

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI



UTN \* SANTA FE

# VIII CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# III CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA FERROVIARIA

13 AL 15 DE SEPTIEMBRE DE 2023

Facultad Regional Santa Fe

 UNIVERSIDAD  
TECNOLÓGICA  
NACIONAL

 AJEA  
Actas de Jornadas y Eventos  
Académicos de UTN



Facultad Regional Santa Fe -UTN

VIII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica : III Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria : actas / compilación de Sebastián L. Russillo ; editado por Giuliani, Andrés; Leurino, Rodrigo C.; Marelli, Victor H. J y Russillo, Sebastian L. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Universidad Tecnológica Nacional, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-42-0234-9

1. Ingeniería. 2. Mecánica. 3. Transporte Ferroviario. I. Russillo, Sebastián L., comp. II. Giuliani, Andrés, ed. III. Título.

CDD 625.10071

ISBN 978-950-42-0234-9



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN) no percibe fondos desde los congresos / jornadas, la publicación es gratuita y abierta para eventos realizados u organizados en unidades académicas de la UTN



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.



VIII Congreso Argentina de Ingeniería Mecánica  
III Congreso Argentina de Ingeniería Ferroviaria

**13, 14 Y 15 DE SEPTIEMBRE DE 2023**

Facultad Regional Santa Fe (UTN)  
Foro Docente del Área Mecánica de las Ingenierías (Fo.D.A.M.I.)

## Indice General

Prólogo .....	Pág.I
Sede del Congreso .....	Pág.II
Objetivos del Congreso .....	Pág.III
Áreas Temáticas.....	Pág.III
Autoridades, Comités, Coordinadores .....	Pág.IV
Evaluadores .....	Pág.VI
Conferencias Plenarias y Charlas Invitadas .....	Pág.VII
Trabajos Destacados.....	Pág.IX
Declaraciones de interés .....	Pág.X
Certificaciones.....	Pág.XI
Agradecimientos .....	Pág.XI
Auspiciantes y Acompañantes .....	Pág.XII
Índice de Trabajos .....	Pág.XIII



## Prólogo

La co-organización y realización del VIII CAIM y III CAIFE entre el FoDAMI, y la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional significó un hecho de suma importancia. Una vez más, el Octavo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica y Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria (VIII CAIM / III CAIFE) brindó un espacio de encuentro y un escenario propicio donde presentar y difundir los aspectos innovadores y experiencias exitosas de la ciencia, con el propósito la transferencia y vinculación al ámbito industrial, convalidando así también un valioso aporte a la educación superior, en la senda de la mejora continua de los egresados en las carreras de Ingeniería Mecánica y afines.

Contemplamos desde el Fo.D.A.M.I. un camino, que abarca quince años desde el CAIM inicial de 2008, enriquecido por el acompañamiento de distintas Instituciones Universitarias. En esta ocasión, destacamos la co-organización con la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional, que con una muy atinada planificación del desarrollo de todas las actividades del congreso a través de sus autoridades, docentes, investigadores, alumnos y no docentes en general y del Departamento de Ingeniería Mecánica en particular, habiendo logrado validar la fructífera experiencia de compartir saberes y conocimientos que los sitúa como referentes reconocidos en estos eventos, avalados por la calidad y actualización de trabajos presentados y por el acompañamiento de un amplio espectro de los distintos actores de nuestro país y del exterior.

Como característica particular de esta edición, podemos destacar el hecho de que el desarrollo de este Congreso y todas sus actividades, se llevaron a cabo en forma híbrida, es decir, simultáneamente de manera presencial y virtual, lo cual facilitó un mayor grado de participación tanto de los expositores de trabajos como de los asistentes en general.

Tanto el conocimiento como la educación son las herramientas fundamentales para lograr los cambios permanentes que se requieren. Compartir estas herramientas de manera altruista, en consonancia con las necesidades de nuestro país, pueden constituir el plan estratégico de continuidad de estos espacios, que tienen razón de ser gracias a la participación activa de sus protagonistas, participantes, asistentes, auspiciantes, sponsors, y por el traslado de los nuevos saberes a la educación superior. De esta reciprocidad, nos nutrimos y contribuimos para mejorar la formación de los graduados en las disciplinas de la Ingeniería Mecánica y carreras afines.

Por ello, nos complace manifestar nuestra gratitud por vuestro estimado acompañamiento y confiamos que hayan disfrutado del Congreso, y generado expectativas positivas, con vistas a seguir encontrándonos, en la nueva edición programada para el año 2025.

Comisión Organizadora  
VIII CAIM – III CAIFE

## Sede del Congreso

La ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, capital de la provincia homónima, se encuentra en un marco natural imponente del Litoral argentino. En cercanías a la ciudad se despliega toda la belleza del ecosistema del Paraná Medio; ríos, lagunas y un vasto sistema de islas que se integran al ejido urbano.

Desde su fundación, en 1573, Santa Fe ha sido la ciudad donde la cultura y la historia se conjugan. En 1853 se sancionó la Constitución Nacional; y es esta ciudad donde vuelven a reunirse las convenciones reformadoras de 1860, 1866, 1957 y 1994. Estos grandes acontecimientos históricos dejaron huellas que marcaron su reconocimiento como la “Ciudad de las Convenciones”. Dada su ubicación (por estar entre otras cosas ubicada estratégicamente en la ruta del Mercosur), infraestructura y servicios turísticos; escala amigable; la presencia de tres universidades nacionales y variados centros de investigación dependientes del CONICET, la ciudad de Santa Fe se destaca por su potencialidad como sede de eventos de diversa índole.

Por otro lado, y atendiendo a uno de los ejes temáticos que refiere este congreso, la ciudad de Santa Fe y región cuenta con una importante historia y antecedentes en el tema ferroviario. Basta con citar, entre otros, los viejos edificios de las estaciones del ferrocarril Belgrano y Mitre, el actual centro cultural “La Redonda”, edificio de forma semicircular de 60 metros de radio que albergaba 40 fosas de reparaciones, como resabio del entonces complejo Santa Fe cambios de la compañía francesa de FFCC de Santa Fe. Asimismo, aún se conservan una gran parte de las instalaciones de talleres pertenecientes en su momento a la vieja estación del Ferrocarril Santa Fe, monumental edificio demolido en 1960 para erigir en su lugar la actual Estación Terminal de Colectivos Gral. Manuel Belgrano.

### **La Facultad Regional Santa Fe de la UTN.**

La Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN FRSF) inicia sus actividades en 1953, integrando el grupo de las cinco facultades fundacionales de la Universidad Tecnológica Nacional. En sus setenta años de vida académica ha establecido fuertes lazos con el sector productivo de la región litoral y toda la comunidad.

La UTN FRSF es un ámbito académico de prestigio en la formación de ingenieros y temas vinculados a las carreras de ingeniería civil, eléctrica, mecánica, industrial y sistemas de información. Dentro del Departamento de Ingeniería Mecánica, se encuentra el Grupo de Ingeniería Mecánica Aplicada – GIMA, que abarca diferentes áreas de investigación y servicio relacionados con motores de combustión interna, energías alternativas en medios de transporte, diseño de piezas, análisis de materiales, simulaciones numéricas, etc., quien en esta oportunidad forma parte de la comisión organizadora de ambos congresos.

A lo largo de su historia, la FRSF ha mantenido un enfoque fuerte en la formación técnica y la vinculación con el entorno productivo y social de la región. Ha establecido convenios y colaboraciones con empresas, organizaciones y organismos gubernamentales, con el objetivo de promover la transferencia de tecnología y la inserción de sus graduados en el ámbito laboral.

La facultad ha sido reconocida por su calidad educativa y su aporte al desarrollo regional. Además de su actividad académica, la FRSF ha llevado a cabo investigaciones en diversas áreas de la ingeniería, participando en proyectos científicos y tecnológicos.

A lo largo de los años, la FRSF ha ido creciendo en infraestructura y recursos, sumando nuevos edificios, laboratorios y equipamiento. Esto ha permitido ampliar su capacidad de formación e investigación, así como también brindar servicios y asesoramiento técnico a la comunidad.

## Objetivos del Congreso

El CAIM y el CAIFE constituyen ámbitos para el intercambio de experiencias y debate de ideas respecto al desarrollo sostenible y a las investigaciones que se están realizando en las temáticas que se abordarán, dando lugar a la difusión de conocimientos con una perspectiva más amplia ante los compromisos del mundo científico y específicamente el universitario con la sociedad.

En particular, los congresos de ingeniería constituyen un marco propicio para que se establezcan contactos entre los diferentes actores de los ámbitos académico, científico, profesional y productivo, así como para el establecimiento de formas de cooperación entre instituciones, entidades, organizaciones y universidades.

### Entre los objetivos más relevantes podemos destacar:

- Intercambiar conocimientos y experiencias entre académicos, investigadores, estudiantes, profesionales y empresarios industriales.
- Divulgar los desarrollos actuales y las tendencias en Ingeniería Mecánica, Ingeniería Ferroviaria y afines.
- Difundir los conocimientos de expertos nacionales y/o internacionales teniendo en cuenta las necesidades de la región y del país.
- Presentar experiencias exitosas o modelos innovadores en materia de enseñanza de las disciplinas afines a la Ingeniería Mecánica e Ingeniería Ferroviaria.
- Divulgar la Industria 4.0.

## Áreas Temáticas

- Enseñanza y Formación Docente
- Industria 4.0 y Transformación Digital
- Mecatrónica y Automatización
- Energía y Medio Ambiente
- Máquinas y Sistemas Térmicos e Hidráulicos
- Materiales
- Simulaciones Numéricas y Mecánica Computacional Aplicada
- Ingeniería de Fabricación y Mantenimiento
- Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas
- Agroindustria
- Innovaciones y Desarrollos Tecnológicos Ferroviarios
- Operación, Seguridad y Normativa Ferroviaria
- Misceláneas

# Autoridades del Congreso

## Co-Presidentes

Esp. Ing. Eduardo Donnet (UTN FRSF)  
Mg. Ing. Alejandro R. Ferreiro (Fo.D.A.M.I.)

## Unidad de Coordinación:

Ing. Andrés Giuliani (UTN FRSF)  
Dr. Jorge Vega (UTN FRSF)  
Esp. Ing. Prof. Alberto Romeo (Fo.D.A.M.I.)  
Mg. Ing. Sandra Robles (Fo.D.A.M.I.)

## Comité Organizador

### Presidente

Ing. Ricardo A. Verón (UTN - FRSF)

### Integrantes

Ing. Andrés Giuliani (UTN FRSF)  
Ing. Víctor Marelli (UTN FRSF)  
Esp. Ing. Rodrigo Leurino (UTN FRSF)  
Mg. Ing. Leonardo Arietti (UTN FRSF)  
Ing. Fabian Nessier (UTN FRSF)  
Lic. Julio Mir (UTN FRSF)  
Dr. Ing. Alejandro Albanesi (UTN FRSF - CIMEC)  
Dr. Ing. Santiago Marquez (UTN FRSF - CIMEC)  
Dr. Ing. Federico Cavalieri (UTN FRSF - CIMEC)  
Ing. Ruben Tonini (UTN FRSF)  
Ing. Sebastián Rusillo (UTN FRSF)  
Ing. Javier Caputo (UTN FRSF)  
Ing. Mariela Bredice (UTN FRSF)  
Ing. Pablo Paolini (UTN FRSF)

## Comité Técnico Científico

### Presidente

Dr. Ing. Rogelio Hecker (UNLPam - CONICET)

### Secretarios

Ing. Daniel Ades (UNR)  
Ing. Rodolfo Duelli (UNRC)

## Coordinadores de Área Temática

### Enseñanza y Formación docente

Ing. Gabriel Dasso (Industrias Berg SA - CABA)  
Ing. Anibal Chicojay Coloma (USAC Guatemala)

### Industria 4.0 y Transformación Digital

Mg. Ing. José Luis Polti (UTN FRBA)  
Dra. Erica Fernandez (UTN-FRSF, UTN FRR)

## **Mecatrónica y Automatización**

Mg. Ing. Eduardo Cirera (UNNE)

Ing. Gerardo Bravo (UNNE)

## **Energía y Medio Ambiente**

Dra. María Isabel Sosa (FoDAMI)

Dr. Ing. Carlos Juárez (UNSE)

## **Máquinas y Sistemas Térmicos e Hidráulicos**

Dr. Ing. Martín Caldera (UNMdP)

Ing. Orlando Audisio (UNCOMA)

## **Materiales**

Mg. Ing. Sandra Robles (UNS)

Ing. Daniela Alessio (UNS)

## **Simulaciones Numéricas y Mecánica Computacional Aplicada**

Mg. Ing. Alejandro Ferreiro (UNSE)

Dr. Alejandro Albanesi (UTN FRSF - CIMEC Conicet)

## **Ingeniería de Fabricación y Mantenimiento**

Ing. Javier Antezana López (UTN FRD)

Ing. Gustavo Flores (UNLPam)

## **Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas**

Esp. Ing. Prof. Alberto Romeo (FoDAMI)

Ing. Antonio Lukjaniec (UM)

## **Agroindustria**

Esp. Ing. Rodrigo Leurino (UTN FRSF)

Mg. Ing. Leonardo Arietti (UTN FRSF)

## **Innovaciones y Desarrollos Tecnológicos Ferroviarios**

Ing. Eduardo Álvarez (UBA)

Ing. Jorge Petroni (UTN FRBA)

## **Operación, Seguridad y Normativa Ferroviaria**

Ing. Miguel Ángel Galache (UNLP)

Ing. Pablo Martorelli (Instituto Arg. de FFCC - UTN FRBA)

## **Misceláneas**

Ing. Leonardo Plaun (UTN FRBA)

Dra. Elena Forlerer (UTN FRBA - CNEA)

## **Comité Editor Local Integrantes**

Ing. Andrés Giuliani (UTN FRSF)

Esp. Ing. Rodrigo Leurino (UTN FRSF)

Ing. Victor H. J. Marelli (UTN FRSF)

Esp. Ing. Sebastián Russillo (UTN FRSF)

# Evaluadores de los trabajos presentados

Jorge Eduardo Abet (UTN FRC / FoDAMI)	Ezequiel José López (UNCo FI)
Daniel Alberto Ades (FoDAMI / UNR)	Laura Lopresti (UNLP FI)
Rodrigo Mariano Agosta (UTN FRSF)	Myriam Ethel Ludueña (UNSE)
Diego Alarcón (UTN FRSF)	Félix Maciel (CNEA)
Alejandro Eduardo Albanesi (UTN FRSF / CIMEC)	Graciela Analía Mansilla (UTN FRSN)
Marcelo Patricio Alcoba (UNRC FI)	Ariel Marchegiani (UNCo FI)
Daniela Alessio (UNS / FoDAMI)	Mauro Sebastián Martín (ACINDAR)
Eduardo Álvarez (UBA / FoDAMI)	Pablo Ernesto Antonio Martina (UNNE FI)
Juan Carlos Álvarez Hostos (CONICET / CITE)	Daniel Osvaldo Martínez Krahrmer (UNAHUR / INTI)
Gisela Marina Alvarez y Alvarez (UNNE FI)	Pablo Martorelli (UTN FRBA / IAF)
Marcos Elías Amado (UNLP FI)	Alejandro Emmanuel Masante (UNLPam FI / CONICET)
Ricardo Mario Amé (UNLZ FI / FoDAMI)	Federico Rafael Masch (UNLPam FI)
Leonardo Fabián Arietti (UTN FRSF)	Javier Oscar Masetro (UTN FRRO / FoDAMI)
Sergio Martín Arocas (UNLP FI)	Mónica Mattar (UNSE)
Vanesa Bangert (UTN FRSF)	Gabriel Eugenio Miguel (UNSE)
Martín Sebastián Baudino (UNLPam FI)	Claudia Minnaard (UNLZ FI)
Silvina Belmonte (INENCO - UNSa)	Sabrina Inés Montaña (CONICET)
Marcos Bergant (UNCUYO / CNEA)	Edson Gastón Montaña Bautista (UNIVALLE)
Graciela Bertolino (IB CONEA)	Rodolfo Eduardo Neira (UTN FRSCFO)
Adrián Bruna (ITA - FCEyT – UNSE)	Norberto Marcelo Nigro (CONICET)
Carlos Cadena (INENCO - UNSa)	Matías Waldino Orue (UTN FRSF)
Marta Caligaris (UTN FRSN)	Fernando Palmieri (UTN FRSN / FoDAMI)
María Laura Caliusco (UTN FRSF)	Gerardo Rubén Pender (UTN FRBB)
Damian Campos (UNCo FI)	Jorge Petroni (UTN FRBA / FoDAMI)
Eva Silvana Casco (UTN FRSF)	Camila Macarena Picco (UNL FIQ)
Federico José Cavalieri (UTN FRSF / CIMEC)	Renzo Piccoli (UTN FRSF)
Gustavo José Cazzola (UTN FRGP)	Marcelo Tulio Piován (UTN FRBB / CONICET)
Ezequiel Ceccarelli (UTN FRRO)	Leonardo Plaun (UTN FRBA FoDAMI)

Miguel Gustavo Coussirat (UTN FRM)	Mauro Eduardo Puccinelli (UNS)
Mario Eduardo De Bortoli (UNNE FI)	Gustavo Revel (IIIE CONICET)
Rodrigo Enzo de Prada (UNRC FI)	Sandra Isabel Robles (FODAMI / UNS)
Pablo Roberto Dellicompagni (INENCO – UNSa)	Georgina Rodriguez (UTN FRSN)
María Cecilia Demarchi (CONICET /UTN FRSF)	Alberto Romeo (FODAMI)
José Di Paolo (UTN FRSF)	Alejandra Rosolio (FCEIA UNR)
Felipe Víctor Díaz (UTN FRRA / CONICET)	Manuel Ángel Sánchez (UNSJ)
Rodolfo Miguel Duelli (FoDAMI / UNRC)	Emmanuel Sangoi (UTN FRSF)
Gonzalo Duran (INENCO – UNSa)	Diógenes Sartorio Aquino (FIUNA)
Alejandro Remigio Ferreiro (FoDAMI / UNSE)	María Isabel Sosa (FODAMI)
Elena Forlerer (UTN FRBA / CNEA)	Rafael Antonio Suarez Baldo (UNS)
Oscar Fortin (UM)	Carlos Tais (UTN FRVM / FoDAMI)
Laura Leonor Fuertes (UNLP FI)	Vicente Emilio Tamburini (UNLZ FI)
Eduardo Alberto Gago (UTN FRRO)	Marcela Terribile (UNSE)
Miguel Ángel Galache (UNLP FI)	Fernando Florentín Tilca (UNSa)
Alejandro José Giudici (UNC / FoDAMI)	José Luis Torres (UTN FRSF)
Anibal Oscar Gomez Khairallah (ITA - FCEyT - UNSE / FoDAMI)	Adrián Matías Urrestarazu (UNS)
María de los Ángeles Gómez López (FACET – UNT)	Juan Valle Sosa (UNCo FI)
Fabián Gon (UTN FRSF)	Mariana Valor (UTN / FoDAMI)
Gustavo Jaime González (UTN FRC / FoDAMI)	Pablo Gerardo Varela (UNRC)
Luis Ricardo González (UNSE FCET)	Luis Vera (UNNE FI / FoDAMI)
Arnaldo Rubén González (UFRGS)	Diego Alberto Vicente (UNLPam)
Agustín Gualco (UNLZ FI)	Julio Villalobos (UTN FRRO)
Mario Andrés Guzmán Villaseñor (UFRO FIC)	Fernando Javier Villegas (UNLPam / CONICET)
Rogelio Hecker (FoDAMI / UNLPam /CONICET)	Nahuel José Volpe (CIMEC- CONICET)
Carlos Ramón Juárez (UNSE / FoDAMI)	Adrián Wittwer (UNNE FI / FoDAMI)
Axel Eduardo Larretguy (UADE)	Mónica Zalazar (UNCo FI)
Lorena Laugero (UTN FRSN)	Daniel Alberto Zambrano (UNGS / FoDAMI)
Jorge Nelson Leguizamón Carate (UNSE)	Sebastián Zappa (UNLZ FI)
Rodrigo Cesar Leurino Esborraz (UTN FRSF)	Daniel Oscar Ziegler (UNS / FoDAMI)

# Conferencias Plenarias y Charlas Invitadas

## **TEMA: "El rol de la UTN en la Sostenibilidad de las cadenas de valor".**

**Ing. Andrés Emiliano Agosti.** Doctorando en Ingeniería Industrial, en temas de Economía y Energía (UTN), Magister en Ingeniería Ambiental (UTN), e Ingeniero Industrial (UTN). Docente de grado y posgrado en la UTN. Coordinador del posgrado de Energías Renovables de la UTN.

## **TEMA: "La relevancia de la Academia en el alcance del desarrollo sostenible: Gobernanza, Formación y Localización".**

**Esp. Lic. Andrea Mejeras.** Licenciada en Enseñanza de la Física (UNSM). Especialista en Docencia Universitaria, Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Diplomada Latinoamericana en Desarrollo Sostenible en las Organizaciones, Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Directora del GICEI (Grupo de Investigación y Capacitación en Enseñanza de la Ingeniería). UTN – FRGP.

**Esp. Ing. María Dolores Gómez.** Ingeniera Agrónoma, Universidad de Morón (UM). Contadora Pública Nacional, Universidad de Morón (UM). Especialista en Ingeniería Gerencial, Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Posgrado en Control de Gestión, Universidad Argentina de la Empresa (UADE). Diplomada en Gobierno 4.0, Transformación Digital y Gov. Tech – (IAE – Universidad Austral). Diplomada Latinoamericana en Desarrollo Sostenible en las Organizaciones, Universidad Tecnológica Nacional (UTN).

## **TEMA: "Perfil del Ingeniero Ferroviario y su vínculo con la industria".**

**Ing. Gonzalo Estella.** Especialista en Ingeniería Ferroviaria. Trenes Argentinos Infraestructura. Líder de Proyecto. Coordinación de proyectos de Infraestructura y Electrificación dentro del programa integral de repotenciación eléctrica del FC Sarmiento, Mitre y Urquiza.

## **TEMA: "Proyectos de Investigación: Lubricación Sólida, Detección de fallas por corrientes parásitas, Estudios aerodinámicos en viaductos, Levitación Magnética".**

**Dr. Maximiliano Zanin.** Ingeniero Mecánico, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo. Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. Docente/Investigador en asignaturas vinculadas al área de la Ciencia de los materiales. Investigador y Proyectista en el Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa – CITEDEF.

## **TEMA: "Alstom Argentina y los principales proyectos que lleva adelante".**

**Ing. Mecánico Guillermo Touceda.** Ingeniero Mecánico Universidad Nacional de La Plata. Ingeniero Electromecánico Universidad Nacional de La Plata. ALSTOM Argentina S.A Gerente de Ingeniería - Sector Señalamiento Bs As.

## **TEMA: "Industry 4.0: Present and Future".**

**Dra. Erica Soledad Fernández.** Doctora en Ingeniería mención Sistemas de Información e Ingeniera Industrial, UTN, FRSF. Investigadora, Profesora y Directora de Proyectos en UTN FRRa y FRFSF. Coordinadora de la Maestría Nacional y Binacional (con Alemania) en Informática Industrial Mención Sistemas Físicos - Cibernéticos Industriales.

**Dra. María Luciana Roldán.** Profesor asociado del Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información en la UTN FRFSF. Investigadora de CONICET, Instituto de Desarrollo y Diseño (CONICET/UTN). Directora de la Maestría Binacional en Informática Industrial, mención Sistemas Físico-Cibernéticos Industriales.

**Mg. Ing. Martín Alejandro Bär.** Engineering degree in Mechanical Engineer from the National Technological University of Santa Fe, Argentina, Master in Industrial-Informatics from the University of Applied Sciences Emden/Leer.

### **TEMA: "Visión Internacional de la Maquinaria Agrícola. Innovaciones".**

**Ing. Mecánico Luis Enrique Duranti.** Ingeniero Mecánico de la Escuela de Ingeniería mecánica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario. Docente en la Diplomatura en Industria y Tecnología de la Maquinaria Agrícola (Fundación Nazareno Crucianelli / UNRaf Universidad Nacional de Rafaela).

**Ing. Mecánico Angel Maximiliano Pellegrini.** Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto. Leaf Agrotech S.R.L. - Armstrong, Santa Fe. - Ingeniero en I+D. Diseño CAD, Cálculos FEM, Planimetría y Documentación Técnica, Seguimiento y control de Prototipos, Testing a campo.

### **TEMA: "HIIG Herramienta de Inspección Interna de Gasoductos"**

**Dr. Alberto Cardona.** Investigador Superior de CONICET y Profesor Titular de la Universidad Nacional del Litoral, en el CIMEC. Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Rosario y Doctor en Ciencias Aplicadas, Universidad de Liège, Bélgica. Director del CIMEC-CONICET.

## Trabajos Destacados

### Enseñanza y Formación docente

***"Superando la inercia psicológica en el marco de la innovación sistemática de TRIZ: una experiencia de aprendizaje basado en competencias en la formación del ingeniero".***

Carlos Eduardo REQUENA.

### Mecatrónica y Automatización

***"Control por modos deslizantes con compensación de la histéresis de un sistema para posicionamiento de ultra precisión".***

Alejandro MASANTE, Rogelio HECKER, Miguel PEÑA, Marcelo FLORES.

### Materiales

***"Modelado de la recristalización dinámica en una aleación de ZN-CU-TI laminada".***

Análía ROATTA, Martín LEONARD, Emanuel NICOLETTI, Fernando SCHLOSSER, Javier SIGNORELLI.

### Simulación Numéricas y Mecánica Computacional Aplicada

***"Análisis vibratorio de vigas fisuradas: Teoría de Timoshenko con truncamiento".***

Maria De ROSA, María LIPPIELLO, Carla CERALDI, Héctor MARTIN, Antonella ONORATO, Marcelo PIOVAN.

## Ingeniería de Fabricación y Mantenimiento

***“Influencia del afilado de la broca sobre los esfuerzos de mecanizado en distintos metales”.***

Daniel MARTINEZ KRAHMER, Alejandro SIMNCELLI, Daniela PEREZ, Germán ABATE, Alberto PEREYRA, Pablo GAYOL.

## Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas

***“Criterios para optimizar el diseño de árboles de máquinas”.***

Sandra ROBLES, Alberto ROMEO, Javier MASETRO.

## Misceláneas

***“Simulación estructural para materiales elásticos lineales y no lineales, de una prótesis valvular aórtica en situaciones no basales”.***

José Di PAOLO, Exequiel FRIES, Brenda WEISS, Marcelo BERLI.

## Declaraciones de Interés

- Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional. Res. CD N° 621/22.
- Rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional. Res. CS N° 111/23.
- Cámara de diputadas y diputados de la Provincia de Santa Fe.
- Ente Autárquico Municipal de Turismo. Municipalidad de Santa Fe. Res. N° 03/2023.
- Honorable Concejo Deliberante de la ciudad de Santa Fe.
- Senado de la Nación. Proyecto de declaración de interés. Res. S-376/2023.

## Certificaciones

La organización y armado del congreso contó con la certificación como “Evento Sostenible” por parte del Programa de UTN Sustentable. El mismo representa un programa y plan de acción de la Universidad Tecnológica Nacional, que promueve el concepto de Sustentabilidad en las diversas prácticas institucionales, de gestión, docencia y formación en la Universidad y en la convivencia de la comunidad universitaria.

De acuerdo con los lineamientos cumplidos y en base a la evaluación realizada, se logró alcanzar el Nivel 3 de Eventos Sostenibles (categoría máxima). Se muestra a continuación copia del certificado correspondiente.



## Agradecimientos

Los editores agradecen la colaboración de la Asociación Argentina de Mecánica Computacional (AMCA) y del Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC), que han facilitado el acceso al servidor de OCS (Open Conference System).

## Auspiciantes Y Acompañantes

Auspiciaron



Colegio de Ingenieros  
Especialistas de la  
Provincia de Santa Fe  
Distrib. I - Ley 11.291



Ministerio de  
Turismo y Deportes  
Argentina

## Acompañaron



## Trabajos presentados

La confección de los trabajos que han sido incorporados en estas actas, es de absoluta responsabilidad de los correspondientes autores, los cuales fueron informados oportunamente del formato sugerido.

# Índice de Trabajos

## Enseñanza y Formación Docente

LA TERMODINÁMICA EN LAS CARRERAS DE INGENIERÍA COMO INICIO A LAS ENERGÍAS RENOVABLES. Jorge A. Adaro, María N. Ziletti, Héctor F. Romero, Alberto S. Esquenazi. ....	Pág.33
TALLER DE CFD COMO ASIGNATURA PARA ESTUDIANTES AVANZADOS DE INGENIERÍA MECÁNICA. César I. Pairetti, Nicolás Trivisonno, Darío Godino, César M. Venier. ....	Pág.43
MODELADO E IMPRESIÓN 3D DE MECANISMO DE CRUZ DE MALTA COMO PRACTICA DE EXTENSION. Laura Lopresti, Lucas Speroni, Sergio Gavino, Laura Fuentes y Gabriel Defranco. ....	Pág.55
EVALUACIONES A LIBRO ABIERTO MEDIANTE LA PLATAFORMA MOODLE Y LA MODELIZACIÓN: EL CASO DE LAS CÁTEDRAS CÁLCULO AVANZADO Y ANÁLISIS MATEMÁTICO II EN LA UTN – FRBB. Carlos Alberto Vera, Franco Ezequiel Dotti, Nicolás Virla, María Leticia Solano. ....	Pág.64
DESARROLLO E INSTRUMENTACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS TERMOMECAÑICOS PARA LA GENERACIÓN DE COMPETENCIAS EN EL ALUMNO DE INGENIERÍA. Sebastián L. Russillo, Matías W. Orué, Rodrigo M. Agosta, Andrés Giuliani, Justina M. Chavez y Víctor H.J. Marelli. ....	Pág.76
DE LAS ACTIVIDADES RESERVADAS AL AULA EN INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD REGIONAL SAN NICOLÁS. Fernando Palmieri, Néstor Reina, Lucía Sacco y Daniel Sosa. ....	Pág.87
LA MECÁNICA COMPUTACIONAL EN LOS CURSOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS: EMPLEANDO CFD PARA ACTIVIDADES PRÁCTICAS EN MODALIDAD TALLER. César I. Pairetti, Guillermo L. Rodríguez. ....	Pág.99
PORTAFOLIO DE EVIDENCIAS COMO INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE: UNA ALTERNATIVA EN MOODLE. Miriam E. Ríos, Gustavo J. López, Sebastián I. Scaglione, Laura A. López, Lurdes A. López y Eve L. Coronel. ....	Pág.111
SISTEMA INTEGRADO DE EVALUACIÓN CONTINUA. Miriam E. Ríos, Gustavo J. López, Sebastián I. Scaglione, Eve L. Coronel, y Laura A. López. ....	Pág.123
EJERCICIOS INTEGRADORES EN RESISTENCIA DE MATERIALES. María Laura Godoy, David Eliel Diaz Maimone. ....	Pág.135
LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS. Marta Caligaris, Georgina Rodríguez y Lorena Laugero. ....	Pág.147
ANÁLISIS DEL APRENDIZAJE EN FORMACIÓN POR COMPETENCIAS DE LOS ESTUDIANTES DE LA FI-UNLZ A TRAVÉS DE UN PROYECTO INTEGRADOR POR MEDIO DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO VEHICULAR TIPO "FÓRMULA SAE". Etapa I. George Faks, Sergio Luna, Marcelo Bertoglio, Leandro Rodríguez, Cecilia Deanes. ....	Pág.159
LA NOCIÓN DE PERFIL CONCEPTUAL COMO INSTRUMENTO PARA EVALUAR COMPETENCIAS EN EL CICLO BÁSICO DE INGENIERÍAS. Claudio Enrique. ....	Pág.169
GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO PARA EL LABORATORIO DE MEDIDAS Y ENSAYOS ELÉCTRICOS DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA FACULTAD REGIONAL SANTA FE, 2021-2013. Lara Zingaretti, Pablo Marelli, Melina Scoppa, Diego López, Pablo Macor. ....	Pág.180

COEVALUACIÓN: UNA EXPERIENCIA EN ANÁLISIS NUMÉRICO. Marta Caligaris, Georgina Rodríguez, Lorena Laugero y Gabriel Bertero. ....	Pág.192
TRABAJO DE LABORATORIO PARA POTENCIAR LAS COMPETENCIAS EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA MECÁNICA. Olga Scagnetti, Sandra Ramirez, Eva Casco, M. Elvira Rodriguez. ....	Pág.201
EXPERIENCIAS INTERACTIVAS PARA LA FORMACION POR COMPETENCIAS EN FISICA II DE INGENIERIA MECANICA. Sergio A. Miglioli. ....	Pág.213
LA FORMACIÓN DE INGENIEROS EN EL CONTEXTO DE LA CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL. María Luisa Jover, Sergio Manterola, María Celia Gayoso. ....	Pág.225
DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA ORIENTADA AL CONOCIMIENTO DE PROBLEMAS AMBIENTALES DE LA REGIÓN Y DESARROLLO SOSTENIBLE EN ALUMNOS DE INGENIERÍA MECÁNICA. Vanina Mazzieri, Mauren Fuentes Mora, Maximiliano Schiappa Pietra, Carlos Córdoba y María Amparo Sánchez. ....	Pág.235
EL PERFIL DEL INGENIERO MECÁNICO EN TÉRMINOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE: LOS DOCENTES COMO FORMADORES A FORMAR. Esp. Lic. Andrea Mejeras, Dr. Ing. Gustavo Cazzola , Esp. Ing. María Dolores Gómez. ....	Pág.243
SUPERANDO LA INERCIA PSICOLÓGICA EN EL MARCO DE LA INNOVACIÓN SISTEMÁTICA DE TRIZ: UNA EXPERIENCIA DE APRENDIZAJE BASADO COMPETENCIAS EN LA FORMACIÓN DEL INGENIERO. Ing. Juan Carlos Nishiyama, Lic. Carlos Eduardo Requena, Ing. Ricardo Marino e Ing. Luciano Arbore. ....	Pág.255
CRITERIOS DE DISEÑO DE PLAN DE ESTUDIOS DE TRANSICION DE LA CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA. Sandra Robles, Alberto Romeo. ....	Pág.268
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE PIEZAS MECÁNICAS.CORTES PARCIALES. Gerardo M. Arias, Sandra N. Fernández, Florencia Salaberría, Vanesa S. Dailoff, Silvana E. Gutiérrez. ....	Pág.278
QUÍMICA: ASUMIENDO DESAFÍOS PARA SU APRENDIZAJE EN UN CURSO DE INGENIERÍA MECÁNICA. Marcelo Alcoba, Martín Broglia y Javier Toledo Arana. ....	Pág.287
DESARROLLO DE CAPACIDADES EN EL ÁMBITO AEROSPACIAL: MODELADO, CONTROL DE ACTITUD Y SIMULACIÓN DE UN SATÉLITE TIPO CUBESAT. Pedro Benjamin Gelid, Lucas Damián Fraga y Tomás Carmelo Jiménez. ....	Pág.299
DESARROLLO DE COMPETENCIAS EN EL PROCESO ENSEÑANZA APRENDIZAJE DE MATEMÁTICA EN INGENIERÍA MECÁNICA. Eduardo Gago, Caren Brstilo, Vanina Amaya y Carolina Pozzebon. ....	Pág.311
LA ENSEÑANZA DE MATEMÁTICA AVANZADA MEDIANTE ACTIVIDADES MULTIDISCIPLINARIAS Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES. Eduardo Gago, Marcelo Zurbriggen y Matías Romero. ....	Pág.323
LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE, DURANTE Y POST PANDEMIA. Rodolfo Neira, Rodolfo Neira (H). ....	Pág.335

## Industria 4.0 y Transformación Digital

DIGITALIZACIÓN DE UN TANQUE DE TRANSPORTE DE LECHE CRUDA COMO HERRAMIENTA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN UNA EMPRESA LÁCTEA. María Luciana Roldán, Pedro Querini, José Luis Torres, Martín Bär, Walter Colombo. ....	Pág.348
TRANSFORMACIÓN DIGITAL DE SERVICIOS DE INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN COMERCIAL. Rodrigo Agosta, Fabián Gon, Matías Orué. ....	Pág.360
LABORATORIO AUTOCONTENIDO DE HIDROPONÍA 4.0. Agustín Mattei, Matías Orué y María Laura Caliusco. ....	Pág.370
DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA LA OBTENCIÓN DE METRICAS EN FIBRAS TEXTILES: ANÁLISIS ECONÓMICO. Abet Jorge, Arcidiácono Marcelo, Carrizo Blanca y Sofía Enamorado. ....	Pág.381
MONITOREO REMOTO DE CONDICIÓN DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS PARTE II: ARQUITECTURA MODULAR PARA INTEGRACIÓN DE MÚLTIPLES SENSORES. Martín Baudino, Pablo Garrone, Diego Vicente y Lucas Leguizamón. ....	Pág.389
MONITOREO REMOTO DE CONDICIÓN DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS PARTE I: SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA EN COJINETES DE BIELA. Pablo Garrone, Martín Baudino, Lucas Leguizamón, Diego Vicente. ....	Pág.399
INGENIERÍA, CULTURA DIGITAL y COBOTS. Damian Rafael Ortega, Jorge Camblong, Miguel Benegas. ....	Pág.407
NUEVOS RETOS QUE DEBEN AFRONTAR LOS INGENIEROS ELECTROMECAÑICOS CON ORIENTACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SARMIENTO EN EL CONTEXTO DE LA CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL. Gonzalo Delcauce, Miguel Benegas, Jorge Camblong. ....	Pág.419
FORMALIZACIÓN DEL LENGUAJE GRÁFICO SEQUENTIAL FUNCTION CHART PARA DEFINIR UN SUBMODELO DE ASSET ADMINISTRATION SHELL EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS. Johnny Alvarado, Marcela Vegetti, Silvio Gonnet. ....	Pág.432

## Mecatrónica y Automatización

CONTROL POR MODOS DESLIZANTES CON COMPENSACIÓN DE LA HISTÉRESIS DE UN SISTEMA PARA POSICIONAMIENTOS DE ULTRA PRECISIÓN. Alejandro Masante, Rogelio Hecker, Miguel Peña y Marcelo Flores. ....	Pág.446
RECONDICIONAMIENTO DE UN EQUIPO DE ENSAYOS DE MATERIALES. Maximiliano Paiva, Miguel Céspedes, Juan Ríos, Eduardo Asta, Juan Balderrama y Francisco Cambiasso. ....	Pág.458
DISEÑO DE UNA PLATAFORMA MECÁNICA MODULAR PARA ROBOTS MÓVILES CON SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN INTERCAMBIABLES. Ignacio Aberasturi, Juan Tomás Beltrán, Bruno Furlan, Pablo Gallucci, Guillermo Rolle, Matías Nacusse. ....	Pág.470
DESARROLLO DE UNA LEY DE CONTROL PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE UN DISPOSITIVO ROBÓTICO INDUSTRIAL. Alejandro Armando Hossian, Roberto Carabajal, Emanuel Maximiliano Alveal y Francisco Barboza. ....	Pág.482

IMPACTO DE SIMPLIFICACIONES DE MODELADO EN LA PREDICCIÓN DEL DESEMPEÑO DE POSICIONADORES NANOMÉTRICOS. Gustavo M. Flores, Lucas I. Lamas, Alejandro Masante, Juan E. Isasti, Rogelio L. Hecker. P .....	Pág.495
MODELADO DE ESLABÓN FLEXIBLE ESBELTO CON ACTUACIÓN PIEZOELÉCTRICA. Fernando J. Villegas, Marcelo T. Piovan y Rogelio L. Hecker. ....	Pág.506
SISTEMAS MECATRÓNICOS PARA INTERFACES TÁCTILES BRAILLE: REVISIÓN Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO. Martín Pucheta, Matías Bertorello, David Gaydou, Fredy Restrepo Blandón, Alejandro Gallardo, Rodrigo González, Tomás Sosa y Facundo Olmedo. ....	Pág.518
DESARROLLO DE UN GENERADOR DE VIBRACIONES MECÁNICAS A PARTIR DE UN PARLANTE DE AUDIO. Renzo Garcia, Federico Masch, Rogelio Hecker y Ernesto Berges. ....	Pág.528
ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DEL EFECTOR FINAL DE UN ROBOT PARA APLICACION EN SOLDADURA. Héctor Molina, Manuel Galdeano, Pedro Bocca, German Barraza, Rodolfo Godoy, Alberto Sanchez. ....	Pág.538

## Energía y Medio Ambiente

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA EMPLEANDO GASES DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA Y AGUA.UN ANÁLISIS EXPERIMENTAL. Stiven Sofan Germán, Jorge Mendoza Fandiño, Miguel Doria Oviedo, Jesús Rhenals Julio.....	Pág.549
ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL DESEMPEÑO ENERGÉTICO, OPERACIONAL Y ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS COMERCIALES DE ABSORCIÓN Y DE COMPRESIÓN MECÁNICA PARA DISTRITOS DE ENFRIAMIENTO. Jorge Mendoza, Miguel Doria2 , Stiven Sofan, Jesús Rhenals, Álvaro Osorio, Duván González. ....	Pág.560
APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE TASA DE RETORNO ENERGÉTICO Y DE EXERGÍA EXTENDIDA A LA PRODUCCIÓN DE SHALE GAS EN LA CUENCA NEUQUINA. Patricio Collazo. ....	Pág.571
LA RADIACIÓN SOLAR EN VILLA MERCEDES – SAN LUIS A PARTIR DE LA TEMPERATURA. Jorge A. Adaro, Jorge N. Díaz. ....	Pág.583
ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA SISTEMAS MICRO-EÓLICOS A PARTIR DE INFORMACIÓN DE VELOCIDADES DE VIENTO REGISTRADAS POR ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE USO AGRÍCOLA. Andres Crespo, Leonardo Sanchez, Gabriel Campetelli y Claudio Reineri. ....	Pág.591
INCORPORACIÓN DE GENERACIÓN ELÉCTRICA RENOVABLE EN LA FORMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA DE UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. Sergio M. Arocas, Geraldine D. Coria Hoffmann, Ivan Calla. ....	Pág.603
CONFECCIÓN DE LA LÍNEA DE BASE ENERGÉTICA DE UN EDIFICIO UNIVERSITARIO EN EL MARCO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA. Sergio M. Arocas, Geraldine D. Coria Hoffmann y Mauro I. Jaciuk. ....	Pág.615
DISEÑO DE UN SISTEMA ECONOMICO DE SENSORES DE GASES DE ESCAPE PARA BANCO DE MOTORES. Luis E. Fauroux, Agustín J. Lohigorry, Omar J. Degaetani, Marisa A. Morais, Carla A. del Puerto y César F. Piñero. ....	Pág.627
HIDRÓGENO EN TRENES, UNA OPCIÓN VERDE FRENTE AL DIÉSEL. Jorge E, Eterovic, Gabriel E. Blanco, Federico J. Alterini, Pablo H. Sobral, Gabriel E. Pisera, Luis E. Fauroux. ....	Pág.636

PERSPECTIVAS DE LA ELECTRIFICACIÓN VEHICULAR EN ARGENTINA. Gustavo Jiménez-Placer, Daniel Zambrano, Amado Vitali, Gonzalo Delcauce, Juan Agotegaray. ....	Pág.648
DESHIDRATADOR SOLAR DE HIERBAS INDIRECTO, CON BANDEJAS GIRATORIAS Y RECIRCULACIÓN DE AIRE. Pablo Galimberti, Alba Lema, María Milanese, Jorge Morsetto, Oriana Arias y Jorge Barral. ....	Pág.660
EVALUACIÓN DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE EL RECURSO EÓLICO EN EL AREA DEL RÍO DE LA PLATA. Pablo G. Provenzano, Luis A. Fernández. ....	Pág.672
SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA RENOVÁVEL EM UMA REGIÃO ISOLADA DO BRASIL, AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS EM ÍNDICES DE EMPREGABILIDADE, IDH E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. Amanda Klein, Tarcísio de O. Klein, Thais G. Xavier, Werik K. S. Rodrigues, Diego M. Y. Maya, Angie L. E. Sarmiento. ....	Pág.684
AGREGADO DE VALOR A RESIDUOS FITOSANITARIOS MEDIANTE PROCESOS TERMO-FISICOS. Mercedes Lozano Rus, María Sol Gutierrez, Norberto Canale, Leonardo Molisani, María Fernanda Gayol y Leisa María Magallanes. ....	Pág.696
ESTUDIO PARA CONTRIBUIR A REDUCIR LA CANTIDAD DE ENERGÍA CONSUMIDA EN SISTEMAS DE TRANSPORTE AUTOMOTOR. Horacio Mirassou, Gustavo Cazzola, Juan Dusau. ....	Pág.707
EL RETROFIT COMO ACELERADOR DE LA TRANSICIÓN HACIA LA ELECTROMOVILIDAD. Javier L. Idzi, Fernando Gutierrez, Marcos E. Amado, José Gialonardo, Maximiliano Ramseyer. ....	Pág.719
EL PROYECTO CAREM, HISTORIA Y FUTURO DEL REACTOR NUCLEAR ÍNTEGRAMENTE ARGENTINO. Oscar J. Ramírez, Marcelo O. Fernández, Marcelo B. Neuman y María F. Ferreyra. ....	Pág.731
MODELADO Y ANÁLISIS DE GENERADORES ELÉCTRICOS BASADOS EN EL APROVECHAMIENTO DE CALORES RESIDUALES CON CICLOS RANKINE ORGÁNICOS. Emmanuel Sangoi; Jorge R. Vega; Luis A. Clementi; Lautaro D. Rossi; Juan Fernandez; Nicolás Pochettino. ....	Pág.743
EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LA PRIMERA CENTRAL ELÉCTRICA DE ENERGÍA POR BIOMASA FORESTAL DE LA PROVINCIA DE CORRIENTES. Luis Horacio Vera, Emilio Sebastián Scozzina Unterholzner, Gonzalo Carbajal. ....	Pág.755
CÁLCULO DEL RETRASO LÍMITE DE ACCIÓN DE COMPUERTA ENTRE DISPOSITIVOS IGBT CONECTADOS EN SERIE Y ANÁLISIS DE UN CIRCUITO DE BALANCE PARA MITIGARLO. Martín Alejandro Torres, Roberto Ricardo Ruiz, Jorge Omar Marighetti, Mario Eduardo De Bórtoli.....	Pág.2073
ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS EN CUENCAS HÍDRICAS DE LA PROVINCIA DE SANTA FE. Ángel Gallo, Marcos Cea, Ulises Manassero, Rodrigo Furlani, Javier Acosta y Ariel Loyarte. ....	Pág.767
APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA DETERMINAR O ATRASO DE IGNIÇÃO EM UM MOTOR DIESEL QUE FUNCIONA A DIESEL / BIODIESEL EM PROPORÇÕES VARIADAS. Márcio Rocha, Lesso Santos, Carlos Cabral, Jefferson Mendonça, Roberto Alécio. ....	Pág.779
CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL: UM ESTUDO PRELIMINAR SOBRE CORRELAÇÕES ENTRE DADOS DE ANÁLISE ELEMENTAR E TEOR DE CELULOSE, HEMICELULOSE E LIGNINA. Stella Borges de Melo, Isabele de Farias Barros, Enio Oliveira de Souza, Diego M. Yepes Maya, Diego Carneiro de Oliveira. ....	Pág.791
MEJORA EN LA HUELLA DE CARBONO MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA GEOTERMICA PARA CONFORT DE AMBIENTES. Julian Torres, Miguel Benegas, Jorge Camblong, Enrique Modai e Ignacio Luis Bisso. ....	Pág.804

ANÁLISIS DE GRANDES TURBINAS EÓLICAS EN UN ENTORNO DE COSIMULACIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA Y MECANISMOS FLEXIBLES. Sabrina Montañó, Alberto Cardona y Juan M. Gimenez. .... Pág.816

CENTRAL ELECTRICA Y SUBESTACIÓN MT/BT CON FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA. Msc. Carlos Labriola, Ing. Daniel Colón, Ing. Mario de la Canal, Ing. Marcelo Ávila, Ing. Benjamín Campigoto, Ing. Rubén Pérez. .... Pág.828

ESTUDIO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE PANELES FOTOVOLTAICOS ANTE LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SU INSTALACIÓN Y DE LAS ESTACIONES DEL AÑO. Mg. Ing. Adrian D'Andrea, Ing. Carlos Pacheco, Matías Maglianesi. .... Pág.840

GENERADORES EÓLICOS DE EJE HORIZONTAL: ESTUDIOS EXPERIMENTALES CON MODELOS A ESCALA REDUCIDA Y SIMULACIONES NUMÉRICAS Lucas José Maidana, Matías Ezequiel López, Marcelo Italo Adotti, Roberto Adrián Wittwer, Jorge Omar Marighetti y Julián Medina. .... Pág.847

ANÁLISIS DE NUEVAS TECNOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE PANELES SOLARES. Alejandro Gorosito, Hernán Solier Zandomeni, Leandro Gioco, Lucas Vicentín, Darío Godino, y Alicia Carbonell. .... Pág.859

USO DE NORMAS PARA DETERMINAR LA CONVENIENCIA DE SISTEMAS PASIVOS O FORZADOS PARA CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA. Jorge Raúl Barral, Javier Hernán Garnica, Juan Martín Lucchini, Sebastián Spasoff Mitcoff. .... Pág.871

MODELACIÓN DEL PATRÓN DE DEMANDA TÉRMICA Y ELÉCTRICA CON RESOLUCIÓN HORARIA Y EN EL TIEMPO DEL DISTRITO DE ENFRIAMIENTO NORTE DE MONTERÍA. Miguel Doria, Stiven Sofan, Jesús Rhenals, Jorge Mendoza, Ernesto Diz, Jorge Mercado. .... Pág.883

MODELADO NUMÉRICO Y ANÁLISIS TÉRMICO DE LA PIRÓLISIS LENTA DE BIOMASA MEDIANTE TERMOGRAVIMETRÍA. Jorge Rhenals, Jorge Mendoza, Jesús Rhenals, Rafael Gómez, Julissa Jiménez, Cristina Cogollo. .... Pág.893

## Máquinas y Sistemas Térmicos e Hidráulicos

ADAPTACIÓN DE TURBINA A GAS KINGTECH K-100 PARA HIDRÓGENO. Nicolás Lipchak, Agustín García, Tomás Gally, Guillermo Valvano, Gisela Parmelo y Milagros Soria. .... Pág.903

COMPARACIÓN DE LOS DISTINTOS MÉTODOS REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO DEL IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRIFUGA PARA LA MODIFICACIÓN DE SUS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO. Ariel Ricardo Marchegiani. .... Pág.915

REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO DEL ROTOR DE BOMBAS CENTRÍFUGAS: ANÁLISIS POR LEYES DE SIMILITUD. Flavia C. Inostroza, Franco L. Pecorari, Ariel R. Marchegiani, Orlando A. Audisio. .... Pág.927

ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DE CALDEIRAS. Anne Karoline Cardoso Macedo; Márcio Andrade Rocha. .... Pág.939

MEDICIÓN DE CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE EN PROTOTIPO DE ÓMNIBUS DIESEL-HIDRÁULICO. Daniel Ades, Mauro Carignano, Guillermo Rodríguez. .... Pág.951

## Materiales

- CORROSIÓN ACELERADA DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 316L PREVIAMENTE SENSIBILIZADO Mariano N. Inés y Graciela A. Mansilla. .... Pág.964
- EFFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO GMAW-B EN JUNTA DISÍMIL DE ACERO-ALUMINIO César Marconi, Carlos Consigli, Cristian Camperos y Hernán Svoboda. .... Pág.975
- ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISCOS DE ARADO María N. Delpupo, Graciela A. Mansilla. .... Pág.987
- EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS COMPUESTOS CEMENTO CARBÓN SOTERRADOS EN LA RESISTIVIDAD DE LA CAPASUPERFICIAL DEL TERRENO. N. Cotella, D. Gallo, S. Antonelli, L. Soler, D. Acevedo, M. Bruno. .... Pág.996
- ESTUDIO METALOGRAFÍCO DE ACEROS Y FUNDICIONES DESTINADO A LA PRODUCCIÓN DE MATERIAL BIBLIOGRÁFICO DE REFERENCIA PARA INDUSTRIAS DEL LITORAL SANTAFESINO. Hugo Mártires, Natalia Veizaga, Ricardo Verón , Rodrigo Leurino y Ezequiel Avellaneda. .... Pág.1008
- DESARROLLO DE MATERIALES BIOBASADOS A PARTIR DE ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO Y SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES DE ARGENTINA. Camila M. Picco, Silvina Regenhardt. .... Pág.1020
- ESTUDIO DE LAS CAUSAS DE ROTURA EN TUBO DE HP MODIFICADO DE UN HORNO REFORMADOR Mauro Puccinelli, César Lanz, Matías Sosa Lissarrague y Daniel Ziegler. .... Pág.1027
- EFFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE SOLDADURA DE PUNTO POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSSW) EN JUNTA DISÍMIL DE ACERO-ALUMINIO César Marconi, Víctor F. Pereira, Alex M.S. Costa y Hernán Svoboda. .... Pág.1039
- ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN ACERO ACERO TRIP Y SU RELACIÓN CON LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL DURANTE ENSAYOS DE COMPRESIÓN Valeria de la Concepción M., Luciano Buglioni, Leonardo Tufaro, Hernán Svoboda. .... Pág.1051
- DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA Y LA RESISTENCIA RESIDUAL EN MATERIALES COMPUESTOS FIBRA-METAL Maximiliano Paiva, Juan Rios, Eduardo Asta, Juan Balderrama y Adrián Cambiasso. .... Pág.1063
- IRAM 11575: AJUSTE Y PUESTA A PUNTO DE UN EQUIPO DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL FUEGO DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS - ENSAYOS PRELIMINARES Pablo Martina, Raquel Aeberhard, Sergio Borchichi, Franco Milich, Gabriel Corvalán y Juan Corace. .... Pág.1075
- TOMOGRAFÍA COMPUTADA DE RAYOS X APLICADA A ESTUDIOS DE POROSIDAD EN FUNDICIONES DE ALUMINIO Martín Felcaro, Felipe Díaz y Matías Peralta. .... Pág.1088
- EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE TRASLACIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTES DE ACERO ESTRUCTURAL OBTENIDOS POR MANUFACTURA ADITIVA POR ARCO ELECTRICO CON ALAMBRE (WAAM) Alejandro O. Miranda, Hernan G. Svoboda. .... Pág.1100
- CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES DE ALEACIONES DE ALUMINIO OBTENIDAS POR MANUFACTURA ADITIVA MEDIANTE FUSIÓN DE CAMA DE POLVO POR LÁSER (L-PBF). Hernán Svoboda, Alejandro Miranda, Adrián Dunky , Guillermo Rubino. .... Pág.1112

CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS TERMOPLÁSTICAS IMPRESAS POR DISTINTAS ESTRATEGIAS EN PROCESO MODELADO POR DEPOSICION FUNDIDA Fabian Claudio Nessier, Rodrigo Lerurino, Nicolas Raviolo , Italo Ruben Tocci. ....	Pág.1122
VIDA A LA FATIGA DE COILED TUBING. INFLUENCIA DE LA TENSIÓN MEDIA Y LA TENSIÓN EN EL CARRETEL Jorge Palavecino, Federico Verdeal, Agustín Suarez, Juan Cruz Rodríguez, Juan Perez Ipiña y Jessica Wainsten. ....	Pág.1134
CABLES DE ACERO: MONITOREO DE SU INTEGRIDAD MEDIANTE LA TECNICA DE EMISION ACUSTICA Pablo G. Varela, Rodrigo E. de Prada, Leandro D. Giorgetti, Martín A. Kunusch Micone, Diego D. Gallo, Ariel H. Manelli . ....	Pág.1144
MONITOREO DEL PROCESO DE TEMPLE DEL ACERO UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE EMISIÓN ACÚSTICA Rodrigo E. de Prada, Pablo G. Varela, Leandro D. Giorgetti, Martín A. Kunusch Micone, Diego D. Gallo .....	Pág.1155
ANÁLISIS DE FALLA DE UN SOBRECIENTADOR DE UNA CALDERA DE CARBÓN Daniela Alessio, Sandra Robles, Mauro Puccinelli, Daniel Ziegler. ....	Pág.1165
ANÁLISIS DE LA CAUSA DE FALLA DE UNA BIELA SOPORTE DE UNA PALA DE CARGA Daniel Ziegler, Sandra Robles, Daniela Alessio, Mauro Puccinelli, Guillermo Berge y Fernando Schlosser. ....	Pág.1175
IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES ELÁSTICAS EN PIEZAS CONSTRUIDAS POR IMPRESIÓN 3D POLIMÉRICA: ENFOQUE A TRAVÉS DE MÉTODOS DINÁMICOS Marcelo Piovan y Pablo Girón. ....	Pág.1183
MODELADO DE LA RECRISTALIZACIÓN DINÁMICA CONTINUA EN UNA ALEACIÓN DE ZN-CU-TI LAMINADA Analía Roatta, Martín Leonard, Emanuel Nicoletti, Fernando Schlosser y Javier Signorelli. ....	Pág.1193
SOLDADURA DE SOLAPE POR FRICCIÓN AGITACIÓN (FSLW) EN UNIONES DISÍMILES AL-CU Y AL-ACERO INOXIDABLE Leonardo N. Tufaro, y Hernán G. Svoboda. ....	Pág.1205
ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS EN LA PRIMERA FALANGE DEL CABALLO, CON MONITOREO DE EMISIÓN ACÚSTICA Pablo Gerardo Varela, Rita Cecilia Fioretti, Rosana Moine, Rodrigo Enzo de Prada, Mario Salvi , Leandro Duilio Giorgetti. ....	Pág.1217
ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO AL CREEP DE ACEROS CON ALTO CONTENIDO DE Ni Gabriel Gonzalez, Gerardo Pender, René Molina, Lilian Moro. ....	Pág.1229
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO AL CREEP DE UN ACERO TERMO-RESISTENTE GR HP Daniela Alessio, Sandra Robles, Lilian Moro y René Molina. ....	Pág.1238
LADRILLOS ECOLÓGICOS PARA LA SUSTENTABILIDAD EN EL NORDESTE ARGENTINO Gabriel Corvalán, Pablo Martina, Raquel Aeberhard y Franco Milich. ....	Pág.1247
CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304 ANTE EL DESGASTE EROSIVO EN CONDICIONES DE MUY BAJO ÁNGULO Y DE BAJA Y MUY BAJA VELOCIDAD José Lucioni, Carlos Tais. ....	Pág.1259
EFFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE AA6061-T6 SOLDADO POR FSW Leonardo N. Tufaro, Maximiliano A. Escoda Avila, Marcos Bergant y Hernán G. Svoboda. ....	Pág.1271

## Simulaciones Numéricas y Mecánica Computacional Aplicada

- DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN PARA CAÑO DN 3" SCH 80 Marcos Amado, Javier Idzi, Fernando Gutiérrez, José Gialonardo y Eduardo Becker Groth. ....Pág.1283
- SIMULADOR DE PROPULSION DE UNA UNIDAD DE SUPERFICIE DE LA ARMADA ARGENTINA Juan Francisco Valea, Pablo Raúl Vernière; Juan Jose Oga , Rubén Roth , Guillermo Escudero. ....Pág.1295
- ANÁLISIS TENSIONAL EN ACCESORIOS TE DE SISTEMAS DE CAÑERÍAS Alejandro J. Giudici, José E. Stuardi, Guillermo D. Chiappero y Francisco Uribarren. ....Pág.1307
- DETERMINACION DE TENSIONES RESIDUALES EN COMPONENTES MECANICOS Leandro Fontanarrosa, Alberto Cardona y Federico José Cavalieri. ....Pág.1319
- ESTUDIO DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DE COLADA EN EL ATRAPE DE POLVO COLADOR EN LA COLADA CONTINUA DE PLANCHONES Javier Sola, Guillermo Diaz y Elena Brandaleze. ....Pág.1331
- ENSAYOS MECÁNICOS EN MATERIALES COMPUESTOS CON CONCENTRACIÓN DE TENSIONES: REVISIÓN DE LA LITERATURA Victor Huaman, Fernando de Azevedo y Victor Gamarra. ....Pág.1343
- "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE TRENES DE ENGRANAJES UTILIZANDO SOFTWARES CAE-CAD" Guillermo R. Facal , José M. di Iorio y Rafael A. Schiazzano. ....Pág.1355
- DESARROLLO DE MODELO DE COMPRESIÓN PARA ACERO TRIP Luciano Buglioni, Valeria de la Concepción M., y Hernán G. Svoboda. ....Pág.1367
- DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE CÁLCULO POR MÉTODO SPH PARA PROCESOS DE GRANDES DEFORMACIONES Luciano Buglioni, Hernán G. Svoboda. ....Pág.1379
- CÁLCULO NUMÉRICO DE LAS VELOCIDADES CRÍTICAS DE UNA BOMBA DE CIRCUITO PRIMARIO DE UNA CENTRAL NUCLEAR Fernando Palmieri, Andreas Klempnow y Wadi Chiapparoli. ....Pág.1391
- ESTRATEGIAS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE MOTOCICLETA PARA ANÁLISIS ESTRUCTURAL José E. Stuardi, Guillermo D. Chiappero y Alejandro J. Giudici. ....Pág.1403
- SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO DE CATEGORÍA L6 (b) en Matlab Simulink Gustavo Cazzola, Juan Dusau, Horacio Mirassou, Brian Buchhammer Papasian. ....Pág.1415
- SIMULACION TERMOELASTICA DE ACCIDENTE EN RECIPIENTE DE PRESION DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA I .Santiago M. Rabazzi, Alejandro E. Albanesi, Javier W. Signorelli, Juan Ramos Nervi y Ezequiel M. Fernández. .... Pág.1427
- VALIDAÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO CFD APLICADA À PREDIÇÃO DE DESEMPENHO AERODINÂMICO DE MICROTURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL Guilherme Toquini, Elisa Pereira, Celso Bittencourt , Angie L. Espinosa Sarmiento e Diego M. Y. Maya. ....Pág.1439
- CONDENSADOR DE 4 ETAPAS PARA GAS DE PIRÓLISIS PARA OBTENCIÓN DE ACEITE María Sol Gutierrez, Mercedes Lozano Rus, Leisa Maria Magallanes, Norberto Canale, Leonardo Molisani y María Fernanda Gayol. .... Pág.1451

ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE DIÁMETROS EN LA EFICIENCIA DE UN TUBO VORTEX J. M. Penillas, F. J. Suarez, y N. J. Mariani. ....	Pág.1460
DISTANCIA EFECTIVA DEL PAR DE FUERZAS ACTUANDO EN UNA UNIÓN CON CHAVETA Cristian Giner, Adrian Flamant , Gabriel Mattolini , Alfredo Amico , Jose Henkes. ....	Pág.1472
ANÁLISIS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR MEDIANTE TÉCNICAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL María C. Cortizo, Juan C. Catalano , César M. Venier , y César I. Pairetti. ....	Pág.1483
SIMULACIÓN COMPUTACIONAL PARA LA DETERMINACIÓN ESTRUCTURAL DE TANQUES CON SEPARADOR DE CRUDO ANTE CARGAS SÍSMICAS Matías Meroniuc, Héctor Sanzi y Gustavo Elvira. ....	Pág.1495
ANÁLISIS VIBRATORIO DE VIGAS FISURADAS: TEORÍA DE TIMOSHENKO CON TRUNCAMIENTO Anna María De Rosa, María Lippiello Carla Ceraldi, Héctor Martin, Antonella Onorato y Marcelo Piovan. ....	Pág.1505
DINÁMICA DE VIGAS CURVAS CON INCLUSIÓN DE RESONADORES LOCALES EMBEBIDOS CONSIDERANDO LA INCERTIDUMBRE PARAMÉTRICA Walter Horacio Fruccio, Marcelo Tulio Piovan y Rogelio Lorenzo Hecker. ....	Pág.1516
PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN EN EL PROCESO DE DISEÑO DE PERFILES C DE PARED DELGADA. Angel F. Queizan, Edson Gaston Montaña Bautista. ....	Pág.1528
APLICACIÓN DE SIMULACIÓN POR FEM PARA EL MANTENIMIENTO DE EQUIPOS MECÁNICOS Jonatan Raspante, Cristian Vatta, Pablo Girón, Juan F. Guieu y Gonzalo Macchia. ....	Pág.1540
CARACTERIZACIÓN DE POOL FIRES DE LNG UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL Sebastián E. Moreira y Edgardo A. Serafín. ....	Pág.1552
SIMULACIÓN NUMÉRICA DE EXPLOSIONES CIRCULARES Y ESFÉRICAS Alberto F. Lara, Mariano Madeo, Sebastián E. Moreira y Edgardo A. Serafín. ....	Pág.1564
ESTUDIO COMPARATIVO DE LA DINÁMICA DE UN UGV, APLICANDO DINÁMICA DE CUERPO RÍGIDO, FLEXIBLE Y COMPARANDO CON LOS DATOS EXPERIMENTALES Sebastian Tesoriero, Sebastian Loscri , Pablo Vilar, Marcelo Acuña y Elvio Heidenreich. ....	Pág.1576
PRUEBA HIDRÁULICA EN HOT-TAP EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL. Leonardo Brisciese, Héctor Sanzi y Alejandro Turel. ....	Pág.1588
ESTUDIO MECÁNICO COMPARATIVO DE OSTEOTOMÍA SUPRAMALEOLAR DE TIBIA DISTAL Lucas Pedro Acosta, Ramiro Olleac, Daniel Gustavo Goroso, Fernando Daniel Farfán. ....	Pág.1600
ESTUDIO DE UNIFORMIDAD DE FLUJO EN CÁMARA DE ENSAYOS DE TÚNEL DE VIENTO Maximiliano Lugones, Federico Lecci, Germán Soria, Claudio Merelli y Gustavo Vignolo. ....	Pág.1609
ANÁLISIS DE FRECUENCIA SEGÚN LA TEORÍA TRUNCADA DE TIMOSHENKO EN SENSORES BASADOS EN NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED SIMPLE. María Anna De Rosa, María Lippiello Antonella Onorato y Marcelo Piovan. ....	Pág.1621
ESTUDIOS PRELIMINARES PARA LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN SISTEMA MOTO-CONDUCTOR José E. Stuardi, Guillermo D. Chiappero y Alejandro J. Giudici. ....	Pág.1631

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE COJINETES HIDRODINÁMICOS Jorge Palavecino, Matias Borquez, Claudio Merelli, Gustavo Vignolo, Federico Cavalieri, y Santiago Márquez Damián. .... Pág.1643

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ARQUITECTURA DE COMPUTACIÓN EN LA NUBE PARA LA EVALUACIÓN PARALELA DE MODELOS DINÁMICOS NO LINEALES Andrés E. Ajas, Damián F. Campos y Marcelo T. Piovan. .... Pág.1654

## Ingeniería de Fabricación y Mantenimiento

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, QUE PRODUCE EL VUELCO EN UNA VIVIENDA TRAILER Juan J. Valle Sosa, Ubaldo N. Jara, Mariano M. Lastra y Jorge L. Lassig. .... Pág.1666

INFLUENCIA DEL AFILADO DE LA BROCA SOBRE LOS ESFUERZOS DE MECANIZADO EN DISTINTOS METALES Alejandro Simoncelli, Daniela Perez, Germán Abate, Alberto Pereyra Osenda, Pablo Gayol y Daniel Martinez Krahmer. .... Pág.1676

MODOS DE FALLAS EN BOMBAS CENTRIFUGAS Y SU INCIDENCIA EN EL MANTENIMIENTO Orlando Aníbal Audisio Carlos Alberto Katcoff. .... Pág.1688

PROYECTO DE UN NUEVO SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIONES Fernando Palmieri, Darío Violante, Andreas Klemptow y Wadi Chiapparoli..... Pág.1700

ESTUDIO METALGRÁFICO DE FISURAS GENERADAS POST SOLDADURA EN CINTAS DE SIERRA UTILIZADAS EN ASERRADERO DE LA UNLP Nicolas Rosas, F. Ruiz Diaz, J. Lacoste, L. Feloy, A. Cozzarin, D. Tovia. .... Pág.1712

ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES EN PLACAS DE ACERO DE NORMA BRASILEIRA ABNT 7007 Y ALUMINIO ANODIZADO 6063-T5 Victor Huaman, Fernando de Azevedo y Victor Gamarra. .... Pág.1722

COMPARAR A INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG E SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO, QUANTO AO RISCO DE PERFURAÇÃO E VAZAMENTO DE FLUIDO, ASSIM COMO O RISCO DE TRINCA A FRIO Fernando Marques Fernandes, Carlos Alberto Amaral Moino, Heitor Pereira Bernardes, Larissa Pagotto Gomes, Luis Rodrigo Rochelle e Thaís Dantas Silva. .... Pág.1734

ANÁLISE DE MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE DE EMBARCAÇÃO DE APOIO PORTUÁRIO Fernando Marques Fernandes, Carlos Alberto Amaral Moino, Bruno Lopes Chagas da Silva, Caio Fillipe Mello Carvalho dos Santos, Jonathan Bizari de Souza Villanova, Matheus Lima de Oliveira, Matheus Vilaro Affonso Galeti e Paulo Ricardo Vasques. .... Pág.1746

## Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas

INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL, LA CANTIDAD DE DIENTES DE LAS POLEAS Y LA PÉRDIDA DE RENDIMIENTO EN UNA TRANSMISIÓN FLEXIBLE DE CORREA SINCRONIZADORA. Ricardo Mario Amé; Daniel Hernán Lezama; Luis Oscar Cottone. .... Pág.1759

ANÁLISIS DE FALLA POR FATIGA DE PERNO DE UNIÓN DE CABEZA DE BIELA DE MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA Ricardo Mario Amé; Agustín Gualco; Sebastián Zappa. .... Pág.1770

CRITERIOS PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO DE ÁRBOLES DE MÁQUINAS Sandra Robles, Javier Masetro y Alberto Romeo. ....	Pág.1780
EL ESTADO ACTUAL DEL DIMENSIONADO Y TOLERADO DE COMPONENTES MECÁNICOS - LAS ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS DE PRODUCTO (GPS). José Jorge Alvarez, Fabian Claudio Nessier. ....	Pág.1792
OPTIMIZACIÓN DE CHASIS DE SEMIRREMOLQUE DE VUELCO TRASERO MEDIANTE EL USO DE ACEROS MICROALEADOS Marcos Marino, Marcelo Costamagna y Carlos Tais. ....	Pág.1804
DESARROLLO DE UN BANCO DE ENSAYOS DE DESGASTE EROSIVO EN LÍNEAS Y ACCESORIOS DE CAÑERÍAS Adrian Urrestarazu, Nicolas Zabala, Julián Culleton, Lucas Longstaff Alvarez, Jesús Sarabia y Damián Urrestarazu. ....	Pág.1813
DISEÑO Y CÁLCULO DE TRANSMISIONES DE POTENCIA CON CORREAS DE SECCIÓN TRAPEZIAL EN BARCOS ARENEROS Y PRESTACIONES OBTENIDAS. Horacio M. Mirassou. ....	Pág.1825
PROYECTO DE MÁQUINA DE ENSAYO DE FLEXIÓN DE RIELES DE FERROCARRIL COMPACTA. Ignacio Kuchen, Rodrigo Leurino, Ezequiel Avellaneda. ....	Pág.1837
ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE PERFIL AERODINÁMICO PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO, EMPLEANDO TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA. Javier A. Puiatti, Raúl A. Dean, Livio S. Maglione, Leonel Calzolari, Francesco Famea, Julio Grenon. ....	Pág.1849
DESARROLLO DE UN BANCO DE ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECANICAS DIVERSAS EN PIEZAS POLIMÉRICAS. Carlos Mainetti, Andrés Romero, y Marcelo Piovan. ....	Pág.1861
DISEÑO Y ANÁLISIS DE SOPORTE DE AMETRALLADORA MONTADO SOBRE UN VEHÍCULO Bernardo Scorciapino, Pablo Vilar, Elvio Heidenreich. ....	Pág.1873
ANÁLISE DE FALHAS DE IGNIÇÃO AUTOMOTIVA A PARTIR DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS (FTA). Anne Karoline Cardoso Macedo, Gustavo Lima da Silva, Víctor Borges Rodrigues, Márcio Andrade Rocha. ....	Pág.1885

## Agroindustria

PROTOTIPO VIRTUAL DE SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE PASTURAS PARA MÁQUINA SEGADORA. Carlos H. A. García; Germán E. Camprubí; José L. Basterra; Marcelo F. Larrea; Carlos A. Derka. ....	Pág.1896
IMPROVING SEED DETECTION ACCURACY WITH INFRARED SENSORS ARRAY IN PRECISION SEEDERS Sebastián Rossi, Ignacio Rubio Scola, Gastón Bourges, Jorge Eliach, Egidijus Šarauskis, Davut Karayel. ....	Pág.1908

## Innovaciones y Desarrollos Tecnológicos Ferroviarios

DISEÑO DE SISTEMA ÓPTICO PARA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES EN OBRAS DE ARTES FERROVIARIAS. José I. Gialonardo (*), Marcos Amado y Javier Idzi. ....	Pág.1921
OPORTUNIDAD PASO A DISTINTO NIVEL EN RP2 CON FFCC GRAL. ROCA RAMAL RINGUELET-BRANDSEN. Tomás Martiarena, Miguel Ángel Ramón Galache, Sergio Martín Arocas Amado. ....	Pág.1931

ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE LUBRICACIÓN DE PESTAÑAS DE RUEDAS FERROVIARIAS. Tomás Martiarena, Miguel Ángel Ramón Galache, Marcos Elías Amado. .... Pág.1945

## Operación, Seguridad y Normativa Ferroviaria

DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN PARA RIEL FERROVIARIO UIC 54 E.1. Marcos Amado, Javier Idzi, Fernando Gutiérrez, José Gialonardo y Eduardo Becker Groth. .... Pág.1956

IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD OPERACIONAL EN EL TRANSPORTE FERROVIARIO: PROPUESTA DE UN METODO DE IDENTIFICACION, ANALISIS Y EVALUACION DE RIESGOS GENERICOS OPERATIVOS EN EL SERVICIO FERROVIARIO URBANO. Claudio Meccia, Andres Serrano, Leonel Ovejero, Pablo Moret, Maximiliano Moreno y Ariel Rivero. .... Pág.1964

## Misceláneas

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO DE CATEGORÍA L6. Gustavo Cazzola, Horacio Mirassou, Juan Dusau, José Santelli. .... Pág.1978

ANÁLISIS NUMÉRICO SOBRE LA EFECTIVIDAD DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA BASADO EN FRICCIÓN PARA CONTROLAR LA RESPUESTA ESTRUCTURAL. Joaquín Lage Tejo, Juan Sibecas, Oscar Curadelli, Marta Amani. .... Pág.1990

CONFECCIÓN DEL INFORME TÉCNICO PARA LA EMISIÓN DE CERTIFICADOS DE SEGURIDAD VEHICULAR EMITIDOS POR LA AGENCIA NACIONAL DE SEGURIDAD VIAL. Ing. Inti Manuel Smith. .... Pág.2002

MOUSE INALÁMBRICO PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA. Martín Alejandro Torres, Gerardo Bravo, Fernando Flores, Eduardo Cirera, Jorge Omar Marighetti, Mario Eduardo De Bórtoli. .... Pág.2014

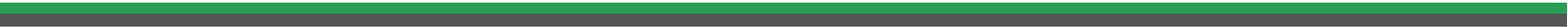
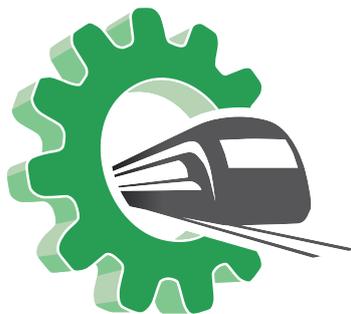
ACEPTABILIDAD DEL RIESGO: DEFINICIÓN Y TOMA DE DECISIONES MEDIANTE LÓGICA BORROSA. Mario Daniel de la Canal, Lautaro Daniel Vela. .... Pág.2026

EVALUACIÓN DE MEDICIONES DE PRESIONES FLUCTUANTES SOBRE PERFIL ALAR NACA 4412 PARA FLUJOS TURBULENTOS. Lucrecia M. Trullet, Gisela M. Alvarez y Alvarez, Marcelo I. Adotti, Juan M. Rodriguez, Mario E. De Bortoli, Beatriz A. Iturri. .... Pág.2038

SIMULACIÓN ESTRUCTURAL PARA MATERIALES ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES, DE UNA PRÓTESIS VALVULAR AÓRTICA EN SITUACIONES NO BASALES. José Di Paolo, Exequiel R. Frías, Brenda A. Weiss y Marcelo E. Berli. .... Pág.2049

TRENES DE CARGA CON AUTONOMÍA ENERGÉTICA ILIMITADA. José Di Paolo y Eduardo A. Villarino. .... Pág.2061

# Trabajos Completos



Área Temática

# Enseñanza y Formación Docente





## LA TERMODINÁMICA EN LAS CARRERAS DE INGENIERÍA COMO INICIO A LAS ENERGÍAS RENOVABLES

**Jorge A. Adaro, María N. Ziletti, Héctor F. Romero, Alberto S. Esquenazi**

Grupo de Energía Solar, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta 36 Km 36, Río Cuarto - Córdoba, Argentina Email: aadaro@ing.unrc.edu.ar

### RESUMEN

En los últimos tiempos se promueve la sostenibilidad, conjuntamente con el crecimiento económico, soslayando las condiciones ecológicas y termodinámicas que establecerían límites y condiciones a la transformación y degradación ambiental. Por esta razón, es imperante que, en la formación de los futuros ingenieros, se incorporen competencias profesionales relacionadas con la preservación del ambiente.

En este trabajo se analiza para las carreras de Ingeniería la formación en la asignatura Termodinámica, perteneciente al Departamento de Mecánica de la Universidad Nacional de Río Cuarto, presentándose como innovación la fundamentación de por qué es necesario incluir en el programa para esta materia, un abordaje que haga énfasis en lo ambiental. A partir del Segundo Principio de la Termodinámica, basado en el Enunciado Ambiental, se contempla entre las competencias que los estudiantes deben lograr, las siguientes: interpretar y aplicar normas y estándares nacionales e internacionales que incluyan las metas acordadas en El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), comparar el desarrollo y aplicación de diversas tecnologías emergentes en la producción de energía eléctrica que utilicen los recursos naturales renovables; identificar, cuantificar y controlar los aspectos ambientales tomando en cuenta indicadores de las emisiones de gases de efecto invernadero.

El programa de la asignatura, mantiene los contenidos que contemplan las bases y fundamentos de los cuatro principios de la termodinámica, el análisis de sistemas térmicos, con sustancias puras y los ciclos térmicos más relevantes. Además, incorpora temas con el propósito que los futuros ingenieros posean una formación integral ambiental, que les permita seleccionar tecnologías que controlen el avance del cambio climático y la depreciación de los recursos naturales, como así también valorar los impactos económicos-sociales de la degradación ambiental.

**Palabras Claves:** Termodinámica, Segundo Principio de la Termodinámica, Entropía, Energías Renovables, Cambio Climático.

**Área Temática:** Energía y medio ambiente.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores



## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se toma a la Termodinámica como objeto de análisis y en consideración en las Carreras de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), particularmente en Ingeniería Electricista (ahora Ingeniería en Energía Eléctrica por cambio de plan de estudio), en Ingeniería Mecánica y en Ingeniería en Energías Renovables. Dichas carreras tienen una estructura curricular con planes de estudio cumplen con las pautas más relevantes de las carreras de ingeniería. Son carreras de 5 años de duración, con asignaturas organizadas por cuatrimestre y divididas en tres bloques a lo largo del ciclo de cursado: asignaturas de ciencias básicas; asignaturas de tecnologías básicas y, por último, las materias del ciclo profesional específicas.

Se puede observar que existe una consistencia en los planes de las carreras de Ingeniería de la UNRC con los objetivos de las propuestas de CONFEDI [1], respetando las actividades reservadas, bajo la hipótesis de que las mismas resultan de los acuerdos entre los representantes de las diferentes terminales de las ingenierías. Se propone agregar a las competencias específicas existentes las siguientes, de tal manera que las mismas sean tenidas en cuenta en las tres terminales consideradas:

- Interpretar y aplicar normas y estándares nacionales e internacionales de lo anteriormente mencionado, haciendo eje en las metas acordadas en El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [2].
- Investigar sobre el desarrollo y aplicación de tecnologías emergentes relacionadas con la generación de la energía tomando en consideración la utilización de recursos naturales renovables.
- Identificar, cuantificar y controlar los aspectos ambientales tomando en cuenta indicadores de las emisiones de gases de efecto invernadero y condiciones de riesgos, mitigando sus efectos adversos en lo referido a su actividad profesional.

El fundamento de proponer las modificaciones en las competencias específicas indicadas en los párrafos anteriores se basa en considerar los descriptores de conocimiento de Tecnologías Aplicadas a Sistemas de Generación de Energía Eléctrica basados en fuentes convencionales y renovables en la carrera de Ingeniería en Energía Eléctrica, Maquinas térmicas e hidráulicas y Tecnología del calor en la carrera de Ingeniería Mecánica; y en la carrera de Ingeniería en Energías Renovables los siguientes descriptores: Máquinas Térmicas, Sistemas de Energía Solar Térmica, Turbomáquinas Hidráulicas, Sistemas de Energía con Biomasa, Sistemas de Energía con

Biocombustibles, Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica, Sistemas de Energía Eólica y Eficiencia Energética entre otras. Entre las Tecnologías Básicas se encuentra a Termodinámica como descriptor para las tres carreras.



En base a estos descriptores es central que los egresados sean competentes en identificar y evaluar a las distintas fuentes de energías primarias renovables como fundamentales en la generación de la energía eléctrica, dado su carácter de renovarse, de ser autóctonas y que deberán ser indefectiblemente de menor impacto.

Es de gran importancia fortalecer entre las competencias de egreso, las sociales, políticas y actitudinales, y entre ellas la de actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de sus actividades en el contexto local y global. Para ello, es central una formación ambiental sostenida en una sólida formación técnica que no soslaye la realidad de crisis ambiental existente en la cual el cambio climático es la principal.

En particular el descriptor de conocimiento Termodinámica se asegura con una asignatura que lleva el mismo nombre para las tres terminales de ingeniería que se está analizando. Es una de las asignaturas dentro de las tecnologías básicas para el estudio de los fundamentos teóricos de la Ingeniería, ya que provee los conocimientos esenciales y el soporte matemático necesario para abordar temas del ciclo superior, en asignaturas tales como: Mecánica de los Fluidos, Generación de Energía Eléctrica, Distribución de la Energía Eléctrica, Energía Solar, entre otras, en la carrera de Ingeniería en Energía Eléctrica, y Máquinas térmicas e hidráulicas, tecnología del calor en la carrera de Ingeniería Mecánica, y Máquinas Térmicas y Turbomaquinas, Sistemas de Energía Solar Térmica, Sistemas de Energía Fotovoltaica entre otras en la carrera de Ingeniería en Energías Renovables.

## 2. LA TERMODINÁMICA EN LA FORMACIÓN DEL INGENIERO

El objetivo principal que se pretende alcanzar en el desarrollo de esta asignatura Termodinámica, es conocer las bases y fundamentos de los cuatro principios de la termodinámica, el análisis de sistemas térmicos, con sustancias puras, así como con gases. La materia tiene el propósito que al finalizar se manejen los conceptos básicos termodinámicos de los ciclos térmicos más importantes para el ingeniero en energía eléctrica, el ingeniero mecánico e ingeniero en energías renovables.

Entre los objetivos específicos podemos citar, el de proporcionar a los alumnos los fundamentos de la Termodinámica clásica, así como la formulación matemática que la sustenta. Utilizar las consecuencias del Primer Principio y Segundo de la Termodinámica en la resolución de problemas de sistemas cerrados y abiertos con flujo estacionario. Manejar los conceptos de calor, entalpía y entropía. Conocer los ciclos aplicados a las Máquinas Térmicas más importantes como los ciclos de Rankine, Otto, Diesel y Brayton y los Ciclos de Refrigeración y Bombas de Calor.



La propuesta para el desarrollo de esta asignatura es a partir de los conocimientos previos, ya vistos en las materias del primer año, como Introducción a la Física y Física, conectar y comprender los conceptos de la Termodinámica.

Se busca que en el transcurso del cursado de la asignatura se puedan lograr competencias que se indican a continuación, distinguiendo las mismas entre las genéricas y las específicas.

Competencias genéricas:

1. Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo.
2. Comunicarse con efectividad.
3. Aprender en forma continua y autónoma.
4. Comprender la crisis ambiental y entender la problemática energética.

Competencias específicas, en relación a las genéricas son:

- 1-a Reconocer y respetar los puntos de vista y opiniones de otros miembros del equipo y llegar a acuerdos.
- 1-b Asumir responsabilidades y roles dentro del equipo de trabajo.
- 2-a Seleccionar las estrategias de comunicación en función de los objetivos y de los interlocutores y de acordar significados en el contexto de intercambio.
- 2-b Producir e interpretar textos técnicos (memorias, informes, etc.) y presentaciones públicas.
- 3-a Reconocer la necesidad de un aprendizaje continuo a lo largo de la vida.
- 3-b Lograr autonomía en el aprendizaje.
  - 4-a Reconocer que a cada emprendimiento, proyecto o implementación le corresponde una evaluación de impacto ambiental.
  - 4-b Entender que cada problemática energética a resolver requiere de la necesidad de reconocer que la solución es de impacto global, y requiere de la utilización de recursos naturales.

La propuesta académica para lograr los objetivos y las competencias indicadas, se puedan agrupar en dos tipos de actividades:

- Por un lado, el desarrollo de exposiciones teóricas conceptuales, por parte de docentes, abarcando ejemplos prácticos de aplicación, que propicien la comprensión de los nuevos conceptos introducidos. Esta modalidad será en los primeros temas, buscando que el estudiante pueda afianzar los conceptos básicos vinculados a sustancias puras, primer y segundo principio de la termodinámica. Se prevé que en diferentes momentos de la clase se realice la resolución de ejercicios y problemas, con el propósito de que se afiancen los conceptos desarrollados previamente en la teoría.



- El segundo tipo de actividades están vinculado a los temas de aplicación, por medio de clases invertidas. Se propondrá a los estudiantes la lectura de textos y publicaciones, y videos, vinculados a los ciclos térmicos aplicados a las Máquinas Térmicas. Luego, se propondrá a los estudiantes trabajos/tareas de los temas de aplicación y se requerirá la presentación de los trabajos/tareas en forma grupal por parte de los estudiantes con el fin de favorecer el intercambio de propuestas y argumentaciones entre ellos. Durante ese bloque de trabajo, el equipo docente estará disponible para contribuir a las discusiones que se produzcan en los grupos de trabajo.

Se dará a conocer a los estudiantes, la rúbrica de Termodinámica (Tabla 1), para que estos tengan a disposición un elemento para la autoevaluación de sus avances en el dominio de los temas abordados. En la rúbrica se contemplan los contenidos generales que debe contener la asignatura en las carreras mencionadas, más allá de las particularidades de cada terminal de ingeniería considerado en este análisis.

Tabla 1. *Rubrica de Termodinámica*

Contenido	Nivel Básico	Nivel Intermedio	Nivel Avanzado
<b>Sustancias Puras</b>	Distinguir las sustancias puras y diferenciarlas de otras tipo de sustancias	Reconocer las zonas de los diferentes estados de agregación y las zonas de mezclas	Dominar del uso de tablas de vapor saturado, vapor sobre calentado y liquido comprimido.
<b>Primera Ley de la Termodinámica</b>	Reconoce los tipos de energías que interviene entre un sistema y su entorno.	Distinguir los tipos de energías que interviene en las ecuaciones de la primera ley de la termodinámica. Diferencia en las transformaciones las formas de energías que depende las trayectorias y las que solo dependen de los estados iniciales y finales	Utilizar las ecuaciones de la primera ley de la termodinámica tanto para sistemas cerrados como para sistema abierto. Aplicar la Primera Ley en diferentes equipos de instalaciones varias.
<b>Segunda Ley de la Termodinámica</b>	Asumir los enunciados de la Segunda Termodinámica como retores en la definición de la entropía. Entender el Enunciado Ambianta como rector para la utilización de las energías renovables. .Comprender el concepto de trasformaciones reversibles e irreversibles	Conceptualizar la desigualdad de Clausius y entender la definición de entropía. Distinguir entre cambio de entropía, transferencia de entropía y producción de entropía.	Utilizar las ecuaciones de la segunda ley para sistemas abiertos y cerrados. Logra encontrar las producciones de entropía en equipos y distintas etapas de procesos. Saber calcular en rendimiento isoentrópico de diferentes equipos
<b>Ciclo Rankine</b>	Conocer las evoluciones básicas de un ciclo de potencia y compararlo con el ciclo Carnot	Asociar las evoluciones del ciclo Rankine con las diferentes instalaciones en donde ocurren las mismas. Calcular. Calcular las energías puesta en juego en las distintas etapas de una instalación de ciclo de potencia de Rankine	Distinguir las distintas centrales térmicas según su fuente de energía. Calcular el rendimiento de un ciclo de Rankine. Conocer las alternativas de mejoras del ciclo de Rankine y su impacto en el rendimiento.



<b>Ciclos Otto, Diesel y Brayton</b>	Conocer el funcionamiento térmico de los ciclos de gas	Conocer las distintas etapas de los ciclos ideales Otto, Diesel y Baryton, y distinguir la diferencia con los ciclos reales.	Analizar y calcular las energías puesta en juego en las etapas de los ciclos ideales Otto, Diesel y Baryton. Calcular las expresiones de los rendimientos para ciclo y analizar sus variaciones en relación a los distintos parámetros.
<b>Ciclos Invertidos</b>	Conocer el principio de los ciclos invertido de forma conceptual y las posibilidades de los mismo	Distinguir la diferencia entre un ciclo de refrigeración y uno como bomba de calor. Calcular la expresión del coeficiente de operación para ciclo de refrigeración y bomba de calor. Conocer las propiedades de los diferentes agentes refrigerantes.	Conocer y distinguir las instalaciones domésticas y las industriales que utilizan ciclos invertidos. Calcular las energías puestas es juego en una instalación frigorífica. Calcular los coeficientes de operación tanto de refrigeración como de bomba de calor. Saber seleccionar agentes refrigerantes.

### 3. ENUNCIADO AMBIENTAL DEL SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Se hace un análisis del Segundo Principio de la Termodinámica basado en el Enunciado Ambiental que versa de la siguiente manera: Es imposible una máquina cíclica que transforme calor en trabajo sin aumentar la energía termodinámica del ambiente [3]. Este enunciado es equivalente a los tradicionales, y ya conocidos, enunciados de Carnot (*la potencia motriz del calor es independiente de los agentes que intervienen para realizarla, su cantidad se fija únicamente por la temperatura de los cuerpos entre los que se hace, en definitiva, el transporte del calórico*), de Clausius (*no es posible ningún proceso cuyo único resultado sea la extracción de calor de una fuente a una cierta temperatura y la absorción de una cantidad igual de calor por una fuente a temperatura más elevada*), y de Kelvin-Planck (*no es posible ningún proceso cíclico cuyo único resultado sea la extracción de calor de una única fuente y la producción de una cantidad equivalente de trabajo*).

Considerando los esquemas de la figura 1, se puede identificar claramente en los mismos, las fuentes de calor FQ y las fuentes de trabajo FW, la máquina M y el ambiente A, que nos permitirá evaluar el comportamiento del Segundo Principio de la Termodinámica, para los cuatro casos representados de conversiones de calor y trabajo.

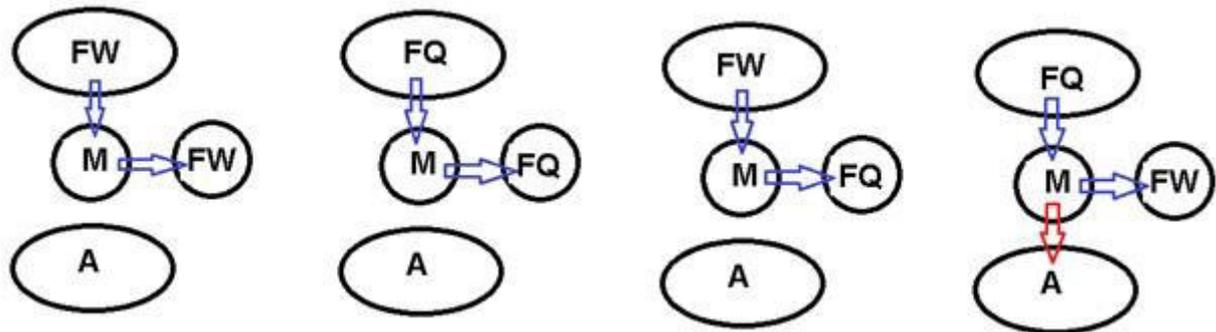


Figura 1. *Conversión de trabajo y calor*

Se observa que la conversión de calor desde una fuente caliente para obtener trabajo tiene un impacto ineludible en el ambiente, el que analizaremos a continuación.

Se puede demostrar utilizando el Primer Principio de la Termodinámica que, debido a la ineludible incidencia ambiental, el rendimiento energético de una máquina térmica cíclica que convierte calor en trabajo es siempre inferior a la unidad.

Por otro lado, a igualdad de trabajo producido, el consumo de energía y la incidencia ambiental de una máquina cíclica disminuyen al aumentar el rendimiento energético.

Si tomamos dos máquinas M1 y M2 que funcionan con similares fuentes FQ, FW y ambiente A, cediendo en ambos casos el mismo trabajo a la fuente correspondiente, se puede definir la Incidencia Ambiental Diferencial como la diferencia de la incidencia ambiental de ambos procesos.

Si consideramos el Ciclo de Carnot, su rendimiento, la incidencia ambiental diferencial de un ciclo de una máquina térmica cualquiera M respecto al ciclo de Carnot entre las mismas temperaturas extremas y para la misma cantidad de trabajo da valor mayor a cero.

Comparando con una máquina que transforma trabajo en trabajo capaz de funcionar sin incidencia ambiental obtenemos también un valor mayor a cero, pero mayor que en el caso anterior dado que el rendimiento de la transformación de trabajo en trabajo, es uno.

Ambas incidencias ambientales diferenciales son mayores a cero porque están referidas al caso con menos incidencia ambiental.

Lo que significa que a igualdad de trabajo y de temperatura de fuente de calor, mientras mayor sea la temperatura ambiente mayor será la incidencia ambiental diferencial de un ciclo de Carnot respecto a la máquina que convierte íntegramente trabajo en trabajo, por lo tanto, de cualquier máquina térmica cíclica.

De todo lo anterior podemos afirmar que las fuentes de energías renovables, que son principalmente fuentes de trabajo (eólica, mareomotriz, hidráulica) o fuente de calor a alta



temperatura (energía solar) tienen un alto potencial de aprovechamiento energético y por consiguiente bajo potencial de incidencia ambiental.

A partir del análisis del enunciado ambiental se puede desarrollar el Segundo Principio de la Termodinámica con la definición de conceptos como reversibilidad, la entropía y exergía de tal forma que los estudiantes puedan conocer y profundizar los contenidos, pudiendo seguir su evolución tomando como referencia la rúbrica presentada en la Tabla 2 sobre la Segundo Principio de la Termodinámica. En la rúbrica se visualizan los contenidos más clásicos de la Termodinámica y los de esta nueva propuesta que incluye a exergía e inferencias a las energías renovables.

Tabla 2 Rubrica de Segundo Principio de la Termodinámica

Contenido	Nivel Básico	Nivel Intermedio	Nivel Avanzado
<b>Enunciados de la Segunda Ley de la Termodinámica</b>	Asumir los enunciados del Segundo Principio de la Termodinámica como retores en la definición de la entropía.	Comparar los diferentes tipos de enunciados de las Segunda Ley y comprender la similitud de los mismos	Conceptualizar la desigualdad de Clausius y entender la definición de entropía. Distinguir entre cambio de entropía, transferencia de entropía y producción de entropía.
<b>Reversibilidad</b>	Comprender el concepto de transformaciones reversibles e irreversibles	Distinguir ciclo reales de ciclos reversibles por el tipo de evoluciones	Asumir al ciclo de Carnot como el ciclo ideal de máximo rendimiento
<b>Formulación de la Segunda Ley</b>	Comprender en concepto de entropía, y distinguir la diferencia entre energía y exergía	Utilizar las ecuaciones de la segunda ley para sistemas abiertos y cerrados. Logra encontrar las producciones de entropía en equipos y distintas etapas de procesos.	Saber calcular el rendimiento isoentrópico de diferentes equipos
<b>Exergía</b>	Comprender el concepto de la definición de exergía y de estado muerto	Distinguir entre exergía física y exergía química Entender las expresiones de la exergía para sistemas cerrados, corriente material y la exergía de un flujo de calor	Saber evaluar los flujo de exergía en diferentes procesos tecnológicos
<b>Inferencias a la Energías Renovables</b>	Entender el Enunciado Ambiental como rector para la utilización de las energías renovables.	Comprender el menor impacto de las Energías Renovables en el ambiente a partir de un análisis termodinámico	Usar la exergía para evaluar las propuestas energéticas a partir de los recursos renovables

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No hay dudas que estamos ante una crisis, que es una crisis ambiental que vino a cuestionar una de las creencias más arraigadas en nuestras conciencias, no sólo la de la supremacía del hombre, sino que es la primera crisis global generada por el desconocimiento del conocimiento. Lleva así a repensar la realidad, a entender sus vías de complejidad, el enlazamiento de la complejidad del ser y del pensamiento, lleva a cuestionar el pensamiento y el entendimiento del



mundo, la ontología, la epistemología y la ética con las que la civilización occidental ha aprehendido al ser, los entes y las cosas; la ciencia y la razón tecnológica con las que ha sido dominada la naturaleza y economizado el mundo moderno [4].

Debemos pensar que entre los saberes al que debe llegar el ingeniero está el saber ambiental, que debe también acoger el no saber, la incertidumbre, la indeterminación y la posibilidad en la producción de la verdad, del conocimiento, del devenir y del porvenir. Ya desde Hegel y Nietzsche la no-verdad aparece en el horizonte de la verdad, la ciencia fue descubriendo las fallas del proyecto científico de la modernidad [6].

Es central en la formación del ingeniero una mirada integral, que no solo entienda lo ecológico, lo social y la economía, para pueda entender la gravedad de la crisis ambiental. El ingeniero debe saber distinguir que, de los problemas ambientales existentes en el planeta, la crisis ambiental debido al cambio climático es la mayor de todas y de carácter global.

No es posible mantener una economía en crecimiento que se alimenta de una naturaleza finita, sobre todo una economía fundada en el uso del petróleo y el carbón. La despetrolización de la economía es un imperativo ante los riesgos catastróficos del cambio climático si se rebasa el umbral de las 550 ppm de gases de efecto invernadero, como vaticina el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [2].

Es muy importante el dominio por parte de los Ingenieros de los conceptos de la Termodinámica, ya que el límite es el punto final desde el cual se construye la vida. Desde la muerte reorganizamos nuestra existencia. El único antídoto a este camino ineludible a la muerte entrópica, es el proceso de producción que niega la entropía (*o neguentrópica, palabra usada por Leff* [5].) de materia viva, que se traduce en recursos naturales renovables.

## 5. CONCLUSIONES

Es necesario y urgente repensar la formación de los ingenieros, centrados en una mirada ambiental, ecológica y de racionalidad económica, basado en las leyes fundamentales de la termodinámica.

Desde las más altas autoridades es urgente el debate y la incorporación de las competencias específicas: a) Interpretar y aplicar normas y estándares nacionales e internacionales de lo anteriormente mencionado, haciendo eje centra en las metas acordadas en El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), b) Investigar sobre el desarrollo y aplicación de tecnologías emergentes relacionadas con la generación de la energía tomando en consideración la utilización de recursos naturales renovables, y c) Identificar, cuantificar y controlar los aspectos ambientales tomando en cuenta indicadores de las emisiones de gases de efecto invernadero y condiciones de riesgos, mitigando sus efectos adversos en lo referido a su actividad profesional.



Desarrollar a Termodinámica como descriptor en las carreras de ingeniería debe ser un desafío permanente, para darle la mirada ambiente que exige la época, la de una crisis ambiental que es el reflejo y resultado de la crisis civilizatoria occidental, causado por sus formas de conocer, concebir y por ende transformar el mundo. Tal como dijera en su momento el científico Albert Einstein: *Las leyes de la Termodinámica son las únicas verdades que permanecieron inalteradas ante las dos grandes revoluciones científicas del siglo XX; la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad.*

Finalmente es importante asumir que la construcción debe ser desde otra perspectiva, hoy para afrontar los problemas ambientales que afligen a la humanidad, es menester contar con una filosofía que permita un desarrollo sostenible y, a la vez, una vida en simbiosis con la naturaleza.

## REFERENCIAS

- [1] Propuesta de Estándares de Segunda Generación para la Acreditación de Carreras de Ingeniería en La República Argentina “Libro Rojo de CONFEDI” (2018).
- [2] Cambio Climático: Bases Físicas (Guía Resumida del Sexto Informe de Evaluación del IPCC, Grupo1 NIPO: 638-18-008-0 (2021).
- [3] Gómez Camacho C. (1994) Enunciado ambiental del segundo Principio de la termodinámica. Aplicaciones a las Energías Renovables. Actas del VII Congreso Ibérico de Energía Solar. Editado por la Universidad de Vigo. Editores Vázquez, M. y Moran J. C. ISBN Tomo 1:84-605-0046-2.
- [4] Leff E. (2010) Globalización, ambiente y sustentabilidad. Saber Ambiental. Siglo XXI Editores. Mexico.
- [5] Leff E. (2008) Decrecimiento o desconstrucción de la economía: Hacia un mundo sustentable. Revista Polis Vol. 7 N° 21 págs. 81-90 Ed. de la Universidad Bolivariana de Chile.
- [6] Löwith K. (2008) de Hegel a Nietzsche. La quiebra revolucionaria del pensamiento en el siglo XIX. Ed. Katz Barpal Editores SI. ISBN: 978-84-96859-16-6.



## TALLER DE CFD COMO ASIGNATURA PARA ESTUDIANTES AVANZADOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

César I. Pairetti<sup>1,2</sup>, Nicolás Trivisonno<sup>1,3</sup>, Darío Godino<sup>1,3</sup>, César M. Venier<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) – Universidad Nacional de Rosario (UNR) Riobamba 219 bis, Rosario, Santa Fe, Argentina- [pairetti@fceia.unr.edu.ar](mailto:pairetti@fceia.unr.edu.ar)

<sup>2</sup> Instituto Jean LeRond D'Alembert, Sorbonne Université, 4 Place Jussieu, Paris, Francia

<sup>3</sup> Centro de Investigación en Métodos Computacionales, CIMEC (UNL - CONICET)  
<https://cimec.conicet.gov.ar/>

### RESUMEN

Presentamos en este trabajo una asignatura electiva cuyo objetivo es introducir a estudiantes del último año de Ingeniería Mecánica a la Mecánica de los Fluidos Computacional (CFD). El curso se enfoca en desarrollar criterios de uso de CFD que sean luego aplicables a la resolución de problemas de ingeniería en contextos industriales. Asimismo, buscamos presentar los aspectos fundamentales de métodos numéricos con un enfoque práctico empleando *software* libre. Las primeras cinco clases trataron sobre fundamentos de mecánica de fluidos y métodos numéricos, en una modalidad con dos momentos: una presentación magistral y una actividad de programación en lenguaje interpretado (Octave), implementando algoritmos básicos. Las clases posteriores consistieron en configurar y resolver casos tutoriales empleando la plataforma OpenFOAM. Las dos consignas definidas incluyen datos de referencia, de bibliografía o experimentación propia, para que los estudiantes validen sus modelos numéricos. Estas dos actividades se evaluaron mediante la entrega de informes incluyendo los resultados CFD propios y el correspondiente análisis de error. Como última instancia de evaluación, se realizó una jornada de exposiciones donde grupos de tres estudiantes expusieron un proyecto semestral aplicando CFD a un problema tecnológico específico. Finalizando este primer dictado del segundo semestre 2022, vemos que el curso ha cumplido los principales objetivos propuestos. A partir de los informes y exposiciones presentadas, es evidente que cada estudiante alcanzó un nivel básico en el uso de *software* CFD, ampliando sus capacidades para enfrentar los desafíos que se les presentarán en su futuro profesional. Como puntos de mejora, presentamos en este trabajo algunas modificaciones de cronograma y material pedagógico empleado, a fin de lograr una carga más homogénea en la exigencia durante las posteriores entregas del curso. Dada la respuesta positiva de esta primera cohorte, esperamos continuar impartiendo la asignatura una vez por año, atendiendo la creciente demanda de los estudiantes.

**Palabras Clave:** *Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Ingeniería Asistida por Computadora (CAE), Diseño Curricular, Software Libre*



## 1. INTRODUCCIÓN

La Mecánica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) es una herramienta esencial en la resolución de problemas complejos en ingeniería y la investigación en contextos industriales, en el marco de la Ingeniería Asistida por Computadora (*Computer Aided Engineering*, CAE). En la última década, la demanda de profesionales capacitados en el uso de *software* CFD ha aumentado considerablemente debido a su aplicación en diversos campos de la ingeniería, como la aeronáutica, la automoción, la energía y la biomedicina, entre otros [1, 2]. Asimismo, su alcance es verdaderamente multidisciplinario, requiriendo un sólido conocimiento en áreas tan diversas como la Mecánica de Fluidos, el Cálculo, los Métodos Numéricos y la Informática. Así, la complejidad inherente a cada uno de estos campos hace que la integración de todos ellos en un solo curso de estudio represente un gran desafío.

A menudo, los cursos de CFD se orientan principalmente a enseñar el funcionamiento de un *software* específico [3, 4]. Aunque esto es útil para adquirir habilidades prácticas, puede ser insuficiente para brindar a los estudiantes un entendimiento completo de los fundamentos teóricos y criterios de aplicación en problemas de ingeniería. Sin un entendimiento firme de estos conceptos, los estudiantes no estarán preparados para utilizar el CFD de manera efectiva en su ámbito profesional.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la bibliografía de introducción a los métodos numéricos para CFD tiende a ser extensa e involucrar matemática avanzada [5-8]. Aunque estos textos son valiosos para aquellos que desean especializarse en CFD, pueden ser demasiado detallados y técnicos para los estudiantes de grado que buscan iniciarse en este campo. Frente a este desafío, el presente trabajo describe el diseño curricular de un curso para introducir a los estudiantes de último año de Ingeniería Mecánica al CFD. Este curso busca abordar las brechas identificadas en la educación tradicional en CFD, proporcionando a los estudiantes una introducción balanceada a los aspectos teóricos y prácticos del campo.

La estructura del artículo es la siguiente. La Sección 2 expone los fundamentos de CFD, exponiendo la utilidad y complejidad de esta disciplina. Luego, la Sección 3 aborda los aspectos pedagógicos en sí mismos, describiendo las actividades propuestas en el curso y cuáles son los objetivos de aprendizaje a desarrollar en cada caso. Finalmente, en la Sección 4 presentamos nuestras reflexiones en cuanto a la primera implementación del curso durante el año 2022, analizando diferentes aspectos a mejorar y proponiendo cambios que, además, potencien los aprendizajes que los mismos estudiantes han reportado luego de cursar la asignatura.



## 2. FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Existen tres aspectos principales que se exponen brevemente a continuación: la Mecánica de Fluidos, los Métodos Numéricos y algunos aspectos relacionados a la Informática. Las dos primeras disciplinas se incluyen en las carrera de Ingeniería Mecánica de nuestro país, de acuerdo a las especificaciones del CONFEDI [8]. Si bien la Informática es también una asignatura típica en la formación de grado, las consideraciones necesarias para el uso de CFD suelen ser demasiado específicas y, por lo tanto, no suelen estar presentes en otras asignaturas. A continuación presentamos un breve resumen de los contenidos básicos a abarcar para cada una de estas disciplinas.

### 2.1. Ecuaciones de la Mecánica de Fluidos

La Mecánica del Continuo representa un marco teórico fundamental para describir el comportamiento de los sistemas macroscópicos. Los modelos matemáticos que emplea se construyen mediante la formulación y resolución de Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDP), que describen la evolución de variables físicas (velocidad, presión, temperatura, etc.) en función del tiempo y del espacio.

La Mecánica de Fluidos, como una rama especializada de la Mecánica del Continuo, se ocupa de la descripción y análisis de los comportamientos de los fluidos, ya sean líquidos o gases. Las ecuaciones que rigen el movimiento de los fluidos pueden plantearse a partir de leyes de conservación: de masa, momento y energía. Estas ecuaciones de balance son los pilares fundamentales para la comprensión de la dinámica de los fluidos.

En este contexto, las ecuaciones de Navier-Stokes, Eq (1) y (2), son quizás las más emblemáticas. Estas ecuaciones modelan el movimiento de fluidos incompresibles y viscosos (newtonianos), considerando los balances de masa y momento lineal respectivamente.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \mu \Delta(\bar{u}) + \rho \bar{g} \quad (2)$$

Donde  $\bar{u}$  es el campo velocidad del flujo,  $\rho$  y  $\mu$  son la densidad y viscosidad del fluido respectivamente. La presión  $p$  y la aceleración de la gravedad  $\bar{g}$  actúan como fuentes externas de momento lineal en el flujo.



Las Eqs. (1) y (2) pueden analizarse como casos particulares de una *Ecuación General de Transporte*, que puede expresarse como se indica en la Eq. (3). Esta perspectiva permite generalizar el análisis de los modelos, describiendo la evolución temporal de un campo  $\phi$ , que puede ser afectada por procesos de advección (transporte debido al campo de velocidad  $\bar{u}$ ), difusión (con difusividad  $v_\phi$ ), o reacción (fenómenos que crean o destruyen la cantidad de  $\phi$  en el sistema, agrupados en el término  $S_\phi$ ).

$$\frac{\partial(\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \bar{u}) - \nabla \cdot (v_\phi \nabla \phi) = S_\phi \quad (3)$$

Todos los términos de esta ecuación se encuentran en la Eq. (2), donde se plantea la conservación de cantidad de movimiento  $\rho \bar{u}$ , para la cual las fuerzas externas (gradientes de presión y gravedad) actúan como fuentes de momentum. Dado que usualmente también se considera la hipótesis de flujo isotérmico, las ecuaciones de Navier-Stokes suelen ignorar la conservación de la energía. Cabe aquí notar que, a partir de la primera ley de la Termodinámica, puede plantearse la Eq. (3) para la energía interna  $\rho e$ , donde  $e = c_v T$ .

Así, puede observarse que este enfoque es particularmente útil para el desarrollo de métodos numéricos. Al representar las ecuaciones de la Mecánica de Fluidos como ecuaciones de transporte, es sencillo implementar el mismo método numérico a todas las leyes de conservación relevantes. Debido a esto, es clara la necesidad de proporcionar un marco teórico sólido para el análisis de la estabilidad y la precisión de los métodos numéricos a emplear.

## 2.2. Métodos numéricos para la resolución de EDP

Es relativamente inusual que las Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDP) obtenidas a partir de la teoría del continuo puedan resolverse de manera analítica. Por lo tanto, es necesario aplicar métodos de resolución numérica que permitan obtener soluciones aproximadas de estas ecuaciones.

Los Métodos Numéricos consisten en aproximaciones que permiten transformar las EDP, cuyas soluciones son campos (es decir, funciones en el espacio), en sistemas de ecuaciones algebraicas cuyas soluciones son valores aproximados de cada variable en diferentes puntos del dominio. De esta forma, se facilita la resolución de problemas que de otra manera serían computacionalmente inabordables.



Dentro del abanico de métodos numéricos existentes, los Métodos Variacionales son una familia muy empleada para la resolución de las EDP. En particular, los Métodos de Diferencias Finitas (FDM), Elementos Finitos (FEM) y Volúmenes Finitos (FVM) son enfoques comunes que comparten una filosofía similar: estiman valores medios o puntuales en celdas o nodos mediante la aproximación local de derivadas.

De estos, el FVM es ampliamente utilizado en Mecánica de Fluidos debido a que su formulación es inherentemente conservativa, es decir, la integral de las variables no se ve afectada por errores de aproximación. Por ello, a partir de ahora, nos centraremos en los aspectos claves del Método de Volúmenes Finitos, utilizando su terminología y nomenclatura.

En el FVM, se aplican estimaciones específicas para cada derivada, utilizando diferentes esquemas de interpolación e integración, para formular una ecuación algebraica que determina el cambio en el tiempo de una variable en función de su valor actual y los valores en celdas vecinas. Así, la Eq. (3) puede emplearse como base para calcular el cambio de la variable  $\phi$  en una celda  $P$ :

$$\frac{V_p}{\Delta t}(\phi_p^{n+1} - \phi_p^n) + \sum_f \left[ \bar{u}_f \phi_f^{n+*} - v_\phi \nabla \phi_f^{n+*} \right] = S(t, \bar{x}_p, \phi_p^n, \phi_p^{n+1}) \quad (4)$$

Donde  $n$  corresponde al tiempo presente, donde los valores de  $\phi$  son conocidos y  $n + 1$  es el tiempo siguiente a calcular y  $n + *$  representa una aproximación intermedia. La celda  $P$ , de volumen  $V_p$ , está limitada por sus caras  $f$  donde los flujos advectivos y difusivos producen el transporte de la cantidad  $\phi$  con las celdas vecinas  $N$ . Para cada instante de tiempo, en función de la posición  $\bar{x}_p$  y los valores de las variables, pueden calcularse los términos fuente  $S$ . Aplicando fórmulas específicas para aproximar cada término, estas ecuaciones pueden expresarse finalmente como ecuaciones lineales, Ec.(5) las cuales al ensamblarse para cada celda del dominio se obtiene el sistema de ecuaciones, Ec.(6).

$$a_p \phi_p^{n+1} + \sum_N a_N \phi_N^{n+1} = b_p(t, \bar{x}_p, \phi_p^n) \quad (5)$$

$$[\mathbf{A}]\boldsymbol{\phi} = \mathbf{b} \quad (6)$$

La solución de este sistema proporciona una estimación del valor de cada campo en cada una de las celdas para el tiempo objetivo, representada en el vector  $\boldsymbol{\phi}$ . Luego, en función de la



complejidad física del problema, puede ser necesario aplicar diversos algoritmos que acoplen la evolución de variables físicas, como la velocidad y la presión [5, 6, 7].

Estos aspectos metodológicos básicos permiten entender el cálculo que ejecuta el ordenador durante una simulación e interpretar los resultados obtenidos (aproximaciones discretas de los campos de flujo). A su vez, los detalles de los métodos de discretización permiten entender cuáles son las potenciales fuentes de error numérico al momento de realizar una simulación CFD.

### 2.3. Herramientas computacionales para la aplicación de CFD

Resta ahora considerar los aspectos informáticos de las plataformas de simulación CFD, muy similares a los de cualquier herramienta CAE. Estas aplicaciones de *software* son las que implementan y ejecutan el proceso, descrito en las secciones anteriores, de resolución de las EDP de la Mecánica del Continuo mediante métodos numéricos para obtener las soluciones aproximadas discretas.

Existe una gran variedad de alternativas, desde programar un código propio en lenguajes interpretados, pasando por el uso de *software*, libre o comercial, que se instala en una máquina local a las opciones más novedosas que permiten el cálculo en la nube. En este contexto, un Ingeniero generalmente actúa como usuario de estas herramientas, sin entrar en los detalles específicos de programación. Por lo tanto, a continuación daremos una perspectiva general de las características que debe tener un *software* para su uso en la industria, observando ciertas ventajas y limitaciones que han guiado la selección de aplicaciones que empleamos finalmente en el curso.

#### 2.3.1 Prototipado de código en lenguaje interpretado

Para pruebas pequeñas y resolución de casos académicos, es usual emplear lenguajes de programación interpretados - como Octave ([octave.org](http://octave.org)) o Python ([python.org](http://python.org)) - para implementar los sistemas de Ecuaciones (5). Es una práctica común de la bibliografía actual de métodos numéricos proponer ejercicios de programación donde se resuelva un problema de transporte unidimensional con esta metodología, para luego comparar con resultados de referencia y verificar que la formulación matemática del código es correcta, verificando el proceso de aprendizaje del estudiante.



Esta dinámica no requiere más que la instalación de una Interfaz de programación para el lenguaje en cuestión. Sin embargo, la dificultad de crear el código propio hace que esta práctica esté reservada sólo a fines pedagógicos. El uso profesional de CFD se apoya en otro tipo de herramientas.

### **2.3.2 Software especializado para CAD, CFD y post-proceso**

Existe una amplia oferta de *software* para realizar análisis de Mecánica Computacional en general y CFD en particular. Las plataformas ANSYS Fluent ([ansys.com](https://www.ansys.com)) o Star-CCM+ de Siemens PLM ([plm.siemens.com](https://www.plm.siemens.com)) son algunas de las alternativas comerciales que integran todas las etapas necesarias para realizar una simulación: representar la geometría (mediante herramientas CAD), configurar el modelo y ejecutar los métodos numéricos (es decir, realizar la simulación por CFD) y analizar los resultados, ya sea visualmente o calculando alguna valor derivado de los campos aproximados (post-procesar la información obtenida por la simulación).

Otra alternativa es emplear *software* libre, que es gratuito, transparente y flexible. En experiencias anteriores [9-11] hemos observado que el uso de herramientas *Free Open Source Software* (FOSS) llevan al estudiante a tener una práctica más activa, con mayor atención en los fundamentos matemáticos y los detalles de modelado. Como desventaja, cabe destacar la falta de integración entre etapas. Para generar el CAD debe emplearse una herramienta específica, como FreeCAD ([freecad.org](https://www.freecad.org)), que crea una geometría en un formato específico relativamente universal, como *stereolithography* (STL). Ese dominio luego puede emplearse en una plataforma de cálculo, como OpenFOAM [7] ([openfoam.org](https://www.openfoam.org)), para generar una malla y ejecutar el modelo numérico con el cual se obtiene el campo solución aproximado por valores discretos en el espacio. Esta información es la que luego se analiza en una plataforma de post-proceso, como Paraview ([paraview.org](https://www.paraview.org)). Si bien cada uno de estos *software* se ha vuelto más potente y fácil de utilizar con el tiempo, el hecho de tener que emplear diferentes entornos para cada etapa del análisis CFD dispersa la atención de los estudiantes. Es por esto que en experiencias más recientes [12-15] hemos optado por emplear alguna interfaz de integración, como sim-flow ([sim-flow.com](https://www.sim-flow.com)), que, si bien son *software* comercial con versiones gratis de prueba, articulan la interacción entre diversas herramientas FOSS, lo que permite una experiencia de usuario más amena sin perder las ventajas de emplear *software* libre.

En este contexto, la sección siguiente describe las estrategias pedagógicas consideradas para aplicar las herramientas computacionales ya descritas a la resolución de problemas académicos que permitan comprender cómo realizar CFD en un marco de aplicación industrial.



### 3. DISEÑO CURRICULAR DE LA ASIGNATURA ELECTIVA

En primera instancia, debemos dejar claro que el objetivo pedagógico principal del curso es que los estudiantes adquieran capacidades prácticas para resolver problemas de ingeniería mediante herramientas computacionales. El desarrollo de los criterios necesarios para convertirse en un buen usuario de *software* CFD requiere un conocimiento básico de los fundamentos de métodos numéricos y la comprensión de cómo estos conceptos afectan las diferentes etapas del proceso de simulación. Por lo tanto, el curso se enfoca en destacar los principios teóricos más relevantes y relacionarlos, en el contexto de actividades prácticas específicas, con buenos hábitos de uso del CFD.

En este sentido, el curso consta de dos etapas principales. La primera consiste en clases teóricas sobre fundamentos de mecánica de fluidos y métodos numéricos, y la segunda consiste en actividades prácticas que involucran programación en lenguaje interpretado (Octave) y el uso de la plataforma OpenFOAM. A lo largo del semestre, los estudiantes trabajaron en dos proyectos predefinidos donde realizan una validación de los modelos numéricos con datos de referencia. Las clases relacionadas a estas actividades se plantearon con una dinámica de taller [16, 17], trabajando de forma individual en un espacio compartido con el resto del curso, donde se favoreció el intercambio de opiniones y aportes mediado por el docente. La evaluación se realizó mediante la entrega de informes que incluyen los resultados CFD obtenidos y el correspondiente análisis de error. Para el proceso de corrección de estos documentos se dispuso de un protocolo de revisión por pares, muy similar a cualquier proceso de evaluación para un congreso o una revista científica.

Además de las actividades de taller con consignas cerradas, se planteó durante el semestre la ejecución de un proyecto, motivado por algún tema de interés personal. Como última instancia de evaluación, se realizó una jornada de exposiciones donde estos grupos presentaron los resultados de cada proyecto semestral.

A fin de ilustrar la complejidad de los problemas abordados durante el curso, se presentan brevemente las consignas planteadas. Cabe aclarar que cada actividad se expone con un marco teórico detallado y referencias relevantes sobre cada temática.

#### 3.1. Aerodinámica

El primer problema abordado corresponde al flujo incompresible alrededor de cuerpos sólidos, que puede describirse mediante las ecuaciones de Navier-Stokes, Ec. (1) y (2), para obtener

los campos de presión ( $p$ ) y velocidad ( $\bar{u}$ ). En particular, se plantea analizar el flujo alrededor de un cilindro, siendo este un problema académico ampliamente estudiado [2-4,14]. El desarrollo de calles de von Kármán para un número de Reynolds moderado ( $Re = 667$ ) se ilustra en la Figura 1, donde se observa también la evolución temporal de los coeficientes aerodinámicos. La actividad consiste en analizar el flujo que se desarrolla para diferentes valores de  $Re$ , empleando modelos de turbulencia RANS [5-8], realizando validaciones a partir de datos experimentales y análisis de convergencia en malla.

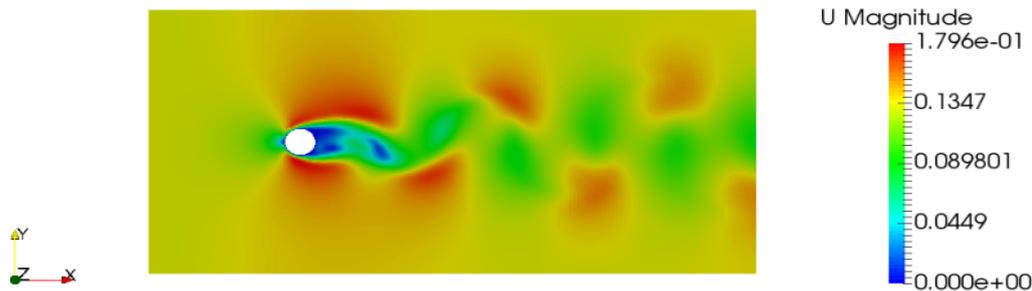


Figura 1: Campo de velocidad alrededor del cilindro ([sim-flow.com](http://sim-flow.com))

### 3.2. Transferencia de calor

A partir del análisis del flujo alrededor del cilindro, se considera un problema de convección forzada. Para esto, además de las ecuaciones de Navier-Stokes es necesario tener en cuenta la conservación de la energía, que puede expresarse como transporte de temperatura  $T$ :

$$\partial_t (\rho c_p T) + \nabla \cdot (\rho c_p T \bar{u}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (8)$$

donde  $c_p$  es el calor específico del fluido,  $k$  su conductividad y  $S$  representa términos fuente. En la bibliografía pueden encontrarse resultados experimentales que reportan, por ejemplo, el número de Nusselt ( $Nu = hL/k$ ) a lo largo del perímetro del cilindro

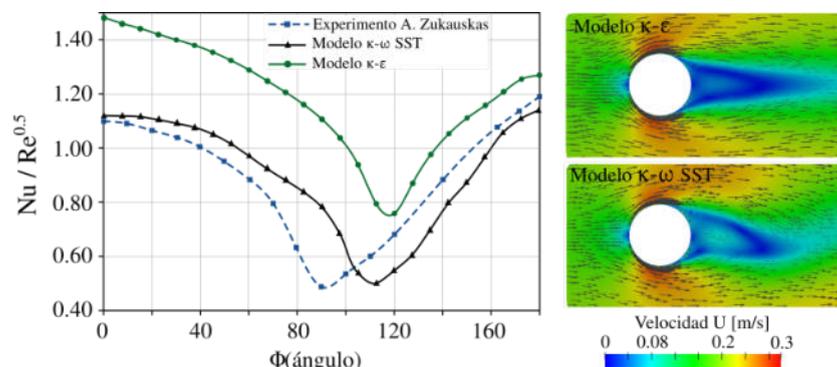


Figura 2: Representación  $Nu(\Phi)$  y velocidad para diferentes modelos de turbulencia.



### 3.3. Flujos multifásicos

La última actividad de taller se basó en un dispositivo experimental de construcción propia [19, 20], que se simuló empleando un modelo tipo *Volume of Fluid* (VoF) [21] para representar la interfase líquido-gas durante el vaciado por burbujeo de una columna de agua. El objetivo principal de este último taller fue experimentar la dificultad de lograr mediciones experimentales de calidad (precisas, repetibles, confiables) y configurar un modelo numérico que se comporte con la misma dinámica dentro de un margen de error aceptable.

El contraste con los casos anteriores, donde los valores de referencia parecían incuestionables, facilitó que los estudiantes debatieran sobre el uso de CFD como una herramienta de ingeniería más, como las normas, los ábacos, los ensayos de laboratorio u otras herramientas de cálculo más allá del CAE.

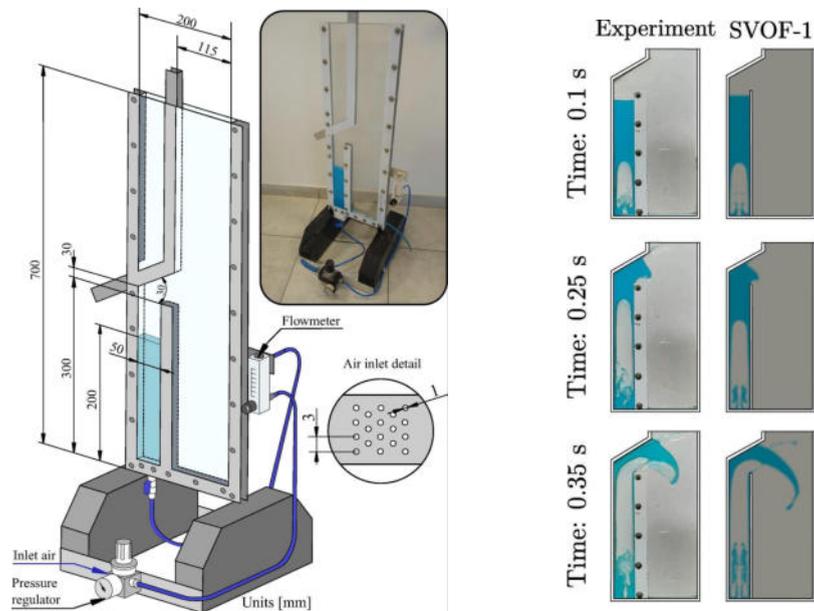


Figura 3: Esquema del dispositivo experimental [20], y comparación de resultados cualitativos.

### 4. CONCLUSIONES

Al finalizar el primer dictado del curso, observamos que el curso ha cumplido con los principales objetivos propuestos. Los informes y exposiciones presentadas demuestran que cada estudiante alcanzó un nivel básico en el uso de *software* CFD, ampliando sus capacidades para enfrentar desafíos técnicos que puedan requerir el uso de herramientas CAE.



Respecto al módulo inicial de repaso, fueron los mismos estudiantes quienes destacaron la importancia de esta instancia. Observamos que, aún luego de finalizada la etapa de revisión sobre los fundamentos teóricos, varios alumnos reportaron inconvenientes a la hora de asociar estos conceptos con el contexto práctico de aplicación. En este sentido, los estudiantes valoraron las actividades de *scripting*, considerando que fue una tarea que los llevó a reflexionar más detenidamente sobre la teoría, facilitando su comprensión. Aún así, los docentes notamos que es necesario replantear ciertas prácticas haciendo énfasis en los conceptos del FVM que afectan la confiabilidad del CFD, por ejemplo, la calidad de la malla y cómo la misma afecta la precisión de los resultados.

Respecto a los tres módulos de taller, si bien los casos de estudio fueron académicos, las actividades permitieron exponer diferentes estrategias de modelado necesarias para la resolución de problemas industriales, como RANS. Esta instancia permitió hacer foco en las capacidades y limitaciones del CFD como herramienta de ingeniería, comparándola con prácticas de cálculo más usuales en la industria argentina. A partir de estas experiencias, los estudiantes mostraron suficiencia en cuanto a los criterios de modelado y planificación de un análisis CFD, a pesar de no haber desarrollado gran familiaridad con el *software* en sí mismo. Este último aspecto es difícil de mejorar, dado que alcanzar un desempeño competitivo en el uso de cualquier herramienta de cálculo es una tarea que requiere trabajo con una frecuencia constante a lo largo de períodos que se extienden más allá de un sólo cuatrimestre.

A partir de la experiencia adquirida en esta primera edición del curso, hemos aplicado algunas modificaciones en el cronograma y el material pedagógico empleado para la edición 2023. Esperamos lograr, con estos cambios, una carga más homogénea en la exigencia. Dada la respuesta positiva de esta primera cohorte, planeamos continuar impartiendo la asignatura una vez por año, atendiendo la creciente demanda de los estudiantes.

## REFERENCIAS

- [1] Bhatti, M. M., Marin, M., Zeeshan, A., Abdelsalam, S. I. (2020). *Recent trends in computational fluid dynamics*. *Frontiers in Physics*, 8, 593111.
- [2] Cengel, Y., Cimbala, J. *Fluid mechanics: fundamentals and applications*. McGraw Hill, Nueva York, 2013
- [3] ESI (2020) *3 weeks tutorial series*. Disponible en: <https://wiki.openfoam.com>
- [4] Guerrero, J., *OpenFOAM introductory training material*. Disponible en: [wolfdynamics.com](http://wolfdynamics.com)
- [5] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education, 2007
- [6] Moukalled, F., Mangani, L., Darwish, M., Moukalled, F., Mangani, L., Darwish, M. *The finite volume method*. Springer International Publishing, 2016



- [7] Greenshields, C. J., Weller, H. G. *Note on Computational Fluid Dynamics: General Principles*. CFD Direct, 2022.
- [8] CONFEDI, *Propuesta De Estándares De Segunda Generación Para La Acreditación De Carreras De Ingeniería En La República Argentina*. Editorial Universidad FASTA, Argentina, 2018.
- [9] Pairetti C., Catalano J. C., et al. (2021). *Desarrollo de un Taller de Fluidodinámica Computacional Empleando Herramientas de Código Libre*. CAIM-CAIFE, San Nicolás 2021
- [10] Cortizo, M. C., Ravagnan H. et. al. (2020). *Estudio De Transferencia de Calor en un Disipador Para Componentes Electrónicos Mediante Técnicas de CFD*. JorCTel UNR 2020. Disponible en: <https://jornadasctei.unr.edu.ar/12b-cortizo/>
- [11] Catalano J. C. et. al. (2020). *Estudio De Solidificación Con Frontera Libre Mediante CFD*. JorCTel UNR 2020. Disponible en: <https://jornadasctei.unr.edu.ar/12b-catalano/>
- [12] Cardona, C. S., Hazzi, F., Pairetti, C. I., Venier, C. M. *Estudio Cfd De Pérdida De Carga En Válvula De Tesla T45-R*. ANALES AFA, Vol. 33, No. Especial, pp. 26-30, 2022
- [13] Hazzi, F., Cardona, C. S., Pairetti, C. I., Venier, C. M. *Análisis Cfd De Control De Flujo Mediante Una Válvula Esférica*. ANALES AFA, Vol. 33, No. Especial, pp. 21-25, 2022
- [14] Seguenzia, N. I., Canciani, P., Pairetti, C., Navone, H. *Efectos del Modelado de Turbulencia sobre las Fuerzas Aerodinámicas en un Cilindro Fijo*. *Mecánica Computacional*, 39(4), 109-110, 2022
- [15] Catalano, J. C., Carbone, M. C. C., Venier, C. M., Pairetti, C. I. *Análisis Numérico de Intercambiadores de Calor*. *Mecánica Computacional*, 39(4), 107-108, 2022.
- [16] Fraser, D. M., et al. *Enhancing the learning of fluid mechanics using computer simulations*. *Journal of Engineering Education* 96.4: 381-388, 2007
- [17] Ander-Egg, Ezequiel. *El taller: una alternativa de renovación pedagógica*. Magisterio del Río de La Plata, La Plata, 2007.
- [18] Žukauskas, A. *Heat transfer from tubes in crossflow*. *Advances in heat transfer*, Elsevier. Vol. 8, pp. 93-160, 1972.
- [19] Godino, D. M., Corzo, S. F., Ramajo, D. E. *Two-phase modeling of water-air flow of dispersed and segregated flows*. *Annals of Nuclear Energy*, 149, 107766, 2020
- [20] Piña, J. S., Godino, D., Corzo, S., Ramajo, D. *Air injection in vertical water column: Experimental test and numerical simulation using volume of fluid and two-fluid methods*. *Chemical Engineering Science*, 255, 117665, 2022
- [21] Damián, S. M., Nigro, N. M. *An extended mixture model for the simultaneous treatment of small-scale and large-scale interfaces*. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 75(8), 547-574, 2014



## MODELADO E IMPRESIÓN 3D DE MECANISMO CRUZ DE MALTA COMO PRÁCTICA DE EXTENSIÓN

Laura Lopresti, Lucas Speroni, Sergio Gavino, Laura Fuertes y Gabriel Defranco <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia Grupo de Ingeniería Gráfica Aplicada (UIDET GIGA)

Departamento de Mecánica – UNLP Facultad de Ingeniería

Calle 1 y 48, La Plata, Argentina- laura.lopresti@ing.unlp.edu.ar

### RESUMEN

Esta presentación se enmarca en las acciones de extensión que la Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia Grupo de Ingeniería Gráfica Aplicada (UIDET GIGA) ha implementado desde el año 2005 a la fecha. En esta oportunidad, se relatan las actividades realizadas con estudiantes de 7mo año de la orientación electromecánica de la Escuela de Educación Secundaria Técnica N° 6 Albert Thomas de la ciudad de La Plata, dependiente de la Dirección General de Cultura y Educación de la Provincia de Buenos Aires. La modalidad de trabajo se realizó bajo el Sistema de Prácticas Formativas en Ambiente de Trabajo. Las mismas son obligatorias para la Educación Técnico Profesional según Resolución 2343/2017. Estas prácticas contribuyen a la formación integral de los estudiantes, en este caso de escuelas técnicas, ya que constituyen una aproximación progresiva al campo ocupacional y colaboran a consolidar el perfil profesional según los requerimientos propios de los sectores científico, tecnológico y socio productivo. Bajo esta premisa, se consideró realizar una actividad enmarcada en una instancia de proyecto real como es la modelización e impresión 3D de un mecanismo o conjunto articulado. En esta ocasión, se ha seleccionado el mecanismo llamado Cruz de Malta o Rueda de Ginebra, se trata de un sistema que transforma un movimiento circular continuo en otro movimiento circular intermitente y se aplica industrialmente en líneas de producción y ensamble. En este trabajo se detalla el diseño del mecanismo como modelo didáctico, sin que el mismo pierda la identidad morfológica y funcional, y se describe la secuencia de actividades llevadas a cabo. En un sentido más general, este trabajo nos permite reflexionar sobre nuestras propias prácticas docentes y de extensión para una constante revisión de los procesos de enseñanza y aprendizaje.

**Palabras clave:** Extensión; escuelas secundarias; sistemas de representación; Mecanismo Cruz de Malta.



## 1. INTRODUCCIÓN

El rol del extensionismo vivencia un profundo cambio y se hace extensivo a las universidades latinoamericanas. Como lo analiza Cano Menoni (2014) *“la universidad ha cambiado esta mirada desde perspectivas centradas en la propia institución hacia otras miradas cada vez más vinculadas con la sociedad y los aspectos sociopolíticos que la atraviesan”* [1]. Y en esta evolución, fruto de los cambios políticos-históricos y de perspectiva generacional, es inevitable redefinir las acciones y los actores. Como indica Bejarano (2011) *“La extensión universitaria viene atravesando, en los últimos años, un proceso sostenido de crecimiento y jerarquización, paralelamente a una profunda redefinición de sus objetivos y metodologías”* [2]. De esta manera la extensión universitaria discurre hacia un proceso dinámico y en constante revisión.

A nivel regional en la Universidad Nacional de La Plata se encuentran coincidencias en las palabras de Tauber (2018), *“... la extensión universitaria experimentó un proceso de crecimiento y de afianzamiento institucional que se consolida día a día. Pasó de mero integrante en el discurso histórico de las funciones básicas de la universidad, junto a la enseñanza y la investigación, a ser protagonista activa de procesos sociales asociados a la formación de estudiantes y docentes, con un fuerte vínculo que la comunidad reconoce cada vez con más claridad, y se transformó en referente en el tema entre las universidades del país y la región.”* [3]. Es así como las acciones de extensión establecen lazos y crean redes para contribuir al desarrollo social y al bienestar de la sociedad a través de la aplicación práctica del conocimiento y la participación activa de la universidad en su entorno.

La UIDET – Grupo de Ingeniería Gráfica Aplicada ha buscado desde sus inicios consolidar su espacio de extensionismo inmersos en esta constante resignificación de espacios y actores. Ha propiciado el vínculo con instituciones de nivel medio y terciario. Ha realizado actividades y talleres con el objeto de promover la enseñanza de los sistemas de representación de acuerdo con marcos de referencia, tanto teóricos como instrumentales. Ha trabajado con docentes de escuelas técnicas de la provincia de Buenos Aires y estudiantes de institutos de formación docente, de pregrado y de grado, de profesorado tecnológico y graduados. En este diálogo continuo se reúnen las distintas voces de los actores directos e indirectos y se propone la búsqueda de acciones que complementen la formación del estudiantado de nivel medio en el marco de Prácticas Profesionalizantes. Estas prácticas, definidas por el Consejo Federal de Educación como *“estrategias y actividades formativas que, como parte de la propuesta curricular, tienen como propósito que los estudiantes consoliden, integren y/o amplíen las capacidades y saberes que se corresponden con el perfil profesional en el que se están formando”* permiten una articulación entre los saberes escolares y los requerimientos de los diferentes ámbitos extraescolares. Es así como las *“prácticas profesionalizantes se orientan a*



*producir una vinculación sustantiva entre la formación académica y los requerimientos y emergentes de los sectores científico, tecnológico y socio productivo. Esta vinculación intenta dar respuesta a la problemática derivada de la necesaria relación entre la teoría y la práctica, entre el conocimiento y las habilidades” [4]*

En este trabajo se han propuesto encuentros formativos con los estudiantes de nivel medio. En estos talleres se han retomado contenidos propios de la formación secundaria técnica de la orientación electromecánica. Se ha promovido la aplicación de conocimientos y habilidades para representar piezas mecánicas en 3D a partir de asignaturas incluidas en el diseño curricular, como Dibujo Tecnológico (4° año) y Diseño y Procesamiento Mecánico (6° año). Los contenidos desarrollados por estas asignaturas, ya transitados por los alumnos asistentes, nos han permitido abordar desde el aspecto de diseño de partes mecánicas como también la confección de planos. En ambos casos se trabajó con aplicaciones CAD (Diseño Asistida por computadora) poniendo énfasis en la lectura e interpretación de representaciones gráficas y en la evaluación de la información requerida en un plano.

## 2. DESARROLLO

### 2.1 Mecanismo Cruz de Malta

Se ha optado por un mecanismo de funcionamiento electromecánico y de aplicación industrial para circunscribir el tema de esta experiencia en la especialidad electromecánica. De esta manera se ha seleccionado el mecanismo cruz de Malta también conocido como rueda de Ginebra (*Geneva drive*). Este dispositivo se deriva de los originalmente aplicados en relojes mecánicos, que fueron popularizados en Ginebra, presentes en automatización, robótica, transmisiones mecánicas, transmisiones continuas variables especialmente cuando se trata de transmitir fuerzas y momentos elevados. Son utilizados en reemplazo o en combinación con engranajes. Este mecanismo traduce un movimiento de rotación continuo en un movimiento giratorio intermitente. Una rueda motriz giratoria está equipada con un perno o pivot que entra en una ranura en la otra rueda denominada rueda accionada que lo hace avanzar un paso a la vez. La rueda principal tiene además un disco de bloqueo circular que bloquea en cada paso la rueda giratoria accionada. El paso utilizado da lugar a diferentes combinaciones funcionales de este mecanismo. La configuración más común del accionamiento de rueda de Ginebra es la que la rueda accionada tiene cuatro ranuras (Figura 1), como la utilizada en este trabajo, y por lo tanto el paso de avance es de 90°. Generalizando, si la rueda accionada tiene  $n$  ranuras entonces el paso de avance será de  $360^\circ/n$  para completar una vuelta.



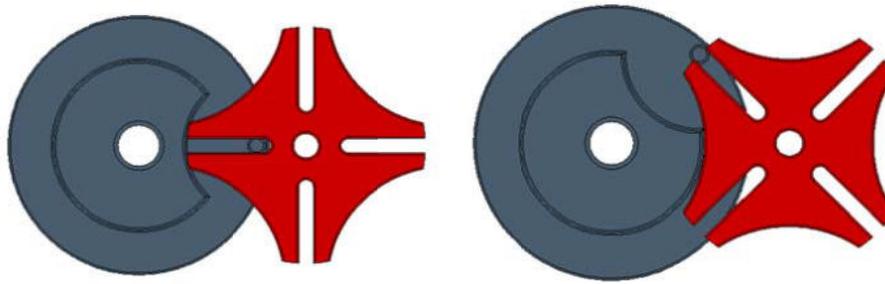


Figura 1: Dos posiciones del mecanismo Cruz de Malta.

Otras aplicaciones, aparte de la relojería, son los proyectores y las cámaras de cine convencionales donde la película avanza fotograma por fotograma y necesariamente tiene que cumplir con un intervalo de detención delante de la ventana de exposición. También se pueden encontrar en el cambio de punta en plotters, dispositivos de muestreo automático, máquinas contadoras de billetes, máquinas etiquetadoras, cambiadores de herramientas en máquinas CNC; torretas de tornos, máquinas de roscar, algunos tipos de mesas giratorias; por mencionar algunas de ellas.

## 2.2. Diseño del mecanismo

Se han considerado varios aspectos para el diseño del mecanismo como modelo didáctico:

Que el mecanismo esté compuesto por la mínima cantidad de piezas para poder llevar a cabo el modelado y ensamble en el tiempo dado de la actividad.

Que permita explorar otras opciones funcionales dentro del mismo mecanismo articulado. (Como el cambio de paso)

Que cada una de las partes que conforman el conjunto posean diferente morfología que permitan abordar diferentes formas de modelado 3D.

Que se pueda imprimir cada pieza optimizando el tiempo.

Que las piezas impresas 3D puedan vincularse y funcionar sin terceros elementos de unión.

De esta manera el mecanismo ha quedado constituido por cinco piezas: una base, con agujeros de sujeción para un futuro anclaje y dos agujeros donde se vinculan los ejes; la cruz propiamente dicha, con cuatro ranuras; la rueda motriz con el pivot y dos ejes, que se vinculan solo por forma para facilitar la posterior fabricación y el ensamble sin terceros elementos. (Figura 2).

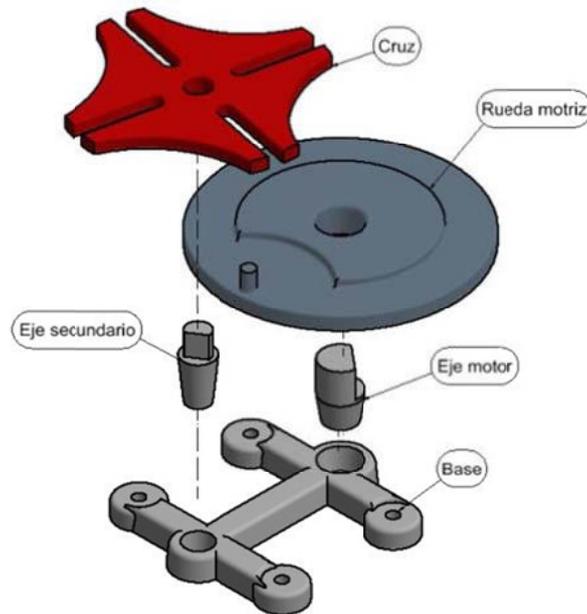


Figura 2: Partes del mecanismo propuesto en vista explotada.

Para llevar a cabo el modelado 3D de cada una de las piezas se ha considerado la siguiente secuencia didáctica:

**Rueda motriz:** se utilizan extrusiones y redondeado de aristas.

El modelado de esta pieza permite reconocer que una sumatoria de extrusiones puede generar una volumetría. Además, ayuda a entender qué es una sección constante y su relación con la operación 3D.

**Cruz:** se utiliza extrusión de un módulo y luego se realiza una copia múltiple de ese módulo. Se suma la extrusión del cilindro central y se genera la cavidad para el eje. Por último, se realiza el redondeado de aristas.

Permite reconocer otra estrategia de modelado 3D como lo es trabajar por módulos (Figura 3). Luego, las diferentes maneras de combinación del módulo generan diferentes disposiciones de geometrías.

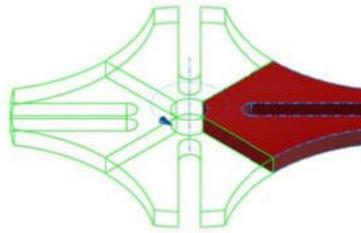


Figura 3: Módulo de la cruz

**Ejes:** se utiliza la operación de revolución y luego se complementa con una extrusión negativa.

Estas piezas permiten explorar la operación de revolución como generatriz de este tipo de volúmenes. Además, posibilita analizar el impacto que tiene variar la forma de la sección o cambiar el eje de revolución en el modelado 3D. Es importante centrarse aquí en la vinculación y las dimensiones de estas piezas con respecto de la base y con las dos ruedas para luego poder definir las al momento de pensar la impresión 3D y lograr el ajuste adecuado entre ellas.

**Base:** se trata de una pieza compleja y debe ser modelada por una sumatoria de operaciones. No hay una operación generatriz que se destaque. En este modelado se utilizan los siguientes comandos: extrusión, extrusión negativa, copia múltiple con matriz, agujereado y redondeado de aristas.

Esta base permite una aproximación al ejercicio de lectura y generación de modelado 3D de piezas de morfologías complejas.

### 2.3. Desarrollo de los Encuentros

Cada encuentro se ha llevado a cabo de la siguiente manera:

**Encuentro 1.** Se ha presentado el marco general de la actividad de Prácticas Profesionalizantes y del espacio y grupo de trabajo. Se explicó el mecanismo y las partes constitutivas. Además, se mencionaron las aplicaciones industriales que tiene este mecanismo considerando el paso del tiempo. Luego, se inició con la lectura del plano de la rueda motriz (Figura 4) y se comenzó el modelado en el módulo IPT del software Autodesk® Inventor™. En esta actividad se hizo hincapié en los paradigmas de modelado 3D mencionando bajo qué tipo de procedimiento de modelado trabaja un software paramétrico. Por último, se mostraron acciones concretas de modelado 3D del software como operaciones de Extrusión y Revolución.

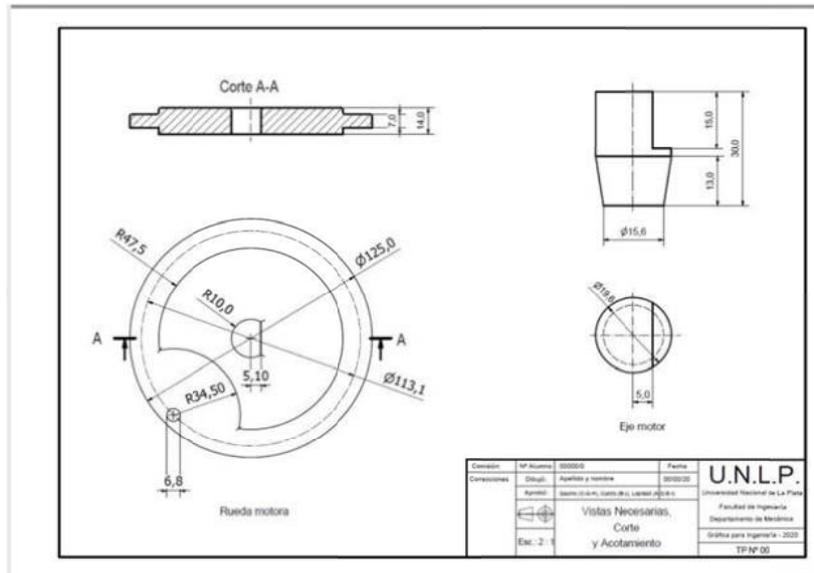


Figura 4: Plano de rueda motriz (izq.) Plano del eje principal (der.)

**Encuentro 2.** Se continuó con la lectura de los planos restantes, en esta oportunidad se inició con la Cruz, luego con los Ejes y por último la Base. Se exploraron las operaciones de modelado como extrusión y revolución reconociendo estas dos operaciones como acciones claves a la hora de la generación de volúmenes básicos. Por último, se realizó un plano técnico para la exploración del módulo Inventor™ *drawing*.

**Encuentro 3.** Se llevó a cabo el ensamble de las partes con el módulo Inventor™ *Assembly* y se realizó la verificación de funcionamiento del mecanismo. De manera introductoria se mostró cómo variando la Cruz y los parámetros involucrados en el paso (n) se puede obtener un funcionamiento diverso.

**Encuentro 4.** Se inició este encuentro con una introducción a la impresión 3D y cómo es el procedimiento de exportación y adecuación de los modelos para ser fabricados con esta tecnología. Se detallaron los parámetros utilizados puntualmente para estas piezas teniendo en cuenta la contracción del material y el ajuste que permita el correcto ensamble. Se han realizado las prácticas de impresión utilizando el programa Repetier-Host y la impresora 3D cartesiana Preta de Vitofeli.

### 3. RESULTADOS

En los encuentros realizados se hizo notorio el compromiso de trabajo por parte del estudiantado y del grupo de docentes involucrados, de ambas instituciones. Durante el desarrollo de los encuentros se han detectado dificultades en la lectura de planos que, como se



menciona anteriormente, debería ser un conocimiento previo trabajado en la materia dibujo tecnológico de 4º año. Para poder concretar esta tarea la lectura de planos se realizó de manera conjunta. También se presentaron problemas a la hora de enfrentarse al módulo de Ensamble por la complejidad operativa de la interfaz. Para lograr mejores resultados es necesario realizar previamente una actividad que permita un acercamiento paulatino a este módulo.

Durante las instancias de modelado y posterior ensamble de las partes del mecanismo presentado, los alumnos han demostrado entusiasmo y pudieron apreciar las potencialidades del programa Autodesk® Inventor™ tanto como una herramienta de ayuda en la concreción de planos como una herramienta de diseño de piezas. Algunos de ellos manifestaron estar interesados en el modelado de trabajos personales.

Respecto a la impresión 3D, si bien fue una actividad introductoria, se materializó todo el trabajo realizado y permitió darles un cierre a las actividades.

#### 4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados mencionados para futuros encuentros se considerará rever la cantidad de horas de trabajo presencial. Si bien el tiempo planteado para estos encuentros estuvo sujeto a las actividades de docencia de grado que este grupo de trabajo ya posee y a los tiempos áulicos del estudiantado, se podrían incluir actividades no presenciales para la ejercitación y maduración de los contenidos dados. Además, se agregarían más actividades y prácticas de impresión 3D para reforzar su uso como herramienta de diseño y proyecto.

Respecto del mecanismo de Cruz de Malta utilizado, permitió un aprendizaje progresivo de modelado 3D. El modelo didáctico desarrollado, bajo las consignas ya dichas, permitió concretar tareas simples y de manera introductoria para luego complejizarlas. Para el corriente año se han planteado nuevos encuentros con estudiantes de la misma institución. Para los mismos se considerará implementar mejoras en el ensamble del mecanismo dado con el fin de facilitar el recorrido del estudiantado por este módulo, aunque no se descarta la implementación de nuevos modelos didácticos de otros mecanismos.

Es importante mencionar que la incorporación de ayudantes alumnos de grado en estas actividades de extensión consolida el recorrido formativo de los mismos. Se tiene pensado sumar más ayudantes a estas actividades.

A futuro, se espera abordar nuevas líneas de acción en el marco de las Prácticas Profesionalizantes que involucren el proceso proyectual como actividad central, en concordancia con los contenidos que la currícula de las escuelas secundarias tienen. Estas



acciones, en combinación con la docencia, impactan positivamente en el trabajo áulico de grado y son enriquecidas por su interacción con la realidad de la comunidad local y permiten reflexionar sobre las propias prácticas, docentes y de extensión, para una constante revisión de los procesos de enseñanza y aprendizaje.

### **AGRADECIMIENTOS**

Un especial reconocimiento al ayudante alumno de la Cátedra Gráfica para Ingeniería: Nicolás Marinangeli (estudiante de la carrera Ing. Electromecánica), que acompañó a este grupo de trabajo en los encuentros realizados.

### **REFERENCIAS**

- [1] Cano Menoni J. A. La extensión universitaria en la transformación de la universidad latinoamericana del siglo XXI: disputas y desafíos. Repositorio digital. CLACSO. 2014.
- [2] Bejarano C. Los actores de la Extensión Universitaria. Un Saber Hacer para la construcción de un enfoque CTS. XI Congreso Iberoamericano de Extensión Universitaria. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina. 2011.
- [3] Tauber F., Giordano C. J. Pensar la extensión universitaria en la UNLP. Proyecto institucional de la Universidad Nacional de La Plata - 2018 - 2022. Documento de trabajo. 2018.
- [4] Ministerio de Educación. Consejo Federal de Educación. Resolución CFE N° 47/08. Anexo I. Lineamientos y criterios para la organización institucional y curricular de la educación de la educación profesional correspondiente a la educación secundaria y educación superior. 2016.



## EVALUACIONES A LIBRO ABIERTO MEDIANTE LA PLATAFORMA MOODLE Y LA MODELIZACIÓN: EL CASO DE LAS CÁTEDRAS CÁLCULO AVANZADO Y ANÁLISIS MATEMÁTICO II EN LA UTN - FRBB

Carlos Alberto Vera<sup>1, 2</sup>, Franco Ezequiel Dotti<sup>2, 3, 5</sup>, Nicolás Virla<sup>1, 2, 5</sup>, María Leticia Solano<sup>3, 4</sup>

<sup>1</sup> Departamento Ing. Mecánica – UTN Facultad Regional Bahía Blanca  
11 de Abril 461 – 8000, Bahía Blanca, Argentina

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada – UTN Facultad Regional Bahía Blanca – CIC  
11 de Abril 461 – 8000, Bahía Blanca, Argentina

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias Básicas – UTN Facultad Regional Bahía Blanca  
11 de Abril 461 – 8000, Bahía Blanca, Argentina

<sup>4</sup> Equipo Interdisciplinario de Apoyo Académico – UTN Facultad Regional Bahía Blanca  
11 de Abril 461 – 8000, Bahía Blanca, Argentina

<sup>5</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

[cvera@frbb.utn.edu.ar](mailto:cvera@frbb.utn.edu.ar), [fdotti@frbb.utn.edu.ar](mailto:fdotti@frbb.utn.edu.ar), [jnirla@frbb.utn.edu.ar](mailto:jnirla@frbb.utn.edu.ar),  
[leticiasolano@frbb.utn.edu.ar](mailto:leticiasolano@frbb.utn.edu.ar)

### RESUMEN

Se presenta el caso de evaluaciones parciales y finales en las Asignaturas Cálculo Avanzado (3° año de la carrera de Ingeniería Mecánica) y Análisis Matemático II (homogénea para las carreras de Ingeniería) en la UTN – Facultad Regional Bahía Blanca.

Se exponen metodologías que desde el 2020 e impulsadas por la pandemia por COVID – 19 posibilitaron diagramar nuevos instrumentos de formación: examen “a libro abierto” y de “respuesta abierta” en entornos virtuales. Estas modalidades, si bien requieren de entrenamiento inicial del estudiantado, permitieron a docentes evaluar en instancias de no presencialidad con aprovechamiento de recursos tecnológicos disponibles (software de cálculo simbólico/numérico, plataformas Moodle y Zoom) acelerando su uso para la continuidad pedagógica.

Estas evaluaciones de una visión más genérica y completa de la aplicación de herramientas de cálculo matemático vinculadas a las actividades de futuros profesionales de la Ingeniería Mecánica, mejoraron de manera sustancial las trayectorias estudiantiles en las Asignaturas objeto de estudio.

A diferencia de las evaluaciones tradicionales, la evaluación a libro abierto logra poner en juego competencias como el razonamiento, argumentación, pensamiento crítico, la distinción y toma de decisiones, así como el encuentro de sentidos más allá de operaciones cognitivas memorísticas, repetitivas e inmediatas de operación matemática. En este caso fueron reemplazadas por implementaciones de los conceptos mediante rutinas del software *Mathematica*.

Por otra parte, las evaluaciones dejan de ser las tradicionales y lineales preguntas sobre el resultado de un cálculo, para promover desde los enunciados la modelización de problemas y por sobre todo, la interpretación física de resultados para más de una situación. Esta ventaja es la más representativa de la pregunta tipo Kprime de la plataforma Moodle.

Se desarrollan estos dos casos articulando las metodologías implementadas en entornos virtuales.

**Palabras Clave:** *Evaluaciones a Libro Abierto; Entornos Virtuales; Software; Continuidad Pedagógica.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es compartir las experiencias desarrolladas en la Facultad Regional Bahía Blanca de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) sobre diferentes modelos de evaluaciones que, producto de la pandemia por COVID – 19, se han trabajado en las Asignaturas de Análisis Matemático II y de Cálculo Avanzado de la carrera de Ingeniería Mecánica, donde, pasado este período crítico, se siguen mejorando en sus secuencias didácticas y diversificación de actividades de evaluación. Se exponen dos modalidades metodológicas: en el caso de Análisis Matemático II, la evaluación está directamente relacionada a la modelización y respuestas abiertas; en tanto que en Cálculo Avanzado con evaluaciones a libro abierto.

Se ofrecen resultados de una encuesta administrada a una muestra representativa de estudiantes 2020-2022 cursantes de Cálculo Avanzado para disponer de retroalimentación, testimonios y comentarios que enriquezcan este caso.

### 1.1. Concepciones sobre aprendizaje y evaluaciones en la carrera de Ingeniería Mecánica de la UTN

En un todo de acuerdo con la reforma de los diseños curriculares de Ingeniería que aprobara la Universidad Tecnológica Nacional, el diseño de la carrera de Ingeniería Mecánica, Ordenanza UTN CS 1901 [1], indica de manera muy adecuada que *“El aprendizaje se concibe como un proceso individual y social a la vez, es de carácter situado y se produce en el marco de procesos de interacción mediados en contextos específicos. La visión situada del aprendizaje da cuenta de que lejos de ser un proceso individual, se produce en el marco de la participación de los sujetos en actividades diversas. Es diverso, heterogéneo y distribuido, gradual y progresivo. Involucra la afectividad, el pensamiento y la acción de modo inseparable”*. Por ello *“el enfoque didáctico que se propone para la formación en Ingeniería Mecánica es importante considerar las formas de seleccionar y organizar los distintos saberes a enseñar, y las estrategias de enseñanza y de evaluación a privilegiar*.

En esa dirección, las evaluaciones se tornan en un desafío para el cuerpo docente de la carrera. Siguiendo la lectura de la Ordenanza 1901 y en lo referente a las evaluaciones se cita que *“se hace necesaria la enunciación de las formas e instrumentos de evaluación a utilizar para poder establecer la coherencia con las competencias indicadas en los contenidos mínimos de la asignatura... En este contexto, los y las docentes de carreras de Ingeniería se enfrentan al reto de plantear estrategias de enseñanza que promuevan el desarrollo de las competencias de egreso establecidas. Históricamente, la Universidad se ha dedicado a la enseñanza y evaluación de conocimientos. Sin embargo, las competencias hacen referencia a la capacidad que tienen quienes estudian para abordar con cierto éxito situaciones problemáticas en un contexto*



*académico o profesional dado. Teniendo en cuenta que estas competencias se desarrollan o afianzan por medio de la ejercitación, para contribuir al proceso de formación de las mismas, es necesario que quien ejerza la docencia seleccione las técnicas con especial énfasis en la resolución de problemas, estudios de casos, trabajo cooperativo, etc. tareas en las que para su ejecución exigen que el y la estudiante pongan en juego capacidades y competencias...*

## **1.2. Las evaluaciones a libro abierto y de respuesta abierta: caracterización en las Asignaturas intervinientes, ventajas y dificultades**

Sin lugar a dudas la situación de pandemia vivida entre 2020 y 2021 fue impulso para la introducción de cambios de concepción en los procesos de enseñanza aprendizaje. Los cuerpos docentes han tenido que dar respuesta a la continuidad pedagógica, desde el dictado de clases hasta las evaluaciones, entendidas en el marco de este trabajo como procesuales y continuas. Así, los procesos evaluativos debieron reorientarse, siendo una de las opciones la evaluación a libro abierto y otra, de ítems de respuesta abierta administradas en las Asignaturas intervinientes.

La evaluación a libro abierto, conocida como *open – book examinations (OBE)* [2] es una instancia en la que se permite a estudiantes, utilizar material bibliográfico en general (libros, internet, apuntes propios, rutinas de cálculo, etc.). La modalidad puede ser presencial o en línea en un horario establecido previamente y con una duración máxima prevista de entrega.

A diferencia de los exámenes tradicionales que podrían denominarse *a libro cerrado*, la modalidad a libro abierto evalúa la capacidad del estudiantado de aplicar los conocimientos a problemas concretos, habilidades cognitivas, razonamiento crítico y pone en juego competencias para la resolución de problemas [3]. En todos los casos se solicita la justificación de la respuesta, que seguramente no obra en algún material que consulta en el tiempo de ejecución del examen.

Su principal ventaja es que se basan exclusivamente en casos prácticos sobre los que se formulan las preguntas a responder y proyectan a situaciones que deberán enfrentar y afrontar en el rol profesional. Es decir, que ante situaciones problemáticas deberán consultar información diversa para razonar y argumentar soluciones.

Este tipo de examen también presenta desventajas o un mayor nivel de complejidad: desde su elaboración, que debe ser estratégica y cuidadosa, hasta la formulación de preguntas, que en casos puede quedar abierta, evaluando así, la puesta en marcha de competencias más que de conocimientos abstractos memorísticos. Otra cuestión a considerar es que generalmente son exámenes novedosos para el estudiantado y puede caerse en el pensamiento de que no requieren de horas de preparación y estudio. Este constituye un error en la praxis que lleva a mayores índices de dificultad, factor sorpresa y, en los primeros momentos de aplicación, a discusiones a raíz de la brecha sobre *“lo que se quiso preguntar”* y *“lo que en realidad se contestó”*.



Este tipo de evaluación se lleva adelante sostenida en las potencialidades de la plataforma Moodle que opera el Aula Virtual de la Asignatura Cálculo Avanzado de la carrera de Ingeniería Mecánica.

Los exámenes de respuesta abierta, como los anteriores, son exámenes que demandan de estudiantes respuestas amplias, diversas y elaboradas, siendo también otras las variables intervinientes en el aprendizaje: cognitivas, metacognitivas, afectivas, sociales, otras. En particular suelen ser escritos, pero también existen antecedentes de exámenes orales. Varían en su extensión y se ajustan a consignas más que a preguntas. Por esto se exige que quienes lo desarrollen, relacionen un amplio conjunto de conocimientos, no ya solamente de la Asignatura en cuestión, sino más bien de otras en articulación con ésta.

Las principales características de este tipo de evaluación son: flexibilidad; logran evaluar conceptos, contenidos y procedimientos; se adaptan a la articulación e integración de contenidos interáreas, exigen del estudiantado el aprendizaje, desarrollo y aplicación de competencias de lecto-escritura y oralidad, entre otras.

Dadas estas características, son indicadas usualmente para articular en un mismo examen saberes propios de una Asignatura, al tiempo de pedir que se tomen conocimientos de otras para su concreción.

Una dificultad suele aparecer en su corrección, ya que requiere de docentes con formación en más de una disciplina, por las características de transversalidad. Otra desventaja, es que el tiempo de corrección que insume puede ser más extenso que el examen tradicional.

Para el caso particular de la Asignatura Análisis Matemático II, este tipo de examen incluyó la elaboración de una presentación con recursos audiovisuales, un video de estudiantes para la Aprobación Directa de la Asignatura.

## **2. EXPERIENCIAS EN LA FACULTAD REGIONAL BAHÍA BLANCA**

### **2.1 Evaluaciones a libro abierto en Cálculo Avanzado en 3° año de Ingeniería Mecánica**

Como se viene comentando, la cátedra Cálculo Avanzado inició acciones para promover evaluaciones a través de la plataforma Moodle que fueran consistentes con las competencias a desarrollar, el cursado, la Aprobación Directa y exámenes finales de la Asignatura.

De las múltiples herramientas que la plataforma aporta, se decidió administrar cuestionarios en línea utilizando el tipo de pregunta "Kprime": de opción múltiple y en un enunciado con cuatro opciones que deben ser respondidas en su totalidad como "Verdadera" o "Falsa". De las tres opciones que presentan este tipo de preguntas, se optó por la de puntuación "Subpuntos", donde cada opción otorga 0.25 puntos, siendo 0 (cero) el mínimo y 1 (uno) el máximo.



Este tipo de preguntas se elaboraron para los objetos de conocimiento de Cálculo en Variable Compleja, Transformada de Laplace y Análisis de Fourier, donde los cálculos y la manipulación algebraica mediante técnicas algebraicas son de dificultad y complejidad significativa, y al ser abordadas a través de un software de cálculo simbólico, pasan a ser de más sencilla y precisa resolución.

El siguiente ejemplo versa sobre una pregunta para el objeto de conocimiento *Cálculo en Variable Compleja*.

Dada

$$f(z) = \frac{1}{(z+2)^2}$$

, determinar el valor de su integral a lo largo de la curva que se indica.

Verdadero	Falso		
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Es 0 para toda curva cerrada que contenga al punto $z = -2$	
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Si	
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Es $2\pi i$ para toda curva cerrada que contenga al punto $z = -2$	$\gamma =  z+1  = 3$
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Es $\pi i$ integrada sobre el arco de circunferencia	
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	desde $z_1 = (0,0)$ hasta $z_2 = (-4,0)$	$\gamma =  z+2  = 2$
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Es $2\pi i$ para toda curva cerrada que contenga al punto $z = -2$	

Figura 1: Ejemplo de pregunta para el objeto de conocimiento Cálculo en Variable Compleja.

Se muestra a continuación un ejemplo de pregunta para un examen del tema *Transformada de Laplace*.

Sea un sistema mecánico amortiguado y forzado exteriormente que responde a la EDO

$$3y'' + y' + 4y = 5, \text{ con } y(0) = 0, y'(0) = 0.$$

Verdadero	Falso		
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	La Función Transferencia FT =	$\frac{1}{s(3s^2 + s + 4)}$
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	La solución del problema es exponencial.	
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	La solución se estabiliza para $y = 0$ desde $t = 20$	
<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	$Y(s) =$	$\frac{1}{s(3s^2 + s + 4)}$

Figura 2: Ejemplo de pregunta Kprime para el tema Transformada de Laplace

Así, sobre una misma pregunta, el tipo de pregunta Kprime ofrece la posibilidad de contestar cuatro consignas. Para su respuesta se deberá resolver primero la ecuación diferencial, graficar la respuesta y luego indicar para cada consigna la respuesta correcta. Esta modalidad requiere realizar para la respuesta a cada pregunta de resoluciones sucesivas del problema, con la ayuda de software de cálculo simbólico o a través de manipulaciones algebraicas (no recomendable).

No obstante, el uso de software de cálculo simbólico es necesario que también disponga de conocimientos relacionados con la temática, ya que las consignas a resolver requieren de manejo no sólo matemático, sino de aplicación de la herramienta, en este caso, Transformada de Laplace. Yendo a un ejemplo concreto, las consignas de la pregunta indicada abarcan consideraciones propias del manejo algebraico ( $Y(s)$ , Función Transferencia) así como también de respuestas sobre la solución obtenida y el comportamiento del sistema desde el punto físico.

Otro ejemplo es para el tema Series de Fourier, en el cual las preguntas se realizan sobre una aplicación, que son los espectros de frecuencia

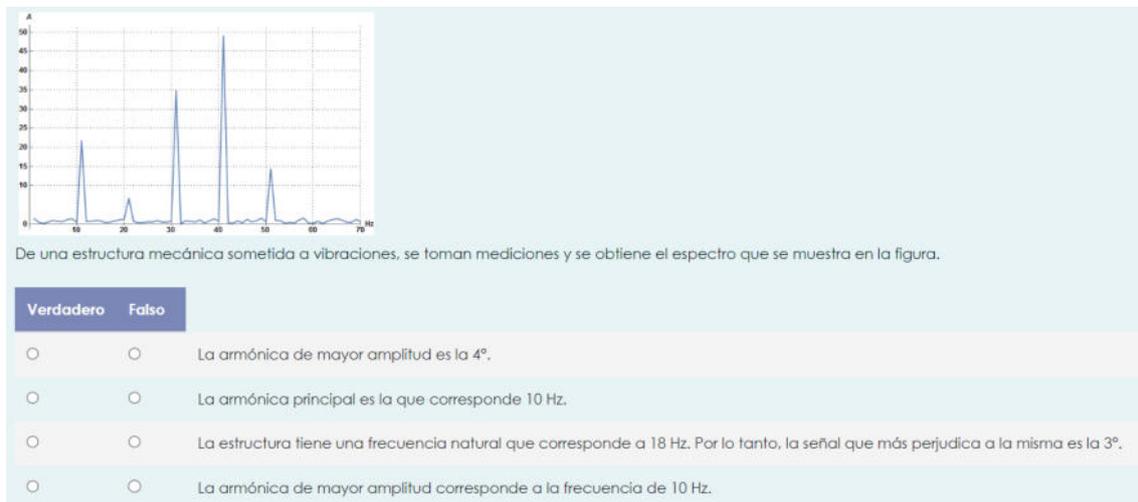


Figura 3: Ejemplo de pregunta Kprime para el tema Análisis de Fourier

Como se observa, este caso no requiere del uso de software de cálculo simbólico, sin embargo, se deben tener en cuenta los conceptos teóricos sobre la aplicación y uso del análisis de Fourier para cada respuesta. Estos conceptos son los que se refuerzan mediante actividades prácticas de medición de vibraciones en el laboratorio de Ingeniería Mecánica.

## 2. 2 Evaluaciones a Consigna Abierta en Análisis Matemático II

En Análisis Matemático II se implementa desde 2020 el examen de tipo respuesta abierta para la evaluación durante la instancia de Aprobación Directa. Esta nueva implementación vino a reemplazar a la evaluación tradicional con examen teórico-práctico -en oportunidades no del todo



articulado- y la modalidad fue adoptada antes de 2020 pero, como en la Asignatura Cálculo Avanzado, el cambio se vio impulsado por el marco de emergencia sanitaria.

En orden de alcanzar la instancia de Aprobación Directa, el estudiantado debe completar la aprobación del cursado de la Asignatura y superar un examen teórico del tipo Verdadero/Falso con justificación sobre los contenidos evaluados durante el cuatrimestre.

La Aprobación Directa se reserva para la evaluación de los contenidos integradores de la Asignatura, centrados principalmente en el Cálculo Vectorial y los Teoremas de Green, Stokes y Gauss. En esencia, el resultado de aprendizaje esperado en esta instancia corresponde a que estudiantes resulten capaces de componer los conceptos del cálculo diferencial e integral, multivariable y vectorial, para resolver problemas de ingeniería, reconociendo situaciones donde estos teoremas resultan ser una herramienta de utilidad.

Se propone entonces la libre elección de algún tema o problema en el que sea posible aplicar los conceptos asociados a los contenidos integradores. Desde la Asignatura se les sugiere como guía para la selección del problema a abordar, la posibilidad de alguna aplicación simple de ingeniería, o algún problema matemático que pueda ser replicado a partir de un libro, artículo científico o internet. No obstante, se destaca la condición optativa de la mencionada guía, pudiendo proponer cada estudiante cualquier otra idea o implementación de interés. Aunque en última instancia la decisión sobre tema y enfoque corre exclusivamente por cuenta de las y los estudiantes, la guía de la cátedra consiste en la evaluación de cada propuesta en términos de complejidad y capacidad de abordaje dentro del límite de tiempo establecido para la entrega, fijada en cuatro semanas. El abordaje del problema elegido puede ser individual o grupal, lo que también queda a elección de los y las estudiantes. En este punto debe destacarse un aspecto clave: durante el cursado de la Asignatura. También, el cuerpo docente de la cátedra no se limita a introducir las herramientas matemáticas en forma abstracta, sino que siempre acompaña con ejemplificación referida a aplicaciones directas de la física y/o la ingeniería. Como ejemplo cabe mencionar la obtención de las expresiones del Teorema de Green empleando conceptos de Mecánica de los Fluidos [4], o la demostración de la Ley de Conservación de la Energía empleando el Teorema Fundamental del Cálculo Vectorial y la Segunda Ley de Newton [5]. Este tipo de práctica permite que las y los estudiantes cuenten con herramientas de decisión a la hora de seleccionar un problema o temática para su trabajo de Aprobación Directa.

Para la resolución, demostración y/o implementación del problema planteado, se sugiere el empleo del programa *Mathematica* como herramienta complementaria durante el dictado del curso y utilizado por docentes y estudiantes tanto para ilustraciones en dos y tres dimensiones como para la resolución simbólica general y numérica de problemas.

Como entregables del examen se establece un archivo de *Mathematica* conteniendo las rutinas del planteamiento, desarrollo y solución del problema abordado; y una presentación de

*PowerPoint* acerca del trabajo elaborado. El principal medio de verificación de la evaluación es una presentación grabada en video, que debe ser subida a la plataforma YouTube, y en la cual individual o grupalmente deberán presentar y describir el problema, como así también comentar la metodología de resolución y los resultados obtenidos. La presentación se realiza con la guía de la serie de diapositivas de *PowerPoint*, con un tiempo máximo de extensión de 15 (quince) minutos. Así, es posible evaluar el manejo de los conceptos de parte de estudiantes, su noción de la relación de estos conceptos con la ingeniería, sus conocimientos del programa *Mathematica*, su aptitud para comunicar sus propias ideas y su capacidad de análisis, argumentación y síntesis, entre otras variables.

Habiendo realizado todo esto, podemos calcular las 3 integrales que nos darán el flujo

$$\text{CirculacionC1} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \underset{\text{producto escalar}}{\text{Dot}[\text{Cpotencial}[x[t], y[t], z[t]], \underset{\text{deriva}}{D[\text{C1}[t], t]}]} dt$$

$$\text{CirculacionC2} = \int_0^1 \underset{\text{producto escalar}}{\text{Dot}[\text{Cpotencial}[x[t], y[t], z[t]], \underset{\text{deriva}}{D[\text{C2}[t], t]}]} dt$$

$$\text{CirculacionC3} = \int_0^1 \underset{\text{producto escalar}}{\text{Dot}[\text{Cpotencial}[x[t], y[t], z[t]], \underset{\text{deriva}}{D[\text{C3}[t], t]}]} dt$$

Y por lo tanto

$$\text{FlujoC} = \text{CirculacionC1} + -1 * \text{CirculacionC2} + \text{CirculacionC3}$$

$$-3 + \frac{\pi}{2}$$

Lo que nos permite comprobar que era posible calcular el flujo de estas 3 formas distintas

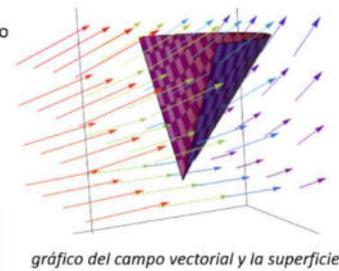
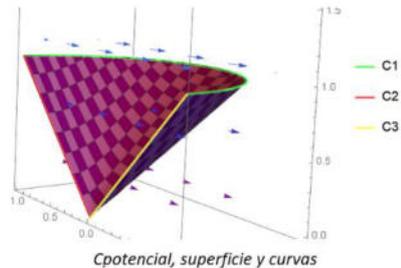


gráfico del campo vectorial y la superficie



Cpotencial, superficie y curvas

Figura 4: Captura de PowerPoint. Cálculo de caudal másico de fluido a través de una superficie, empleando los conceptos de flujo de campos vectoriales, Teorema de Stokes y Teorema de Gauss.

Las Figuras 4 a 6 muestran ejemplos de las diferentes implementaciones realizadas por estudiantes en el marco de esta metodología de consigna abierta. Si bien las temáticas abordadas resultan diversas, los problemas más elegidos por estudiantes corresponden a cálculos de vorticidad y flujo en campos de velocidades de fluidos, estudio de campos gravitacionales, electromagnéticos y friccionales desde el enfoque de conservación de la energía y aplicaciones de las leyes de Maxwell.

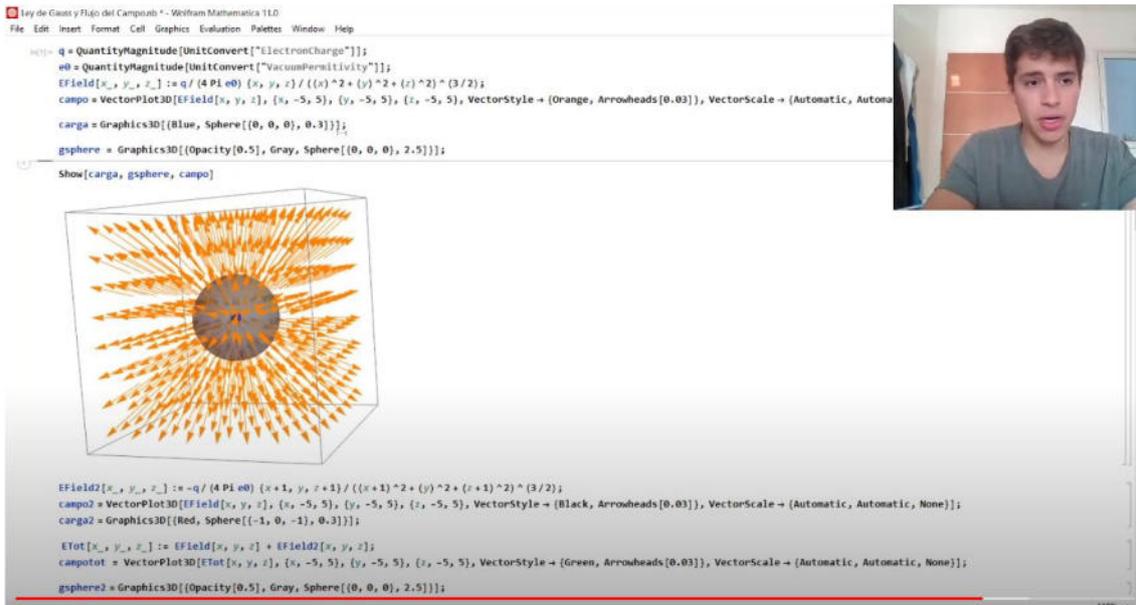


Figura 5. Captura de video. Verificación de la Ley de Gauss, empleando los conceptos de flujo de campos vectoriales, Teorema de Stokes y Teorema de Gauss.

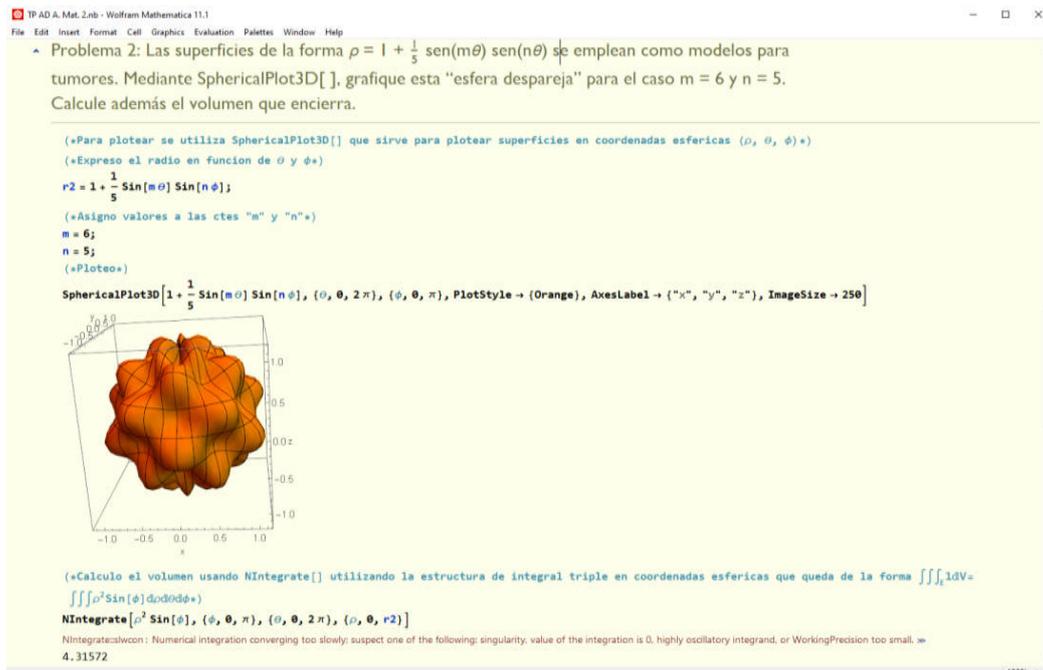


Figura 6. Captura de la interfaz de *Mathematica*. Estudio simplificado de modelado del crecimiento de tumores, empleando los teoremas integradores y la teoría de parametrización de superficies.

## 2.3. Sobre resultados y análisis de resultados de las metodologías implementadas

### 2.3.1. Cálculo Avanzado y la percepción estudiantil: las encuestas



Desde esta Asignatura y como se mencionó, la metodología de evaluación a libro abierto y en línea propuesta en exámenes parciales y finales buscó recabar la percepción y valoración de estudiantes del período 2020 – 2022 a través de una encuesta breve, de 14 (catorce) preguntas, elaborada en dimensiones que incluyen variables: temporales, ubicación en el plan de estudios, propia preparación para exámenes, variables comportamentales ante consignas, de ejecución, cognitivas, empleo de materiales de estudio, feedback, afianzamiento de conceptos y propuestas para disponer de indicadores que garanticen la mejora continua, la réplica metodológica y la evaluación de su utilidad como experiencia de aprendizaje.

Así, quienes respondieron a la encuesta, una muestra de 34 (treinta y cuatro) estudiantes que habrían aprobado la Asignatura, valora en general la experiencia de evaluación, que no aparece en el común de las Asignaturas de la carrera. La propuesta puede aparecer con factores subjetivos que inciden en lo comportamental generando incertidumbre y expectativas de complejidad pero la novedad, la ejecución y resolución se percibe como óptima y/o de adecuada complejidad. Les parece propicio el uso de las nuevas tecnologías en evaluación y el Software de cálculo numérico.

Apuntes de la cátedra, bibliografía, apuntes propios y otros fueron el material de estudio más utilizado pudiendo inferir acerca del factor confianza en la cátedra, la elaboración de la evaluación y la posterior resolución de los exámenes sin factores sorpresa vistos como interferencia.

Aspectos importantes son aquellos como los de haber obtenido feedback sobre sus respuestas y desarrollo general en aquellos temas donde existieron dudas y donde se debieron afianzar conocimientos, así como la importancia de este tipo de evaluación en la comprensión de conceptos y respuestas.

Recomiendan que se sigan utilizando evaluaciones en línea y como recurso sin reemplazar, en algunas ocasiones o para algunas temáticas, a la evaluación tradicional.

De esto puede desprenderse como valorable por el cuerpo docente, la aproximación al cumplimiento de los propósitos de la Asignatura, propósitos docentes, objetos de conocimiento y la concordancia y consistencia interna con los instrumentos de evaluación, también en la formación de profesionales de la ingeniería que busquen soluciones a problemas prácticos y reales desde lo teórico y desplegando diversas conductas que les permitan operacionalizar en ambientes complejos como aquellos en los que asistimos.

### **2.3.2. Análisis Matemático II**

Los resultados obtenidos han sido altamente satisfactorios desde el punto de vista de la cátedra. Los grupos de estudiantes muestran en su mayoría un entusiasmo en el desarrollo de un proyecto que les resulta propio en esencia. Por su parte, la consigna abierta y la respuesta abierta resultan ser un enfoque que contribuye a la flexibilización del aprendizaje en general. En cuanto a la asignatura Análisis Matemático II en particular, la estrategia implementada permite que el estudiantado certifique conocimientos mediante su aplicación directa. Una vez concluidos los



proyectos, desde la cátedra se percibe en general una afirmación del convencimiento de parte de estudiantes en cuanto a la importancia de la matemática en términos de su utilización como herramienta para el abordaje de problemas del mundo real asociados a su futura profesión. Este aspecto resulta clave para la formación global de profesionales de la ingeniería capaces de desempeñarse con solvencia en el aspecto técnico, pero también -y aquí la introducción de la novedad- en el aspecto innovador, que es donde en mayor medida se requieren las herramientas de conocimiento brindadas en esta Asignatura de Análisis Matemático II.

### 3. CONCLUSIONES

Hasta aquí, la experiencia de dos Cátedras.

Los enfoques didácticos propuestos para la formación de futuros profesionales de la Ingeniería Mecánica permitieron seleccionar objetos de conocimiento, saberes, estrategias, secuencias didácticas y de evaluación que, como se expuso, tienen correlación con las competencias a desarrollar por los contenidos mínimos de cada una de las Asignaturas y su integración al plan de estudios de la Carrera.

El desarrollo de este escrito, así como el intercambio y articulación de la viñeta de caso dada por la praxis del cuerpo docente de cada una de las Asignaturas participantes aquí, llevan a comunes denominadores a modo de conclusión y también, a la apertura de nuevas líneas de investigación y profundización de las existentes.

Seguramente queden interrogantes que puedan ser planteados en la invitación a que los autores fundamenten aún más la complejidad de administrar evaluaciones *a libro abierto y a respuesta abierta*; primero, como proceso y segundo, en Asignaturas donde resulta poco convencional su aplicación metodológica como en las intervinientes. De eso se tratan algunas estrategias y líneas de acción que se desprenden de la propuesta de las ordenanzas de la UTN, desde el aprendizaje como proceso individual, social y situado. Sobre esta última adjetivación y yendo a lo situado, no se debe olvidar la complejidad misma que imprimió a la sociedad la pandemia como telón de fondo o como figura, de acuerdo a la percepción y vivencia de cada estudiante en contexto de aislamiento, con factores subjetivos como los que contempla la cultura universitaria uteniana en la formación integral de profesionales.

No debemos perder de vista que las evaluaciones implementadas agudizan su irrupción en el contexto de entornos virtuales donde se requería de la continuidad pedagógica y el uso de herramientas efectivas para la evaluación como proceso. Se considera que desde las Asignaturas intervinientes, el desafío fue entonces doble: dar continuidad sin tender a acreditar sólo conocimientos de manera mecánica, memorística y lineal.

Este tipo de metodologías y exámenes constituyen herramientas valorables desde una concepción de evaluación formativa, donde la centralidad de estudiantes es el ingrediente



principal. La guía y el rol docente orienta con su feedback la apropiación del proceso de aprendizaje. Si la herramienta de evaluación ayuda, promueve, colabora y refuerza el proceso de aprender, el conocimiento, el desarrollo y la puesta en marcha de competencias, puede decirse que la evaluación estaría cumpliendo su cometido dispuesto al aprendizaje.

Se considera que la ejercitación y la valoración estudiantil de lo implementado, así como el criterio docente es el faro para la mejora continua y la profundización de nuevas maneras de evaluar y poner en marcha capacidades y competencias.

Las herramientas implementadas son procesuales y pueden ser incorporadas, compartidas y socializadas en programas de formación docente [6] relativos a desarrollo competencial, a estrategias de aprendizaje y a evaluación en entornos virtuales considerando someter a mayores estándares de evaluación estas mismas propuestas para la mejora de la calidad educativa en la

## REFERENCIAS

- [1] Ordenanza 1901 2022 [Consejo Superior - Universidad Tecnológica Nacional] Diseño Curricular de Ingeniería Mecánica - Plan 2023. 5 de octubre de 2022.
- [2] Centre for Teaching and Learning. A guide for academics - open book exams. Newcastle, Australia:University of Newcastle.  
[https://www.newcastle.edu.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0006/268980/Open-Book-Exams.pdf](https://www.newcastle.edu.au/_data/assets/pdf_file/0006/268980/Open-Book-Exams.pdf)
- [3] Anijovich R. (comp.), Camilloni A. R. W. de, Capelletti G., Hoffmann J., Katzkowicz R., Mottier Lopez. *La evaluación significativa*. Buenos Aires, Paidós, 2010
- [4] Dotti, F. [Franco Dotti] (29 de junio de 2020) AM2 Clase 25c Teorema de Green desde la Mecánica de fluidos. [Video] YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=1HaOlhvEh\\_g](https://www.youtube.com/watch?v=1HaOlhvEh_g)
- [5] Dotti, F. [Franco Dotti] (6 de junio de 2020) AM2 Clase22g Trabajo y energía cinética [Video] YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=wzUvJgP-Mc> y (9 de junio de 2020) AM2 Clase23e Trabajo, energía potencial y Ley de Conservación de la Energía. [Video] YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=JyAUkUQY-kQ>
- [6] Cura R.O, Solano, M.L., Vera, C.A. *Programa Central de Formación de Competencias en las Carreras de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca*. Bahía Blanca, 2021



## DESARROLLO E INSTRUMENTACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS TERMOMECAÑICOS PARA LA GENERACIÓN DE COMPETENCIAS EN EL ALUMNO DE INGENIERÍA

Sebastián L. Russillo<sup>1</sup>, Matías W. Orué<sup>2</sup>, Rodrigo M. Agosta<sup>3</sup>, Andrés Giuliani<sup>4</sup>,  
Justina M. Chavez<sup>5</sup> y Víctor H.J. Marelli<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Ing. Mecánica Aplicada - Dto. Acad. de Mecánica – UTN FR Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina- [srussillo@frsf.utn.edu.ar](mailto:srussillo@frsf.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> Grupo de Inv. en Enseñanza de la Ing.- Dto. Acad. de Mecánica – UTN FR Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina - [morue@frsf.utn.edu.ar](mailto:morue@frsf.utn.edu.ar)

<sup>3</sup> Grupo de Inv. en Enseñanza de la Ing.- Dto. Acad. de Mecánica – UTN FR Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina - [ragosta@frsf.utn.edu.ar](mailto:ragosta@frsf.utn.edu.ar)

<sup>4</sup> Grupo de Ing. Mecánica Aplicada - Dto. Acad. de Mecánica – UTN FR Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina - [agiuliani@frsf.utn.edu.ar](mailto:agiuliani@frsf.utn.edu.ar)

<sup>5</sup> Secretaría Académica – UTN Facultad Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina- [jchavesgalizzi@frsf.utn.edu.ar](mailto:jchavesgalizzi@frsf.utn.edu.ar)

<sup>6</sup> Grupo de Ing. Mecánica Aplicada - Dto. Acad. de Mecánica – UTN FR Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina - [vmarelli@frsf.utn.edu.ar](mailto:vmarelli@frsf.utn.edu.ar)

### RESUMEN

El desarrollo tecnológico no sólo está cambiando la economía, sino también la naturaleza de los mercados de trabajo y de la mano de obra. En este contexto, las instalaciones termomecánicas siguen ocupando un espacio importante en la industria, particularmente, las instalaciones térmicas destinadas a la generación y transporte de calor entre fluidos. La generación y uso de vapor de agua para fines técnicos tiene una participación central en el ámbito de las industrias de proceso (calefacción de procesos en elaboración de lácteos, frigoríficos, plantas químicas, bebidas y alimenticias en general).

Para el funcionamiento seguro y eficiente de las mismas debe tenerse un conocimiento completo y tecnológicamente actualizado de los elementos que la conforman y su comportamiento bajo diferentes condiciones operativas.

Este trabajo pretende poner en evidencia las ventajas formativas de tener un banco de ensayos termomecánicos en las carreras de Ingeniería de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN - FRSF), ya que representa un área de gran interés por su aplicación en la industria regional para los futuros profesionales que se forman en dicha Casa de estudios.

Este desarrollo se enmarca en el Proyecto de Investigación “Desarrollo e instrumentación de un banco de ensayos termomecánicos para la generación de competencias en el alumno de ingeniería con perspectiva hacia la transformación digital”, que se encuentra en etapa inicial, por lo que el mismo aborda de forma exploratoria las características de diseño y constructivas necesarias, para optimizar los recursos en la búsqueda del enfoque tecnológico aplicado que integre el conocimiento teórico adquirido en el aula, es decir, articular en el proceso de enseñanza-aprendizaje los conceptos teóricos con las experiencias que pueden ejemplificar, en un contexto real, la problemática que los alumnos de ingeniería podrían enfrentar en el espacio laboral profesional.

**Palabras Clave:** Termomecánica; Digitalización; Competencias; Enseñanza.



## 1. INTRODUCCIÓN

Las instalaciones térmicas ocupan un espacio importante en la mayoría de los sectores de consumo, ya sean del tipo industrial o el de los edificios públicos y comerciales. De acuerdo con el artículo publicado Renewables 2021 Global Status Report [1], los usos de energía térmica en 2018, que incluyen calentamiento de agua y calefacción, refrigeración de espacios y calor de procesos industriales, representaron más de la mitad (51%) del total de la energía final que se consume. Asimismo, según datos de la IEA [2], el 32% del consumo mundial de energía se emplea en la industria, y el 74% de esas necesidades energéticas en la industria son de calor. Las instalaciones térmicas destinadas a la generación y transporte de calor utilizan fluidos de distinta naturaleza para llevar a cabo un sinnúmero de operaciones y procesos. El vapor, el agua caliente y el aceite térmico sirven de medio calefactor, aunque el vapor saturado se considera el medio más eficaz de transmitir el calor en procesos industriales. A este le siguen los aceites térmicos y el agua caliente. Esta última suele tener más aplicaciones en sistemas de climatización de grandes espacios [3].

La generación y uso de vapor de agua y agua caliente para fines técnicos continúa teniendo una gran participación en el ámbito de las industrias de proceso de la zona de influencia de la FRSF\_UTN. Ejemplo de esto lo representan las diversas empresas dedicadas a la elaboración de productos lácteos, frigoríficos de vacunos, porcinos y aves, plantas químicas, de elaboración de bebidas y alimenticias en general con las que cuenta nuestra región [4]. En ellas es posible encontrar equipos generadores de calor, sistemas de enfriamiento, bombas centrífugas y equipos de proceso que fundamentalmente funcionan como intercambiadores de calor.

Los objetivos globales de emisiones de CO<sub>2</sub> de la Agenda 2030 [5] y los costos energéticos demandan ciclos de mejora continua que afecten a la eficiencia de estas instalaciones, motivo por el cual la industria debe optimizar sus procesos y alcanzar un mayor ahorro en el consumo de los recursos. La clave para lograr estos objetivos reside en tener procesos cada vez más automatizados y contar con una buena monitorización de los consumos para su posterior análisis, de forma que se puedan determinar las oportunidades de mejora. En adición, para el funcionamiento seguro y eficiente de estas instalaciones, debe contarse con la posibilidad de regulación, control y medición de los parámetros de funcionamiento, además de un conocimiento completo y actualizado de los elementos que la conforman y su comportamiento bajo diferentes condiciones operativas. En este sentido, un resultado de aprendizaje que se podría incorporar en la planificación de las asignaturas destinatarias del proyecto sería optimizar el sistema en todas sus etapas; desde el muestreo de las variables físicas, hasta la generación de indicadores por medio de gráficas representativas de las dinámicas del sistema, en cada una de sus partes y en tiempo real [6].



Por otra parte, la sociedad demanda a las instituciones de educación superior respuestas a la problemática de globalización y el desarrollo tecnológico; ya a fines del siglo pasado en Europa se genera el Espacio Europeo de Educación Superior [7], a partir de allí inician cambios necesarios para que los estudiantes desarrollen la capacidad de “aprender a aprender”, y aparece el proyecto Tuning [8] para la formación basada en competencias [9]. Actualmente, los docentes de ingeniería conocemos las instituciones y organismos que diseñan y proponen bases normativas y recomendaciones para mejoras en los procesos de enseñanza y aprendizaje; tal es así, y de forma preponderante en el ambiente de las carreras de ingeniería, que el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI), concibe documentos para formalizar los conceptos de competencias en el ámbito específico de la ingeniería [10], y en 2018 presentó su reconocido Libro Rojo con el objetivo de actualizar y consolidar el actual modelo de formación de ingenieros [11]. Por este motivo, para la enseñanza de la ingeniería, es conveniente contar con equipamiento moderno de tal manera que las universidades se conviertan en un centro de formación integral para diferentes niveles de conocimiento y garanticen el egreso de profesionales capaces de insertarse y desempeñarse en los contextos laborales actuales [12]; por lo que el laboratorio tiene un rol fundamental para la integración de la teoría y la experimentación [13].

## 2. OBJETIVOS

Mediante este trabajo, se busca mostrar y poner en debate los resultados preliminares alcanzados en las etapas de documentación y diseño desarrolladas del proyecto del banco de ensayos, siendo el objetivo principal del proyecto lograr un diseño que combine conceptos tradicionales de termodinámica con nuevas tecnologías de medición y visualización gráfica. De esta forma, el banco de ensayos permitirá realizar pruebas en equipos de intercambio de calor y estudiar su comportamiento real.

Además, su implementación posibilitará recopilar información y analizar variables relacionadas con el funcionamiento de equipos industriales de intercambio térmico, utilizar herramientas de simulación para estudiar los fenómenos físicos y buscar mejoras operativas para un uso eficiente de los equipos. De igual manera, se podrán desarrollar actividades de laboratorio para formar las competencias necesarias en la aplicación de los fenómenos de transferencia de calor en sistemas térmicos.

## 3. PUNTO DE PARTIDA

### 3.1. Actividades reservadas y Competencias

Conforme describe el “Libro Rojo” del CONFEDI [11], y la Resolución 1254/2018 del Ministerio de Educación de la Nación [14], las “actividades profesionales reservadas exclusivamente al



título” refieren a aquellas habilitaciones que involucran tareas que tienen un riesgo directo sobre la salud, la seguridad, los derechos, los bienes o la formación de los habitantes, lo que anteriormente se denominaba “incumbencias” en la Ley de Educación Superior [15]. En el caso de Ingeniería Mecánica es concreta la relación con el área de las tecnologías del calor y los sistemas térmicos, y en la Tabla 1 se realiza una síntesis de dichas actividades y competencias para este contexto.

Tabla 1. Resumen de Actividades Reservadas y Competencias Específicas para Mecánica, relativas al área de sistemas térmicos

Actividad Reservada	Competencia Específica
1. Diseñar, proyectar y calcular sistemas térmicos.	1.1. Diseñar y desarrollar proyectos de sistemas térmicos.
2. Controlar la construcción, operación y mantenimiento de sistemas térmicos.	2.2. Realizar la gestión del mantenimiento. 2.3. Operar y controlar proyectos de ingeniería mecánica.
3. Certificar el funcionamiento y/o condición de uso o estado de los sistemas térmicos.	3.1. Determinar y certificar el correcto funcionamiento y condiciones de uso de lo descripto. 3.2. Interpretar la funcionalidad y aplicación.
4. Proyectar y dirigir lo referido a la higiene y seguridad en lo concerniente a su actividad profesional.	4.1. Proyectar y dirigir en lo referido a la higiene y seguridad en los proyectos de ingeniería mecánica según lo descripto.

### 3.2. Generador de vapor

Actualmente, en el Laboratorio de Ing. Mecánica de la Facultad Regional Santa Fe, se cuenta con una serie de equipos e instalaciones que pretenden ser utilizadas como base para el desarrollo de este proyecto. Las mismas surgieron como iniciativa de la cátedra “Tecnología del Calor” perteneciente al 4º año de la carrera Ingeniería Mecánica, con el propósito de disponer de material didáctico para desarrollar diversas actividades relacionadas con la enseñanza práctica de la materia y funcionar con la idea de Laboratorio de vapor. A partir del año 2018 se puso en funcionamiento un equipo generador de vapor con capacidad de producir 200 [kg/h] de vapor saturado y una presión máxima de 16 [kg/cm<sup>2</sup>] (Figura 1). Su provisión bajo requerimientos de la FRSF-UTN, fue realizado por una empresa local. Cuenta con todos los elementos de seguridad y sistemas necesarios para un funcionamiento completamente automático. En la elección, la tipología acuotubular prevaleció sobre la humotubular, debido a la ausencia de riesgo de explosión.

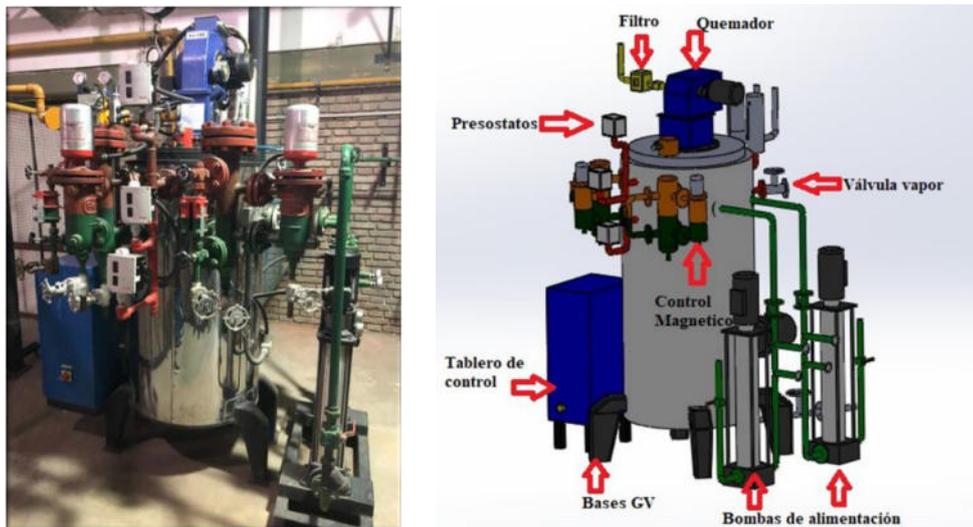


Figura 1: (a) Caldera instalada en taller del Dpto. de Ingeniería Mecánica UTN FRSF.  
(b) Diseño 3D de la caldera y detalle de componentes.

Hoy en día se utiliza para la realización de estudios de campo, reconocimiento de componentes, mediciones de combustión y ensayos de rendimiento.

### 3.3. Otros equipos

Como complemento del generador de vapor, se dispone de una serie de equipos y dispositivos característicos de instalaciones térmicas adquiridos por el Departamento Ing. Mecánica a lo largo de los años y también gracias al aporte y colaboración de empresas de la zona y docentes de la casa. Los mismos se utilizan habitualmente como elementos demostrativos en diferentes cátedras de la carrera. Entre los más importantes se encuentran:

- Intercambiadores de calor de placas.
- Intercambiador de calor de casco y tubos.
- Intercambiador de calor de tubos aletados.
- Torre de enfriamiento de agua tiro forzado.
- Bomba centrífuga.
- Válvula reductora de presión de vapor.
- Válvula termostática para vapor.
- Trampas de vapor de diferentes tipos (termodinámica, de flotante y termostática).



#### 4. METODOLOGIA

Para alcanzar los objetivos, se definieron etapas de desarrollo para que el avance se produzca de forma organizada, con resultados medibles, correctamente fundamentados mediante la recopilación de información.

En un primer momento, se consideraron especialmente las experiencias prácticas de interés para las cátedras del área, incluyendo las técnicas industriales de uso del vapor y agua caliente como fuente de calor, así como la infraestructura requerida para su manipulación.

Con este análisis preliminar, se planteó un esquema general de las instalaciones y equipos necesarios que incluyó el estudio de:

- Sistemas de tuberías de vapor y condensado,
- Intercambiadores de calor,
- Sistemas de calentamiento y enfriamiento de agua,
- Sistemas de medición de caudal, presión y temperatura.

Por último, se procedió al diseño de las instalaciones y sistemas, en base a las necesidades y las restricciones de espacio existentes, materiales, elementos que pudieran asociar riesgos a la salud por su manipulación, entre otros.

#### 5. RESULTADOS

Desde el inicio del proyecto, se pudo avanzar en una serie de actividades que incluyen el relevamiento de las asignaturas relacionadas, actividades potenciales que se podrían desarrollar, acercamiento a las competencias que se pueden trabajar y su relación con los alcances y finalmente una propuesta de diseño de las instalaciones.

##### 5.1. Asignaturas relacionadas

Se realizó un relevamiento e identificación de las cátedras afines a la temática que pretende abordar el proyecto, o que tienen un interés particular en utilizar el banco para demostraciones u obtención de datos, aunque no tengan una relación intrínseca con el área de conocimiento mencionada.

En las Tablas 2 y 3 siguientes se muestra el impacto esperado del desarrollo dentro del plan de estudios de cada uno de los de los departamentos académicos de UTN Santa Fe.



Tabla 2. Ingeniería Mecánica

Asignaturas relacionadas	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Física II (2º Nivel)</li> <li>○ Termodinámica (3º Nivel)</li> <li>○ Tecnología del calor (4º Nivel)</li> <li>○ Mecánica de los fluidos (4º Nivel)</li> <li>○ Instalaciones Industriales (4º Nivel)</li> <li>○ Electrónica y Sistemas de Control (4º Nivel)</li> <li>○ Maquinas Alternativas y Turbomáquinas (5º Nivel)</li> <li>○ Diseño de Inst. y equipos en Termomecánica (electiva. 5º Nivel)</li> <li>○ Aire Acondicionado y calefacción (electiva. 5º Nivel)</li> </ul>	<p>Relacionadas 20%</p> <p>Otras 80%</p>

Tabla 3. Impacto de la temática en las otras ingenierías de UTN FRSF

Ingeniería Industrial	Ingeniería Eléctrica
<p>Relacionadas 16%</p> <p>Otras 84%</p>	<p>Relacionadas 13%</p> <p>Otras 87%</p>
Ingeniería Civil	Ingeniería en Sistemas
<p>Relacionadas 9%</p> <p>Otras 91%</p>	<p>Relacionadas 8%</p> <p>Otras 92%</p>

## 5.2. Actividades propuestas

Como resultado del relevamiento realizado entre las cátedras afines de los diferentes departamentos de estudio, se han propuesto una serie de actividades prácticas las cuales podrían llevarse a cabo con el banco de ensayos:

- Medición de la eficiencia de generadores de vapor por vía directa e indirecta.
- Eficiencia en instalaciones de vapor, perdidas y aislaciones.
- Determinación y Apreciación de la variación del título del vapor producido por el generador de vapor en relación con la producción de vapor.



- Determinación de consumo de vapor de equipos.
- Comparación de tecnologías de intercambiadores de calor.
- Determinación de los coeficientes peliculares en los IQ.
- Comportamiento de trabajo de distintos tipos de trampas de vapor, con y sin subenfriamiento de condensado.
- Ensayos de una torre de enfriamiento. Estudio de parámetros de funcionamiento.
- Ensayos de intercambiadores de tubos aletados aire-agua.
- Manipulación de variables (válvulas reguladoras de temperatura y presión).
- Recolección y gestión de datos para el desarrollo de curvas características y respuestas transitorias.

### 5.3 Esquema de instalación propuesto.

En base al análisis de los requerimientos y al material disponible, se ha planteado el esquema operativo de la figura 2. En el mismo se pueden distinguir dos circuitos principales que hacen a la operatividad del mismo:

- Circuito de Vapor–Condensado: Este consiste en un circuito que en su tramo inicial recibe vapor desde el distribuidor del generador de vapor. Previo al ingreso al banco se encuentra un separador de condensado (SC) con una trampa de vapor (TTD) para el drenado de condensado de la cañería hacia una batea de desagüe. Luego del separador se dispone de un cuadro de reducción-regulación de presión (VRP) para poder ajustar los parámetros del vapor de entrada según las necesidades del banco. A partir de ahí la cañería de vapor toma dos caminos:
  - CIQ Circuito intercambiadores: En su comienzo dispone de una válvula termostática (VTR), seguido por dos intercambiadores de calor dispuestos en paralelo (uno del tipo casco y tubo (IC C+T) y uno del tipo de placas (ICP1), ambos para intercambio vapor-agua), con la opción de seleccionar cual poner en servicio mediante el accionamiento de válvulas de maniobra. El caudal de vapor se regula automáticamente por medio de la VTR en función de la temperatura deseada en el agua a la salida de los intercambiadores. El vapor una vez terminado su recorrido por el interior de los intercambiadores continua como condensado, y se dirige hacia una batea en donde se encuentran tres trampas de vapor en paralelo (TTD – TF – TTE).

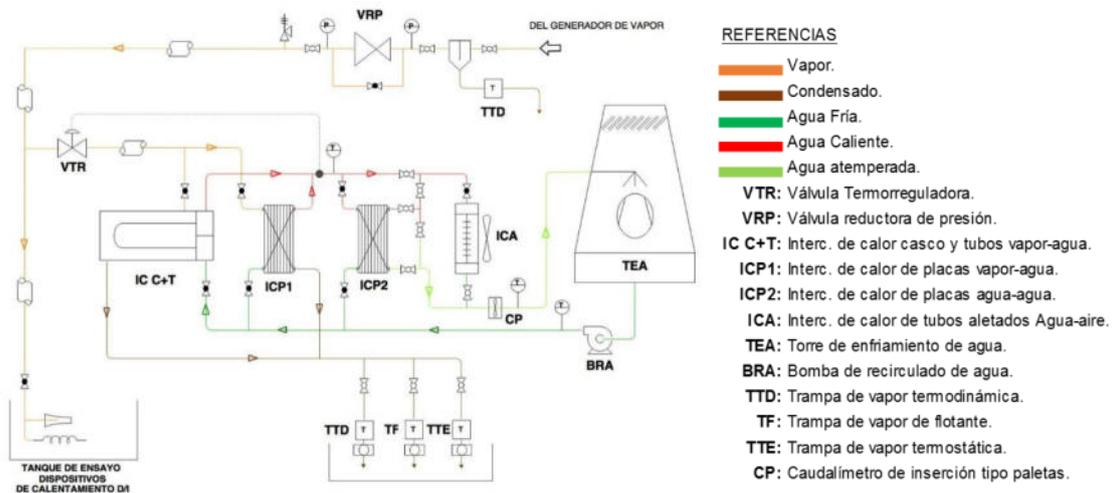


Figura 2: Esquema general del banco de ensayos propuesto y referencias de equipos.

- CB Circuito tanque: El vapor finaliza su recorrido en un tanque de ensayos en donde se podrá emplear para la prueba de diversos dispositivos de calentamiento de tipo directo o indirecto.
  - Circuito de Calefacción–Refrigeración de agua: Consiste en un circuito cerrado, que partiendo de una torre de enfriamiento (TEA) de donde proviene agua fría, que mediante una bomba de recirculado (BRA), es enviada para su calefacción a los intercambiadores de C+T (vapor – agua) y ICP1 (vapor – agua). El agua caliente obtenida a la salida de estos intercambiadores tiene la posibilidad de pre-enfriarse en un tercero ICP2 (intercambiador de placas agua – agua), pasar por un intercambiador de tubos aletados aire-agua (ICA) o pasar consecutivamente por estos últimos para finalmente entrar a la torre de enfriamiento para su posterior refrigeración, cerrando de esta manera el circuito.

## 6. CONCLUSIONES

El desarrollo del banco de ensayos propuesto representa un recurso didáctico de gran interés y presenta un considerable impacto dentro del plan de estudios de la carrera Ing. Mecánica de la UTN-FRSF. Su implementación ofrece la oportunidad de enriquecer el proceso de aprendizaje al proporcionar un entorno práctico donde los estudiantes pueden, por ejemplo, aplicar y experimentar los conceptos teóricos abordados en diversas cátedras. Esto contribuye a una formación más integral y aplicada en ingeniería. Además, se pueden involucrar cátedras de formación básica de todas las carreras de ingeniería, como Física y Estadística. Esto demuestra



la versatilidad y aplicabilidad de la instalación en los diseños curriculares actuales con enfoque en competencias.

Desde un punto de vista más general, la planta de ensayos ofrece la posibilidad de integrar de manera horizontal y vertical los contenidos de las diferentes carreras de ingeniería. Los estudiantes tienen la oportunidad de aplicar sus conocimientos en un sistema físico, lo que les permite realizar análisis de datos concretos y predecir comportamientos a través de la utilización de modelos de simulación basados en magnitudes reales.

Dicho esto, y tomando en cuenta que solo se han obtenido resultados preliminares, tener un sistema físico didáctico, pero con toda la potencialidad de simular un entorno industrial verdadero, constituye una herramienta de gran eficacia para el aprendizaje significativo en las carreras de ingeniería.

Por último, se plantea en una etapa posterior instrumentar el mismo con diversos sensores en diferentes puntos de interés del circuito para monitorear y registrar las principales variables involucradas (presión, temperatura, caudal) en los ensayos que se pretenden realizar.

## REFERENCIAS.

- [1] REN21. *Renewables 2021 Global Status Report*. ISBN 978-3-948393-03-8 (REN21 Secretariat. Paris). 2021.
- [2] International Energy Agency (IEA), *World Energy Statistics*, online tables. 2016.
- [3] Comité Argentino del Consejo Mundial de Energía. *“Guía de Eficiencia Energética en Sistemas de Vapor”*. CACME, 2020.
- [4] Gobierno de la Pcia. de Santa Fe/ FISFE, *“Oferta Industrial de Santa Fe”*. Disponible en <http://www.oisfe.com.ar>.
- [5] Organización de las Naciones Unidas, *“Transformar nuestro mundo. La Agenda 2030 para el desarrollo sostenible”*, Asamblea General ONU, Res 70/1, 2015.
- [6] L. A. Flores, L. A. y González, P. S. V. *“Modelo de base para la transformación digital en la Industria 4.0”*, en 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education Caribbean Conference for Engineering and Technology, 2021.
- [7] Fernández, A.B. *“Desarrollo y evaluación de competencias en educación superior”*. Narcea Ediciones, 2009.
- [8] Tuning América Latina, *“Reflexiones y perspectivas de la Educación Superior en América Latina”*. Universidad de Deusto, 2007.
- [9] Arroyo, B. S. *“La formación en competencias: un desafío para la educación superior del futuro”*. Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.
- [10] Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI), *“Competencias en Ingeniería”*. Universidad FASTA Ediciones, 2014.
- [11] Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI), *“Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la república argentina (Libro Rojo de CONFEDI)”*. Universidad FASTA Ediciones, 2018.



[12] Osorio, Y. W. “El experimento como indicador de aprendizaje”. Boletín PPDQ, No. 43, pp. 7-10, 2004.

[13] Marín, Q. M. “El trabajo experimental en la enseñanza de la química en contexto de resolución de problemas”. Revista EDUCyT, pp. 1, 37-52, 2010.

[14] Resolución 1254/2018. ALCANCES DEL TITULO – DETERMINACION. Ministerio de Educación de la Nación Argentina. 2018. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/310000-314999/310461/norma.htm> .

[15] Ley N° 24.521. Ley de Educación Superior. Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina. 1995. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/25000-29999/25394/texact.htm#:~:text=ARTICULO%203%C2%BA%20%E2%80%94%20La%20Educaci%C3%B3n%20Superior,las%20actitudes%20y%20valores%20que>



## DE LAS ACTIVIDADES RESERVADAS AL AULA EN INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD REGIONAL SAN NICOLÁS

Fernando Palmieri<sup>1</sup>; Néstor Reina<sup>1</sup>; Lucía Sacco<sup>1</sup>; Daniel Sosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ing. Mecánica. UTN Facultad Regional San Nicolás  
Colon 332, San Nicolás, Buenos Aries, Argentina- fpalmieri@frsn.utn.edu.ar

### RESUMEN

Las competencias desarrolladas en los graduados de ingeniería son el resultado de la puesta en funciones de una compleja estructura de conocimientos, habilidades y destrezas que le permitan al egresado ejercer su profesión. La implementación del enfoque basado en competencias implica prácticas docentes que consideren, entre otras dimensiones, la construcción de planificaciones de sus asignaturas según los lineamientos mínimos establecidos dentro del proceso de adecuación curricular.

Este trabajo presenta la articulación y trabajo conjunto de docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás en las asignaturas Sistemas de Representación, Análisis Matemático II, Mecánica Racional, Elementos de Máquinas y Proyecto Final, de primer a quinto nivel respectivamente. La investigación aquí presentada forma parte de las actividades desarrolladas en el marco de un Proyecto de Investigación y Desarrollo Asociado entre Facultades Regionales de Bahía Blanca, Neuquén y San Nicolás.

A partir de la lectura y análisis de documentación específica, desde el Libro Rojo, la Declaración de Valparaíso a la Ordenanza 1901, se lograron consensos entre los docentes de las cinco asignaturas. Acuerdos que permitieron pensar elementos incluidos en las planificaciones, que muestren el aporte al desarrollo de las competencias vinculadas a una misma actividad reservada del ingeniero mecánico. Ello llevó pensar en una propuesta pedagógica que incluyera actividades que guíen a los estudiantes, de manera progresiva, al desarrollo de determinadas capacidades asociadas a las competencias genéricas y específicas identificadas.

A partir de ello, se muestra en este trabajo como resultados de este proceso, las metas, resultados de aprendizaje y las intenciones educativas de las actividades formativas propuestas en los estudiantes desde 1° a 5° nivel y actividades formativas. Como conclusión, resulta evidente una trazabilidad de competencias vertical y se considera que este trabajo puede ser el insumo para seguir trabajando con las demás asignaturas de la especialidad.

**Palabras clave:** *Actividades Reservadas; Competencias; Capacidades Asociadas; Actividades Formativas.*



## 1. INTRODUCCIÓN

En 2021, en el marco del PIDA “Evaluación de la formación y el desarrollo de competencias en Ingenierías” entre las Facultades Regionales de Bahía Blanca, San Nicolás y Neuquén, el equipo de docentes integrantes de la Facultad Regional San Nicolás (FRSN), a cargo de cinco asignaturas de los cinco niveles de la carrera de Ingeniería Mecánica, inician un proceso de formación en torno al Modelo Conceptual y Operativo de Formación por Competencias [1] con el propósito de plasmar este enfoque en las planificaciones de las asignaturas de la carrera. Las asignaturas involucradas son Sistema de Representación (1er nivel), Análisis Matemático II (2do nivel), Mecánica Racional (3er nivel), Elementos de Máquina (4to nivel) y Proyecto Final (5to nivel).

A partir del estudio y análisis de documentación vigente en ese momento, se realizaron las primeras acciones para establecer la relación de cada una de las asignaturas con las competencias genéricas y específicas de egreso del Ingeniero Mecánico [2], la formulación de la meta general en cada asignatura, el análisis de los objetivos establecidos en el Diseño Curricular Vigente [3], la construcción de una matriz de tributación de las competencias del egresado y la redacción de los resultados de aprendizaje esperados para ese año en curso en cada una de las asignaturas [4].

En 2022, en las asignaturas Análisis Matemático II (AMII) y Mecánica Racional (MR) de la FRSN, inician un proceso de análisis de la articulación e integración de aprendizajes entre las mencionadas asignaturas. A partir de considerar que el primer paso para ser un ingeniero mecánico competente, a la hora del diseño de un sistema o máquina que involucre cuerpos sólidos en movimiento, es determinar las interacciones (en el sentido de cuantificar las mismas) y ello requiere la capacidad de construir modelos matemáticos de esos sistemas a partir de los principios físicos involucrados. Esto implica el conocimiento de la Mecánica y de la Matemática involucradas en simultáneo y la capacidad de plasmar esos conocimientos en desempeños elevados como el análisis y la síntesis de sistemas [5].

En 2023, en línea con lo estudiado en años anteriores y en el marco de antecedentes como el Libro Rojo de CONFEDI, la Declaración de Valparaíso y la Ordenanza 1901, se lograron consensos entre los docentes de las cinco asignaturas. Acuerdos que permitieron elaborar las planificaciones de cada una de las asignaturas, considerando que todas aportaban al desarrollo de competencias vinculadas a una misma actividad reservada del ingeniero mecánico. Ello llevó a pensar en una propuesta pedagógica que incluyera actividades formativas que guíen a los estudiantes, de manera progresiva, al desarrollo de las competencias genéricas y específicas relacionadas con dicha actividad reservada. Este trabajo presenta los acuerdos entre docentes, puestos de manifiesto en las competencias genéricas y específicas a tributar, la definición de capacidades asociadas a ellas, la meta, los resultados de aprendizajes esperados en los estudiantes desde 1° a 5° nivel y articulación de actividades formativas a proponer.



## 2. DESARROLLO

La Ordenanza 1901 lleva a cada uno de los docentes a repensar el abordaje de su asignatura en el marco de un enfoque por competencias y centrado en el estudiante, teniendo en cuenta competencias ingenieriles necesarias para insertarse en un mundo de permanente cambio.

La carrera de Ingeniería Mecánica prepara profesionales con una formación académica que genere aptitudes, habilidades y actitudes, sustentada en el conocimiento científico y tecnológico, que le permita interpretar nuevas tecnologías y contribuir al desarrollo de las mismas, con visión innovadora y emprendedora, partiendo desde la identificación para la resolución de problemas de manera sistémica, motivado por las necesidades de la sociedad, apoyado permanentemente en la ética y con una perspectiva global que incluye aspectos biológicos, culturales, políticos, económicos y ambientales en general [6].

### 2.1. Actividad Reservada (AR1)

Las cinco asignaturas aportan al desarrollo de competencias vinculadas con la actividad reservada AR 1: *Diseñar, proyectar y calcular máquinas, estructuras, instalaciones y sistemas mecánicos, térmicos y de fluidos mecánicos, sistemas de almacenaje de sólidos, líquidos y gases; dispositivos mecánicos en sistemas de generación de energía; y sistemas de automatización y control* [6]

En particular se establece que todas las asignaturas permiten trabajar en distinto grado de profundidad la Competencia Específica asociada a ésta actividad reservada CE1.1: *Diseñar y desarrollar proyectos de máquinas, estructuras, instalaciones y sistemas mecánicos, térmicos y de fluidos mecánicos, sistemas de almacenaje de sólidos, líquidos y gases; dispositivos mecánicos en sistemas de generación de energía; y sistemas de automatización y control aplicando metodologías asociadas a los principios de cálculo, diseño y simulaciones para valorar y optimizar, con sentido crítico e innovador, responsabilidad profesional y compromiso social.*

También en las 5 asignaturas se coincide aportar a la Competencia Genérica CG1: *Identificar, formular y resolver problemas de Ingeniería.* Dicha competencia se vincula directamente con uno de los ejes definidos en el Anexo I de la Resolución de Ministerial 1541/21: *Identificación, formulación y resolución de problemas de ingeniería mecánica.*

### 2.2. Aportes desde cada asignatura a AR1

#### 2.2.1. Sistemas de Representación

En sistemas de representación se establece como objetivo, insertar al estudiante de Ingeniería Mecánica, al mundo donde el dibujo de piezas o conjuntos de piezas es una competencia que deben desarrollar, ya que es, a través de ella, que puede representar objetos existentes, desarrollar nuevos, innovando y compartiendo ideas, mediante un lenguaje universal. Es por ello



que la representación de un diseño bajo un código común a todos los ingenieros es una capacidad asociada a la Competencia Específica CE1.1., es aquí que, la asignatura, brinda las herramientas y desarrolla los conocimientos y habilidades, del futuro ingeniero/ingeniera, ya que mediante el dibujo podrá bosquejar las primeras ideas de un proyecto, donde el diseño comienza a tomar forma, y el proyecto surge con los primeros trazos.

### **2.2.2. Análisis Matemático II**

Análisis Matemático II es una asignatura que se dicta en el segundo nivel de la carrera de Ingeniería Mecánica y esa vinculada con los descriptores de conocimiento: Cálculo diferencial e integral y Ecuaciones Diferenciales. [6]

En carreras de Ingeniería constituye una herramienta, no una finalidad en sí misma. Sus conceptos centrales, tales como campo vectorial y campo escalar, con sus variaciones y las integrales que los involucran, son esenciales para los estudiantes de Ingeniería, ya que proporcionan las herramientas básicas e indispensables para la modelización matemática de diversos fenómenos físicos, que pueden ser analizados a partir de una representación vectorial o una ecuación diferencial. Aunque AMII, en el diseño curricular Plan 2023 no tiene definida una competencia específica a la que podría tributar, se considera que adquirir metodologías de análisis y modelización es central para poder abordar cualquier problema de ingeniería y así que se considera trabajar en torno a CG1 y CE1.1 [6].

### **2.2.3. Mecánica Racional**

El primer paso para diseñar, calcular y proyectar una máquina, una estructura o un sistema mecánico es determinar, para cada cuerpo que lo compone, si se mueve, como se mueve, con que otros cuerpos interactúa y que fuerzas produce ese movimiento o esa condición de interacción. Luego de entender y cuantificar los esfuerzos y solicitaciones de cada parte de ese sistema mecánico y se pueden usar los conceptos y metodologías de otras áreas, como Estabilidad, para diseñar o calcular esos elementos. Todas estas acciones se vinculan con la competencia AR1. El estudiante podrá utilizar los principios de la mecánica para analizar el movimiento, las fuerzas que intervienen y el intercambio de energía entre las partes de un sistema mecánico en movimiento para poder emplear una tecnología existente a un problema de ingeniería real o llevar adelante una innovación tecnológica.

### **2.2.4. Elementos de Máquinas**

Esta asignatura es una de las integradoras dictada en el cuarto nivel de la carrera, donde se conjugan conocimientos y saberes de un conjunto de materias básicas tales como: Matemática, Geometría, Mecánica, Física, Química, Estabilidad, y otras más específicas como, por ejemplo, las relacionadas con el estudio de distintos tipos de materiales. Esta integración tiene como objetivo poder desarrollar el cálculo o selección de los distintos elementos constitutivos de una máquina o equipo, de manera tal que cumplan una determinada función, resistiendo los



esfuerzos y solicitudes a los que están sometidos, sin presentar fallas. La relación con CE1.1 es alta dado que el estudio de la cátedra permite la adquisición y asimilación de las herramientas necesarias para poder proyectar, calcular, estudiar, seleccionar los componentes mecánicos de una máquina o instalación.

### **2.2.5. Proyecto Final**

La asignatura Proyecto Final es el espacio donde el estudiante da su primer paso a la actividad profesional, dado que debe plasmar todas sus habilidades y conocimientos adquiridos en un proyecto mecánico. Se espera que el estudiante obtenga capacidad de planificación, recopilación y análisis de información, elección de metodologías a aplicar, aplicación de las regulaciones legales o normativas involucradas, criterio de síntesis o simplificación de las situaciones, visión global, habilidad para el trabajo en equipo. También es necesario el desarrollo de artes para la presentación y exposición de los resultados de sus proyectos, en el ámbito de la evaluación técnica y económica de los mismos. Otro aspecto importante a tener en cuenta es el seguimiento del cumplimiento de lo planificado y el análisis de las desviaciones posibles.

## **3. RESULTADOS**

A partir del análisis anterior, a continuación, se presentan las capacidades específicas y actividades formativas a desarrollar en cada una de las asignaturas considerando el aporte progresivo de cada una de ellas a la AR1 y en consecuencia a CG1 y CE1.1.

### **3.1. Capacidades asociadas, Meta y Resultados de aprendizaje**

La redacción de la meta y de los resultados de aprendizaje se ha realizado considerando la corriente teórica propuesta por autores como [7] [8] [9] [10] entre otros.

#### **3.1.1. Sistema de Representación**

Las capacidades asociadas a CG1 y CE1.1 que se espera el estudiante desarrolle son:

C.G.1.1: Aplicar, saberes del dibujo tecnológico, para modelizar problemas y soluciones, aplicando las normas IRAM.

CE1.1.1: Desarrollar, un criterio analítico, para el análisis de la problemática a resolver, mediante los métodos de proyección diédricos y/o axonométricos definidos por norma.

CE1.1.2: Explicar, la/las soluciones alternativas, mediante gráficos simples, respetando las normas de dibujo para la caligrafía y líneas.

La Meta General de la asignatura Sistema de Representación, es que el estudiante: *Valora las herramientas necesarias para identificar y comprender correctamente la geometría de una pieza o conjunto de piezas o para desarrollar una idea, transfiriéndola al plano de dibujo, sea a mano alzada o mediante software CAD, utilizando normas nacionales e internacionales, como*



*instrumentos de uso común, desarrollando habilidades, que le permitan abordar situaciones complejas, con un criterio analítico y crítico.*

Los resultados de aprendizaje definido en relación con CG1 y CE.1 y a la actividad formativa correspondiente son:

RA 1: Emplea las técnicas de croquizado para transmitir una idea o representar un objeto aplicando el tipo de croquis más adecuado.

RA 3: Interpreta las vistas fundamentales de un objeto, para integrarlas y obtener la representación axonométrica (perspectiva isométrica o caballera reducida), utilizando la norma 4501-3.

### **3.1.2. Análisis Matemático II**

Las capacidades asociadas a CG1 y CE1.1 que se espera el estudiante desarrolle son:

CG1.1: Reconocer saberes del Cálculo Diferencial e Integral de Funciones de  $R_n$  en  $R_m$  para la problematización de situaciones de acuerdo con el contexto de aplicación en Ingeniería Mecánica.

CG1.2: Aplicar saberes del Cálculo Diferencial e Integral de Funciones de  $R_n$  en  $R_m$  para resolver situaciones problemáticas utilizando diferentes registros de representación.

CG1.3: Utilizar Ecuaciones Diferenciales para la modelización y estudio de fenómenos naturales o inducidos que evolucionan en el tiempo reconociendo su importancia y aplicabilidad en Ingeniería Mecánica.

CE1.1.1. Aplicar Ecuaciones Diferenciales en la resolución de problemas de sistemas de automatización y control reconociendo criterios técnicos o económicos

La Meta General de la asignatura Análisis Matemático II, es que el estudiante: *Valora la importancia de la aplicación del Cálculo Diferencial e Integral con funciones vectoriales y de varias variables y Ecuaciones Diferenciales como herramientas eficaces en la formación básica del profesional para la identificación, formulación, resolución y comunicación de problemas de Ingeniería.*

El resultado de aprendizaje definido en relación con CG1 y CE.1 y a la actividad formativa correspondiente es:

RA 3: Considera ecuaciones y sistemas de ecuaciones diferenciales para modelizar y resolver problemas de aplicación en Física y Química mediante la aplicación de métodos analíticos.

### **3.1.3. Mecánica Racional**

Las capacidades asociadas a CG1 y CE1.1 que se espera el estudiante desarrolle son:

CG1.1. Identificar datos, incógnitas y metodologías de cálculo aplicables, para resolver un problema de mecánica de Newton, correctamente.

CG1.2. Analizar los resultados de un problema de mecánica para entender las implicancias y consecuencias ingenieriles del mismo adecuadamente.



CE1.1.1. Describir el movimiento de dispositivos y sistemas mecánicos en funcionamiento para analizar un diseño de una máquina o mecanismo utilizando las herramientas de la mecánica Newton

CE1.1.2. Analizar las fuerzas y la energía mecánica en juego en un sistema o dispositivo mecánico en funcionamiento para determinar potencias de diseño de una máquina o mecanismo utilizando adecuadamente los conceptos de potencia y energía mecánica.

La Meta General de la asignatura Mecánica Racional, es que el estudiante: *Utilice los principios de la mecánica para analizar y predecir el movimiento, las fuerzas que intervienen y el intercambio de energía entre las partes de un sistema mecánico animado de movimiento, para poder emplear una tecnología existente a un problema de ingeniería real o llevar adelante una innovación tecnológica en forma consistente con la Mecánica de Newton y Lagrange*

Los resultados de aprendizaje definidos en relación con CG1 y CE.1 y a la actividad formativa correspondiente son:

RA 1: Describe la posición, velocidad y aceleración de sistemas mecánicos para estudiar el ciclo de movimiento de una máquina o mecanismo usando las metodologías y herramientas de la cinemática del cuerpo rígido o de la partícula

RA 2: Calcula las fuerzas y momentos actuantes en un sistema mecánico con el propósito de determinar los esfuerzos sobre los componentes de este durante un ciclo de trabajo usando los principios de la dinámica.

#### **3.1.4. Elementos de Máquinas**

La asignatura se basa en el conocimiento y desarrollo de la metodología de cálculo de cada uno de los elementos de máquinas unitarios que conforman una máquina, herramienta o dispositivo como un todo. Este cálculo debe complementarse con el diseño del elemento o parte, de manera que se pueda ir optimizando su conformación final. Se genera entonces, una iteración de diseño-cálculo y cálculo-diseño, que forman parte de la formación profesional requerida en el ingeniero mecánico, como también lo es, el análisis de distintas alternativas de solución, frente un problema de selección o dimensionamiento de un elemento de una máquina. Entonces se puede trabajar en problemas abiertos de diseño, sobre la síntesis y la toma de decisiones. Entonces como capacidades asociadas a la CG 1 se definen:

CG1.1. Identificar datos, condiciones de carga, restricciones y metodologías de cálculo aplicable a cada uno los elementos de máquinas involucrados en un problema de diseño de una máquina

CG1.2: Analizar los resultados en el dimensionamiento o selección de un elemento de máquinas con criterio económico y técnico de manera integrada.

Las capacidades asociadas a CE1.1 que se espera el estudiante desarrolle son:

CE1.1.1. Resuelve problemas de dimensionamiento y verificación de los elementos componentes de una máquina, para que resistan las sollicitaciones de trabajo, aplicando metodologías de cálculo acordes a las reglas del buen arte de la ingeniería mecánica.



CE1.1.2. Selecciona elementos componentes de una máquina estandarizados, para que resistan las solicitaciones de trabajo, con un criterio técnico económico fundado.

La Meta General de la asignatura Elementos de Máquinas, es que el estudiante: *Realiza el análisis, dimensionamiento y/o selección de cada uno de los elementos mecánicos que componen una máquina o instalación para garantizar que cumplan la función determinada dentro del sistema mecánico, eligiendo una solución de compromiso con criterio fundado en saberes técnicos.*

Los resultados de aprendizaje definidos en relación con CG1 y CE.1 y a la actividad formativa correspondiente son:

RA 1: Calcula la resistencia de un elemento de máquina para evitar fallas de rotura o deformación en su desempeño como integrante de un equipo o sistema.

RA 2: Selecciona un elemento de máquina de un catálogo para dar respuesta a una solicitud de un sistema en función del estado de carga que está sometido.

### **3.1.5. Proyecto Final**

Las capacidades asociadas a CG1 y CE1.1 que se espera el estudiante desarrolle son:

CG1.1. Identificar restricciones, posibilidades, ventajas y metodologías de diseño ante un problema que involucra resolver una necesidad industrial de manera completa y precisa

CG1.2: Analizar las soluciones logradas con criterio técnico para establecer posibles mejoras.

CE1.1.1. Aborda el desarrollo de una solución tecnológica para satisfacer una necesidad cotidiana o industrial utilizando los saberes disciplinares específicos con autosuficiencia.

CE1.1.2. Evalúa distintas alternativas de diseño mecánico para dar respuesta a una necesidad tecnológica con criterio técnico profesional.

La Meta General de la asignatura Proyecto Final, es que el estudiante: *Aplica los conceptos y las metodologías para el diseño de estructuras, máquinas, instalaciones, sistemas mecánicos, térmicos y fluido mecánicos, etc., de manera tal de obtener una solución a un problema tecnológico, mediante la elaboración de un proyecto, entendiendo a este como un esfuerzo temporal y delimitado, donde se destinan variados recursos, con el fin de llegar a obtener un bien o servicio tecnológico, con un enfoque técnico-económico desarrollado.*

Los resultados de aprendizaje definidos en relación con CG1 y CE.1 y a la actividad formativa correspondiente son:

RA 1: Emplea las metodologías de estudio de sistemas mecánicos, térmicos y fluidos mecánicos para desarrollar una solución tecnológica eficiente en el contexto de un proyecto mecánico que satisfaga una necesidad específica

RA 2: Procesa distintas alternativas de soluciones tecnológicas ante una necesidad surgida, de un problema de ingeniería mecánica, para dar respuesta a la misma solución.

## **3.2. Diseño de actividades formativas**



En función de las capacidades asociadas y resultados de aprendizaje definidos, se realiza una descripción de las metodologías empleadas en cada asignatura:

### **3.2.1. Sistema de Representación**

Para alcanzar la meta y que los/las estudiantes logren las competencias y capacidades mencionadas en el apartado anterior, se desarrollan los Métodos de Proyección Ortogonal a partir de ciertas actividades. Comenzamos con un cuestionario exploratorio, sobre los conocimientos previos que traen, cabe aclarar que son estudiantes del primer nivel y no todos son técnicos. En base a ello, se van desarrollando los distintos conceptos y definiciones, acompañándolos y guiándolos en todo momento, desarrollando el tema teóricamente, acompañado de ejemplos prácticos para un mejor entendimiento. Luego a través del ABP (Aprendizaje Basado en Problemas), se explora distintas situaciones, aumentando la complejidad de los casos. Un ejemplo de ello es la obtención de las tres vistas fundamentales (vista frontal, vista lateral izquierda y vista superior), de un elemento mecánico como lo es un soporte en L. El trabajo realizado, se lleva a cabo según indica la norma IRAM 4501-2, para el Método ISO E. Además, se suben a la plataforma Moodle, videos y ejemplos resueltos, como material de apoyo. Lo mencionado, se realiza en una primera etapa a mano alzada (croquizado), para luego mediante el uso de software asistido por computadora (AutoCAD®), digitalizar el trabajo, dando un cierre y completando distintas etapas del aprendizaje.

### **3.2.2. Análisis Matemático II**

En la unidad temática de Ecuaciones Diferenciales los estudiantes, a partir de la interpretación de enunciados, avanzan en la modelización de los problemas propuestos. Para Ingeniería Mecánica, entre los problemas planteados se encuentra el sistema de una masa vinculada a una pared a través de un resorte con un desplazamiento sobre una superficie horizontal con rozamiento al que se aplica una fuerza constante.

El abordaje didáctico en clases es, con la intención de vincular la teoría y la práctica a partir de la resolución del problema, en primer lugar, con la lectura del enunciado interpretando la información brindada y lo requerido a fin de lograr la vinculación con los contenidos que serán abordados en la unidad, realizando la traducción del lenguaje coloquial al simbólico con el propósito de identificar variables que lleven a la modelización matemática inicial más adecuada. Luego, el desarrollo de actividades de aprendizaje que permitan introducir saberes necesarios para resolver el problema, vuelta al problema realizando el abordaje del modelo con la utilización de la bibliografía sugerida y lo desarrollado en clases. Fuera de clases, se propone seguir con el problema, con las demás consignas con actividades prácticas con el uso de diferentes softwares dinámicos o ventanas propias de la cátedra. A partir de este tipo de actividad formativa se puede promover el desarrollo de capacidades como comprensión de los conceptos, el modelado y su aplicación para resolver nuevos problemas, como un circuito RLC en serie, alimentado con una fuente de corriente continua. Las ventanas dinámicas en GeoGebra o MatLab propuestas a los



estudiantes complementan el trabajo dentro y fuera del aula. Su uso brinda la posibilidad de analizar cuestiones relevantes desde el punto de vista matemático y del problema físico y asociar los resultados matemáticamente obtenidos con su interpretación física.

### **3.2.3 Mecánica Racional**

Para trabajar la comprensión de la dinámica de los sistemas mecánicos se elige la estrategia de aprendizaje basado en problemas. Se propone una secuencia didáctica dividida en tres etapas a llevarse a cabo en al menos tres clases: primero se usa el formato de clase dialogada donde el docente aborda problemas prácticos especialmente seleccionados y sus soluciones, enfatizando la aplicación ingenieril del tema abordado con o en el problema. Luego se proponen problemas individuales sugeridos para que cada estudiante resuelva individualmente. Finalmente se forman parejas, a cada una de las cuales se les asigna un problema abierto de dinámica para resolver que contenga una aplicación ingenieril real, generalmente relacionada al diseño de sistemas de transporte o mecanismos o a la seguridad. Luego de resolverlo debe ser presentado ante sus compañeros.

### **3.2.4 Elementos de Máquinas**

Cada una de estas actividades se desarrollará en tres procesos de comprensión. Una descripción general del tema utilizando bibliografías, apuntes, presentaciones de elementos de máquinas que se encuentran en los laboratorios y/o aportados por la cátedra, imágenes de computación, o planos (elaborados) de empresas de la zona. Un desarrollo conceptual, donde se verterán por parte del docente los distintos criterios teóricos existentes en la técnica, definidos en las distintas normas y las metodologías propuestas para el cálculo por los distintos autores. Un proceso de formación práctica donde los estudiantes resuelven los distintos trabajos prácticos y casos de estudios. Para cada tema se procede a la resolución colectiva, en el aula, e individual de tarea, de problemas y casos de estudio para que el estudiante ponga en práctica sus habilidades. Luego se realiza un cierre mediante la discusión grupal de las soluciones adoptadas.

### **3.2.5. Proyecto Final**

El enfoque de la asignatura y de su evaluación se centra en el trabajo del estudiante en su proyecto particular. Se pretende que los estudiantes, a la hora de desarrollar su proyecto final, conformen un equipo de trabajo junto con los docentes, donde cada uno de los integrantes cumplan roles diferenciados. Se elige la estrategia de aprendizaje por proyectos. Se divide el accionar en dos etapas. En la etapa previa al anteproyecto se emplean clases con temas orientativos incluidos en el plan de la asignatura, vinculados a la metodología de elaboración de proyectos. También se fijan clases y horarios de consulta e intercambio de ideas con la cátedra, referido, a los posibles proyectos que realizaran los estudiantes hasta llegar a la selección de uno y la elaboración del anteproyecto. En la etapa post anteproyecto, que es la etapa de elaboración de proyecto, también, se establecen clases y horarios de consulta e intercambio de



ideas con la cátedra, momentos de realización de informes de avance. Hasta llegar a la conclusión del proyecto con la defensa.

#### 4. DISCUSIÓN

En Sistemas de Representación, se inicia este proceso mediante la comprensión de la pieza o sistema a través de su representación, desarrollando un criterio analítico, con el cual se busque la mejor solución al problema planteado, a través de un trabajo con precisión y calidad en su confección.

El abordaje del problema de los sistemas de segundo orden gobernados por una ecuación diferencial lineal no homogénea, habilita a interpretar la generalización de este a cualquier sistema, despertando el espíritu crítico hacia los resultados obtenidos y observando si los mismos tienen validación o coherencia desde el punto de vista físico. A su vez, acercar en los primeros años de la carrera, conceptos que se tratarán con rigor en materias inherentes al estudio teórico de los Sistemas Dinámicos, lo que permite mostrar al estudiante la importancia y aplicación en problemas del ciclo superior de los temas enseñados en AMII y dar verdadero significado al estudio matemático del problema. [11]

La resolución de los problemas trabajados en Mecánica Racional permite que el estudiante demuestre sus conocimientos de dinámica de sistemas y cinemática de cuerpos rígidos en una aplicación real y la solución de ese problema le permite encontrar los esfuerzos de diseño de las piezas o partes de un equipo industrial. Esos parámetros permiten luego avanzar en el diseño, selección y cálculo de los elementos que conforman una máquina o equipo.

En Elementos de Máquina, las cargas dinámicas determinadas mediante el uso de los principios de la mecánica y de los modelos matemáticos construidos, se usarán para dimensionar y diseñar los distintos elementos como ser rodamientos, ejes y acoplamiento.

Por último, en Proyecto Final, las competencias asociadas a CG1 y CE1.1 se expresan en toda su dimensión y en este caso si el estudiante diseñara una instalación que incluya cintas transportadoras podrá determinar el centro de masa de los bultos y su estabilidad al vuelco, determinar su potencia y las cargas en ella presentes, diseñar o calcular los elementos de máquina que la componen, representarla en planos para su construcción y hacer la evaluación técnica económica para saber si es un proyecto rentable y factible. Es decir, el estudiante deberá dar cuenta de desarrollo de las capacidades asociadas de las asignaturas previas.

#### 5. CONCLUSIONES

Se observa en la planificación de las actividades formativas, una trazabilidad de competencias vertical donde todas aportan progresivamente a la actividad reservada AR 1 del título.

Puede considerarse al presente escrito como insumo para seguir trabajando con las demás asignaturas de la especialidad.



## REFERENCIAS

- [1] Kowalski, V. y otros. *Saberes, Competencias y Acreditación de carreras de Ingeniería. Curso de Posgrado Formación por Competencias, Aprendizaje Centrado en el Estudiante y Estándares de Acreditación de Segunda Generación para Ingeniería*. Cuarto Documento. 53-55. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. 2018.
- [2] CONFEDI. *Propuesta de Estándares de Segunda Generación para la Acreditación de Carreras de Ingeniería en la República Argentina: Libro Rojo de CONFEDI*. Rosario, 2018.
- [3] Ordenanza 1027. Adecua el Diseño Curricular de la Carrera Ingeniería Mecánica. Secretaría de Consejo Superior. Universidad Tecnológica Nacional. 2004.
- [4] Palmieri, F.; Reina, N.; Sacco, L.; Sosa, D. *Avances en formulación de metas y resultados de aprendizaje en Ingeniería Mecánica*. Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería: 2021. Tomo III. Compilación. 838-845. ISBN 978-987-88-7246-9. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 2021.
- [5] Palmieri, F.; Sacco, L. *Estudio de articulación y transferencia de aprendizajes en estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás*. VIII Jornadas Nacionales y IV Latinoamericanas de Ingreso y Permanencia en Carreras Científico-Tecnológicas. Facultad Regional San Nicolás de la Universidad Tecnológica Nacional. 12, 13 y 14 de octubre de 2022, San Nicolás de los arroyos. Buenos Aires. Argentina
- [6] Ordenanza 1901. *Diseño Curricular De Ingeniería Mecánica*. Plan 2023. Consejo Superior. Universidad Tecnológica Nacional. Rectorado. 2022.
- [7] Kowalski, V.; Erckl.; Enriquez, H. *Manual para redactar Resultados de Aprendizaje para Ingeniería. Una propuesta con ejemplos para Matemática y otros casos. Formación por Competencias y Aprendizaje Centrado en el Estudiante*. Laboratorio MECEK. 2020.
- [8] Unidad de Gestión Curricular y Monitoreo, Vicerrectoría Académica, Universidad del Bío-Bío *Manual elaboración de programas de asignaturas. Manual de apoyo para la implementación del modelo educativo en el marco del proceso de renovación curricular en la Universidad del Bío Bío*. ISBN 978-956-9275-20-3. Chile 2013.
- [9] Tobón, S. *Formación integral y competencias. Pensamiento complejo, currículo, didáctica y evaluación*, 4ta. ECOE. Bogotá. 2013.
- [10] Pimienta Pietro, J. *Las competencias en la docencia universitaria*. Pearson. México. ISBN 978-607-32-0763-8. 2012.
- [11] Riccomi, H., Schivo, M. E., Sacco, L., Pacini, C. *Estudio, en forma intuitiva y visual, de las respuestas de los sistemas de control gobernados por una ecuación diferencial lineal de segundo orden a coeficientes constantes*. Congreso Latinoamericano GeoGebra. Presidencia Roque Sáenz Peña. Universidad Nacional del Chaco Austral. ISBN 978-987-1880-96-6. 2013.



## La Mecánica Computacional en los cursos de Mecánica de Fluidos: empleando CFD para actividades prácticas en modalidad taller.

César I. Pairetti <sup>1,2,3</sup>, Guillermo L. Rodríguez <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) – Universidad Nacional de Rosario (UNR) Riobamba 219 bis, Rosario, Santa Fe, Argentina- [pairetti@fceia.unr.edu.ar](mailto:pairetti@fceia.unr.edu.ar)

<sup>2</sup> Instituto Rosario de Investigación en Ciencias de la Educación, IRICE (UNR-CONICET)

<sup>3</sup> Instituto Jean LeRond D'Alembert, Sorbonne Université, 4 Place Jussieu, Paris, Francia

### RESUMEN

La Mecánica de Fluidos es una disciplina que, debido a sus ecuaciones no lineales y transitorias, desarrolla un comportamiento difícil de caracterizar analíticamente. Para solucionar esto, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite obtener resultados numéricos, facilitando el análisis de problemas no triviales, con un costo significativamente menor al enfoque experimental.

En este trabajo, describimos cómo utilizamos en una modalidad de taller físico virtual, los conceptos de CFD en la actividad curricular “Mecánica de los Fluidos”, de tercer año de Ingeniería Mecánica en la Universidad Nacional de Rosario. La estrategia pedagógica trabaja sobre problemas de dificultad intermedia sin solución analítica y que se aproximan a un equipo industrial real. En este sentido, los estudiantes partieron de un caso tutorial modificando los parámetros de entrada para analizar la sensibilidad del sistema físico ante cambios en las condiciones de contorno o en las propiedades del fluido. Se estudiaron problemas de flujo en cañerías, flujo alrededor de un perfil aerodinámico normalizado y flujo compresible en una tobera. En estos contextos, los alumnos utilizaron los modelos numéricos como banco de experimentos y reportaron en informes técnicos los diferentes resultados obtenidos para distintas condiciones de flujo. La evaluación de cada informe incluye una etapa de revisión por pares, la discusión entre estudiantes empleando un registro formal y la participación del docente como moderador.

Los primeros resultados dan cuenta que la implementación de este taller dentro de la asignatura posibilita una mejora de la comprensión de los contenidos del curso, una integración efectiva del uso de herramientas tecnológicas, fomentando un proceso de construcción de conocimiento colaborativo.

**Palabras Clave:** *Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Enseñanza de la ingeniería, Modalidad pedagógica de taller, Software Libre.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La Mecánica de los Fluidos es una disciplina presente en una amplia gama de aplicaciones de la Ingeniería Mecánica. Aerodinámica, hidráulica, transferencia de calor, todas estas subáreas del conocimiento se ven directamente afectadas por el movimiento de gases y líquidos [1, 2].

Las ecuaciones de la Mecánica del Continuo que rigen la dinámica de fluidos en su forma más general son no lineales, lo que en el contexto de una evolución transitoria produce un comportamiento caótico. Esta dificultad es particularmente notoria en flujos turbulentos presentes en la gran mayoría de flujos de interés industrial.

Si bien existen simplificaciones teóricas y geométricas que pueden aplicarse para llegar a soluciones analíticas, la adecuabilidad de estas fórmulas suele ser limitada. Por otra parte, las correlaciones empíricas también tienen un alcance acotado o precisan de ajustes que requieren una medición experimental que suele ser bastante costosa.

En este contexto, los métodos numéricos son una alternativa para reducir los tiempos y costos de cualquier análisis que involucre flujos en geometrías complejas [3-6]. Con el desarrollo de más potencia de cálculo y códigos de simulación más eficientes, las capacidades de realizar estudios mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) son día a día más accesibles [7].

Si bien esta herramienta se extiende cada vez más en el mundo de la ingeniería, las habilidades necesarias para hacer un uso correcto de una plataforma CFD no se desarrollan usualmente en la carrera de grado [8-12]. Esto se debe, en gran medida, a que la mayor complejidad de los modelos físicos requieren un análisis más riguroso al momento de configurar los métodos numéricos, en contraste con otras herramientas Ingeniería Asistida por Computadora (*Computer Aided Engineering, CAE*) que resuelven sistemas de ecuaciones lineales y estacionarios (elasticidad, acústica, electromagnetismo, etc).

El presente trabajo propone una primera integración de contenidos y habilidades CFD en el contexto de la asignatura Mecánica de Fluidos, del tercer año de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Rosario. En esta propuesta didáctica, el foco se ubica en emplear modelos numéricos preconfigurados como una herramienta de análisis para profundizar el estudio sobre soluciones analíticas o datos experimentales. En este sentido, la sección 2 presenta brevemente los contenidos del analítico en la asignatura. En la sección 3 se presenta OpenFOAM, siendo esta la plataforma CFD elegida debido a su carácter de *software* libre y a la extensión internacional que la misma tiene en la industria. Asimismo, se introduce la interfaz gratuita *simFlow* ([sim-flow.com](http://sim-flow.com)), que se utiliza para reducir el tiempo necesario para que los estudiantes se interioricen con el programa. La sección 4 presenta las descripciones



generales de cada trabajo práctico y una breve reseña de los aprendizajes que los estudiantes adquieren en cada práctica. Finalmente, presentamos las primeras conclusiones sobre la práctica realizada hasta el momento y algunas propuestas para hacer un mejor uso del espacio “Taller de CFD” dentro del curso Mecánica de Fluidos.

## 2. UNA PROPUESTA DE TALLER FÍSICO VIRTUAL

La actividad curricular Mecánica de los Fluidos se ubica en el sexto cuatrimestre de la carrera Ingeniería Mecánica de la UNR. Sus correlativas anteriores incluyen “Mecánica de Medios Continuos”, “Termodinámica” y “Métodos Numéricos”, asignaturas que incluyen los elementos básicos de modelado y resolución aproximada de las ecuaciones usualmente resueltas en los códigos CFD.

Particularmente los tres primeros módulos de la asignatura son: “Propiedades de fluidos”, “Hidrostática” y “Balances integrales”, unidades que repasan conceptos definidos en Termodinámica. Estas unidades temáticas apuntan a un modelado que resulta en ecuaciones algebraicas, usualmente resueltas con métodos tradicionales. El módulo cuatro, denominado: Balances diferenciales, introduce las ecuaciones de Navier-Stokes: Eq (1) y (2) que representan respectivamente, balances de masa y momento lineal, en este caso para un flujo incompresible Newtoniano [1].

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \mu \Delta(\bar{u}) + \rho g \quad (2)$$

Con este primer sistema de ecuaciones diferenciales, se introduce el uso de métodos numéricos y se describen los fundamentos del CFD en el módulo cinco de la asignatura. Luego, a partir de este modelo relativamente general, se estudian áreas de aplicación específicas de la Mecánica de Fluidos como flujo en cañerías y aerodinámica, que son respectivamente los módulos seis y siete del curso. Otra unidad temática de la asignatura es el modelado de flujo compresible, que constituye el número ocho.

El actual contexto físico-virtual de formación superior, solicita de investigaciones, desarrollos tecnológicos y transferencias que aborden en forma interdisciplinar las problemáticas relacionadas a la construcción de nuevos perfiles de formación e inserción profesional que requieren una integración adecuada y a la vez analítica de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) [13].



En esta línea, durante el año 2022, se propuso la implementación de un taller físico virtual para llevar adelante las actividades específicas empleando CFD. En este sentido, se planteó hacer foco en la construcción de los contenidos y habilidades a través del intercambio bajo la modalidad pedagógica de taller, mediatizadas por dispositivos informáticos y comunicacionales, resultando indisociable que todo desarrollo tecnológico que se pone en práctica, debe atender a complejos contextos de aplicación.

De esta manera, cada actividad práctica consistió en una primera instancia donde cada estudiante ejecuta una simulación en la configuración inicial y valida la herramienta CFD con resultados de referencia. Luego, debía resolverse una consigna que involucra un análisis paramétrico sobre el problema en cuestión, induciendo a la reflexión conjunta sobre el impacto de esa variable en cierto aspecto particular de la dinámica de fluidos.

### **2.1. Selección de problemas y diseño de las actividades prácticas.**

Al introducir las ecuaciones de Navier-Stokes queda claro que los casos donde puede encontrarse una solución analítica son la excepción. Sólo es posible arribar a una Ecuación en Derivadas Parciales (EDP) lineal en problemas de geometría realmente simple, siempre y cuando pueda obviarse la turbulencia. En este contexto, los casos de estudio se seleccionan para hacer foco en fenómenos transitorios y relacionados a dinámicas locales producidas por la complejidad de la geometría analizada. Asimismo, se busca que la complejidad de los problemas planteados vaya en aumento y que su ordenamiento mantenga la lógica interna de las clases donde se presenta la teoría de cada unidad temática.

Así, se proponen cuatro actividades basadas en los problemas siguientes, donde cada caso está relacionado a un flujo particular: dentro de una cavidad cuadrada (módulo cuatro), a través de una válvula (módulo seis), alrededor de un perfil aerodinámico normalizado (módulo siete) y, en un conducto donde la compresibilidad del fluido produce ondas de choque (módulo ocho). Las actividades propuestas en cada caso se describen con más detalle en la Sección 4, donde también se mencionan los objetivos pedagógicos y un breve resumen de las experiencias de los estudiantes.

### **3. HERRAMIENTAS CFD Y CRITERIOS DE USO**

Las plataformas de simulación CFD consisten en aplicaciones de software que permiten resolver las Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDPs) de la Mecánica de Fluidos, y otros fenómenos de transporte, empleando algún método numérico para obtener soluciones discretas aproximadas. La mayoría del software masivo actual emplea técnicas basadas en el



Método de Volúmenes Finitos (*Finite Volume Method*, FVM) por su carácter inherentemente conservativo [4]. Tal es el caso de OpenFOAM [9].

### 3.1. Flujo de trabajo típico de un análisis de ingeniería aplicando CFD

En general, el CFD es una herramienta que se aplica a la resolución de problemas cerrados, como por ejemplo: el cálculo de la fuerza de arrastre en la pala de un aerogenerador, en el marco de un problema abierto, como el diseño del rotor.

Una vez definido el sistema que va a estudiarse, el proceso para realizar un análisis CFD comienza creando una representación CAD (*Computer Aided Design*) del dominio donde se resolverán las ecuaciones de interés. Esta geometría luego se subdivide en celdas, que constituyen la “malla” donde se aplicarán los cálculos algebraicos. Luego se procede a definir el modelo físico a emplear: las ecuaciones que se calcularán, las propiedades de las sustancias involucradas, los valores para cada parámetro del modelo, y las condiciones de contorno. Una vez definidos estos valores, se ejecuta el *software* CFD, que implementa métodos numéricos para obtener soluciones aproximadas a las ecuaciones diferenciales. Como resultado, se obtienen valores en celda que aproximan los campos de solución del modelo de Mecánica de Fluidos. Estas aproximaciones locales son las que luego permiten calcular el resultado relevante para el problema de ingeniería.

Retomando el ejemplo mencionado, la fuerza de arrastre se calcula a partir de las aproximaciones de la presión, velocidad y su gradiente, sobre la superficie sólida. Este proceso es el que se representa en la región azul del diagrama presentado en la Figura 1.

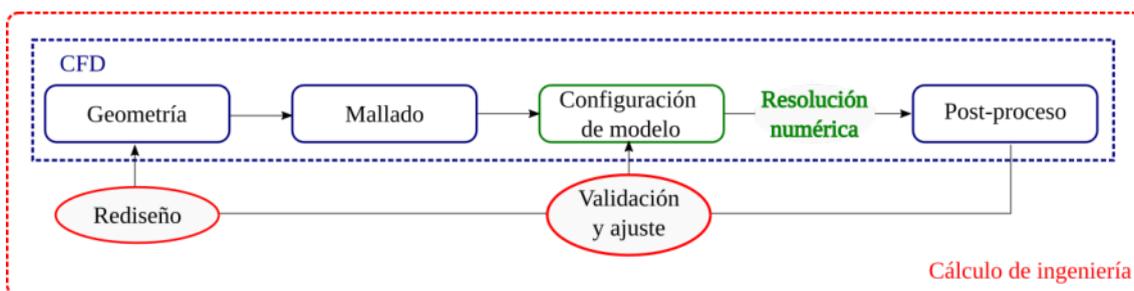


Figura 1: Flujo de trabajo CFD dentro de un cálculo de ingeniería

Este esquema muestra, además, cómo el cálculo mediante CFD es sólo una parte del cálculo de ingeniería. En general, se requieren varias iteraciones en la configuración de la simulación para llegar a resultados con buena confiabilidad. Este proceso de calibración, contrastando los resultados numéricos con un problema de prueba sencillo, o midiendo un valor conocido *a priori* en el problema original, se conoce como validación del modelo. Una vez que la configuración



logra la precisión requerida, se procede a emplear el modelo numérico en el análisis de ingeniería *per se*. Particularmente, analizando la dinámica del desprendimiento de vórtices en la pala del aerogenerador se proponen cambios en la geometría y se realizan nuevas simulaciones sobre dicho rediseño, a fin de evaluar si los cambios aplicados logran el efecto esperado.

Es sobre esta última etapa, de validación y análisis, que se hace foco en las actividades propuestas para la cátedra de Mecánica de los Fluidos. En este sentido, la dinámica de trabajo en los talleres de CFD se centra en que el estudiante comience con una configuración de caso funcional, valide la misma con datos de referencia o resultados analíticos y finalmente haga un estudio de sensibilidad donde analice cómo cambia un resultado macro del problema (por ejemplo: la fuerza neta sobre la pala del aerogenerador) frente al cambio de un parámetro de diseño (cuerda el perfil de la pala).

### 3.2. Criterios de uso del CFD

Como se observa en la descripción anterior, realizar un estudio CFD lleva tiempo y debe estar justificado. Este es el primer punto a analizar: ¿Necesito una solución cuantitativa de precisión? ¿de cuánta precisión? ¿Cómo verifico esta precisión? ¿Cuánto tiempo llevará configurar una simulación? ¿Cuánto tiempo llevará ejecutar la simulación?

Antes de comenzar con cualquier estudio CFD, es necesario plantearse estas preguntas y ensayar una respuesta. Por ejemplo, el proceso de verificación de la precisión del método numérico, usualmente llamado validación, es en sí mismo un trabajo que lleva tiempo. Esta etapa es tan importante como la calibración de un instrumento de medición en una línea de producción. Sin bien una buena planificación para un estudio mediante CFD debe tener en consideración una serie de pruebas que validen el modelo numérico, es usual que en la práctica estas instancias se ignoren o se realicen sólo si se detectan problemas en la etapa de post-proceso.

Este es sólo un ejemplo de los conceptos que se incluyen como contenido transversal de estas actividades. Si bien el principal objetivo pedagógico de cada actividad práctica está relacionado a conceptos propios de la Mecánica de Fluidos, los ejercicios se plantean de forma que despierten inquietudes, las mencionadas previamente y otras, respecto a cómo realizar un buen uso del CFD como herramienta de ingeniería.

Cabe notar que las formaciones en CFD raramente se centran en este aspecto, sino que apuntan a comprender la dinámica de la herramienta descrita en la sección anterior. En el contexto de nuestra asignatura, estas cuestiones pasan a segundo plano. Por esta razón,



buscamos seleccionar un software que sea a la vez intuitivo, didáctico y usualmente aplicado a la resolución de problemas industriales.

### 3.3. Selección de software y uso de interfaces

Existe una gran diversidad en las ofertas de *software* CFD [7]. En particular, hay varias alternativas aún dentro de la categoría de herramientas generales de aplicación industrial.

Una primera clasificación dentro de este grupo es la distinción entre *software* libre y comercial. El *software* libre es gratuito y abierto, es decir que se puede acceder a la programación del código y analizarla de primera mano. Las aplicaciones comerciales son en general más fáciles de aprender y más intuitivas.

En la cátedra optamos por una propuesta basada en la plataforma de código libre OpenFOAM ([openfoam.org](http://openfoam.org)) [5]. Esta elección nos permite además debatir sobre el desarrollo y el uso de herramientas desarrolladas principalmente por la comunidad académica y utilizadas fuertemente en investigación. Particularmente, este entorno está muy extendido en la industria internacional (como Ferrari, Audi, Volkswagen, Huawei), por reducir significativamente los costos y ser más adaptable a las necesidades específicas de la empresa.

Por último, se cuenta con la interfaz gratuita simflow ([sim-flow.com](http://sim-flow.com)), que permite al usuario trabajar en un entorno que integra la preparación de la simulación, así como su ejecución -mediante OpenFOAM- y post-proceso empleando Paraview ([paraview.org](http://paraview.org)), desarrollado por Sandia Labs. El uso de esta interfaz gráfica reduce el tiempo necesario para que los estudiantes se familiaricen con la dinámica de trabajo, manteniendo el uso de *software* libre desarrollado por comunidades internacionales.

## 4. ACTIVIDADES PROPUESTAS

A continuación describimos cada Trabajo Práctico, su función pedagógica y los principales resultados que los estudiantes deben obtener y reportar en un informe técnico.

### 4.1. Flujo interno en una cavidad cuadrada

Este caso es un ejercicio académico definido como se observa en la Figura 2. Consiste en el movimiento de un fluido incompresible y newtoniano, impulsado por el esfuerzo de corte inducido por el movimiento de la cara superior del dominio: un prisma cuadrado de altura despreciable. Este problema, cuasi bidimensional, ha sido estudiado experimentalmente y por tanto se cuenta con datos de referencia que permiten estudiar el desarrollo transitorio del flujo y la transición a regímenes más caóticos a partir del crecimiento del número de Reynolds. A su

vez, esta simulación precisa una configuración muy básica, lo que permite emplear la actividad tutorial del *software*.

Esta actividad permite entender la dinámica de la interfaz gráfica del problema, así como la definición de condiciones de contorno básicas y el análisis de un transitorio hasta alcanzar un estado estacionario aproximado.

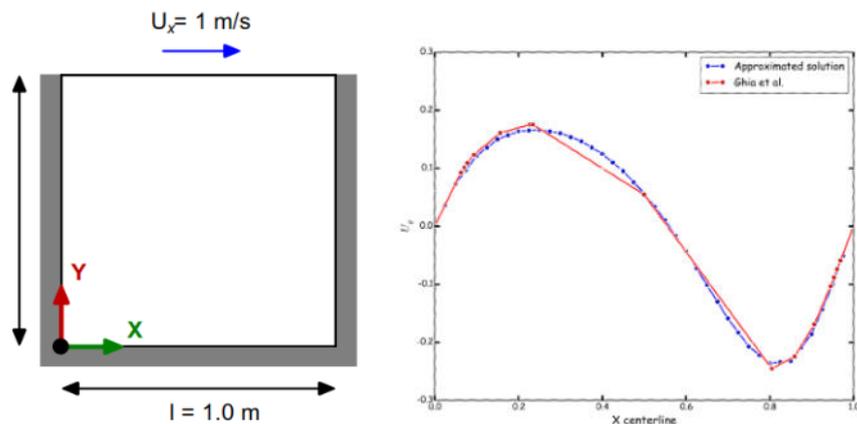


Figura 2: Esquema del dominio de la cavidad cuadrada (izquierda) y gráfica de validación con resultados de referencia para la componente vertical de velocidad (derecha)

El objetivo pedagógico de esta actividad es comprender los efectos del paso de malla y paso de tiempo sobre la precisión de la simulación, en el marco de un proceso de validación de *software*. En cuanto a la Mecánica de Fluidos, el análisis sobre los cambios que ocurren en el flujo a partir de la variación del número de Reynolds apuntan a tener una mejor noción del concepto de “tiempo de desarrollo” de un flujo transitorio hasta alcanzar un comportamiento, al menos estadísticamente, estacionario.

Los resultados que se solicitan para el informe son imágenes de los campos y las líneas de corriente del flujo ya desarrollado. Para obtener dichas representaciones, los estudiantes deben determinar el tiempo a partir del cual el flujo deja de cambiar significativamente en el tiempo. Esto lleva a una reflexión respecto a la causa de la variación de dicho tiempo, comparando regímenes con diferentes números de Reynolds.

#### 4.2. Válvula de Tesla

Este dispositivo es un conducto, sin partes móviles, que actúa como diodo hidráulico. La Figura 3 ilustra la distribución de presión en los dos sentidos de flujo. Este ejercicio introduce una geometría de mayor complejidad y profundiza el estudio sobre los fenómenos que generan

pérdida de carga en cañerías [14,15]. Esta actividad permite comprender el flujo interno en una geometría compleja, la pérdida de carga asimétrica y el desarrollo de capa límite confinada.

El objetivo pedagógico para la cátedra es profundizar en el concepto de pérdida de carga, relacionarlo con capa límite y observar el efecto de la turbulencia. En este sentido, los resultados solicitados para el informe son las curvas  $dp(Q)$  en ambas direcciones, la diodicidad calculada a partir de estos valores y los campos de presiones, destacando valores máximos y mínimos, indicando la localización de los mismos.

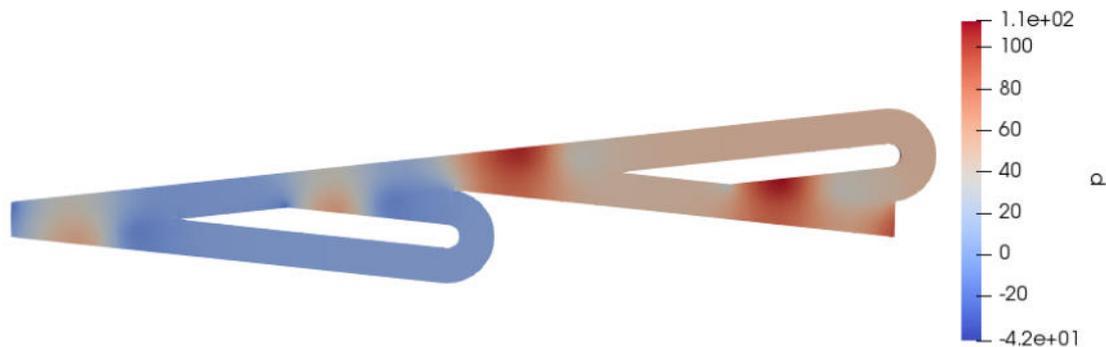


Figura 3: Vista lateral de la válvula de Tesla, coloreada por presión manométrica

#### 4.3. Perfil aerodinámico normalizado NACA

Aerodinámica de perfil NACA 0012: el análisis del flujo alrededor de este perfil normalizado permite explorar el modelado de turbulencia y estudiar las fuerzas de *drag* (arrastre) y *lift* (sustentación) para un problema ampliamente documentado [16-18]. Se ilustra el dominio analizado en la Figura 4.

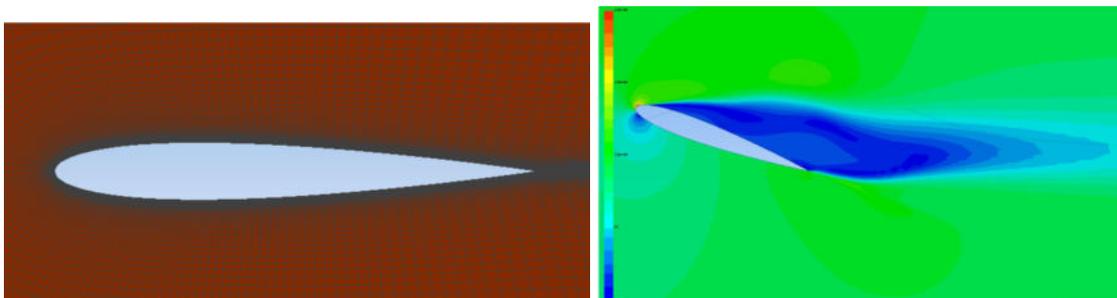


Figura 4: Mallado alrededor de un perfil NACA0012 (izquierda). Magnitud de velocidad para ángulo de ataque  $\alpha = 20^\circ$  (derecha)

El objetivo pedagógico principal de este trabajo es que el estudiante profundice su estudio en los conceptos básicos de aerodinámica, principalmente la relación entre las fuerzas de arrastre



y sustentación (usualmente expresadas en coeficientes adimensionales  $C_D$  y  $C_L$ ) con el ángulo de ataque. Al reportar estos resultados y compararlos con datos experimentales de la NASA para este perfil normalizado, se disparan reflexiones sobre el desprendimiento de la capa límite, cómo este fenómeno afecta la distribución de presión alrededor del cuerpo, y por ende, la fuerza neta sobre el mismo.

En este sentido, los resultados se presentan en curvas  $C_D(\alpha)$  y  $C_L(\alpha)$ , donde se contrastan las simulaciones propias con los resultados de referencia. Luego, para analizar la causalidad de los valores observados, los estudiantes analizan las líneas de corriente y el campo de presión sobre la superficie para diferentes ángulos de ataque, buscando el valor a partir del cual el desprendimiento de capa límite provoca la reducción de la fuerza de sustentación.

#### 4.4. Tobera convergente-divergente

Tobera convergente divergente: este es un problema que, al considerarse invíscido y adiabático, tiene solución analítica (para el flujo medio). La actividad propuesta apunta a analizar la dinámica de ondas de choque durante el régimen transitorio y a estudiar cómo cambia el flujo cuando las hipótesis se alejan de los casos ideales [1,19]. La Figura 5 ilustra la geometría de la tobera y la distribución del número de Mach en el flujo desarrollado.

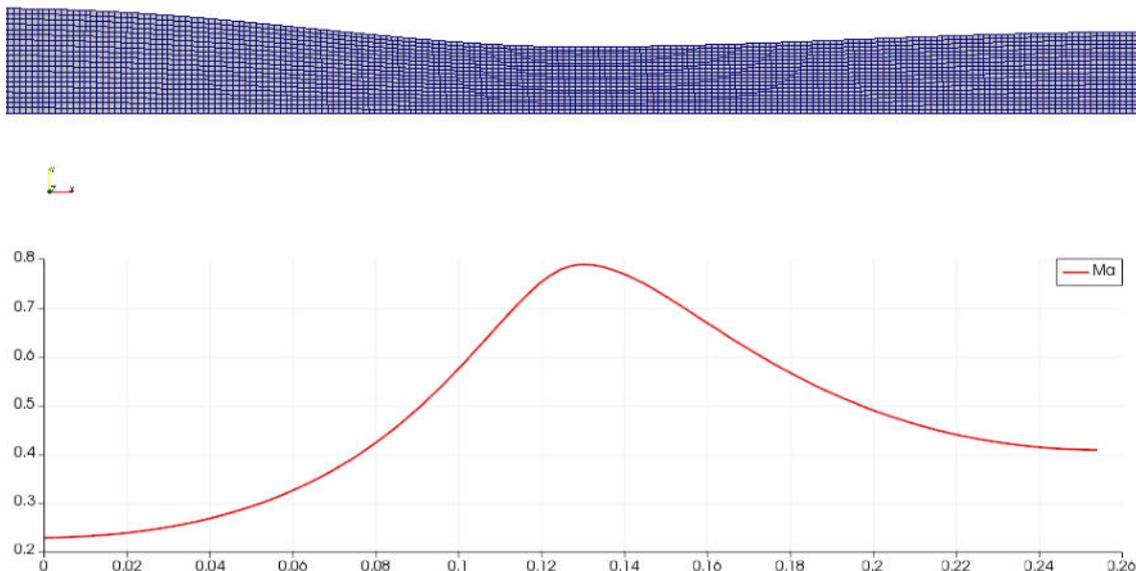


Figura 5: Malla de la tobera convergente-divergente y número de Mach para el caso de flujo subsónico desarrollado.



Esta actividad permite comprender el funcionamiento de un dispositivo de gran importancia en aeronáutica y turbinas, al mismo tiempo que facilita un contraste práctico entre los comportamientos de flujos incompresibles y compresibles. Así, el objetivo pedagógico principal de la actividad es analizar los modelos analíticos de flujo compresible expuestos en el curso, comparando sus predicciones con las simulaciones de procesos transitorios en condiciones ideales que deberían alcanzar los estados estacionarios ideales observados por los modelos unidimensionales isoentrópicos.

Para esta actividad, la validación del *solver*, diferente a los anteriores porque considera el balance de energía, se realiza justamente con resultados analíticos para el problema 1D. Otro de los resultados que se solicita es el tiempo de desarrollo de flujo para cada uno de los tres casos sugeridos (subsónico, supersónico y un caso intermedio con una onda de choque). En su informe, los estudiantes reportan los valores de presión, temperatura, y número de Mach a lo largo del eje de simetría, en gráficas como la que se muestra en la Figura 5.

## 5. CONCLUSIONES

Se exponen en este artículo las propuestas de actividades prácticas en el marco de una asignatura de Mecánica de los Fluidos que, empleando CFD, permiten analizar con más detalle aspectos específicos de contenidos curriculares y fomentar habilidades valiosas para la vida profesional. El uso de esta herramienta enriquece los desarrollos teóricos y experimentales, completando la visión más tradicional de la asignatura.

Las actividades propuestas llevan a los estudiantes a plantearse como casos de análisis donde se realizan estudios paramétricos sobre la dinámica de un dispositivo en particular. De esta manera, pueden obtener conclusiones principalmente sobre la física de los problemas. Sin embargo, se aclara que el aprendizaje del uso de CFD es genérico, ya que los tiempos del curso no permiten profundizar en estas cuestiones.

A futuro se espera emplear un *software* de interfaz más intuitiva, de forma que los estudiantes puedan dedicar más tiempo al estudio paramétrico y al análisis de resultados.

## REFERENCIAS

- [1] Cengel, Y. y Cimbala, J. *Ebook: Fluid mechanics fundamentals and applications*. McGraw Hill, EEUU, 2013.
- [2] White, F. M. *Fluid mechanics*. McGraw Hill, EEUU, 1966.
- [3] Versteeg, H. K., y Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education, England, 2007.



- [4] Moukalled, F.; Mangani, L.; Darwish, M.; Moukalled, F.; Mangani, L. y Darwish, M. *The finite volume method*. Springer International Publishing, EEUU , 2016.
- [5] Greenshields, C. J. y Weller, H. G. *Note on Computational Fluid Dynamics: General Principles*. CFD Direct, England, 2022. Disponible en: <https://doc.cfd.direct/notes/cfd-general-principles/>
- [6] Hirsch, C. *Numerical computation of internal and external flows: The fundamentals of computational fluid dynamics*. Elsevier, EEUU, 2007.
- [7] CFD Online. *Codes*. Disponible en: <https://www.cfd-online.com/Wiki/Codes>
- [8] CONFEDI. *Propuesta de Estándares de Segunda Generación para la Acreditación de Carreras de Ingeniería en la República Argentina*. Editorial Universidad FASTA, Argentina, 2018.
- [9] OpenFOAM (ESI). *3 weeks series*. Disponible en: [https://wiki.openfoam.com/%223\\_weeks%22\\_series](https://wiki.openfoam.com/%223_weeks%22_series)
- [10] Guerrero, J. *Introductory OpenFOAM Course*. University of Genoa, Italia, 2013.
- [11] Fraser, D. M.; Pillay, R.; Tjatindi, L. y Caseet, J. M. *Enhancing the learning of fluid mechanics using computer simulations*. Journal of Engineering Education, Vol. 96-4, pp. 381-388, 2007.
- [12] Magana, A. J.; Falk, M. L.; Vieira, C. y Reese Jr, M. J. *A case study of undergraduate engineering students' computational literacy and self-beliefs about computing in the context of authentic practices*. Computers in Human Behavior, Vol. 61, pp. 427-442, 2016.
- [13] San Martín, P. y Rodríguez, G. *Construir un nuevo diseño curricular participando de un Dispositivo Hipermedial Dinámico*. Revista Cognición: Revista Científica de FLEAD, Vol. 22, pp. 1-17, 2009.
- [14] Cardona, C. S.; Hazzi, F.; Pairetti, C. I. y Venier, C. M. *Estudio CFD de pérdida de carga en válvula Tesla T45-R*. Anales AFA, Vol. 33, pp. 26-30, 2022.
- [15] Hazzi, F.; Cardona, C. S.; Pairetti, C. I. y Venier, C. M. *Análisis CFD de control de flujo mediante una válvula esférica*. ANALES AFA, Vol. 33, pp. 21-25, 2022.
- [16] Alletto, M. OpenFOAM wiki. *NACA0012*. Disponible en: [https://wiki.openfoam.com/NACA0012\\_by\\_Michael\\_Alletto](https://wiki.openfoam.com/NACA0012_by_Michael_Alletto)
- [17] Airfoil Tools. *Airfoil database list*. Disponible en: <http://airfoiltools.com/search/airfoils>
- [18] NASA. *Turbulence Modeling Validation (NACA0012)*. Disponible en: [https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012\\_val.html](https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012_val.html)
- [19] NASA. *Converging-Diverging Verification (CDV) Nozzle*. Disponible en: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/cdv/cdv.html>



## PORTAFOLIO DE EVIDENCIAS COMO INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE: UNA ALTERNATIVA EN MOODLE

Miriam E. Ríos<sup>1</sup>, Gustavo J. López<sup>2</sup>, Sebastián I. Scaglione<sup>3</sup>, Laura A. López<sup>4</sup>, Lurdes A. López<sup>5</sup> y Eve L. Coronel<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Departamento Académico de Matemática-UNSE Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías  
Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina- [merios15@yahoo.com.ar](mailto:merios15@yahoo.com.ar)

<sup>2</sup>Departamento Académico de Matemática-UNSE Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías  
Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina- [gustavoilopez@gmail.com](mailto:gustavoilopez@gmail.com)

<sup>3</sup>Departamento Académico de Matemática-UNSE Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías  
Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina- [purinqui.cn@gmail.com](mailto:purinqui.cn@gmail.com)

<sup>4</sup>Departamento Académico de Matemática-UNSE Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías  
Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina- [lopezlauraanabel@gmail.com](mailto:lopezlauraanabel@gmail.com)

<sup>5</sup>Facultad de Agronomía y Agroindustrias. UNSE. Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero,  
Argentina- [lurdeslopez.agro@gmail.com](mailto:lurdeslopez.agro@gmail.com)

<sup>6</sup>Facultad de Agronomía y Agroindustrias. UNSE. Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero,  
Argentina- [evcoronel@gmail.com](mailto:evcoronel@gmail.com)

### RESUMEN

En los últimos años en congruencia con el modelo de enseñanza del siglo XXI, la evaluación ha adquirido una nueva dimensión al girar el aprendizaje en torno al estudiante; en este sentido debe estar correctamente diseñada para que permita valorar si el estudiante ha alcanzado, como objetivo, no sólo los conocimientos sino también las competencias previamente definidas; haciéndose necesario la implementación de estrategias innovadoras. Surge en este marco el portafolio electrónico como una herramienta diseñada para dar soporte a la evaluación formativa. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (código 23C166) y presenta el diseño e implementación del portafolio electrónico como instrumento de evaluación del y para el aprendizaje en el contexto de asignaturas de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías y la plataforma Moodle. Se utilizó la metodología de análisis y revisión de las experiencias llevadas a cabo, de actas de regularidad período 2019 y 2020. Así como encuesta a estudiantes y entrevistas a docentes participantes. Entre los principales resultados del estudio, destaca que un gran número de alumnos regularizaron la asignatura con la implementación de la herramienta, lo que supone una mejora respecto a años anteriores en los que no se utilizaba la herramienta. Además, las encuestas a los alumnos y las entrevistas a los docentes respaldan una valoración positiva del desempeño académico de los alumnos y su satisfacción con la experiencia de participación. El portafolio electrónico semiestructurado es una herramienta que permite la evaluación continua durante el desarrollo del currículo, beneficia el desempeño y contribuye a mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje.

**Palabras Clave:** *Portafolio de Evidencias, Evaluación del Aprendizaje, Portafolio Electrónico.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación se ha convertido, en los últimos años, en un elemento central dentro del ámbito universitario particularmente al girar el aprendizaje en torno al estudiante; Afloran ahora nuevos planteamientos teóricos que otorgan un lugar preponderante a la evaluación y los docentes deben apropiarse de ellos. El concepto Evaluación Alternativa hace referencia a todas las técnicas y métodos de evaluación que intentan superar a la metodología tradicional de evaluación, basada en la simple realización de pruebas y exámenes, con la finalidad única o principal de calificar [1]. La Evaluación Auténtica es aquella que propone situaciones del mundo real o cercanas a ellas, problemas significativos, complejos, para que los estudiantes utilicen sus saberes previos, pongan en juego estrategias y demuestren la comprensión de los conocimientos nuevos [2]. En este sentido, cuando se plantea la evaluación para el aprendizaje se está comprendiendo que, instalada en el mismo paradigma que la evaluación formativa, la primera la complejiza y amplía hasta pensar en la evaluación como un proceso que tiende a ser continuo, con énfasis en la retroalimentación de la información para el docente y especialmente para el estudiante. Es importante aclarar, como lo hacen [3], que ambos conceptos no son sinónimos, “la evaluación para el aprendizaje apunta a pensar a cerca de la enseñanza y del aprendizaje, mientras que la evaluación formativa se propone como un enfoque para la evaluación”. Es decir que, por un lado, se está considerando al estudiante en el centro del proceso evaluativo. Y por otro, se logra integrar la evaluación con la enseñanza y el aprendizaje de un modo más auténtico y desafiante para el estudiante; éste se va formando mientras aprende, muestra sus desempeños y se va generando información que contribuye a su avance.

En este contexto se presenta un instrumento de evaluación, el portafolio de evidencias electrónico semiestructurado. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (código 23C166), uno de cuyos objetivos es diseñar nuevas propuestas de enseñanza, aprendizaje y evaluación para el desarrollo de competencias de los estudiantes. Esto es exactamente lo que pretende al presentar el diseño e implementación del portafolio electrónico como instrumento de evaluación del y para el aprendizaje en el contexto de asignaturas de la FCEyT y la plataforma Moodle.

Para ello se presentan los materiales, un portafolio de evidencias semiestructurado en formato electrónico o digital, y se describe su proceso de construcción e implementación en las asignaturas Modelización Matemática del Profesorado y Licenciatura en Matemática e Investigación Operativa de la Licenciatura en Sistemas de Información, ambas de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de la Universidad Nacional de Santiago del Estero. Se analizan y revisan las contribuciones de los estudiantes y las actas de regularidad del período 2019 y 2020. Así como encuesta a los estudiantes y entrevistas a los docentes participantes.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia que se describe se realizó con el alumnado de dos asignaturas. Una, Modelización Matemática del Profesorado en Matemática y, la otra, Investigación Operativa de la Licenciatura en Sistemas de Información, ambas de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de la Universidad Nacional de Santiago del Estero. Se utilizó la metodología de análisis y revisión de las experiencias llevadas a cabo, en las asignaturas mencionadas con el uso del e-portafolio, y de las actas de regularidad del Sistema de Información Universitaria SIU GUARANÍ-UNSE periodos 2019-2020 para contrastar el rendimiento de los alumnos en esos periodos. Así como encuestas a estudiantes y entrevistas a docentes participantes.

### 1.1. El portafolios para una evaluación integral

A partir del paradigma que considera a la evaluación como un proceso del y para el aprendizaje, se propuso, como evaluación integral de asignaturas, la evaluación por portafolios. Tal como lo definen [4] “el portafolios es una colección de trabajos producidos por los estudiantes que revelan su progreso durante un cierto tiempo. Es un instrumento basado en la reflexión, que permite evaluar el proceso de aprendizaje y el logro de las metas propuestas”.

Por otra parte [5] destaca que este instrumento le permite al estudiante demostrar, por medio de la selección y organización de evidencias, los aspectos más significativos de su proceso de aprendizaje. Esta colección permite que tanto alumno como profesor reconozcan, valoren y reflexionen sobre el crecimiento gradual de los aprendizajes logrados en la formación.

Según la clasificación propuesta [5], se distinguen tres tipos de portafolio estructurado, semiestructurado y libre. Además, los mismos autores analizaron los formatos, físico y en línea, disponibles para integrar los portafolios como instrumento de evaluación. En este último se pueden incluir evidencias con diversos formatos como audio, video, gráficos, entre otros; ello permite que los alumnos desarrollen habilidades tecnológicas.

Otro aspecto importante a tener en cuenta al trabajar con portafolios son sus componentes. Mientras que [4] establecen como componentes básicos: carátula, índice, carta de presentación y entradas o capítulos; [5] distingue: datos de identificación, tipo de portafolio a desarrollar, tipo de formato del portafolio, secciones que integrarán al portafolio, evidencias de cada sección, sesiones de realimentación que se realizarán durante el desarrollo del portafolio, fecha de entrega y la realimentación final.

En cuanto a las ventajas de este tipo de herramienta, según [4] una de las grandes ventajas del portafolios digital o electrónico o e-portafolios, es que facilita la integración de los tres tipos de



evaluación (Autoevaluación, coevaluación y heteroevaluación) en un sólo instrumento. También, promueve el desarrollo de habilidades metacognitivas y de autonomía, ya que son los mismos alumnos quienes seleccionan y analizan las evidencias de sus aprendizajes. Las mismas autoras afirman que poseen tres ventajas adicionales. Tiene una mayor visibilidad, combinan múltiples formas de lenguaje que facilita la integración de recursos de audio, video e imágenes; los entornos virtuales favorecen el trabajo colaborativo y la posibilidad de incluir a otros en el trabajo de construcción de portafolio. Sin embargo, el portafolios digital o e-portafolios no debe reducirse a una copia del portafolio manuscrito tradicional y se debe aprovechar Internet, ya que existen muchas herramientas que ofrecen formas de manejar la información más dinámica, y según [6], un portafolios de este tipo agrega a la potencialidad de su formato para el intercambio (pdf, doc, ...), su potencial de interacción. Además, brinda una gama de opciones, lo que lo convierte en una herramienta más completa y personalizable que realiza funciones de gestión del aprendizaje.

Según [3], la retroalimentación como proceso de diálogo y mejora no se reduce a corregir el trabajo de los estudiantes, sino a intentar involucrarlos en la revisión de sus aprendizajes. Mas importante aún, cuando se da en el contexto de la evaluación formativa, se caracteriza por ser constante a lo largo del cursado, valorar el avance, identificar los obstáculos, atender consultas y ofrecer sugerencias a los alumnos para que regulen sus propios procesos.

Sugiere [7] que los criterios de evaluación en el marco de la evaluación auténtica sean el resultado de un acuerdo entre el docente y el alumno, ya que esto ayuda a crear una mayor implicación y compromiso para lograr el objetivo de aprendizaje previsto.

En el mismo riel de las sugerencias, [7] propone organizar la información, a través del siguiente esquema: describir el trabajo realizado por el estudiante; destacar los aspectos positivos; focalizar; ejemplificar y preguntar; indicar que hacer con la información; comunicar.

Plantea [8] que, para utilizar el portafolio, en la evaluación del y para el aprendizaje, es necesario conjugarlo con otros instrumentos como rúbricas, escalas, listas de cotejo o exposiciones.

## **1.2. Desarrollo de la experiencia: Portafolios de evidencias electrónico semiestructurado**

La implementación del portafolios de evidencias semiestructurado en formato electrónico o digital se realizó a partir del mes de marzo de 2020 con el inicio el período de aislamiento social preventivo y obligatorio por la pandemia por COVID 19 lo que hizo que los equipos docentes tuvieran que rediseñar las actividades formativas. Y, en ese contexto, se consideró que, utilizando una plataforma, como Moodle, contribuiría a la actualización de un instrumento pedagógicamente importante y permitiría aprovechar el aula virtual del Centro Universitario Virtual de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías (CUV- FCEyT) como un espacio de construcción colectiva.



Una vez que se decidió implementar tal instrumento de evaluación se siguió el proceso propuesto por [5]. En primer lugar, tras revisar detalladamente la planificación, se incorporaron competencias y habilidades clave en función de las cuales se definieron los resultados de aprendizaje que los alumnos deben alcanzar, de acuerdo con los lineamientos institucionales establecidos. Estas competencias fueron: Desarrollar modelos matemáticos de situaciones problemáticas, ya sean de sistemas reales o abstractos, utilizando técnicas y herramientas matemáticas e informáticas, trabajando tanto de manera autónoma como en equipos interdisciplinarios; Desempeñarse de manera efectiva en el trabajo colaborativo en equipos; Comunicarse de manera eficiente y efectiva tanto de forma oral como escrita; Fomentar el aprendizaje continuo y autónomo. En cuanto a los resultados de aprendizaje, estos incluyen: Valorar la importancia de la construcción de modelos y la aplicación de métodos de solución en su proceso de aprendizaje; Comparar diferentes software para la solución de modelos matemáticos y la interpretación de las soluciones obtenidas; Expresar por escrito sus reflexiones fundamentadas en los principios teóricos de las actividades desarrolladas durante la asignatura. Y para cuidar la coherencia interna, orientada al alineamiento constructivo del currículo como sugiere [9] se realizaron cambios metodológicos en la enseñanza y se diseñaron instrumentos y procedimientos de evaluación acordes con los resultados propuestos. Sin dejar de establecer acuerdos con los alumnos de los criterios de valoración y las evidencias de aprendizaje a considerar. Como consecuencia del acuerdo anterior, se explicó a los alumnos en qué consiste el portafolios, su importancia y el propósito sobre su empleo en la asignatura. Asimismo, se los orientó respecto de los tipos de evidencias, su contenido y su organización. Durante todo el cuatrimestre los estudiantes recopilaron evidencias de las distintas actividades, las triangulan con los aportes teóricos del aula virtual, otros autores, sitios y las agregaron en el portafolio. Son ejemplos de evidencias: seleccionar un problema construir su modelo matemático, resolverlo con todos los métodos posibles en papel y lápiz y usando al menos dos softwares e indicar ventajas y desventajas de cada uno. Interpretar la solución obtenida, clasificar el tipo de solución encontrada y recomendar la decisión óptima a seguir; rehacer aquellos items del examen parcial con algún error y explicar cuál sería la forma correcta de los mismos; expresar las conclusiones a las que arribaron en ambos proyectos grupales: sobre problemas de distribución y sobre juegos. Indique aspectos positivos, desafíos, inconvenientes, aprendizajes logrados.

El portafolio diseñado según los componentes básicos propuestos por [5] se divide en 3 secciones cada una con su correspondiente sesión de retroalimentación del docente tras la exposición oral individual de sus producciones. La cual permite a ambos evidenciar "el esfuerzo, los progresos, los procesos y los logros en cada instante del cursado y no esperar al final cuando poco queda por hacer.



### 1.2.1. Incorporación de rubrica de evaluación

De manera asociada al portafolio, se empleó una rúbrica analítica para realizar una valoración integral de las competencias, teniendo en cuenta cinco criterios (secciones, evidencias, su organización y estado, las reflexiones) en cada uno se describen cuatro niveles de ejecución con un puntaje (ver Figura 1). En la última columna se indica el puntaje que el portafolio alcanza. Inclusive se resaltan los aspectos esperables para la aprobación del portafolio.

Nombre del evaluado:		Fecha:			
Criterios	Sobresaliente 20	Suficiente 17,5	Deficiente 12,5	Inaceptable 10	Puntaje
<b>Secciones</b>	Presenta todas las secciones requeridas.	Presenta más de la mitad de las secciones requeridas.	Presenta menos de la mitad de las secciones requeridas.	No presenta las secciones requeridas.	
<b>Evidencias</b>	Incluye todos los tipos de evidencias solicitados que respaldan el logro del aprendizaje esperado: tareas y actividades en cada sección.	Incluye el 50% o mas de los tipos de evidencias solicitados que respaldan el logro del aprendizaje esperado: tareas y actividades en cada sección.	Incluye menos del 50% de los tipos de evidencias solicitados y/o no demuestran el logro del aprendizaje esperado: tareas y actividades en alguna sección.	No incluye los tipos de evidencias solicitados ni demuestran el logro del aprendizaje esperado: tareas y actividades en algunas secciones.	
<b>Organización de evidencias</b>	Las evidencias cumplen con la secuencia establecida y usa un formato creativo.	Las evidencias tienen una secuencia coherente que no es la establecida, pero usa un formato creativo.	Las evidencias tienen una secuencia poco clara, no es la establecida y usa un formato poco creativo.	Las evidencias no tienen una secuencia coherente y usa un formato poco creativo.	
<b>Estado de las evidencias</b>	Las evidencias demuestran los avances en los aprendizajes esperados y cumplen con todos los elementos del formato que se consideran en las instrucciones del portafolio.	Las evidencias demuestran los avances en los aprendizajes esperados, pero no cumplen con todos los elementos del formato que se consideran en las instrucciones del portafolio.	Las evidencias demuestran algunos de los avances en los aprendizajes esperados y cumplen con algunos de los elementos del formato que se consideran en las instrucciones del portafolio.	Las evidencias no demuestran los avances en los aprendizajes esperados, pero cumplen con algunos los elementos del formato que se consideran en las instrucciones del portafolio.	
<b>Reflexiones</b>	Contiene reflexiones serias y vinculada con los logros alcanzados y los aspectos para mejorar en cada sección.	Contiene reflexiones serias y medianamente vinculadas con los logros alcanzados y los aspectos para mejorar en cada sección.	Contiene reflexiones poco vinculada con los logros alcanzados y los aspectos para mejorar en algunas sección.	No contiene reflexiones sobre los logros alcanzados ni los aspectos para mejorar en ninguna de las sección.	
					<b>Total</b>
Aspectos esperables para aprobación del portafolio					

Figura 1. Rubrica de evaluación asociada al portafolio semiestructurado digital

### 3. RESULTADOS

A continuación, se presentan las diferentes derivaciones conseguidas con esta propuesta de trabajo en el aula.

En primer lugar, del análisis y revisión de las experiencias llevadas a cabo en las asignaturas mencionadas con el uso del e-portafolio, y de las actas de regularidad del Sistema Información



Universitaria SIU GUARANÍ-UNSE periodos 2019-2020 para contrastar el rendimiento de los alumnos en esos periodos se observa entre los alumnos inscriptos en modelización Matemática en 2020, que desarrollaron un e-portafolio, el 82,35 % regularizó la asignatura. En contraste, el 66,6% de los alumnos inscriptos en el año 2019, sin implementación del e-portafolio, consiguió la regularidad. Por otra parte, de a los alumnos matriculados en Investigación operativa en 2020, que desarrollaron un e-portafolio, el 83,3 % regularizó la asignatura. Mientras que, el 71,1% consiguió lo hizo en 2019, sin implementación del e-portafolio.

La Figura 2, muestra la comparación entre alumnos (en porcentaje) que regularizaron su correspondiente asignatura en 2019 previa implementación del portafolio y en 2020 con la implementación de tal herramienta.

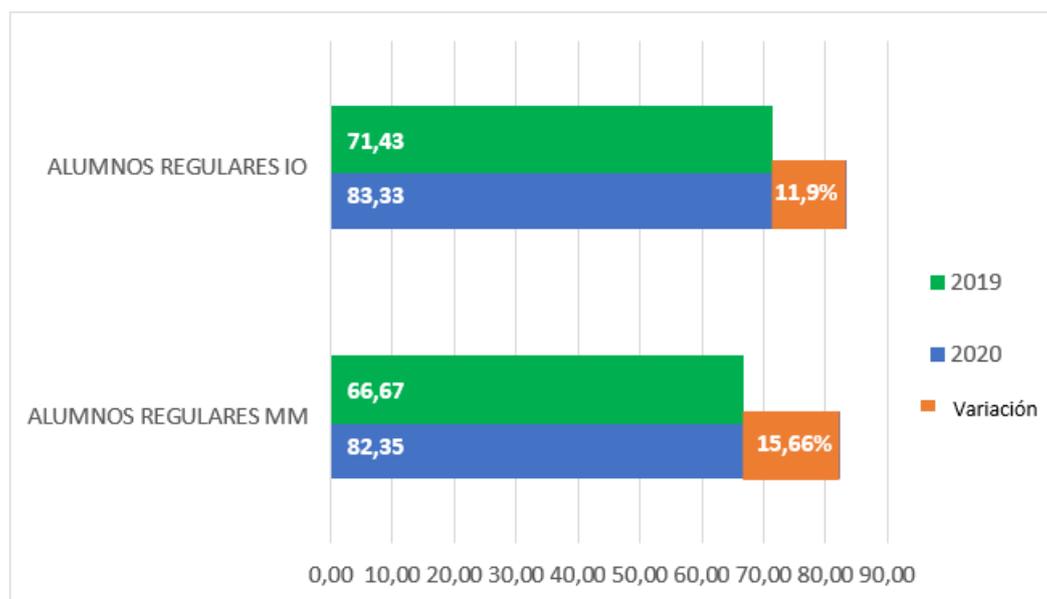


Figura 2: Comparación alumnos regulares 2019 versus 2020

### 3.1. Opinión de los alumnos

La encuesta estuvo dirigida a 35 alumnos al finalizar el ciclo lectivo 2020 y tuvo como objetivo recopilar información sobre la experiencia y comprender la concepción del instrumento didáctico desde la perspectiva de los alumnos. La estructura de la encuesta consta de tres preguntas abiertas (Tabla 1) y tres preguntas cerradas en escala tipo Likert (5: muy de acuerdo; 4: de acuerdo; 3: neutral; 2: en desacuerdo; 1: muy en desacuerdo), que indagan sobre beneficios e inconvenientes de la aplicación del instrumento.

Tabla 1. Preguntas para los alumnos sobre beneficios e inconvenientes del uso del portafolio



1- ¿Qué ventajas crees que ha tenido trabajar con la metodología aportada por la guía-portafolio en comparación con la forma en que se hacía hasta ahora?
2- ¿Cuáles son los inconvenientes?
3- De cara al desarrollo futuro de esta herramienta docente, ¿qué sugerías para que pueda mejorarse y ser más fácil?

En cuanto a los beneficios de utilizar el portafolios, los alumnos en su mayoría respondieron que el portafolios sirve como guía para entender lo que se está estudiando en la asignatura. También informaron que facilitó su comprensión global. Con base en el rol de alumnos, señalaron que esto les permitió mostrar en el portafolios lo que han aprendido de su trabajo, mientras revisan lo que no entienden durante las sesiones de tutoría con la ayuda de los profesores. Algunos de sus comentarios incluyen:

- "Me permite conectar y comparar trabajos y ver cómo han evolucionado. Una cosa que nunca hacía antes era corregir errores de algún examen luego de haberlo aprobado. Si el examen estaba aprobado, no prestaba atención a los errores que había cometido. Ahora el portafolio me obligó a corregir esos errores y aprender de ellos".

- "Entendí mejor cada tema y logré conectarlos entre sí. Por ejemplo, tenía que elegir evidencias en el portafolios, elegí un problema y lo resolví con todos los métodos y software".

- "Me obligó a practicar mis presentaciones orales, porque en cada sesión de tutoría con el profesor tenía que explicar y justificar el procedimiento de solución de las tareas que he elegido para el portafolio".

Estos son solo algunos ejemplos textuales de los comentarios de los alumnos. Su experiencia se puede ver a través de la reflexión, el autoaprendizaje y las relaciones entre docente y alumno/alumnos.

Entre los inconvenientes o desventajas de utilizar un portafolios en Moodle, la mayoría de los alumnos señalaron el tiempo de trabajo, pues según ellos, es una actividad muy exigente además de estudiar otras materias simultáneamente. Por otro lado, mencionaron bastante dificultad técnica porque el portafolio en el aula virtual de Moodle no era amigable por estar configurado en un idioma extranjero, el inglés. Finalmente, una pequeña proporción no informó problemas. La Figura 3 muestra el porcentaje de alumnos que señalaron las variables más representativas como desfavorecida.

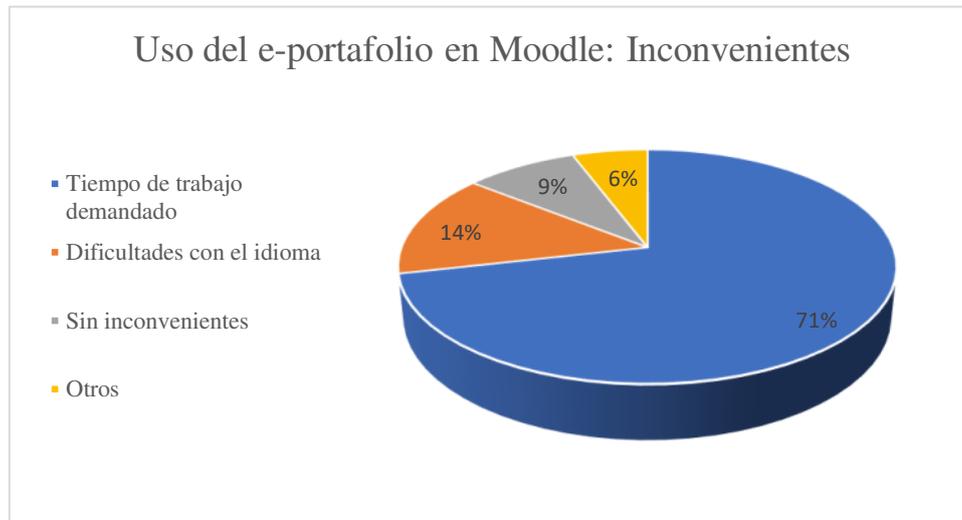


Figura 3. Inconvenientes señalados por los alumnos en el uso del e-portafolio en Moodle.

Respecto a las sugerencias de mejora, los estudiantes consideran que, en lugar de dar retroalimentación oral de forma individual, es mejor presentar cada portafolios en grupos, lo que puede reducir el tiempo de espera de cada estudiante.

En lo referente a las preguntas de respuesta cerrada, medidas con escala tipo Likert, que se muestran en la Tabla 2, se puede observar respecto a la pregunta 4, los alumnos respondieron estar de acuerdo en que el uso del portafolios contribuyó significativamente a su aprendizaje con un coeficiente de 57,14%. Y el 68,57 % de los alumnos dijeron estar de acuerdo en que el portafolios es una buena herramienta de enseñanza. Finalmente, mientras que el 40 % estuvo de acuerdo con la afirmación 6, un porcentaje mayor (45,71%) estuvo muy de acuerdo en que el portafolios contribuyó a la reflexión de su trabajo académico.

Tabla 2. Preguntas de respuesta cerrada (medidas con escala tipo Likert)

4- El uso del portafolio contribuyó a mi aprendizaje de forma significativa.
5- Fue una buena herramienta de enseñanza.
6-El portafolio contribuyó a la reflexión de mi trabajo académico.

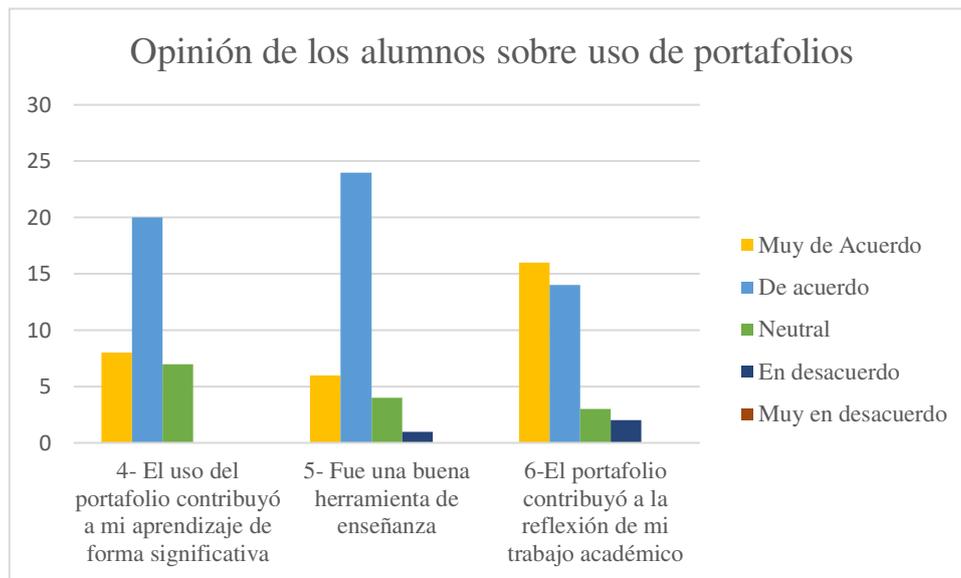


Figura 4. Apreciaciones vertidas por los alumnos sobre el uso del e-portafolio en Moodle.

Además, se observa en la Figura 4 que del 80% al 85% de los alumnos estuvo de acuerdo o muy de acuerdo con las tres preguntas sobre el uso del portafolios como una buena herramienta de enseñanza y su contribución al aprendizaje y la reflexión en el trabajo académico. Sin embargo, es necesario indagar por qué el 5,7% de los alumnos consideró que el portafolios no contribuye a la reflexión del trabajo académico.

### 3.2. Opinión de los docentes

Se realizaron entrevistas cualitativas en profundidad a través de reiteradas sesiones cara a cara con cada uno de los profesores para obtener las percepciones de los encuestados sobre sus experiencias con esta herramienta de evaluación. Se establecieron dos criterios para que sirvieran de guía de las charlas con los informantes sobre el portafolio, su proceso de elaboración y resultados alcanzados. Las entrevistas realizadas a cada uno de los docentes de las asignaturas fueron transcritas y analizadas de acuerdo con los criterios mencionados anteriormente.

De manera sucinta, entre las expresiones de los docentes, se destaca que “los documentos elaborados por el alumno fueron pruebas del proceso de aprendizaje”; “del análisis de esas pruebas se pueden identificar los ciclos de aprendizaje, lo cual no ocurre con los métodos tradicionales”; “el alumno ve el aprendizaje como propio y su responsabilidad ya que puede decidir cuándo mejorar su trabajo”.

De esta forma, los profesores reconocen el valor de esta herramienta de evaluación porque los acerca a sus alumnos. Especialmente durante las sesiones de retroalimentación, ya que



estas permitieron, en primer lugar, conocer a los estudiantes y analizar más profundamente cada una de sus producciones y su conexión con el contenido de la asignatura. Si bien advierten que existe un enorme potencial interactivo en el portafolio electrónico, expresan que debido al aislamiento preventivo impuesto por Covid 19, la coordinación de turnos de exposición vía videoconferencia se tornó en extensas jornadas de interacción. Además, pensaron que tanto la cantidad de alumnos como la abundancia de evidencias obstaculizaron su implementación, lo que requirió una inversión significativa de tiempo y esfuerzo por ambas partes. Por otro lado, esta experiencia les permitió planificar con mayor claridad el proceso de retroalimentación para involucrar a los alumnos en la revisión constante de sus aprendizajes. Incluso sintieron que los alumnos, al haber participado en el establecimiento de los criterios de evaluación se implicaron y comprometieron más en el logro de los objetivos de aprendizaje.

#### 4. CONCLUSIONES

Entre los principales resultados del estudio, se pudo observar que tras la implementación del portafolio electrónico semiestructurado hubo un incremento en la variación absoluta de la serie temporal 2019-2020 dado que por ejemplo en Modelización Matemática el 15,66 % de los alumnos regularizaron la asignatura. Mientras que en la asignatura Investigación Operativa arrojó un signo positivo del orden del 11,90 %. Esto supone una mejora respecto del año anterior en el que no se utilizaba la herramienta.

En líneas generales, el estudio confirmó la percepción positiva de los alumnos sobre las fortalezas del portafolio y su satisfacción con la experiencia de participación. Esto es así ya que, en las encuestas completadas, un alto porcentaje de alumnos indicó que el portafolio constituía una buena herramienta de enseñanza, que había contribuido significativamente a su aprendizaje, así como a la reflexión de su trabajo académico. Además, indicaron entre sus beneficios que sirvió de guía y que facilitó la comprensión global de la asignatura. Sin embargo, también dijeron que una posible debilidad de la experiencia llevada a cabo, podría estar vinculada al excesivo tiempo que ellos invierten en su construcción.

Desde el punto de vista de los profesores se puede deducir que el portafolio constituye una técnica de evaluación alternativa; que muestra el proceso de aprendizaje de los alumnos y que permite identificar los ciclos de aprendizaje. Incluso consideran que trabajando en él el alumno ve el aprendizaje como propio y su responsabilidad ya que puede decidir cuándo mejorar su trabajo. De esta forma, los profesores reconocen el valor de esta herramienta de evaluación porque los acerca a sus alumnos.



En otro sentido, no menos importante, su uso está en línea con el estándar actual para mejorar las herramientas de evaluación porque facilita el aprendizaje de los estudiantes, además de poder observar su desempeño ya que dota de transparencia al proceso y permite la autonomía del alumno. Es un recurso que posibilitó hacer una mejor evaluación formativa.

Por último, desde la perspectiva del profesor, también se evidenció en esta investigación que una evaluación por portafolio, en sí, requiere un gran esfuerzo y trabajo de su parte, tanto en su diseño como en su implementación. Sin embargo, hay que señalar que tal esfuerzo se equipara a los grandes resultados que se pueden lograr con la retroalimentación constante con los alumnos.

## REFERENCIAS

- [1] López Pastor, V. M. *Evaluación formativa y compartida en Educación Superior: Propuestas, técnicas, instrumentos y experiencias*. Narcea, Madrid, 2018.
- [2] Anijovich, R. *La evaluación Significativa*. Paidós, Buenos Aires-Argentina, 2010.
- [3] Anijovich, R. y Cappelletti, G. *La evaluación como oportunidad*. Paidós, Buenos Aires-Argentina, 2017.
- [4] Anijovich, R. y González, P. *Evaluar para aprender: Conceptos e instrumentos*. AIQUE, Buenos Aires- Argentina, 2011.
- [5] Mendiola, M. S., y González, A. M. *Evaluación del y para el aprendizaje: instrumentos y estrategias*. Imagia Comunicación, 2020.
- [6] García, F. "El papel de los portafolios electrónicos en la enseñanza-aprendizaje de las lenguas". *Glosas Didácticas*. Revista electrónica Internacional, nº14, primavera 2005.
- [7] Romero, T. 04. *Evaluar en entornos virtuales. Proceso de retroalimentación* [material de curso de autocapacitación]. Departamento de Educación a Distancia. Facultad de Humanidades. Universidad Nacional de Catamarca, 2021.
- [8] Barberá Gregori, E. *Calificar el aprendizaje mediante la evaluación por portafolios*. Perspectiva Educacional, Formación de Profesores, 45, 70-84, 2005. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333329100005>
- [9] Bronwn, S. y Pickford, R. *Evaluación de habilidades y competencias en Educación Superior*. Narcea, Madrid, 2018.



## SISTEMA INTEGRADO DE EVALUACIÓN CONTINUA

Miriam E. Ríos<sup>1</sup>, Gustavo J. López<sup>2</sup>, Sebastián I. Scaglione<sup>3</sup>, Eve L. Coronel<sup>4</sup>, y Laura A. López<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Departamento Académico de Matemática-UNSE Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías  
Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina- [merios15@yahoo.com.ar](mailto:merios15@yahoo.com.ar)

<sup>2</sup>Departamento Académico de Matemática-UNSE Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías  
Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina- [gustavoilopez@gmail.com](mailto:gustavoilopez@gmail.com)

<sup>3</sup>Departamento Académico de Matemática-UNSE Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías  
Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina- [purinqui.cn@gmail.com](mailto:purinqui.cn@gmail.com)

<sup>4</sup>Facultad de Agronomía y Agroindustrias. UNSE. Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero,  
Argentina- [evectoronel@gmail.com](mailto:evectoronel@gmail.com)

<sup>5</sup>Departamento Académico de Matemática-UNSE Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías  
Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina- [lopezlauraanabel@gmail.com](mailto:lopezlauraanabel@gmail.com)

### RESUMEN

Este artículo presenta un sistema integrado de evaluación continua en la educación universitaria, diseñado con el fin de obtener múltiples evidencias de los conocimientos y habilidades de los alumnos y facilitar el seguimiento y apoyo de sus procesos de aprendizaje. Esta experiencia de innovación fue planificada y desarrollada en el marco de un Proyecto de Investigación de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (código 23C-166). Los hallazgos clave de las encuestas a estudiantes y entrevistas a docentes respaldan una valoración positiva del rendimiento académico de los estudiantes y su satisfacción con la experiencia de participación. Es relevante destacar que, por un lado, al integrarse en un sistema de evaluación, los casos prácticos seleccionados poseen un valioso potencial para capturar evidencias de los procesos de aprendizaje. Además, resultan fundamentales en la administración y gestión de diversas ayudas educativas dirigidas a los estudiantes durante dichos procesos.

**Palabras Clave:** Sistema de Evaluación, Evaluación Continua, Evaluación Formativa.



## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la evaluación se ha convertido en un elemento central en los sistemas formativos universitarios. Y en particular, ella se entrama con el curriculum y la enseñanza y tensiona sobremanera a los alumnos cuando éste se enfrenta a dedos acusadores e instrumentos de medición que brindan notas cuantitativas sin criterios claros que las justifiquen; centrándose más en las debilidades y errores que, en los logros; castigando los errores y no asumiéndolos como un motor esencial del aprendizaje y la formación.

Este último y otros aspectos de la evaluación tradicional son cuestionados a diario bajo el imperio del enfoque de evaluación de las competencias. Este enfoque busca determinar los logros y áreas de mejora de una persona en relación a una competencia específica, utilizando criterios acordados y evidencias relevantes. Se enfoca en el desempeño de la persona en actividades y la resolución de problemas en distintos contextos. La retroalimentación desempeña un papel central en este proceso y debe ser oportuna y asertiva [1].

Es necesario aclarar algunos elementos involucrados en esta concepción: Se entiende por criterios de aprendizaje a aquellas pautas fundamentales que se deben tener en cuenta en la valoración de la competencia; se componen de un “*qué se evalúa*” y un “*con qué se compara*” (referente). Los criterios buscan considerar los diferentes saberes de la competencia (ser, hacer, conocer y convivir). Para un mejor manejo, se pueden establecer y clasificar mediante ejes procesuales, que son los grandes aspectos (temas, bloques, etc.) o desempeños que estructuran una competencia y configuran su dinámica de desarrollo. Por otra parte, las evidencias son los productos que se van obteniendo a partir de las actividades de aprendizaje. Es decir, pruebas concretas y tangibles de la competencia que resultan esenciales para evaluar los criterios. No se reducen a conocimientos.

Ambos, alumnos y docente, como protagonistas del proceso educativo deben atravesar la práctica compleja de la evaluación. Lejos de reducirse a la aplicación de un instrumento o a la medición de variables, supone una toma de decisiones y un posicionamiento teórico por parte de los docentes y de allí deriva su complejidad. En esta realidad compleja se hace necesario conformar sistemas integrados de evaluación que conecten las técnicas de manera racional entre sí, a modo de unidad, para conseguir los objetivos pretendidos. A esta tarea se aboca el presente trabajo que describe una experiencia de innovación planificada y desarrollada en el marco de un Proyecto de Investigación de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (código 23C-166). El enfoque de esta investigación se centra en el Sistema Integrado de Evaluación Continua (SIEC) en la educación universitaria diseñado con el fin de obtener múltiples evidencias de los conocimientos y habilidades de los alumnos y facilitar el seguimiento y apoyo de sus procesos de aprendizaje. Se seleccionaron cuatro casos de prácticas



de evaluación formativa que cumplen con dos criterios básicos: en primer lugar, tienen el potencial de constituir un sistema de evaluación integrado; y, en segundo lugar, comparten como eje común las competencias que pretenden desarrollar.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: en primer lugar, se revisarán los criterios indicados en la bibliografía para un sistema integrado de evaluación. Posteriormente, se presentarán los resultados de las experiencias mencionadas después de detallar la metodología utilizada.

Un sistema integrado de evaluación continua de los aprendizajes va más allá de la evaluación puntual o aislada de conocimientos y competencias, buscando obtener una visión integral y significativa del desarrollo académico de los alumnos. Esto requiere pasar de prácticas pedagógicas centradas en el aprendizaje de contenidos, las clases expositivas, la evaluación sumativa, el aprendizaje individual y el énfasis en la calificación, por prácticas focalizadas en la sociedad del conocimiento [1].

La evaluación continua implica que la evaluación se lleva a cabo de manera constante y en diferentes momentos del proceso de aprendizaje, permitiendo identificar fortalezas y áreas de mejora de los estudiantes en tiempo real [2]. Además, el sistema integrado considera diversas técnicas de evaluación, como exámenes, trabajos prácticos, proyectos, portafolios, rúbricas, entre otras, que abarcan distintos tipos de habilidades y conocimientos [3].

El enfoque integrado busca proporcionar una retroalimentación constante y constructiva a los estudiantes, lo que les permite reflexionar sobre su propio aprendizaje y realizar ajustes para mejorar su rendimiento [4]. Además, permite a los docentes y a las instituciones educativas tomar decisiones informadas sobre el diseño curricular, la planificación de clases y la adaptación de estrategias de enseñanza.

Al crear un sistema de evaluación de aprendizajes integrado, un docente debe seguir una cuidadosa planificación [5] y considerar diversos criterios para seleccionar las técnicas más adecuadas [6]. Aquí hay algunos criterios clave que un docente podría seguir: 1. Resultados de aprendizaje: Los criterios de evaluación deben estar alineados con los resultados de aprendizaje que se esperan que los estudiantes logren. Y deben ser el punto de partida para seleccionar las técnicas de evaluación. 2. Variedad de habilidades: La evaluación debe incluir una variedad de habilidades y conocimientos para garantizar que se evalúen todos los aspectos del aprendizaje. 3. Autenticidad: La evaluación debe ser auténtica y relevante para la vida real para que los estudiantes puedan aplicar lo que han aprendido en situaciones reales. 4. Continuidad y coherencia: El sistema de evaluación debe ser coherente en su diseño y aplicado de manera continua a lo largo del curso o período de estudio. Esto permite un seguimiento efectivo del progreso del estudiante y proporciona una visión integral de su aprendizaje. 5. Retroalimentación



significativa: La evaluación debe proporcionar retroalimentación significativa a los estudiantes para que puedan mejorar su aprendizaje. 6. Equidad e inclusión: La evaluación debe ser justa e inclusiva para todos los estudiantes, independientemente de su origen o habilidades. 7. Adaptabilidad: La evaluación debe ser adaptable y flexible para satisfacer las necesidades individuales de los estudiantes. 8. Uso de tecnología: La evaluación puede ser más eficiente y efectiva mediante el uso de tecnología. 9. Eficiencia y factibilidad: La evaluación debe ser eficiente y factible para el docente y los estudiantes. 10. Participación del estudiante: Involucrar a los estudiantes en el proceso de evaluación y considerar sus opiniones y preferencias en la medida de lo posible. Esto aumenta su compromiso y responsabilidad en el proceso de aprendizaje. 11. Evaluación formativa y sumativa [7]: la evaluación debe incluir tanto la evaluación formativa como la sumativa para garantizar que se evalúen todos los aspectos del aprendizaje. La evaluación formativa se caracteriza principalmente por ser continua, la evaluación sumativa tiende a ser un punto final, numérico y que encierra juicios evaluativos. Con este tipo de evaluación se retroalimenta a los alumnos de forma paralela y continua durante el transcurso del proceso de aprendizaje. De esta forma, en el preciso momento en que se detectan las disfunciones, es posible administrar los “remedios” necesarios y no esperar al final, para simplemente comunicar al alumno que reprobó el curso. La evaluación formativa trata de vincular el proceso de evaluación, al de formación completa del alumno; y se señala, de forma expresa, que la evaluación no debe entenderse sólo como procedimiento de selección, sino de orientación y de ayuda. Esta “se aplica en los distintos estadios y momentos del proceso de enseñanza-aprendizaje y adopta formas muy diferentes. Su objetivo es proporcionar información a profesores y alumnos y, a su vez, bases para la corrección de deficiencias encontradas en el proceso educativo” [8]. Al mismo tiempo, busca mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje tanto del alumnado como del docente [8]. Es una alternativa valiosa frente a modelos tradicionales de evaluación basados en controlar las conductas del alumnado a través de exámenes y en las que únicamente tiene importancia la calificación [9-12].

Todo sistema de evaluación puede estar conformado por diversas técnicas [3], sin embargo, consideramos que hay un conjunto mínimo de ellas que deben formar parte inexcusablemente del sistema para que sea completo. Estas técnicas clave son el examen, el portafolio y las rúbricas. Estas herramientas de evaluación tienen la capacidad de abarcar diferentes dimensiones del aprendizaje y complementarse entre sí para proporcionar una evaluación más integral y significativa. A continuación, veremos cómo cada una de estas técnicas puede contribuir a evaluar diferentes aspectos del aprendizaje:

**Examen:** Los exámenes son una técnica tradicional que se centra principalmente en evaluar el conocimiento conceptual y teórico de los estudiantes. Pueden incluir preguntas de opción múltiple, preguntas de desarrollo o preguntas prácticas que permitan medir la comprensión y



aplicación de conceptos clave. Los exámenes son útiles para evaluar la retención de información, la capacidad de análisis y síntesis, y el pensamiento crítico en torno a un tema específico [13].

Portafolio: Los portafolios son una herramienta más amplia y versátil que permite evaluar diversas habilidades y competencias. Al recopilar una variedad de trabajos y evidencias de desempeño a lo largo del tiempo, los portafolios pueden reflejar el progreso del estudiante y su capacidad para aplicar el conocimiento en diferentes contextos. Además de evidenciar conocimientos teóricos, los portafolios pueden mostrar habilidades prácticas, creatividad, capacidad de resolución de problemas y reflexión crítica [13].

Rúbricas: Las rúbricas son instrumentos de evaluación que determinan criterios claros y específicos para evaluar el desempeño de los estudiantes en una tarea o proyecto concreto. Por tanto, son especialmente adecuadas y útiles para evaluar competencias [13]. Una de las grandes ventajas del uso de las rúbricas es que la evaluación es más efectiva si los aprendices se responsabilizan de su aprendizaje, entienden y comparten anticipadamente los criterios de evaluación.

En síntesis, del análisis de la literatura se pueden subrayar algunas características significativas de un sistema de evaluación integrado: busca obtener una visión integral y significativa del desarrollo académico de los alumnos, tendrá retroalimentación constante y constructiva para mejorar el proceso educativo. Al integrar diferentes métodos de evaluación, se promueve un enfoque más completo y efectivo para apoyar el aprendizaje significativo y el desarrollo integral de los estudiantes.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio es de tipo descriptivo y cuantitativo. Aunque los cuatro casos de prácticas de evaluación formativa que se describen a continuación no constituyen por sí mismos un sistema de evaluación, cada uno de ellos representa un componente valioso que, en conjunto, podría conformar un sistema integrado de evaluación más completo y significativo. Además, ellos comparten como eje común las competencias que pretender desarrollar. Estas competencias abordan habilidades fundamentales, como construir modelos matemáticos de situaciones problemáticas de sistemas reales o abstractos mediante la aplicación de técnicas y herramientas matemáticas e informáticas; desempeñarse efectivamente en equipos de trabajo; comunicarse de manera oral y escrita de forma efectiva; y, por último, aprender de manera continua y autónoma. El estudio se llevó a cabo en la Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina, específicamente en asignaturas de las facultades de Ciencias Exactas y Tecnologías, y la Facultad de Agronomía y Alimentos. Para la recopilación de información, se utilizaron encuestas semiestructuradas dirigidas a los estudiantes y se analizaron diversos



documentos, como planificaciones de asignaturas, proyectos, exámenes y trabajos presentados en jornadas o congresos. Es importante destacar que estos casos de prácticas de evaluación formativa tienen el potencial de contribuir a un sistema de evaluación más integral. Cada uno de ellos aporta una perspectiva única para medir y evaluar el progreso y las competencias de los estudiantes. Al combinar estas prácticas de manera coherente y racional, es posible obtener una visión más completa y enriquecedora del proceso de aprendizaje de los estudiantes.

### 3. RESULTADOS

A continuación, se presentan las diferentes derivaciones conseguidas con esta propuesta de trabajo.

#### 3.1. Consideraciones de los estudiantes sobre la evaluación

Se planificó evaluar esta experiencia mediante la realización de una encuesta que permitiera recopilar información sobre las opiniones, creencias y/o actitudes de los alumnos participantes hacia la implementación de las diversas estrategias de evaluación. Se utilizó una encuesta semiestructurada como herramienta de recopilación. Un total de 60 estudiantes de FCEyT y FAyA de la Universidad Nacional de Santiago del Estero participaron de las diversas experiencias y se les solicitó información sobre la enseñanza y el acompañamiento docente durante el curso. A continuación, se muestran reseñas de ellos. El bloque consta de cinco preguntas acerca de las instancias de trabajo propuestas. La Figura 1 muestra las estadísticas resultantes de respuestas de los alumnos a las siguientes tres proposiciones: 1- Las actividades individuales propuestas en clase fueron pertinentes para favorecer el aprendizaje... 2- Las actividades grupales propuestas fueron pertinentes para favorecer el aprendizaje... 3- ¿El docente te acompañó en tu proceso de aprendizaje?

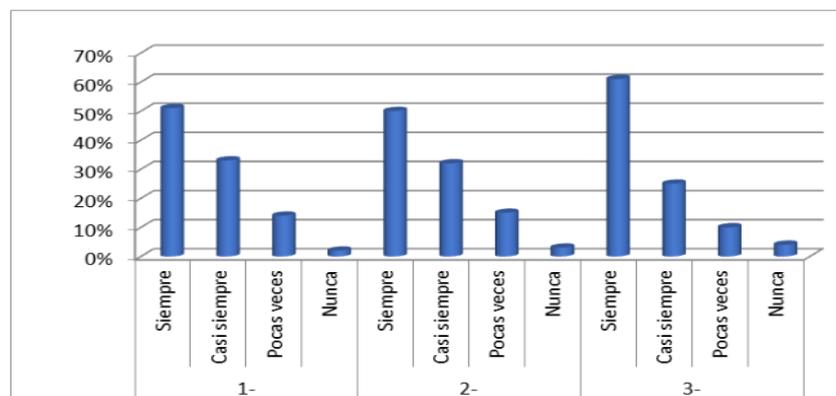


Figura 1. Consideraciones de los estudiantes sobre la enseñanza y acompañamiento docente.

Se observó que más del 80% de los alumnos reconoció la pertinencia de las actividades individuales y grupales para favorecer el aprendizaje, con valores de siempre o casi siempre. Y en el mismo rango, para el acompañamiento del docente durante el proceso de aprendizaje. Por otra parte, más del 86% de los alumnos encontraron útiles o muy útiles las instancias de formación práctica. Sin embargo, será necesario idear estrategias de remediación/accompañamiento para aquellos alumnos (2%) que consideran que no le fueron útiles las instancias de formación práctica (Figura 2).

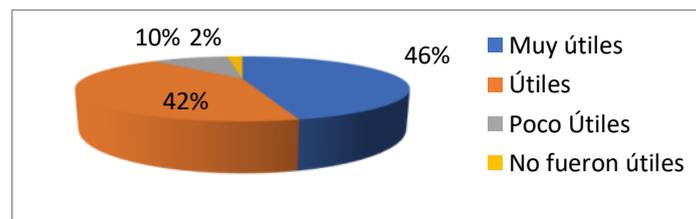


Figura 2. Consideraciones de los estudiantes sobre las Instancias de formación práctica

En cuanto a la devolución de los resultados de la evaluación, el 84% de los alumnos consideró al menos parcialmente beneficiosa para su proceso de aprendizaje (Figura 3). En pos de una evaluación formativa habrá que reflexionar y estudiar las causas que llevaron al 16% de los alumnos a afirmar que la devolución de los resultados no favoreció su proceso de aprendizaje o no tuvo devolución.

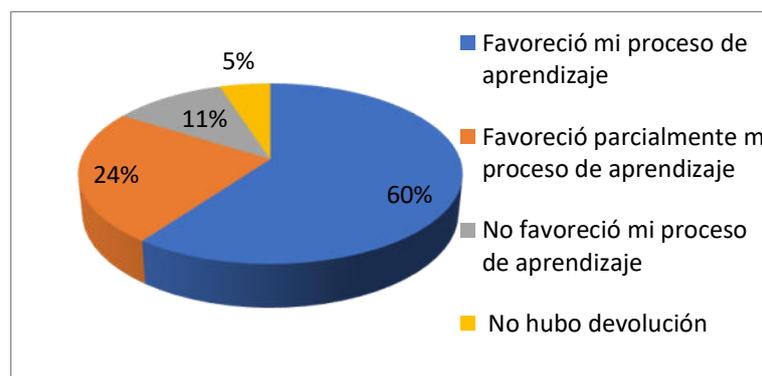


Figura 3. Consideración de los alumnos sobre la devolución de resultados de la evaluación.

### 3.2. Análisis de prácticas de evaluación formativa

Los integrantes del proyecto de investigación (código 23C-166) han venido trabajando durante muchos años en diversas capacitaciones, diseño e implementación de nuevas propuestas de enseñanza, aprendizaje y de evaluación para el desarrollo de competencias de los estudiantes. De los cuales se seleccionaron cuatro casos de prácticas de evaluación formativa que tienen como eje común las competencias que pretenden desarrollar: construir modelos matemáticos de



situaciones problemáticas de un sistema real o no para optimizar su desempeño mediante la aplicación de técnicas y herramientas matemáticas e informáticas; desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo; comunicarse con efectividad en forma oral y escrita; aprender en forma continua y autónoma. Tales experiencias han tenido lugar durante el curso 2020-21, en asignaturas, de carreras de Ingeniería Industrial, Ingeniería en Alimentos, licenciaturas en Sistema de Información, y en Matemática, con una metodología de la enseñanza centrada en el estudiante y apoyo de las TIC. Es importante recalcar que durante este período se produjo la irrupción abrupta del cierre total de las universidades debido al aislamiento social preventivo y obligatorio causado por la pandemia de Covid-19. Situación que, más que atemorizar, desafió a los docentes a mejorar/redefinir su acción pedagógica mediada por tecnologías digitales. Lo hicieron en el marco del Aula Extendida o Aula Aumentada con Tecnologías Digitales (TD) [14] ya que venían usando los recursos (foro, glosario, tarea, wiki, crucigrama, cuestionario, etc.) que ofrecen los entornos virtuales. Esta variante la venían utilizando, como apoyo de las clases presenciales desde el año 2012, percibiéndola como un facilitador del aprendizaje [14].

- La primera experiencia de evaluación formativa seleccionada consistió en dos estrategias: prueba diagnóstica con formulario electrónico (PDFE) y una guía de trabajo práctico (GTP) en una asignatura de primer año de la licenciatura en matemática con 14 alumnos. Ambas estrategias se implementaron en el primer cuatrimestre de 2021. Los profesores de esta asignatura habían sentido insatisfacción y desconexión entre sus propuestas y su relevancia en el aula, dado que solían enfocarse más en los contenidos que en evaluar las competencias que querían fomentar. Luego de participar en instancias de aprendizaje con colegas, expertos y sus propios alumnos, los profesores sintieron la necesidad de evaluar competencias y centrar su enfoque en la capacidad como elemento central del desarrollo de los alumnos. Para lograrlo, revisaron la planificación, incorporaron competencias y habilidades del perfil del egresado relevantes para la asignatura y definieron los resultados de aprendizaje a lograr por los estudiantes. Realizaron cambios metodológicos en la enseñanza y diseñaron instrumentos y procedimientos de evaluación, orientados al alineamiento constructivo del currículo como sugiere [11], acordes con los resultados propuestos.

La prueba PDFE fue diseñada y aplicada utilizando formularios de Google para evaluar las condiciones de entrada de los estudiantes al comienzo del curso. Esto se hizo considerando la estructura jerárquica de las tareas de aprendizaje matemático y la idea de obstáculo epistemológico [15,16]. Los resultados de las pruebas fueron analizados y se elaboraron informes personalizados para cada alumno. Luego, los alumnos realizaron actividades de remediación en el entorno virtual del aula, con resultados muy satisfactorios.

En tanto que la GTP consiste en la realización en grupos de una guía. Esta contiene resultados de aprendizaje, contenidos, recursos, consigna, fecha de entrega y la rúbrica analítica de



coevaluación. Los alumnos reunidos en grupos leyeron, dialogaron, visitaron la página web de la asignatura, tomaron decisiones, compartieron en el foro de trabajo colaborativo del aula virtual. Con tales producciones realizaron una presentación en PowerPoint, que subieron al aula virtual en fecha estipulada, recibieron feedback del docente y comunicaron oralmente. Finalmente, coevaluaron usando rúbrica analítica con niveles de desempeño y escala de valoración con cuatro puntos: muy competente, competente, aceptable y no aceptable [13]. En estas experiencias tanto el docente como el alumno tienen roles activos. Además, a través de la evaluación los alumnos se evalúan mutuamente, intercambiando su papel de evaluador alternativamente [17].

- La segunda experiencia se llama “Preexamen síncrono” preparación para el examen final. Se eligió como práctica de evaluación formativa una actividad, Evaluaciones Orales Síncronas (EOS) de contenidos teórico-prácticos mediadas por videoconferencia. Esta actividad se realizó en las Cátedras: Lácteos y subproductos; Operaciones Unitarias I; Higiene y Seguridad Industrial del Departamento de Ingeniería Básica y de Procesos, de la Carrera Ingeniería en Alimentos, de la Facultad de Agronomía y Agroindustrias; e ingeniería industrial, licenciatura en sistemas de información y licenciatura en matemática e ingeniería Electrónica de la facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Las EOS se presentaron como la alternativa que más se asemejaba a una situación de examen presencial, puesto que permitieron no solo controlar el entorno, sino también asegurar la identidad del estudiante. Sin embargo, demandaron gestionar y limitar el tiempo. En este derrotero la instauración de un pre examen para poner a punto la metodología y el acuerdo acerca de los dispositivos a emplear para el encuentro sincrónico, entre docentes evaluadores y estudiantes, se convirtió en una herramienta útil para garantizar el éxito del proceso. La EOS favoreció que el estudiante minimice los nervios propios de la situación, a los sumados por el empleo de la virtualidad; probar y acordar los dispositivos a emplear; pautar el desarrollo de la actividad y su tiempo; a su vez permitió al docente indagar el grado de maduración y aprendizaje para aconsejar al alumno la revisión o el mejor abordaje de algunos temas de la asignatura. La totalidad de los estudiantes que se presentaron a examen bajo esta metodología aprobaron el examen final.

- La tercera experiencia se denomina “Estudio de Caso con software” corresponde a una metodología de evaluación de una asignatura de cuarto año de ingeniería industrial, basada en el estudio de caso. Los alumnos agrupados estudiaron un caso asignado vinculado a la industria y sus problemas de distribución, a lo largo de dos semanas realizando entregas parciales en fechas programadas por los docentes para ayudar en la organización y administración del tiempo destinado a la tarea. También analizaron datos y encontraron soluciones usando software delimitando su alcance y eficiencia. El estudio de caso constituye una actividad que posibilita al alumno articular y movilizar estructuras mentales, saberes y actitudes, acercándole al contexto



de los problemas del mundo profesional. Entonces el docente debe proporcionarle materiales y ejemplos en documentos y requerirle que hagan recomendaciones, ofrezcan soluciones y resolución de problemas. También se puede pedir a los estudiantes que escriban su propio caso de estudio basado en sus experiencias prácticas, adoptando un enfoque interrogatorio y crítico [11].

- La cuarta experiencia titulada “Motorización del aprendizaje” asociada a la metodología de evaluación integral de una asignatura de cuarto año de la Licenciatura en Matemática, basada en la elaboración de un portafolio de evidencias digital y autoevaluación con crucigramas en línea. Durante todo el cuatrimestre los estudiantes recopilaron evidencias de las distintas actividades, las triangularon con los aportes teóricos del aula virtual, otros autores, sitios y las agregaron en el portafolio semiestructurado. Son ejemplos de evidencias: seleccionar un problema construir su modelo matemático, resolverlo con todos los métodos posibles en papel y lápiz y usando al menos dos software e indicar ventajas y desventajas de cada uno. Interpretar la solución obtenida, clasificar el tipo de solución encontrada y recomendar la decisión óptima a seguir; rehacer aquellos items del examen parcial con algún error y explicar cuál sería la forma correcta de los mismos; expresar las conclusiones a las que arribaron en ambos proyectos grupales: sobre problemas de distribución y sobre juegos. Indique aspectos positivos, desafíos, inconvenientes, aprendizajes logrados. El portafolio se divide en 3 secciones cada una con su correspondiente sesión de retroalimentación del docente tras la exposición oral individual de sus producciones. La cual permite a ambos evidenciar "el esfuerzo, los progresos, los procesos y los logros en cada instante del cursado y no esperar al final cuando poco queda por hacer. Por su parte la actividad de crucigrama en línea es una estrategia basada en juegos para reforzar los conceptos de una forma dinámica y amena. De esta manera se pretende generar mayor motivación a través del juego y conseguir uno de los grandes retos que es lograr que los alumnos permanezcan conectados el máximo tiempo posible e interactúen. Ambas actividades motivaron intrínsecamente a los estudiantes por la realización de la actividad misma, sin depender de otros alicientes o estímulos ajenos a ellas.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación han permitido sintetizar los rasgos distintivos de las prácticas de evaluación seleccionadas y analizadas, situándolas en el contexto de la evaluación formativa. En primer lugar, se ha demostrado que al integrar y entrelazar la evaluación con las actividades de enseñanza, se transforma en una herramienta de conocimiento, permitiendo que los estudiantes avancen progresivamente en su aprendizaje durante todo el proceso [18].

En segundo lugar, se ha evidenciado que cada experiencia analizada presentó un ciclo de retroalimentación que recibió una valoración positiva por parte de los estudiantes en la encuesta.



De hecho, el 84% de los estudiantes manifestó que la devolución de los resultados de la evaluación fue al menos parcialmente beneficios para su proceso de aprendizaje. Estos resultados enfatizan el valor de la retroalimentación como una herramienta fundamental para promover el aprendizaje [7].

En tercer lugar, se concluye que la evaluación formativa es altamente valorada por el 80% de los estudiantes, ya que perciben esta instancia como una oportunidad significativa de aprendizaje. De hecho, reconoce que las actividades evaluativas favorecieron su aprendizaje siempre o casi siempre.

En conjunto, estas conclusiones destacan el valor de la evaluación formativa como una herramienta dinámica y enriquecedora tanto para los estudiantes como para los docentes, fomentando una educación más participativa y centrada en el aprendizaje significativo. La integración de estas prácticas de evaluación - exámenes, portafolios y rúbricas - en un sistema coherente fortalecería significativamente el proceso educativo al proporcionar una visión más completa y holística del aprendizaje de los estudiantes. Esta integración permitiría ofrecer una retroalimentación continua y constructiva, promoviendo así un aprendizaje más significativo y efectivo. Además, estas prácticas resultan fundamentales en la administración y gestión de diversas ayudas educativas dirigidas a los estudiantes durante dichos procesos.

## REFERENCIAS

- [1] Tobón, S. *Gestión curricular y ciclos propedéuticos*. ECOE, Bogotá, 2007.
- [2] López Pastor, V. M. *La Red Nacional de Evaluación Formativa, Docencia Universitaria y Convergencia Europea*, In Actas de las III Jornadas Internacionales de Innovación Universitaria: Métodos docentes afines al EEES (Vol. CD-Rom). Universidad Europea de Madrid, Madrid, 2006
- [3] Sánchez Mendiola, M., & Martínez González, A. *Evaluación del y para el aprendizaje: instrumentos y estrategias*. Imagia Comunicación, México, 2020.
- [4] Tobón, S. *Formación integral y competencias. Pensamiento complejo, currículo, didáctica y evaluación*. ECOE, Bogotá, 2010.
- [5] Zabala, M.A. *Competencias docentes del universitario*. Narcea, Madrid, 2003.
- [6] Zabala, A. y Arnau, L. *11 ideas clave. Cómo aprender y enseñar competencias*. Graó, Barcelona, 2007.
- [7] Scriven, Michael. "The methodology of evaluation", en R. W. Tyler, R. M. Gagne y M. Scriven (eds.), 1967.
- [8] García Ramos, J. M. *Bases pedagógicas de la evaluación*. Síntesis, Madrid, 1989.



- [9] Herranz, M. y López Pastor, V.M. *¿Es Viable Llevar a Cabo Procesos de Autoevaluación y Evaluación Compartida en Educación Física en la Etapa de Educación Primaria? Un Estudio de Caso Longitudinal (1ª parte)*. *Revista de Educación Física, Renovar la teoría y la práctica*, 133 (30,1), 11-18, 2014.
- [10] Álvarez Méndez, J. M. *Evaluar para conocer, examinar para excluir*. Morata, Madrid, 2001.
- [11] Brown, S. y Glasner, A. *Evaluar en la universidad*. Narcea, Madrid, 2003.
- [12] Anijovich, R. y Cappelletti, G. *La evaluación como oportunidad*. Paidós, Argentina, 2017.
- [13] Pozo Flórez, J. A. *Competencias profesionales: Herramientas de evaluación: el portafolios, la rúbrica y las pruebas situacionales*. Narcea, Madrid, 2012.
- [14] Barberá E., Badia A. *Educación con aulas virtuales. Orientaciones para la innovación en el proceso de enseñanza y aprendizaje*. Editorial A. Machado Libros, Madrid, 2004.
- [15] Brousseau, G. "Los obstáculos epistemológicos y los problemas en matemáticas", en *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 4(2), México, DIE-Cinvestav, 1983.
- [16] Bachelard, G. *La formación del espíritu científico. Contribución a un psicoanálisis del conocimiento objetivo*. Siglo XXI, Buenos Aires- Argentina, 2000.
- [17] Castillo y Cabrerizo. *Evaluación educativa de aprendizajes y competencias*. Pearson Educación, Madrid, 2010.
- [18] Camilloni, A. *Calidad de programas e instrumentos de evaluación*. 1. La evaluación de los aprendizajes en el debate didáctico contemporáneo. Paidós, Argentina, 1998.



## EJERCICIOS INTEGRADORES EN RESISTENCIA DE MATERIALES

María Laura Godoy <sup>1</sup>, David Eliel Diaz Maimone<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Área Estructuras – Facultad de Ingeniería UNICEN (Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Bs. As.)

Av del Valle 5737, Olavarría, Buenos Aires, Argentina

<sup>1</sup> mgodoy@fio.unicen.edu.ar <sup>2</sup> david.diaz@fio.unicen.edu.ar

### RESUMEN

En la asignatura Estabilidad II que se dicta en la Facultad de Ingeniería - UNICEN, la cual involucra conocimientos referidos a Resistencia de Materiales, el objetivo es que los alumnos obtengan los conocimientos y práctica necesarios para encontrar los estados tensionales en un cuerpo sometido a diversas cargas.

Con este fin se estudian diferentes solicitaciones a las que puede someterse un elemento estructural, dimensionando y verificando el mismo. Se adopta un material que resista dichas solicitaciones analizando los esfuerzos que las mismas originan, a fin de obtener el estado tensional en diversos puntos del cuerpo.

Cada tema contempla las distintas solicitaciones a las que puede estar sometido un elemento estructural. Como una forma de acercar a los alumnos a la realidad, al final de cada tema se les entrega un ejercicio representativo de un caso real, que resolverán y expondrán en grupo al comienzo de la clase siguiente. Esto les permite adquirir otras habilidades que les serán de utilidad a lo largo de su vida, como trabajar en equipo, exponer en público y hacerse responsables de su propio proceso de aprendizaje.

Como Trabajo Práctico Final, se tienen los Ejercicios Integradores. Con los mismos se pretende integrar toda la asignatura, analizando tanto los esfuerzos en una estructura sometida a estados combinados de cargas como el estado tensional en puntos determinados.

En el presente trabajo se muestran las problemáticas y dificultades que se presentan en la asignatura y las estrategias didácticas implementadas para su resolución. A tal fin se realizan las actividades mencionadas, los cuales permiten al alumno realizar un trabajo integral, analizando diferentes esfuerzos que actúan sobre la estructura y evaluando el estado tensional en algún punto de la misma, actividad que los entrena para conocer las zonas de máximas solicitaciones, con las que deberán dimensionar a posteriori la estructura.

**Palabras clave:** Estructuras; Esfuerzos; Análisis tensional; Estrategias didácticas



## 1. INTRODUCCIÓN

Estabilidad II es una asignatura básica dentro del campo de las estructuras, de acuerdo con ello, se orienta principalmente hacia la asimilación de conceptos que el alumno utilizará luego en las asignaturas de aplicación.

Los aportes que estos contenidos hacen a la formación del futuro profesional consisten en realizar una correcta interpretación de las acciones a tener en cuenta, y de acuerdo con la magnitud de las mismas, tener una idea práctica de las dimensiones necesarias para un determinado elemento estructural; del orden de magnitud de las deformaciones posibles y también de las cargas máximas permitidas, todo esto en concordancia con el tipo de material utilizado.

Se han detectado desde hace algunos años las dificultades que presentan muchos alumnos para este análisis, con lo cual se han ido implementando diferentes estrategias didácticas [1] para intentar solucionarlo. Estas dificultades radican fundamentalmente en la interpretación espacial, interpretación del problema, cálculo y análisis de esfuerzos.

Dentro de las estrategias, en algunas temáticas en particular y con el fin de mostrar un medio más para el análisis, se complementa la práctica con el uso de la herramienta computacional [2]. Se muestran los resultados de problemas sencillos obtenidos por este medio, que se resolvieron previamente en la forma tradicional. Se presentan también videos de ensayos de probetas a diferentes solicitaciones para que puedan visualizar e interpretar el estado cinemático que se genera. El alumno fija conceptos por medio de aplicaciones concretas, adquiere habilidad en la resolución de problemas diferentes; interpreta resultados y efectúa una revisión crítica de los mismos.

Con el objetivo de acercar al alumno a la realidad e incentivar la mirada ingenieril, al final de cada tema se les entrega un ejercicio referido a los conceptos tratados y representativo de un caso real, el cual deben resolver en grupo para el comienzo de la clase siguiente. Luego entregan un informe de lo realizado y algún/algunos grupos exponen al resto de sus compañeros el trabajo realizado. Las ventajas de esta actividad son que aprenden mejor los contenidos de la asignatura y adquieren otras habilidades que les serán de utilidad a lo largo de su vida, como trabajar en equipo, exponer en público y hacerse responsables de su propio proceso de aprendizaje.

Como Trabajo Práctico Final, se incluyen los Ejercicios Integradores, con los mismos se pretende integrar toda la asignatura, analizando los esfuerzos en una estructura y el estado tensional en puntos determinados. Estos ejercicios son del estilo de los que se evalúan en los exámenes finales.

Es de fundamental importancia que el alumno al aprobar la asignatura tenga un acabado conocimiento de los estados tensionales en la estructura.

Estas actividades permiten realizar un seguimiento de los alumnos de acuerdo a su participación, a su creatividad y a su espíritu crítico. Con esto, los docentes de la cátedra pueden realizar una evaluación del desarrollo de la asignatura a través de un análisis de valoración sobre los distintos aspectos enunciados en el párrafo anterior y vislumbrar las dificultades en los procesos de enseñanza y aprendizaje, como así también los logros alcanzados.

## 2. ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS

Se muestran a continuación las diferentes estrategias implementadas:

### 2.1. Modelos numéricos

La utilización de software es una herramienta que posibilita no solo la resolución de los ejercicios, sino también la corroboración con lo resuelto de manera analítica y fundamentalmente mostrar de una manera espacial tanto los enunciados como los resultados. La forma en que se resuelve un ejercicio en elementos finitos no está dentro del alcance de la asignatura.

En repetidas ocasiones los enunciados no pueden ser comprendidos porque se dibujan en el plano. El estudiante mejora la comprensión de dibujos planos a medida que avanza en la carrera, pero este no es el caso ya que la cátedra corresponde al segundo año de ingeniería. Las herramientas de modelado en tres dimensiones y la rotación de los elementos en software facilitan la resolución de este inconveniente.

A continuación, se muestra el caso particular de flexión oblicua (Figura 1). Este es un caso especial ya que las deflexiones se desvían del plano de carga. Se carga una viga de sección transversal triangular, empotrada en su extremo y libre en el otro, con una fuerza concentrada en este último extremo y pasante por el centroide de la sección transversal. Se puede visualizar la posición deformada en correspondencia con la posición original sin deformar. Se observa la desviación de la deflexión respecto al plano de carga.

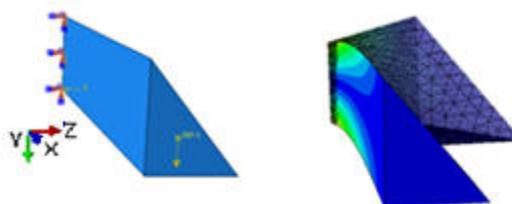


Figura 1: Viga sometida a flexión oblicua

En el siguiente ejemplo, se tiene una viga empotrada libre de sección rectangular (Figura 2). Se muestra cómo al variar la posición del vector representativo del momento cambia la sollicitación



en la estructura. En la primera figura, dicho vector se encuentra coincidente con el eje X, originando una sollicitación de torsión. Puede observarse la distribución de tensiones por torsión en la sección transversal.

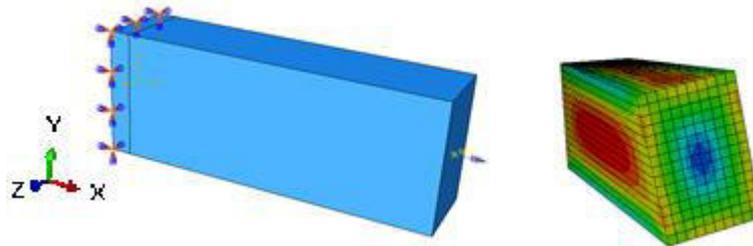


Figura 2: Viga sometida a torsión

Si el vector representativo del momento coincide con el eje Z, se está en presencia de una flexión normal (Figura 3), mostrando las tensiones de tracción en las fibras inferiores y la compresión en las superiores.



Figura 3: Viga sometida a flexión normal

Si dicho vector representativo se encuentra en una posición que no coincide con los ejes principales de inercia, se está en presencia de la flexión oblicua (Figura 4). Esta podemos representarla con la proyección según los ejes principales, obteniendo un vector momento en el eje Z y otro coincidente con el eje Y. Se observa en la posición deformada respecto de la original, los desplazamientos horizontales y verticales propios de la flexión oblicua.

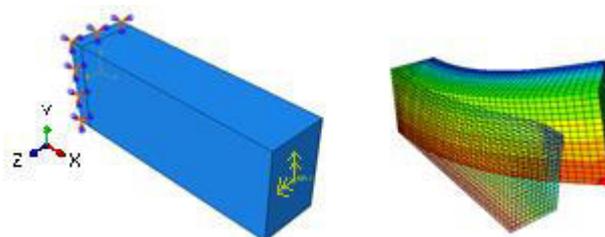


Figura 4: Viga sometida a flexión oblicua

En Figura 5, se muestra la sollicitación de flexotorsión, con los consecuentes efectos elásticos de desplazamiento vertical, horizontal y giro alrededor de su eje.

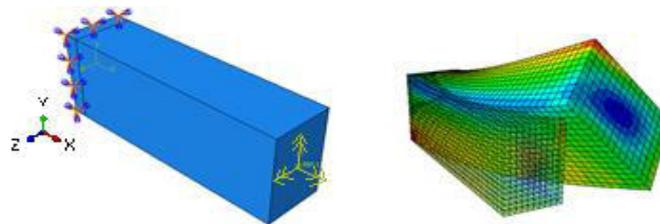


Figura 3: Viga sometida a flexotorsión

Otra cosa que es posible visualizar fácilmente es el diagrama de tensiones generadas por estas solicitaciones. Tal es el caso de una flexión como se muestra a continuación. Puede observarse una representación volumétrica (Figura 6), de un diagrama que usualmente se dibuja abatido en el plano. Puede mostrarse también la distribución en diferentes secciones a lo largo del elemento. La representación en colores, o incluso la escala de los vectores, pone en manifiesto la intensidad de los resultados.

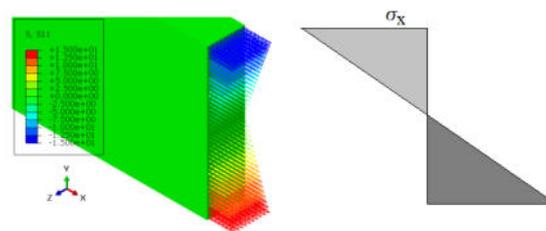


Figura 6: Distribución volumétrica de tensiones y diagrama abatido

A continuación, se observa el caso de análisis de una barra sometida a una carga puntual axial. En la Figura 7 se observa un corte longitudinal que pasa por el punto de aplicación de la carga a fin de poder visualizar el estado tensional. La carga le genera tensiones axiales de compresión uniformes a lo largo de toda la barra, excepto en coincidencia con el punto de aplicación de la carga, lugar en el que se genera una concentración de tensiones que es importante considerar. Se muestra con este ejemplo la interpretación del principio de Saint-Venant [3], mostrando cómo si nos alejamos del punto de aplicación de la carga, las tensiones se tornan uniformes e igual a  $P/A$ .

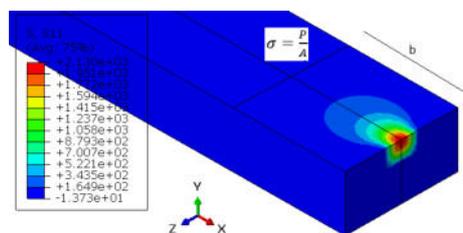


Figura 7: Concentración de tensiones

## 2.2. Ejercicios grupales

Se presentan a modo de ejemplo algunos ejercicios de los resueltos por los alumnos en forma grupal y expuestos en las clases por los mismos.

### 2.2.1. Trabajo Grupal – Flexión - 2020

1) Calcular la longitud que debe tener la viga de madera indicada en la Figura 8, para que no supere la tensión admisible. Considerar el esquema simplificado de la Figura 9 que se anexa y los siguientes datos:

$$\sigma_{adm} = 6 \text{ MPa} \quad Q = 10 \text{ KN/m}$$

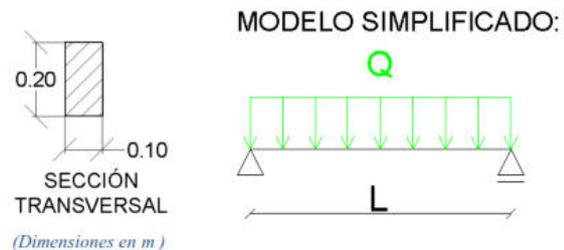


Figura 9: Modelo simplificado

Figura 8: Estructura real

2) En caso de que se desee que  $L = 2 \text{ m}$ , ¿qué sección convendría colocar para no superar la tensión admisible? Considerar que a medida que aumenta la sección transversal, también aumenta el costo. (Figura 10)

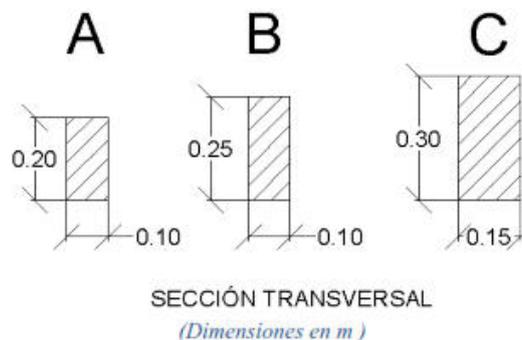
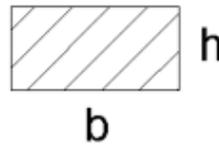


Figura 10: Secciones a considerar



3) ¿Convendría colocar las secciones tal como se indica en Figura 11? ¿por qué? Si se mantiene  $L = 2 \text{ m}$  y la tensión admisible, ¿hay alguna sección que verifique? (Considerar las secciones indicadas en el punto 2).



## SECCIÓN TRANSVERSAL

Figura 11: Disposición alternativa

### 2.2.2. Trabajo Grupal – Deflexiones - 2022

Un puente de madera es atravesado por un ciclista (Figura 12). El puente está constituido por un tablero y dos vigas laterales simplemente apoyadas. Calcular la deflexión de la viga en el centro del vano. El peso del ciclista más la bici es de aproximadamente  $1000 \text{ N}$ , que se reparten equitativamente entre las dos vigas y dos ruedas, siendo  $P = 250 \text{ N}$ ,  $L = 3 \text{ m}$ . Expresar el resultado en función de  $E \cdot I$  genérico. a) Utilizando Teorema de Mohr b) Utilizando tablas.

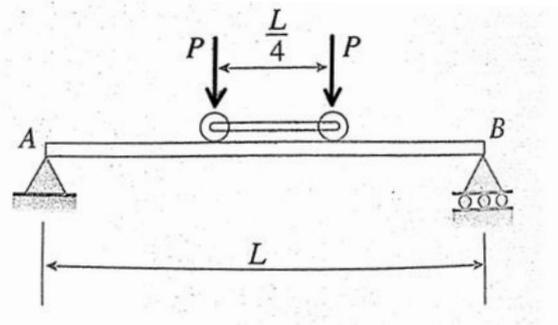


Figura 12: Puente y esquema simplificado

### 2.2.3. Trabajo Grupal – Esfuerzos combinados - 2022

Un poste de tendido eléctrico de acero ( $\sigma_{adm} = 120 \text{ MPa}$ ) que se encuentra firmemente empotrado al suelo (Figura 13), de sección circular hueca y siete metros de altura, soporta tres cables de alta tensión, mediante una ménsula de un metro de longitud. Cada cable genera en la ménsula una fuerza de  $3000 \text{ N}$ . Suponiendo que los cables se encuentran muy próximos entre sí, a fin de considerar la fuerza generada por los tres cables como una fuerza única y horizontal:



1. Determine mediante las Teorías de Rankine y de Guest, cuál es el diámetro exterior requerido para que no se produzca la rotura del poste (suponiendo una relación de diámetros  $d_e/d_i=1,2$ ).
2. ¿Cuál de las dos teorías empleadas es la más adecuada en este caso?

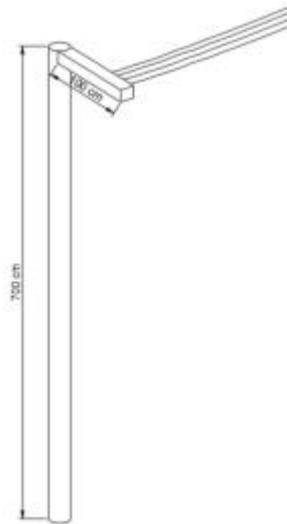


Figura 13: Poste de tendido eléctrico

### 2.2.3. Trabajo Grupal – Flexión Compuesta – 2018

Un poste de aluminio para el alumbrado público pesa 2300 N y soporta 2 brazos que pesan 330 N y 420 N (Figura 14). El centro de gravedad de cada brazo está a 1,2 m. del eje del poste.

El diámetro exterior del poste es 225 mm y su espesor es de 18 mm. El ángulo entre los brazos es de  $90^\circ$ .

Determinar los esfuerzos máximos de compresión y tracción en el poste debido a los pesos.

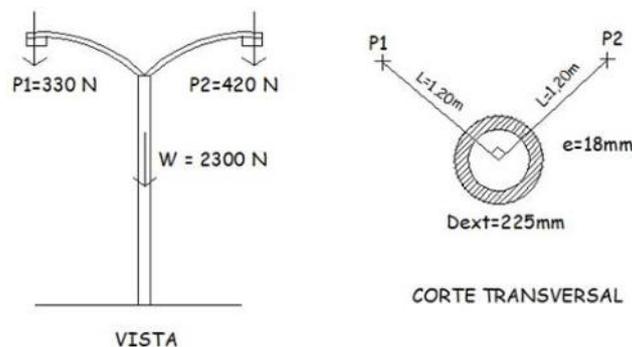


Figura 14: Poste de alumbrado público

## 2.3. Ejercicios integradores

### 2.3.1. Ejercicio 1

El tubo perforador hueco de un pozo petrolero (Figura 15) tiene un diámetro exterior de 150 mm y 15 mm de espesor (diámetro interior de 120 mm). Justo arriba de la boca, la fuerza de compresión en el tubo (debido al peso del tubo) es de 265 kN y el par de torsión (debido a la perforación) es de 19 kNm. Determine los esfuerzos máximos de tensión y compresión y los esfuerzos cortantes en el tubo perforador. [4]

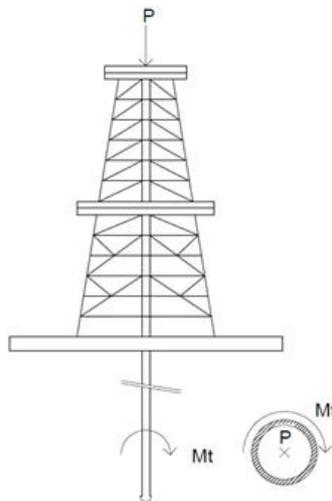


Figura 15: Tubo perforador

#### Resolución:

Para calcular las tensiones principales se deben determinar las tensiones generadas por la fuerza de compresión y el par torsor. Se deben determinar las propiedades geométricas de la sección tubular, el momento de inercia polar y el área:

$$A = \frac{\pi(de^2 - di^2)}{4} = \frac{\pi((150\text{mm})^2 - (120\text{mm})^2)}{4} = 6361,77 \text{ mm}^2$$

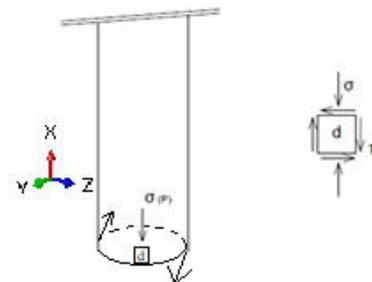
$$I_o = \frac{\pi(de^4 - di^4)}{32} = \frac{\pi((150\text{mm})^4 - (120\text{mm})^4)}{32} = 2,934 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

La tensión axial producida por el peso del tubo será:

$$\sigma_x = -\frac{P}{A} = -\frac{265\text{KN}}{6361,77\text{mm}^2} \cdot \frac{1000\text{N}}{1\text{KN}} = -41,65 \text{ MPa}$$

La tensión de corte producida por el par torsor será:

$$\tau_{zx} = \frac{Mt}{I_o} \cdot r_0 = \frac{19\text{KNm}}{2,934 \cdot 10^7\text{mm}^4} \cdot 75\text{mm} \cdot \frac{1000\text{N}}{1\text{KN}} \cdot \frac{1000\text{mm}}{1\text{m}} = 48,57 \text{ MPa}$$



Con la tensión normal y de corte del punto "d" se pueden calcular las tensiones principales y las tensiones de corte máximas:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{zx}^2} \quad \rightarrow \quad \sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{-\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{zx}^2}$$

Por lo tanto, reemplazando se tiene:

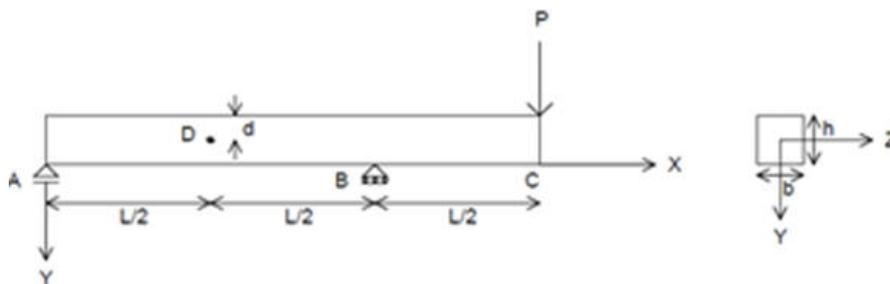
$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{-\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{zx}^2} = \frac{-41,65 \text{ MPa}}{2} + \sqrt{\left(\frac{41,65 \text{ MPa}}{2}\right)^2 + (48,57 \text{ MPa})^2} = \mathbf{32,02 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{-\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{zx}^2} = \frac{-41,65 \text{ MPa}}{2} - \sqrt{\left(\frac{41,65 \text{ MPa}}{2}\right)^2 + (48,57 \text{ MPa})^2} = \mathbf{-73,67 \text{ MPa}}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{-\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{zx}^2} = \sqrt{\left(\frac{41,65 \text{ MPa}}{2}\right)^2 + (48,57 \text{ MPa})^2} = \mathbf{52,85 \text{ MPa}}$$

### 2.3.2. Ejercicio 2

Una viga ABC con voladizo y sección transversal rectangular soporta una carga concentrada P en el extremo libre. La luz entre A y B es L y la longitud del voladizo es L/2. La sección transversal tiene un ancho b y una altura h. El punto D está a la mitad de distancia entre apoyos y a una distancia d desde la cara superior de la viga. Si el esfuerzo de tensión máxima (esfuerzo principal) en el punto D es  $\sigma_1 = 49 \text{ MPa}$ , determine la magnitud de la carga P. Los datos de la viga son  $L = 1,25 \text{ m}$ ,  $b = 25 \text{ mm}$ ,  $h = 150 \text{ mm}$  y  $d = 25 \text{ mm}$ .



### 3. APORTES DE LAS ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS Y CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de los docentes de la asignatura, se considera que las actividades realizadas han favorecido la comprensión de los contenidos.

A fin de tomar conocimiento del impacto de las actividades en los estudiantes y en las asignaturas posteriores, se consultó a los alumnos que la han cursado en años anteriores y a docentes de los bloques de tecnologías básica y aplicada.



A tal fin se han consultado a 2 docentes de Conocimientos de Materiales, 2 docentes de Hormigón 1 y 2 y 2 docentes de Construcciones de Acero y Madera, los cuales manifiestan que los alumnos no presentan inconvenientes en el análisis de esfuerzos y tensiones a partir de la incorporación de las actividades incorporadas en la asignatura Estabilidad II.

En cuanto a los alumnos consultados (20), los mismos representan un porcentaje aproximado al 40 % de los que han cursado y rendido la asignatura en 4 años anteriores.

En particular, la implementación de una herramienta como el software de elementos finitos, colabora para la visualización de los efectos que las cargas realizan sobre la estructura, pudiendo ver tanto los estados tensionales como los efectos elásticos que se generan. Esto constituye uno de los primeros contactos con este tipo de herramientas y será de utilidad en asignaturas posteriores.

Los trabajos grupales, como ya se dijo, son un aporte para la comprensión espacial de los esfuerzos, sumado a otras competencias como son el trabajo en equipo y la expresión oral que sin esta actividad no estaba presente. La exposición oral constituye una de las primeras experiencias de este tipo en la carrera de ingeniería civil. Según los alumnos encuestados les fue de utilidad para la comprensión y cierre de cada uno de los temas tratados en la asignatura.

Respecto de los trabajos integradores, su incorporación obedeció en principio a una necesidad de los docentes de la asignatura, en el sentido de poder evaluar que los estudiantes adquirieran efectivamente un acabado conocimiento de los estados tensionales en los elementos estructurales. Estos ejercicios están incluidos en los exámenes finales y son condición necesaria para su aprobación, por lo que se requiere un entrenamiento previo a dicha evaluación. Los alumnos encuestados apreciaron poder tener una integración de los diferentes temas abordados en la asignatura que les permitiera prepararse para el examen final. Los docentes de asignaturas superiores como son Conocimientos de Materiales, Hormigón y Estructuras de Acero y Madera manifiestan que los alumnos no presentan inconvenientes en la aplicación de estos temas en sus asignaturas.

Por lo expuesto se considera que las estrategias implementadas han impactado favorablemente en el proceso de aprendizaje de los alumnos.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bravo, B.; Iturralde, C.; Rocha, A. El aprendizaje. Hacia una elaboración de una idea que permita sustentar las decisiones didáctico pedagógicas de los docentes. Documento de trabajo. Olavarría, Buenos Aires, 2010.



- [2] Godoy, M. L., Díaz Maimone, D.E., Pico, Leonel O. *Visualización didáctica de estados de tensiones y deformaciones*. CADI-CAEDI, 7 al 9 de Septiembre 2022. Resistencia y Corrientes.
- [3] Pico, L. O.; Peralta, M. H.; Ciancio, P. M.; Montanaro, M. I. *Resistencia de materiales*. Editorial Unicen, Argentina, 2015.
- [4] Gere, J.M., Timoshenko, S.P. *Mecánica de Materiales*. International Thompson Editores, Argentina, 1998



## LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

**Marta Caligaris, Georgina Rodríguez y Lorena Laugero**

Grupo Ingeniería & Educación – UTN – Facultad Regional San Nicolás  
Colón 332 (2900) San Nicolás, Argentina  
[mcaligaris@frsn.utn.edu.ar](mailto:mcaligaris@frsn.utn.edu.ar)

### RESUMEN

El Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) sostiene que el ingeniero actual no sólo debe saber, sino también saber hacer. Para lograr este objetivo, indica una serie de competencias que se deberían desarrollar en los graduados de Ingeniería en Argentina, las cuales tendrían que ser consideradas a la hora de elaborar las propuestas didácticas. Entre las competencias genéricas de egreso dadas por el CONFEDI, se encuentra la de identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.

La modelización matemática establece una relación entre el mundo real y la matemática, mediante fórmulas y conceptos matemáticos. Permite la simulación de procesos complejos, la generación de hipótesis y la utilización de experimentos o métodos de validación. La obtención de un modelo matemático puede ser usada como un vehículo para motivar a los estudiantes y proporcionar una base que los conduzca al desarrollo de un contenido matemático particular.

En base a estas ideas, se elaboró una propuesta didáctica para ser aplicada en la materia Análisis Numérico de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás. En esta propuesta, los alumnos deben resolver una situación problemática vinculada a su especialidad, escribiendo el modelo matemático que representa la situación para aplicar luego un método numérico apropiado que permita aproximar la solución del mismo.

El objetivo de este trabajo es compartir la experiencia de cátedra llevada a cabo y mostrar la opinión de los alumnos tras la realización de este tipo de actividad. Para ello, se detallará de qué modo los estudiantes transitaron por las distintas etapas del proceso de modelización matemática de acuerdo al modelo de Blomhøj.

**Palabras clave:** *Competencias; Modelización Matemática; Análisis Numérico; Problemas Ingenieriles.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) sostiene que el ingeniero actual no sólo debe saber, sino también saber hacer. Para lograr este objetivo, elabora un marco de referencia en cuanto a las competencias que se deberían desarrollar en los graduados de Ingeniería en Argentina, las que tendrían que ser consideradas a la hora de elaborar la propuesta pedagógica [1]. En este contexto, los docentes de carreras de Ingeniería se enfrentan ante el reto de plantear estrategias de enseñanza que promuevan en los alumnos el desarrollo de las competencias de egreso establecidas por el CONFEDI.

El presente trabajo tiene como finalidad compartir la experiencia de cátedra que se llevó a cabo en Análisis Numérico de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional, y mostrar la opinión de los alumnos tras la realización de este tipo de actividad. En esta experiencia y con el objetivo de afianzar en los alumnos la competencia de identificar, formular y resolver problemas de ingeniería, se les planteó una situación problemática. Para resolverla, debieron transitar las distintas etapas del proceso de modelización matemática y acudir a métodos de aproximación numérica para obtener su solución.

## 2. COMPETENCIAS GENÉRICAS DE EGRESO

Una competencia es la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas y valores, permitiendo movilizar distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales [1]. Según el CONFEDI, las Competencias Genéricas de Egreso del Ingeniero pueden clasificarse como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de las Competencias Genéricas de Egreso del Ingeniero

Competencias tecnológicas	Competencias sociales, políticas y actitudinales
<ul style="list-style-type: none"><li>• Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.</li><li>• Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería.</li><li>• Gestionar, planificar, ejecutar y controlar proyectos de ingeniería.</li><li>• Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería.</li><li>• Contribuir a la generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo.</li><li>• Comunicarse con efectividad.</li><li>• Aprender en forma continua y autónoma.</li><li>• Actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global.</li><li>• Actuar con espíritu emprendedor.</li></ul>

El detalle de las competencias que se desea desarrollar en los futuros ingenieros, orienta a las facultades en la definición de sus procesos de enseñanza y aprendizaje. En particular, la UTN



adopta para sus carreras de Ingeniería dichas competencias debido a que sostiene que los alumnos que se gradúan en la UTN no sólo deben saber, sino también saber hacer debido a que el saber hacer no surge de la mera adquisición de conocimientos, sino que es el resultado de la puesta en funciones de una compleja estructura de conocimientos, habilidades, destrezas, actitudes y valores. El diseño así establecido, integrando las competencias al Plan de Estudios, ayuda a vigorizar el saber hacer requerido a quienes egresan de UTN [2].

### 3. LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS

En las aulas, se demandan cada vez más actividades que permitan el desarrollo de competencias. Para ello, es necesario plantear actividades que potencien el papel del alumno en la construcción del conocimiento, el aprendizaje significativo conectado a la realidad y la aplicabilidad de la matemática. Es en este sentido donde la modelización matemática juega un papel importante.

Según Blomhøj [3], la modelización matemática constituye una práctica de enseñanza que permite ubicar la relación entre el mundo real y la matemática en el centro de los procesos de enseñanza y de aprendizaje. Este autor señala que, en general, los alumnos encuentran motivador trabajar tanto con problemas reales como con problemas cuasi – reales (construidos específicamente para la enseñanza), si es que éstos son lo suficientemente ricos e interesantes.

Existen diferentes perspectivas sobre el uso y los objetivos que la modelización matemática persigue en la educación matemática. Una de ellas es la modelización matemática como vehículo para introducir un conocimiento matemático concreto [4]. Desde esta perspectiva, se abordan los diferentes contenidos que aparecen en los programas mediante actividades contextualizadas, dotándolos de esta forma de significatividad y sentido. Así, el contenido seleccionado será utilizado en los procesos matemáticos involucrados en la resolución del problema propuesto.

#### 3.1. El modelo de Blomhøj

El proceso de modelización está constituido por distintas etapas, que pueden variar según el autor [3 - 5], y constituyen el denominado ciclo de modelización. Para transitar por este ciclo, los estudiantes deberán desplegar diversas competencias matemáticas. Así, en el modelo de Blomhøj, cualquier proceso de modelización matemática está dado por los siguientes seis subprocesos [6]:

- **Formulación del problema:** formulación, más o menos explícita, de una actividad que guíe la identificación de aquellas características de la situación que será modelizada.



- **Sistematización:** identificación del dominio de investigación resultante, selección de los objetos relevantes y sus relaciones e idealización de los mismos, a fin de hacer posible una representación matemática.
- **Matematización:** traducción de los objetos y relaciones identificados al lenguaje matemático.
- **Análisis del sistema matemático:** uso de métodos matemáticos para arribar a resultados matemáticos y conclusiones.
- **Interpretación:** análisis de los resultados y conclusiones, teniendo en cuenta el dominio de investigación inicial.
- **Validación del problema:** evaluación de la validez del modelo por comparación con datos observados y/o con el conocimiento teórico o experiencial personal o compartido.

#### 4. EXPERIENCIA DE CÁTEDRA

Se elaboró un proyecto educativo basado en la tendencia de enseñanza denominada “Modelización Matemática” para ser aplicado en el curso de Análisis Numérico durante el aprendizaje de los métodos numéricos que permiten resolver ecuaciones no lineales.

El proyecto educativo diseñado no sólo persigue como propósito mostrarles a los alumnos la necesidad de recurrir a un método numérico para obtener una solución aproximada de una ecuación no lineal sino también afianzar en los estudiantes, por medio de la modelización matemática, la competencia genérica de identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.

Este proyecto acompañó el proceso de enseñanza de los distintos métodos que se estudian en la materia y que aproximan la solución de una ecuación no lineal. Ellos son [7]: Bisección, Newton, Secante y Regula – Falsi.

La introducción de la modelización en el aula requiere de un cambio metodológico importante: es recomendable promover el trabajo en pequeños grupos. Por esta razón, para poder llevar adelante el proyecto, se les pidió a los alumnos que formen grupos de no más de cuatro integrantes. En este contexto, los estudiantes asumieron un rol protagónico y trabajaron de forma autónoma en la resolución del problema. En cambio, el docente se convirtió en un guía que ayudó a los alumnos a superar las dificultades que surgieron durante el proceso de modelización [8].

La situación problemática que se les planteó a los estudiantes para introducir el tema en cuestión fue la siguiente [9, 10]:

*Para simular mecánicamente las funciones de las manos como las de tomar y sostener objetos, se utilizan mecanismos de cuatro barras para el desarrollo de dedos robóticos. Un mecanismo articulado de cuatro barras básico se puede modelar mediante una función no*

lineal. Considerando una barra que se encuentra a lo largo del eje  $x$ , este mecanismo es el que se muestra en la Figura 1. Obtener una aproximación del valor de  $\phi$  sabiendo que  $\alpha = 30^\circ$ ,  $r_1 = 10$  cm,  $r_2 = 6$  cm,  $r_3 = 8$  cm y  $r_4 = 4$  cm.

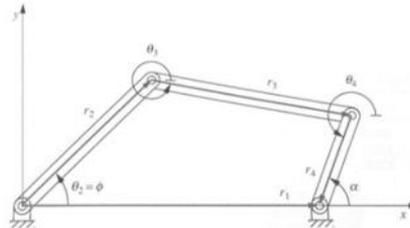


Figura 1: Mecanismo articulado de cuatro barras

Como se puede observar, la modelización matemática es usada como un vehículo ya que, en este caso, el modelo matemático que debieron escribir los alumnos fue un medio para aprender los métodos numéricos que permiten resolver ecuaciones no lineales [4].

Para que los estudiantes ejecutaran los procedimientos rutinarios con rapidez y seguridad, y así dispusieran de más tiempo para comparar las distintas soluciones numéricas, conjeturar y extraer conclusiones, se les proporcionó el recurso educativo digital que se muestra en la Figura 2 [11].

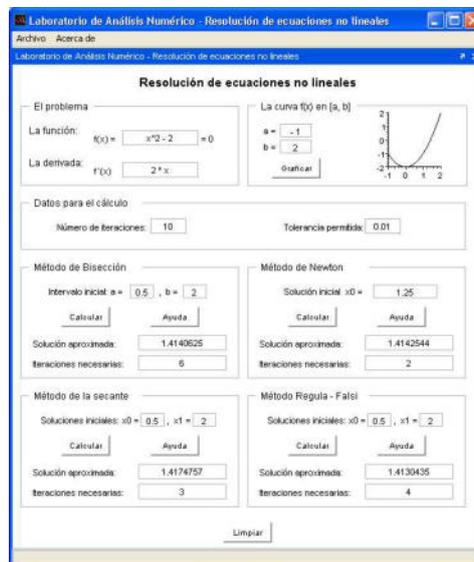


Figura 2: Recurso educativo digital para aproximar la solución de una ecuación no lineal

Como cierre del proyecto y para poder evaluar el proceso realizado por cada uno de los grupos, se les pidió escribir un informe detallando las distintas etapas del proceso realizado. Para la organización del informe, se les indicaron los principales aspectos que debían tener en cuenta: identificación del problema, planteo del modelo matemático que gobierna al problema, selección del método numérico más eficiente según las características del problema, justificación de la



elección de la cantidad de puntos o intervalos para calcular la solución numérica, obtención de la solución numérica utilizando el método elegido, presentación de la solución del problema propuesto y validación de la aproximación numérica calculada utilizando algún procedimiento.

#### 4.1. Etapas del proceso de modelización matemática

A continuación, se detallarán las distintas etapas por las que los estudiantes transitaron para poder resolver la situación propuesta. Para ello, se tendrá en cuenta el modelo dado por Blomhøj.

##### 4.1.1. Formulación del problema

La elección del tema estuvo dada por el docente. Esta decisión se fundamenta en el hecho de que aún los alumnos de Ingeniería Mecánica no han estudiado problemas de la especialidad que requieran de métodos numéricos para su resolución. Por otra parte, la situación problemática fue seleccionada de modo que los alumnos, teniendo en cuenta sus conocimientos previos, pudiesen escribir el modelo matemático que gobierna la situación planteada.

##### 4.1.2. Sistematización

El problema está dado por la determinación de una aproximación del valor del ángulo  $\phi$  sabiendo que  $\alpha = 30^\circ$ ,  $r_1 = 10$  cm,  $r_2 = 6$  cm,  $r_3 = 8$  cm y  $r_4 = 4$  cm.

##### 4.1.3. Matematización

Teniendo en cuenta que  $\alpha$  es un dato en este mecanismo, el ángulo  $\phi$  es la incógnita y  $r_1$  se encuentra a lo largo del eje x, es posible obtener una relación entre  $\alpha$  y  $\phi$ , escribiendo:

$$r_2 + r_3 + r_4 - r_1 = 0 \quad (1)$$

La ecuación (1) puede expresarse como dos ecuaciones escalares, correspondientes a los componentes x e y de los vectores  $r_i$ . Así,

$$r_2 \cos(\theta_2) + r_3 \cos(\theta_3) + r_4 \cos(\theta_4) - r_1 = 0 \quad (2.a)$$

$$r_2 \sin(\theta_2) + r_3 \sin(\theta_3) + r_4 \sin(\theta_4) = 0 \quad (2.b)$$

con  $\theta_2 = \phi$ ,  $\theta_4 = \alpha + 180^\circ = 210^\circ$ ,  $r_1 = 10$  cm,  $r_2 = 6$  cm,  $r_3 = 8$  cm y  $r_4 = 4$  cm.

Combinando las ecuaciones (2.a) y (2.b) y reemplazando por sus correspondientes valores:

$$8 \cos(\theta_3) = 10 - 6 \cos(\phi) + 2\sqrt{3} \quad (3.a)$$

$$8 \sin(\theta_3) = -6 \sin(\phi) + 2 \quad (3.b)$$

Elevando las ecuaciones (3.a) y (3.b) al cuadrado, sumándolas y simplificando, se obtiene:

$$-24 (5 + \sqrt{3}) \cos(\phi) - 24 \sin(\phi) + 88 + 40\sqrt{3} = 0 \quad (4)$$



Por lo tanto, para poder determinar el valor del ángulo  $\phi$  es necesario resolver la ecuación no lineal (4). Esta ecuación se escribe en forma general:

$$R_1 \cos(\alpha) - R_2 \cos(\phi) + R_3 - \cos(\alpha - \phi) = 0 \quad (5)$$

Las ecuaciones de la forma (5) se denominan ecuación de Freudensteien [12, 13].

#### 4.1.4. Análisis del sistema matemático

Para poder determinar el ángulo  $\phi$ , es necesario resolver la ecuación no lineal (4).

Haciendo uso del recurso educativo digital disponible, Figura 3, los alumnos fueron calculando y comparando las distintas aproximaciones obtenidas al utilizar diferentes métodos o al emplear distinta información inicial.

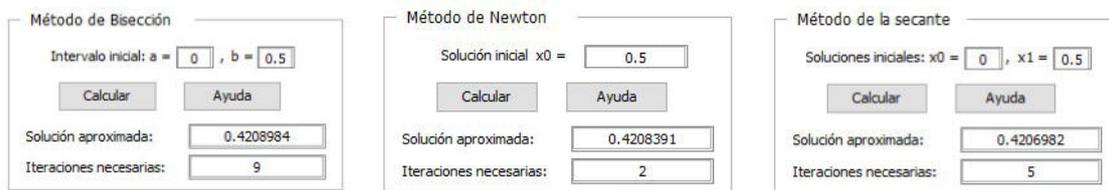


Figura 3: Solución numérica obtenida utilizando el recurso educativo digital

#### 4.1.5. Interpretación

A partir del resultado obtenido los estudiantes determinaron que, aproximadamente, el valor del ángulo  $\phi$  es 0,421 rad. Para interpretar mejor la solución, los alumnos expresaron  $\phi$  en grados sexagesimales. Así, concluyeron que la amplitud de  $\phi$  es de  $24^\circ 7' 17''$ , aproximadamente.

#### 4.1.6. Validación del problema

Si bien los distintos grupos aplicaron procedimientos similares en esta etapa del proceso de modelización matemática, se mostrará el utilizado por uno de los grupos: Figura 4.

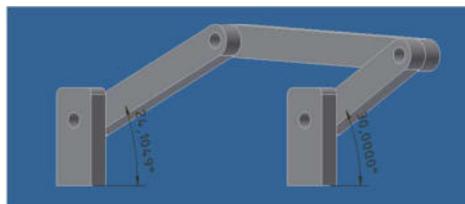


Figura 4: Validación del problema propuesto.

Para validar su resultado, los alumnos generaron el modelo en 3D del mecanismo articulado utilizando el software Autodesk Inventor, empleando una escala 1:1. Posteriormente, midieron la amplitud del ángulo en cuestión haciendo uso de una de las herramientas que dispone el programa. Así, determinaron que la amplitud del ángulo  $\phi$  es  $24^\circ 7' 17''$ , aproximadamente.



Si bien existe una pequeña diferencia, la misma no es significativa. Por lo tanto, se puede inferir que el resultado obtenido tras aplicar el método numérico seleccionado es correcto.

#### 4.2. La evaluación del proceso de modelización matemática

La evaluación de una actividad, basada en la modelización matemática, no es una tarea simple. Una alternativa para llevar adelante la evaluación sumativa es haciendo uso de rúbricas que contemplen no sólo las distintas etapas del proceso de modelización matemática sino también aquellos aspectos vinculados con la presentación y comunicación del proceso realizado.

##### 4.2.1. Resultados de aprendizaje y criterios de evaluación del proyecto educativo

En el proyecto educativo propuesto se plantearon los siguientes resultados de aprendizaje:

- **R1:** resuelve el problema ingenieril planteado aplicando un método numérico, considerando las características que presenta el mismo.
- **R2:** identifica los resultados relevantes del trabajo realizado para poder comunicarlos en un lenguaje pertinente al contexto de la situación e intención comunicativa.

En la Tabla 2 se muestran los criterios de evaluación considerados para analizar el grado de concreción de cada uno de los resultados de aprendizaje.

Tabla 2. Criterios de evaluación considerados

Criterios de evaluación		
<b>R1</b>	CR1.1	Plantea el modelo matemático que describe al problema
	CR1.2	Calcula un resultado utilizando un método numérico adecuado en función del modelo.
	CR1.3	Interpreta el resultado obtenido para dar respuesta al problema propuesto.
	CR1.4	Valida la solución obtenida mediante una representación física del problema.
<b>R2</b>	CR2.1	Presenta de manera organizada la información que se quiere comunicar.
	CR2.2	Realiza una explicación completa, detallada y ordenada del proceso de resolución del problema propuesto.
	CR2.3	Emplea en su informe un vocabulario adecuado.
	CR2.4	Confeciona un informe coherente utilizando las reglas ortográficas y gramaticales de manera correcta.

##### 4.2.2. Rúbrica elaborada para la evaluación de los informes

Las rúbricas son tablas de doble entrada: en las filas se ubican los Criterios de Evaluación y en las columnas los Niveles de Dominio. Por medio de una rúbrica, es posible determinar la calificación de cada uno de los alumnos y, para los estudiantes, tomar conciencia de lo aprendido.



La Tabla 3 muestra la rúbrica analítica con la que se corrigió cada uno de los informes escritos. Cabe destacar que, esta rúbrica fue publicada, junto con el problema propuesto, de manera digital en la plataforma que se utiliza para el desarrollo de la materia (Moodle). De esta forma, los alumnos no sólo sabían cuáles eran los criterios que iban a ser considerados en la evaluación sino también, luego de la corrección, cuáles eran los aspectos en los que debían mejorar.

Tabla 3. Rúbrica analítica elaborada

	<b>Principiante (2 puntos)</b>	<b>Básico (6 puntos)</b>	<b>Competente (8 puntos)</b>	<b>Avanzado (10 puntos)</b>
<b>CR1.1</b> (20%)	No escribe el modelo matemático que representa al problema.	Escribe con muchos errores el modelo matemático que representa al problema.	Escribe con pocos errores el modelo matemático que representa al problema.	Escribe correctamente el modelo matemático que representa al problema.
<b>CR1.2</b> (25%)	No identifica los datos que debe escribir en cada campo del RED para el método seleccionado por lo que no puede obtener un resultado.	Identifica algunos datos que debe escribir en cada campo del RED para el método seleccionado por lo que no puede obtener un resultado.	Identifica de manera incorrecta algunos de los datos que debe escribir en cada campo para el método seleccionado, pero obtiene un resultado.	Identifica correctamente todos los datos que debe escribir en cada campo del RED para el método seleccionado y obtiene un resultado.
<b>CR1.3</b> (10%)	No da respuesta al problema.	La respuesta dada no representa a la solución del problema.	La respuesta dada representa a la solución del problema, pero tiene algunos errores.	La respuesta dada representa correctamente a la solución del problema.
<b>CR1.4</b> (15%)	No evalúa la validez de la solución.	Compara la solución obtenida del modelo con el resultado obtenido de forma experimental, con muchos errores, no pudiendo validar la solución.	Compara la solución obtenida del modelo con el resultado obtenido de forma experimental, pero comete algunos errores, no pudiendo validar la solución.	Compara la solución obtenida del modelo planteado con el resultado obtenido de forma experimental, pudiendo validar la solución obtenida.
<b>CR2.1</b> (10%)	La presentación de la información a comunicar no está bien organizada.	La presentación de la información está levemente organizada.	La presentación de la información está relativamente organizada.	La presentación de la información a comunicar está bien organizada.
<b>CR2.2</b> (10%)	La explicación es incompleta, desordenada y con poco detalle.	La explicación está ordenada, pero con poco detalle e incompleta.	La explicación realizada está ordenada, detallada, pero es incompleta.	La explicación realizada es completa, detallada y ordenada.
<b>CR2.3</b> (5%)	No utiliza un vocabulario pertinente y técnico.	Utiliza en su explicación un vocabulario pertinente pero no técnico.	Utiliza en su explicación un vocabulario pertinente y poco técnico.	Utiliza en su explicación un vocabulario pertinente y técnico.
<b>CR2.4</b> (5%)	En el informe no se utilizan adecuadamente las reglas ortográficas y gramaticales.	En el informe se utilizan de manera muy poco adecuada las reglas ortográficas y gramaticales	En el informe se utilizan de manera poco adecuada las reglas ortográficas y gramaticales	En el informe se utilizan de manera adecuada las reglas ortográficas y gramaticales



#### 4.2.3. Resultados y discusión

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos al tabular la información de cada uno de los criterios de evaluación. En ella, los colores verde, azul, amarillo y rojo indican que ese criterio fue logrado con un nivel Avanzado, Competente, Básico o Principiante, respectivamente.

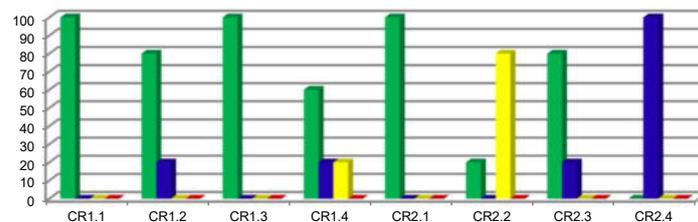


Figura 5: Validación del problema propuesto.

Como se puede observar en la Figura 5, uno de los inconvenientes que presentan los alumnos es la realización de una explicación completa, detallada y ordenada del proceso de resolución del problema propuesto. Esto se evidencia en el hecho de que, aproximadamente, el 20% de los estudiantes alcanzó este criterio de evaluación con un nivel básico. No obstante, la mayor dificultad que tienen los estudiantes es el uso correcto de las reglas ortográficas y gramaticales. Ninguno de los grupos logró alcanzar este criterio de evaluación con un nivel Avanzado.

#### 4.3. Opinión de los alumnos de la experiencia realizada

Con el objetivo de conocer la opinión de los alumnos sobre la experiencia realizada, se efectuó una encuesta a la totalidad de los alumnos. Esta encuesta estaba constituida por dos partes. En la primera parte, se presentaban cuatro enunciados, los cuales fueron analizados utilizando una escala tipo Likert [14] con los siguientes valores numéricos: 5, totalmente de acuerdo; 4, de acuerdo; 3, ni de acuerdo ni en desacuerdo; 2, en desacuerdo; 1, totalmente en desacuerdo.

Teniendo en cuenta el valor numérico asignado a cada nivel de la escala considerada, se calculó la moda para cada uno de los enunciados. La Tabla 4 muestra cada uno de los enunciados con el valor obtenido.

Tabla 4. Moda de cada uno de los enunciados de la encuesta

Enunciados de la encuesta	Moda
La resolución de situaciones problemáticas vinculadas con la especialidad me resulta significativa.	4
La realización de trabajos basados en la modelización contribuye al desarrollo de mis competencias matemáticas.	4
La resolución de situaciones problemáticas implica un grado de dificultad importante.	3
La realización de actividades de manera grupal me resulta una experiencia enriquecedora.	5



Como se puede observar, los resultados indican que los estudiantes están de acuerdo con que la realización de actividades basadas en la modelización contribuye al desarrollo de sus competencias matemáticas, así como también que la resolución de problemas vinculados con su especialidad les resulta significativa. En cambio, los alumnos consideran que el grado de dificultad que implica la resolución de este tipo de problemas no es importante, evidenciándose esto en el valor obtenido. Por último, resaltan que la realización de actividades de manera grupal es una experiencia muy enriquecedora.

En la segunda parte de la encuesta, se les pedía una opinión sobre la realización de actividades como la mostrada en este trabajo. A continuación, se mencionan dos ellas por ser representativas de lo expresado por la mayoría de los estudiantes.

*“Me parece muy interesante la resolución de problemas vinculados con la especialidad a través de los contenidos dados en la materia”.*

*“La aplicación de los conocimientos adquiridos en la materia sirve no sólo para afianzarlos sino también da la posibilidad de vincularlos con otros conocimientos previos”.*

### 3. CONCLUSIONES

Una de las tareas principales de cualquier docente interesado en el aprendizaje de sus alumnos es buscar las estrategias más adecuadas para lograr dar sentido a los conocimientos matemáticos establecidos en el diseño curricular. Es así como la modelización matemática se presenta como una alternativa interesante para lograr este fin. De esta forma, el alumno no sólo podrá encontrarle sentido a los conceptos matemáticos aprendidos ya que podrá entender por qué se los enseña y dónde los podrá aplicar sino que, además, podrá desarrollar competencias transversales importantes para su formación profesional, tales como la resolución de problemas, el uso eficiente de recursos tecnológicos, el pensamiento crítico y la comunicación.

Los resultados obtenidos en la encuesta demuestran que la realización de este tipo de actividades, durante el proceso de aprendizaje de los alumnos, no sólo contribuye a la formación de los mismos, sino que también resulta ser motivadora para ellos. Por esta razón, las docentes a cargo de la cátedra Análisis Numérico tomaron la decisión de incorporar este tipo de propuesta para llevar adelante el aprendizaje de la asignatura.

### REFERENCIAS

- [1] Giordano Lerena, R. (Compilador). *Competencias y perfil del Ingeniero Iberoamericano, formación de profesores y desarrollo tecnológico e innovación*. ASIBEI, 2016.



- [2] Ordenanza 1901 de 2022 [Consejo Superior de la Universidad Tecnológica Nacional]. Por medio de la cual se aprueba el Diseño Curricular de la Carrera Ingeniería Mecánica – Plan 2023 – para todo el ámbito de la Universidad Tecnológica Nacional. Octubre 5 de 2022.
- [3] Blomhøj, M. *Mathematical modelling - A theory for practice*. En Clarke, B.; Clarke, D. Emanuelsson, G.; Johnansson, B.; Lambdin, D.; Lester, F. Walby, A. & Walby, K. (Eds.), *International Perspectives on Learning and Teaching Mathematics*. National Center for Mathematics Education. Suecia, p. 145-159, 2004.
- [4] Julie, C. & Mudaly, V. *Mathematical Modelling of Social Issues in School Mathematics in South Africa*. In book: *Modelling and Applications in Mathematics Education* (pp. 503 – 510), 2007.
- [5] Bassanezi, R. *Ensino-aprendizagem com modelagem matemática, uma nova estratégia*. Sao Paulo: Contexto, 2002.
- [6] Blomhøj, M. y Højgaard Jensen, T. Developing mathematical modelling competence: Conceptual clarification and educational planning. *Teaching mathematics and its applications* 22 (3), 123-139, 2003.
- [7] Burden, R. y Faires, D. *Análisis Numérico*. Internacional Thomson Editores, 2002.
- [8] Blum, W. & Borromeo – Ferri, R. Mathematical Modelling: Can It Be Taught And Learnt? *Journal of Mathematical Modelling and Application*, 1(1), pp. 45 – 58, 2009.
- [9] Portilla Flores, E., Avilés Sánchez, O., Piña Quintero, R., Niño Suárez, P., Moya Sánchez, E., Molina Vilchis, M.A. *Análisis cinemático y diseño de un mecanismo de cuatro barras para falange proximal de dedo antropomórfico*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20, Núm. 1, pp. 45-59, 2010.
- [10] Hoffman J. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*, Mc Graw Hill, United States of America, 1992.
- [11] Caligaris, M., Rodríguez, G. y Laugero, L. *Laboratorio de Análisis Numérico*. En Cukierman, Uriel y Virgili, José María. (Eds). La tecnología educativa al servicio de la educación tecnológica. Experiencias e investigaciones en la UTN. edUTecNe, pp. 583 – 606, 2010.
- [12] Freudenstein, F. *Approximate synthesis of four-bar linkages*, Trans. ASME 77, 853, 1955.
- [13] Todorov, T.S. *Synthesis of four-bar mechanisms by Freudenstein–Chebyshev*, Mechanism and Machine Theory, 37, 1505–1512, 2002.
- [14] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, M. *Metodología de la investigación*. México: Mac Graw Hill, 2010.



## **Análisis del aprendizaje en formación por competencias de los estudiantes de la FI-UNLZ a través de un proyecto integrador por medio del diseño y construcción de un prototipo vehicular tipo “Fórmula SAE” – Etapa I**

**George Faks<sup>1</sup>, Sergio Luna<sup>1</sup>, Marcelo Bertoglio<sup>1</sup>, Leandro Rodríguez<sup>1</sup>, Cecilia Deanes<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Lomas de Zamora – Juan XXIII y Ruta 4, Argentina – [faks.ga@gmail.com](mailto:faks.ga@gmail.com) – [lunasergio87@gmail.com](mailto:lunasergio87@gmail.com) – [rmbertoglio@gmail.com](mailto:rmbertoglio@gmail.com) – [lrodriguez@ingenieria.unlz.edu.ar](mailto:lrodriguez@ingenieria.unlz.edu.ar) - [ceciliadeanes@gmail.com](mailto:ceciliadeanes@gmail.com)

### **RESUMEN**

Este trabajo tiene como objetivo analizar el proceso de aprendizaje por competencias de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (FI-UNLZ). mediante la concepción hasta la implementación de un prototipo vehicular del tipo "Fórmula SAE" (Society of Automotive Engineers).

Para esto se realizará un proyecto integrador en el que participarán estudiantes de nivel superior, promoviendo el aprendizaje colaborativo y el trabajo en equipo. La estrategia constará en la conformación de equipos especializados en áreas específicas, como mecánica general, motores, electricidad, electrónica y contabilidad, entre otras. Actualmente el proyecto se encuentra en la fase diagnóstica de los estudiantes. Este primer año se enfocará en el diseño y construcción del chasis del vehículo, insumo suficiente para poder evaluar las competencias desde el inicio del proyecto, con una duración total de tres años.

Además, se buscará fomentar la transversalidad con otras unidades académicas de la UNLZ, como las Facultades de Derecho, Económicas, Ciencias Sociales y Agrarias incorporando estudiantes de las mismas y delegando responsabilidades en el proyecto integrador, con el objetivo de desarrollar áreas relacionadas a presupuestos, contables, legales, entre otras. De esta manera, se logrará una experiencia multidisciplinaria que puede contribuir a desarrollar competencias para resolver problemas complejos en un entorno profesional.

La observación y evaluación de estas habilidades y actitudes son claves para medir la vocación investigadora. Además, el proyecto busca el desarrollo de habilidades y conocimientos valiosos en cuanto a trabajo en equipo, liderazgo y solución de problemas. En resumen, el proyecto tiene como objetivo formar jóvenes investigadores, desarrollar habilidades y actitudes clave para su futuro desempeño profesional.

En esta publicación se abordará la primera etapa de la investigación, que consta en establecer el criterio para seleccionar las competencias que tendrán mayor inferencia durante la duración del proyecto.

**Palabras Clave:** *Competencias – Fórmula SAE – Aprendizaje Significativo.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje por competencias, a través de un proyecto integrador como es el caso del prototipo vehicular, vincula los conocimientos de las distintas áreas de la ingeniería relacionando lo aprendido desde la teoría y llevándola a un problema real e ingenieril que propone grandes desafíos.

El enfoque de trabajo didáctico por competencias supone, sin duda, una nueva forma de afrontar la enseñanza universitaria. La forma tradicional de aprendizajes por contenido se presenta en la formación universitaria en términos de listas de materias, como contenidos individuales. Pero, las competencias no son otra cosa que un planteamiento de la formación que refuerza la orientación hacia la práctica (performance), tomando como punto de referencia el perfil profesional. Frente a una orientación basada en el conocimiento, las competencias constituyen una aproximación más pragmática al ejercicio profesional. La formación basada en competencias ha llegado a constituir un amplio y extenso movimiento que se ha proyectado sobre numerosos campos profesionales: educación, medicina, enfermería, danza, ingeniería, abogacía, administración de empresas, entre otros.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es desarrollar un objeto de aprendizaje integral basado en la formación por competencias a partir del diseño, desarrollo, construcción y puesta en marcha de un prototipo vehicular.

Se plantean, en consecuencia, los siguientes objetivos específicos, divididos en cuatro etapas acordes al grado de avance en función de la determinación de las competencias.:

- Relevar las competencias generales y específicas esperadas en el perfil del egresado de las carreras de ingeniería intervinientes (etapa I).
- Relacionar las competencias generales y específicas relevadas con las capacidades requeridas para el desarrollo de un prototipo vehicular (etapa II).
- Planificar y desarrollar las actividades para la construcción de un prototipo vehicular basado en la formación por competencias (etapa III)
- Diseñar e implementar un sistema de evaluación de competencias adquiridas durante el desarrollo de un prototipo vehicular (etapa IV).

Este abordaje resulta práctico pues supone una linealidad que facilitarán los trabajos posteriores dada la extensión del proyecto Fórmula SAE.



### 3. PLAN DE TRABAJO

#### 3.1. Antecedentes

La formación del ingeniero actualmente es un desafío debido a la gran cantidad de información disponible, a la complejidad creciente de los problemas a los que se deben enfrentar y a la globalización de los mercados. Además, el medio ambiente se ha convertido en un factor fundamental en la actividad del ingeniero por la necesidad de conseguir productos y procesos sustentables que no lo deterioren; igualmente, es importante la responsabilidad social que asuma el profesional frente a los productos generados por las nuevas tecnologías y su impacto en todos los ámbitos de la actividad humana. Además, las estructuras corporativas son cada vez más participativas, exigiendo al profesional más trabajo en grupo y responsabilidad en la toma de decisiones [1]. Lo anterior implica que un profesional idóneo debe desarrollar gran capacidad de adaptación al cambio, unida al manejo adecuado de la información, con una actitud ética que le permita tomar decisiones adecuadas al entorno socio-cultural en el cual se desenvuelve.

Existe una preocupación constante de universidades y docentes, los cuales buscan desarrollar y adaptar nuevas estrategias pedagógicas y didácticas que permitan la formación de profesionales de la ingeniería con las competencias exigidas por entornos laborales y sociales cada vez más dinámicos. Las nuevas metodologías buscan potenciar el desarrollo de competencias genéricas como: el aprender a aprender, organizar y planificar, analizar y sintetizar, aplicar los conocimientos a la práctica, expresarse con claridad de manera oral y escrita en la propia lengua, capacidad crítica y autocrítica, trabajar de forma colaborativa, capacidad de iniciativa y liderazgo y conocer una segunda lengua [2]. Igualmente se busca el desarrollo de competencias específicas, las cuales dependen de las áreas de conocimiento propias del programa académico que se esté considerando. Estos aspectos han sido recogidos en los criterios para la acreditación de programas de ingeniería en las diversas instituciones responsables de éste proceso, como el ABET (Accreditation Board for Engineering and Technology) en los Estados Unidos [3].

Entre las diversas metodologías para desarrollar las competencias se pueden mencionar: el aprendizaje cooperativo, el aprendizaje colaborativo, el aprendizaje basado en competencias, el aprendizaje orientado por proyectos y el aprendizaje basado en problemas, entre otras [4] [5] [6]. Estas metodologías se han visto favorecidas con el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación, TIC, las cuales, en el caso de la ingeniería, implican la utilización de plataformas en internet para el desarrollo de actividades de formación, laboratorios virtuales y experimentación remota, interfaces web para visualizar contenidos, junto con herramientas de simulación específicamente diseñadas para desarrollar habilidades y destrezas en los futuros ingenieros [7] [8] [9] [10].



En este contexto, en Argentina surge el Primer Acuerdo sobre Competencias [11] en 2006, el cual, siguiendo a Perrenoud [12], sostiene que el saber hacer de los ingenieros es el resultado de una compleja estructura de conocimientos, habilidades y destrezas que requiere ser reconocida expresamente en el proceso de aprendizaje, y propone que las carreras de ingeniería se impartan a partir de diseños curriculares por competencias.

La propuesta del CONFEDI se estructuró a partir de la definición de unidades de competencias [13] que se desagregaron en capacidades asociadas y componentes [14] [15] dando como resultado una matriz que se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Competencias genéricas tecnológicas del perfil del ingeniero en base a CONFEDI

<i>Competencias tecnológicas</i>	<i>Capacidades asociadas integradas</i>
<i>Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Identificar y formular problemas</i></li> <li>● <i>Realizar búsqueda creativa de soluciones y seleccionar la alternativa más adecuada</i></li> <li>● <i>Implementar tecnológicamente una alternativa de solución.</i></li> <li>● <i>Controlar y evaluar enfoques y estrategias propios para abordar eficazmente la resolución de los problemas</i></li> </ul>
<i>Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos).</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Concebir soluciones tecnológicas.</i></li> <li>● <i>Diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería.</i></li> </ul>
<i>Gestionar, planificar, ejecutar y controlar proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos).</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Planificar y ejecutar proyectos de ingeniería.</i></li> <li>● <i>Operar y controlar proyectos de ingeniería.</i></li> </ul>



<p><i>Usar de manera eficaz las técnicas y herramientas de la ingeniería.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Identificar y seleccionar las técnicas y herramientas disponibles.</i></li> <li>● <i>Usar y/o supervisar el uso de las técnicas y herramientas</i></li> </ul>
<p><i>Contribuir a la generación de desarrollos y/o innovaciones tecnológicas</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Detectar oportunidades y necesidades insatisfechas mediante soluciones tecnológicas.</i></li> <li>● <i>Hacer un uso creativo de las tecnologías disponibles.</i></li> <li>● <i>Emplear las formas de pensamiento apropiadas para la innovación tecnológica.</i></li> </ul>

En el 2021, el departamento de IIT&E (Instituto de Investigaciones en Tecnologías y Educación) de la FI-UNLZ, capacitó al personal docente a través de la Diplomatura en Enseñanza Centrada en el Estudiante y Formación por Competencias dando inicio a la transformación de los docentes en la forma de impartir clases. En 2022, surge la iniciativa en la Escuela Tecnológica Ingeniero Giúdice junto a sus estudiantes el diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo vehicular para la competencia Desafío Eco YPF 2022, que permitiría el desarrollo del aprendizaje por competencias de este grupo de estudiantes. A su vez, planteando un desafío mayor, se decide, diseñar y construir un prototipo de mayor envergadura para estudiantes de la Facultad de Ingeniería, y se propone como desafío una nueva competencia de autos llamada Fórmula SAE Brasil.

El concurso Fórmula SAE BRASIL, así como los demás concursos promovidos por la entidad, tiene como objetivo brindar a los estudiantes de Ingeniería la oportunidad de aplicar en la práctica los conocimientos adquiridos en el aula, desarrollando un proyecto completo y construyendo un auto tipo Fórmula. Los trabajos se realizan en grupo.

Creada en 2004, la Fórmula SAE BRASIL va camino a su 18ª edición. En 2019 involucró a más de 1400 suscriptores, número que crece significativamente cada año.

Durante los tres días del evento, los autos pasan por pruebas estáticas y dinámicas, evaluando el desempeño de cada proyecto en la pista, así como las presentaciones técnicas de los equipos, que incluye presentación de proyecto, costo y marketing. Meses antes de la competencia, los



estudiantes presentan informes de costos, estructura, mitigación de impactos y diseño al comité organizador. Los informes son evaluados por ingenieros expertos y ya se consideran la primera parte de la evaluación del prototipo. Ya durante la competencia, en las pruebas estáticas, los equipos deberán demostrar con más detalle si el auto presentado en el proyecto es equivalente al presentado en el evento. Las pruebas dinámicas se llevan a cabo el segundo día del evento. Todas las pruebas se califican de manera diferente, para garantizar que la mejor combinación de diseño y automóvil gane la competencia.

La competencia comenzó en los Estados Unidos en 1981, reemplazando una versión anterior llamada Mini-Indy, aprovechada por la falta de ingenieros especializados en vehículos de alto rendimiento. Fue impulsada por las tres grandes automotrices estadounidenses, General Motors, Ford y Chrysler, quienes vieron en esta competencia una oportunidad única para encontrar nuevos ingenieros para sus equipos. Este apoyo se fortaleció con el tiempo y las empresas quedaron plenamente satisfechas con los estudiantes que fueron contratados. A lo largo de los años, varias empresas se han sumado a las “Big Three” y, además de contratar estudiantes, también han desarrollado productos específicos para la Fórmula SAE.

En Brasil, en 2004 se llevó a cabo la 1ª competencia Fórmula SAE. Actualmente, la competencia se realiza en Australia, Italia, Inglaterra, Alemania, Brasil y Estados Unidos, donde se reúnen los mejores equipos de cada país. En por ello que dentro de la UNLZ se desea investigar en el análisis del aprendizaje en formación por competencias a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Lomas de Zamora a través de un proyecto integrador diseñando y construyendo un prototipo de auto modelo fórmula SAE.

En este proyecto, nos enfocaremos únicamente en el desarrollo de la competencia de trabajo en equipo entre los estudiantes del equipo de Fórmula SAE. Para ello, se llevará a cabo una encuesta a cada estudiante del equipo, centrándonos en las capacidades asociadas a la competencia general de trabajo en equipo. Esta encuesta servirá como instrumento de diagnóstico para evaluar el nivel de competencia antes de iniciar el proyecto.

Para guiar el proceso y fomentar el crecimiento individual, entregaremos a cada estudiante una Bitácora en la que se planteen metas semanales relacionadas con el diseño y construcción del chasis del vehículo eléctrico monoplaza. A través de la Bitácora, los estudiantes registrarán su participación en las actividades propuestas y realizarán autoevaluaciones y coevaluaciones entre los estudiantes y el docente/estudiante. De esta manera, se incentivará el autoconocimiento y la mejora continua en el trabajo en equipo.



El trabajo en equipo será el pilar fundamental durante todo el 2023, mientras los estudiantes se embarcan en el desafío de diseñar y construir el chasis del vehículo para competir en la Fórmula SAE. A lo largo del proceso, se promoverá la colaboración, la comunicación efectiva y la toma de decisiones conjuntas, buscando fortalecer la competencia de trabajo en equipo.

Una vez finalizada la construcción del chasis, se realizará una segunda encuesta con el mismo instrumento de diagnóstico a los estudiantes del equipo de Fórmula SAE. Compararemos los resultados iniciales con los finales, evaluando así el aprendizaje adquirido en la competencia de trabajo en equipo durante todo el proceso del proyecto.

Además, deseamos responder dos hipótesis importantes: la principal es si los proyectos integradores, como el diseño y construcción de un vehículo eléctrico en Fórmula SAE, aportan y suman en forma adicional a las competencias del perfil del ingeniero que se definen en la carrera universitaria del estudiante. La hipótesis auxiliar, por otro lado, plantea si el estudiante adquirió un mayor aprendizaje en la competencia de trabajo en equipo debido al proyecto integrador de la construcción del vehículo eléctrico, más allá del aprendizaje proporcionado por la formación académica en las cátedras de la carrera.

Para abordar estas hipótesis, compararemos la muestra del equipo de Fórmula SAE con una muestra de estudiantes de la facultad que no pertenezcan al proyecto. Ambos grupos responderán el mismo instrumento de encuesta diagnóstica al inicio y final del proyecto de construcción del chasis.

Al finalizar el proyecto, analizaremos los datos recopilados y obtendremos conclusiones sobre la contribución del proyecto integrador en el desarrollo de competencias de trabajo en equipo y en la formación académica y profesional de los estudiantes de ingeniería. Esperamos que este proyecto no solo fortalezca las habilidades de trabajo en equipo de los participantes, sino que también aporte información valiosa para mejorar la educación en el ámbito universitario.

### 3. CONCLUSIONES

En conclusión, este proyecto de investigación representa un valioso esfuerzo dirigido al análisis del proceso de aprendizaje por competencias de los estudiantes de la FI-UNLZ, centrándose especialmente en el desarrollo de la competencia de trabajo en equipo a través del desafiante proyecto de diseño y construcción del chasis de un vehículo eléctrico monoplaza para competir en la Fórmula SAE.

La estructura y enfoque propuestos en este proyecto han demostrado ser ambiciosos y sólidamente estructurados, buscando fomentar el crecimiento integral de los participantes. La



incorporación de diferentes áreas temáticas especializadas y la transversalidad con otras unidades académicas han enriquecido la experiencia de los estudiantes, permitiéndoles adquirir conocimientos prácticos y multidisciplinarios que serán de gran valor en su futuro desempeño laboral.

El proceso de trabajo ha sido cuidadosamente diseñado, brindando herramientas para guiar el desarrollo individual de cada estudiante a través de la Bitácora, donde se establecen metas semanales relacionadas con el proyecto. Además, la autoevaluación y coevaluación promueven el autoconocimiento y la mejora continua en el trabajo en equipo, fortaleciendo la competencia clave de trabajar de manera efectiva en un entorno colaborativo.

Durante todo el año 2023, el equipo de Fórmula SAE ha experimentado el desafío y la responsabilidad de diseñar y construir el chasis del vehículo eléctrico. En este proceso, se han promovido la colaboración, la comunicación efectiva y la toma de decisiones conjuntas, elementos fundamentales para fortalecer la competencia de trabajo en equipo.

Las encuestas iniciales y finales han sido una herramienta valiosa para evaluar el aprendizaje adquirido en la competencia de trabajo en equipo durante todo el desarrollo del proyecto. Además, las hipótesis planteadas sobre el aporte adicional de los proyectos integradores a las competencias del perfil del ingeniero y sobre el mayor aprendizaje en trabajo en equipo han sido abordadas mediante la comparación de la muestra del equipo de Fórmula SAE con la muestra de estudiantes fuera del proyecto.

Los resultados obtenidos en este proyecto han sido fundamentales para comprender cómo los proyectos integradores como el de Fórmula SAE pueden complementar la formación académica de los estudiantes y aportar a su desarrollo profesional. La experiencia obtenida en el caso Desafío ECO - YPF ha demostrado un entusiasmo excepcional por parte de los alumnos, quienes han sido participantes activos tanto en la construcción del vehículo como en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Este proyecto ha permitido que las competencias tecnológicas destacadas por el CONFEDI sean abordadas de manera directa, desarrollando además competencias sociales, políticas y actitudinales que son esenciales para una formación integral como futuros ingenieros. La importancia de esta formación se ha visto reflejada en la demanda laboral, donde las empresas de la zona del AMBA han expresado la necesidad de contar con profesionales que posean conocimientos prácticos y aplicables, además de teóricos.

La vinculación exitosa de la mayoría de los laboratorios de la FI-UNLZ ha sido una prueba concreta de la aplicabilidad práctica de los conocimientos adquiridos en las materias del colegio



secundario. Esta integración entre teoría y práctica ha generado un valioso acervo de conocimientos con aplicaciones inmediatas y tangibles, preparando a los estudiantes para los desafíos del mundo laboral.

Asimismo, el proyecto ha promovido la cohesión entre todas las áreas de la FI-UNLZ, involucrando a todas las cátedras desde la concepción del diseño hasta la puesta a punto final. Esta colaboración interdisciplinaria es esencial para alcanzar un aprendizaje significativo y una formación integral de los futuros ingenieros.

El impacto positivo de este proyecto trasciende las fronteras de la FI-UNLZ, ya que se espera que contribuya al desarrollo de conocimiento colaborativo y significativo a nivel nacional, dando lugar a una fórmula SAE Argentina. En este sentido, se pretende que el proyecto se extienda a otras unidades académicas de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, buscando la participación de diversas facultades en temas específicos relacionados con el proyecto SAE.

En resumen, este proyecto ha demostrado que el enfoque en el desarrollo de competencias de trabajo en equipo a través de proyectos integradores puede marcar una diferencia significativa en la formación académica y profesional de los estudiantes de ingeniería. Los resultados obtenidos en este estudio aportarán valiosa información para mejorar la educación en el ámbito universitario y contribuir al desarrollo de profesionales altamente capacitados y comprometidos con el progreso tecnológico y social del país.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a las autoridades de la FI-UNLZ y a los estudiantes de las carreras de grado y del ETIG, que desde un comienzo confiaron en el proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] Regalado, A., M. Cid y J. Báez, Problem based learning (PBL): Analisis of continuous stirred tank chemical reactors with a process control approach. *International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA)*, 1 (4), 54-73 (2010).
- [2] Galvis, R.V., De un Perfil Docente Tradicional a un Perfil Docente Basado en Competencias, *Acción Pedagógica*, 16 (1), 48-57 (2007).
- [3] Rugarcia, A., R.M. Felder, D.R. Woods y J.E. Stice, The Future of Engineering Education I. A Vision for a New Century," *Chem. Eng. Ed.*, 34 (1), 16-25 (2000).
- [4] Nascimento, J. M. y Amaral E. M., O Papel das interações sociais e de atividades propostas para o ensinoaprendizagem de conceitos químicos, *Ciência & Educação*, 18 (3), 575-592 (2012).



- [5] Moreno, L., C. González, I. Castilla, E. González y J. Sigut, Applying a Constructivist and Collaborative Methodological Approach in Engineering Education, *Computers and Education*, 49 (1), 891–915 (2007).
- [6] Hernández, C., Utilización del Trabajo por Proyectos para Incentivar la Innovación Tecnológica en los Estudiantes Universitarios. *Revista Científica de la Fundación Iberoamericana para la Excelencia Educativa Hecademus*, 3 (8), 42–54 (2010).
- [7] Vacca, V., E. Caicedo y J. Ramírez, Herramienta Remota de Cálculo y Multiusuario para el Aprendizaje Basado en Problemas Usando Matlab. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (59), 158–169 (2011).
- [8] Ertugrul, N. Towards Virtual Laboratories: A survey of LabView-Based Teaching/Learning Tools and Future Trends. *International Journal of Engineering Education*, 16, 171–180 (2000).
- [9] Alejandro, C., Prácticas de Laboratorio de Física General en Internet, *REEC: Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, ISSN-e: 1579-1513 (en línea), 3 (3), 202-210 (2004). [http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen3/REEC\\_3\\_2\\_6.pdf](http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen3/REEC_3_2_6.pdf). Acceso: 5 de Agosto (2022).
- [10] Okutsu, M., D. DeLaurentis, S. Brophy y J. Lambert, Teaching and Aerospace Engineering Design Course via Virtual Worlds: A Comparative Assessment of Learning Outcomes. *Computers and Education*, 60 (1), 288–298 (2013).
- [11] Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina [Confedi]. (2006). *Primer Acuerdo sobre Competencias Genéricas*. Villa Carlos Paz, Argentina: Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina.
- [12] Perrenoud, P. (2013). *Construir competencias desde la escuela*. Madrid, España: Editorial JCSAEZ.
- [13] Huerta, M. (2014). *Formación por competencias a través del aprendizaje estratégico*. Lima, Perú: Editorial San Marcos.
- [14] Tobón, S. (2013). *Formación integral y competencias*. Bogotá, Colombia: Eco Ediciones.
- [15] Tobón, S., Pimienta, J. y García, J. (2012). *Secuencias didácticas: Aprendizaje y evaluación de competencias*. México: Pearson Educación.



# LA NOCIÓN DE PERFIL CONCEPTUAL COMO INSTRUMENTO PARA EVALUAR COMPETENCIAS EN EL CICLO BÁSICO DE INGENIERÍAS

Claudio Enrique

UDB Física - Departamento Materias Básicas – UTN Facultad Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina- [cenrique@frsf.utn.edu.ar](mailto:cenrique@frsf.utn.edu.ar).

---

## RESUMEN

En este trabajo se propone el uso del Perfil Conceptual como instrumento para evaluar competencias cognitivas en alumnos del ciclo básico de ingeniería. Más allá de la necesidad actual respecto de las acreditaciones de carreras universitarias por competencias, es necesario realizar un cambio de paradigma: pasar de una evaluación propia de un entorno positivista hacia uno sistémica en un entorno constructivista de aprendizaje. Por ello, es necesaria la presencia y ajustes de novedosos y diversos instrumentos para determinar dichas competencias. Así se introduce la noción de Perfil Conceptual, que fue presentada recientemente en una tesis doctoral que indagó específicamente sobre la mediación de las TIC en el Movimiento Oscilatorio, donde se indagó el proceso de aprendizaje bajo otras instancias y dentro de un entorno constructivista de aprendizaje donde se realizaron análisis sobre los conocimientos previos; los adquiridos mediante la instrucción; y aquellos que permanecieron en la estructura cognitiva del sujeto. De este modo se pudo investigar sobre aspectos cognitivos presentes en diferentes actividades de la intervención didáctica; cómo se desplazan los conocimientos entre dichas actividades; e incluso cómo se integran junto a los aspectos metacognitivos. Cabe aclarar que, con las modificaciones adecuadas, el Perfil Conceptual podría emplearse tanto en otros contenidos de Física como de otras materias ingenieriles. Por otro lado, se entiende que las competencias cognitivas involucran para el alumno comprender, evaluar, crear, tomar decisiones y solucionar problemas para un determinado contenido en un contexto determinado. Al contrastar los resultados obtenidos a través de los Perfiles Conceptuales presentes en diversas expresiones escritas de los alumnos, sería posible detectar las competencias cognitivas correspondientes. De este modo, la meta es proponer una herramienta novedosa y creativa que permita resolver algunas situaciones sobre uno de los aspectos de la educación, que hace tiempo, necesita cambios y cuasi urgentes.

**Palabras Clave:** *Evaluación de aprendizajes; Perfiles Conceptuales; Competencias Cognitivas; Física Clásica*

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo propone emplear la noción de Perfil Conceptual (PC) como instrumento para evaluar las competencias cognitivas en alumnos del ciclo básico de ingeniería. Se tomó como referencia una tesis doctoral reciente [1] referida sobre una intervención didáctica mediada por las TIC sobre el Movimiento Oscilatorio (MO) en alumnos de primer año de ingeniería cuando cursaron la materia Física I. Los resultados obtenidos en dicha tesis permitieron detectar los niveles cognitivos - y metacognitivos – alcanzados por los estudiantes indagados, a través de las distintas zonas de PC asociados a las diversas actividades académicas sobre el estudio de los sistemas oscilantes. En este trabajo se considera que estos niveles logrados están



estrechamente relacionados con las competencias cognitivas - y metacognitivas - que dispusieron dichos estudiantes para poder realizar las acciones propias de cada una de las etapas de la citada intervención didáctica.

La herramienta empleada para la construcción de los PC, conocida como Matriz Epistemológica, permite evaluar los aspectos cognitivos y metacognitivos que ponen en juego los estudiantes en una actividad de aprendizaje específica. En la tesis mencionada con anterioridad, se trató del estudio del MO - Armónico Simple y Amortiguado -, en una interacción mediada por las tecnologías digitales. Dicha matriz permitió, a través de la identificación de cuatro zonas de PC, cómo “se ubicaron” los saberes de los estudiantes revelados a través de las expresiones escritas provenientes de distintas actividades didácticas; tanto para el grupo en su totalidad, o para cada alumno de manera particular; incluso, para el estudio global del MO, o para distintas categorías de análisis basadas en conceptos y procesos físicos (Conceptos Básicos; Cinemática; Dinámica; Energía; Conservación; y No Conservación). Así, fue posible realizar distintos diagnósticos acerca de cómo los saberes del grupo indagado se reconstruyeron, co-construyeron o deconstruyeron en la intervención didáctica; y además cómo se movilizaron en distintas etapas, a partir de sus conocimientos previos. Incluso, se logró visibilizar si el aprendizaje ha sido significativo: es decir, si los saberes adquiridos han sido perdurables en el tiempo y pudieron ser transferibles en un examen parcial de Física I.

Cabe aclarar que en este trabajo se consideran que las competencias cognitivas y metacognitivas se desarrollan de manera simultánea. Esta situación implica que cuando los sujetos intentan resolver una tarea o situación problemática, no sólo deben contar con sus conocimientos – el saber - sino también cómo usarlos – saber hacer o saber actuar -. Concretamente, deben disponer de los saberes correspondientes (presentes en su estructura cognitiva) en un contexto determinado, y saber cómo usarlos; es decir, poder interpretar, analizar, resolver, evaluar y comunicar las distintas tareas o problemas asignados.

## 2. MARCO TEÓRICO

La noción de PC involucra aspectos epistemológicos y ontológicos que los alumnos activan cuando participan en la gestión de sus saberes, y su “intención es construir un modelo para describir la evolución de las ideas tanto en el espacio social de la clase como en los individuos, a consecuencia del proceso de aprendizaje” [2] (pp. 53), y “deben ser entendidos como modelos de diferentes maneras de ver y representar el mundo, que son utilizados por las personas para significar su experiencia” [3] (p. 113). Se basa en que en cualquier cultura o persona no existe una forma homogénea de pensar sino diferentes tipos de pensamiento verbal, y debido a esta *pluralidad representacional* se produce la coexistencia de dos o más significados para un mismo



concepto - incluyendo los de carácter científico - que se emplean de modo correcto en diferentes contextos. La evolución conceptual no es entendida como la sustitución de las concepciones previas de los estudiantes por ideas científicas, sino como un enriquecimiento del espectro de ideas de las que se dispone para la comprensión de un asunto dado [4]. Así, cualquier problema u objeto sería susceptible de ser analizado o representado de formas alternativas que implicarían diferentes niveles de análisis, jerárquicamente organizados, basados en estructuras conceptuales de diferente complejidad, las cuales pueden ser detectadas a través de las distintas zonas de PC. Para ello, es necesario la construcción de un instrumento denominado Matriz Epistemológica; la cual se describirá y desarrollará más adelante.

Según [5], una persona competente es aquella que sabe actuar de forma oportuna o pertinente. La organización de estos recursos constituye los cimientos para poder construir una competencia donde, a través de ésta, el sujeto podrá actuar de manera eficiente y eficaz en un determinado contexto de trabajo, siempre y cuando coordine el saber hacer, con las capacidades y las habilidades pertinentes. Expresado de otro modo, debe tener la capacidad de desarrollar una serie de actividades deseables, en un determinado contexto, como elegir y movilizar tanto: a. sus propios recursos (conocimientos; saber hacer; cualidades; cultura, motivaciones; afectividad...), y b. los necesarios para el manejo de la información (equipamiento incorporado para obtenerla: banco de datos; redes documentales; redes de experiencia especializada) [6].

Con relación a la educación, el concepto de competencia debería interpretarse como una articulación entre los siguientes aspectos: a. conceptuales, el “saber”; b. procedimentales, el “saber hacer”; c. actitudinales, el “saber ser”; y d. metacognitivos, el “saber saber”; los cuales deben activarse de manera eficiente y eficaz, de modo tal que permita al estudiante tomar decisiones y ejecutar determinadas acciones sobre un conocimiento específico o propio de determinadas actividades cognitivas y metacognitivas. De este modo se pueden interrelacionar la teoría con la práctica – es decir, los cuatro aspectos citados anteriormente -, pudiendo facilitar una especie de “aprendizaje total” [5] en particular para una o un “ingeniera/ ingeniero en formación” cuando cursa el primer año de su carrera universitaria, y específicamente para este trabajo, en la materia Física I.

Por su parte, la Metacognición fue definida como el conocimiento que tienen los estudiantes sobre sus propios procesos cognitivos o sobre cualquier elemento relacionado con ellos; es decir, las propiedades de la información o los datos relevantes para el aprendizaje y, entre otras cosas, el control y la regulación subsiguiente de estos procesos [7]. Expresado de otro modo, “es la toma de conciencia por parte de los individuos, sobre sus propios procesos de pensamiento y conocimiento y sobre las formas de cualificarlos y delimitarlos” [8] (p. 31).

Para finalizar, el análisis sobre el aprendizaje del MO implica establecer una relación con los restantes contenidos enseñados en el curso de Física I. De este modo, puede resultar ser un



muy buen indicador sobre los procesos de aprendizaje de la Mecánica Clásica, dado que, para su estudio, análisis, comprensión, retención, y comunicación, es necesario contar con los saberes propios de la Mecánica de la partícula y del sólido rígido, y además, interrelacionados.

### 3. METODOLOGÍA

En este trabajo se propone que las zonas del PC, para cada una de las etapas de una intervención didáctica sobre un contenido específico (MO), en una materia del ciclo básico de una ingeniería (Física I), puede resultar ser una herramienta muy útil para evaluar las competencias cognitivas – y metacognitivas – de un grupo de estudiantes indagados; tanto de manera grupal como individual; y sobre el contenido enseñado así como también para cada una de las partes del mismo – en este caso, sobre conceptos y procesos del MO -.

En la investigación de referencia [1], participaron 38 estudiantes de primer año de una carrera de ingeniería de la cohorte 2017 de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional, y si bien la misma estuvo conformada por distintas etapas, lo relevante para este trabajo está relacionado a la construcción de la Matriz Epistemológica. Ésta es una herramienta que se diseña para la constitución de las zonas de PC, donde se emplean los pasos teóricos y metodológicos propios del enfoque de PC [9] [10] [11], los cuales atienden a un juego dialógico entre estudios teóricos y empíricos, involucrando al menos tres ámbitos o dominios genéticos [12]: Sociocultural; Ontogenético o Macrogenético; y Microgenético. La evolución en el aprendizaje, tanto del grupo como de cada alumno en particular, puede evidenciarse a partir de la detección de cambios – o no – en las zonas de PC sobre el contenido enseñado, al ejecutar y comunicar las acciones previstas en diferentes instancias; comenzando con el examen pretest – cuestionario sobre conocimientos previos - ; y continuando con las tareas propias de la intervención didáctica – en este trabajo, sobre conocimientos movilizados debido principalmente a las acciones efectuadas mediante el uso de las TIC -; y finalizando en el examen postest – conocimientos adquiridos o que permanecieron en la estructura cognitiva del sujeto; detectados a través del mismo cuestionario que se usó en el pretest -. Cabe aclarar que para el análisis de los tres dominios genéticos además se consideraron los cambios en el aprendizaje de la ciencia propuestos por [13], en las que se caracterizan los principios epistemológicos, ontológicos; y conceptuales producto de diferentes “niveles de análisis emprendidos” (p. 118) y de “un continuo a lo largo del cual habría que ir profundizando con el fin de acercarse al sentido del conocimiento científico” (p. 119).

El dominio Sociocultural, también denominado Sociohistórico, involucra el análisis del MO en la historia del conocimiento científico. Como en el estudio de estos sistemas no existe una categoría propia asociada a sus conceptos - como en el caso de la masa o la fuerza -, se empleó el estudio



del movimiento en la historia de la Física. Así, se definieron tres momentos históricos: a. Aristotélico; b. Medieval o del Ímpetu; y c. Mecánica Clásica o Newtoniana.

En el dominio Macrogenético u Ontogenético se tomaron como referentes varias investigaciones publicadas sobre concepciones de los alumnos sobre MO, incluyendo a las denominadas alternativas o *missconceptions*. Las tres corrientes presentadas en el dominio Sociohistórico resultaron relevantes para el estudio de este dominio, dado que investigaciones en el área de las concepciones alternativas han demostrado que la Física del sentido común mantiene estrechas relaciones con la Física aristotélica y/o con el pensamiento medieval del ímpetu [14] [15] [16].

Dentro del último dominio, el Microgenético, se incluyeron los resultados obtenidos a partir del análisis de las respuestas al cuestionario como pretest, dado que constituyó una fuente de datos importante para la comprensión de los procesos de aprendizaje y del desarrollo cognitivo del grupo indagado. Además, resultó conveniente ampliar el estudio usando las categorías conceptuales Conceptos Básicos, Cinemática, Dinámica, Energía, Conservación, y No Conservación, las cuales caracterizan distintos conceptos y procesos identificados por los estudiantes.

De este modo, la Matriz Epistemológica se conformó con cuatro zonas que se denominaron, según el orden creciente, como:

- Zona 1 Realismo Ingenuo. Propio de una visión perceptiva/intuitiva (animismo), relacionada con los niveles de percepción inmediata y sensible de los fenómenos, corresponde a ideas intuitivas donde los alumnos apenas justifican la ocurrencia natural de los mismos, no siendo consideradas las condiciones en que ocurren los procesos. Predomina el pensamiento de sentido común; asociado a la realidad sensorial inmediata. Asimismo, prevalece una concepción aristotélica del movimiento, por lo que revela la presencia de variadas concepciones alternativas.

- Zona 2 Realismo Interpretativo. Característico de una visión empírica, el estudiante vincula descripciones de los fenómenos y hechos en función de propiedades y cambios observables, donde sólo cambia aquello que "se ve que se altera". Los fenómenos se interpretan en forma cualitativa, teniendo dificultades en expresar de manera coherente las ecuaciones que caracterizan al objeto a analizar. Predomina una concepción medieval del movimiento.

- Zona 3 Racionalismo Clásico. Correspondiente a una visión formalista y racionalista, el sujeto alude a un plano teórico de comprensión, en el cual el análisis de los procesos está asociado al uso de algoritmos y fórmulas matemáticas que derivan de la consideración de modelos teóricos, sin que eso se traduzca en la comprensión de las relaciones conceptuales. Se caracteriza por el uso de conceptos científicamente aceptados, - Mecánica newtoniana - no interrelacionados. Por ello, se utilizan reglas simplificadoras de manera individual, o no asociadas. Los estudiantes pueden revelar alguna de las concepciones alternativas.



- Zona 4 Racionalismo Sistémico. Referido a una visión formalista, racionalista y sistémica, refiere a un plano teórico de comprensión, asociado al uso de algoritmos y ecuaciones matemáticas provenientes de modelos teóricos, al analizar los procesos. La comprensión se realiza mediante la activación de relaciones conceptuales y su integración pasando a conformar un “todo”. Se caracteriza por el uso correcto de la Mecánica newtoniana donde las propiedades de los cuerpos y los fenómenos se interpretan como un sistema en términos de interacción. Se emplean relaciones cuantitativas múltiples entre las variables que tipifican al sistema. Los estudiantes no revelan concepciones alternativas.

Analizando las cuatro zonas del PC, es evidente que se puede establecer una fuerte correspondencia con las competencias cognitivas y metacognitivas desarrolladas en distintas actividades de una intervención didáctica, las cuales fueron evidenciadas a través del análisis de las producciones escritas de los estudiantes. Es en este contexto donde se puede establecer la siguiente relación entre las zonas del PC y la categorización de las competencias asociadas a distintos niveles cognitivos – y metacognitivos -; según la Tabla 1:

Tabla 1. Comparaciones entre zonas del PC y Competencias cognitivas – y metacognitivas -

Zonas del PC	Competencias cognitivas – y metacognitivas -
Realismo Ingenuo (zona 1)	En desarrollo
Realismo Interpretativo (zona 2)	Elemental
Racionalismo Clásico (zona 3)	Competente
Racionalismo Sistémico (zona 4)	Experto

De este modo, los alumnos que accedan o permanezcan en las zonas 3 y 4 son aquellos que se pueden considerar competentes o expertos, respectivamente, de modo tal que *saben hacer* o *saben actuar* cuando aplican los conocimientos apropiados y correspondientes a una actividad asignada. Cabe aclarar que un alumno experto es aquél que realiza un análisis estratégico más eficiente, eficaz, e interrelacionado entre los conceptos y procesos sobre dicho contenido específico y en un contexto determinado, mientras que uno considerado competente puede hacerlo de manera similar aunque no de manera interrelacionada, sino aislada, entre los conceptos y procesos involucrados. Por su parte, los que se encuentran dentro de las zonas 1 y 2 revelan competencias que están en una fase en desarrollo o son de carácter elemental, aunque insuficientes para lograr un nivel de desempeño adecuado; al menos, como un sujeto competente. Si bien ambos presentan deficiencias cognitivas – y metacognitivas – en saberes científicos y sus relaciones, los que corresponden al Realismo Ingenuo están más alejados que los del Realismo Interpretativo. Por lo tanto, es evidente que necesitan de mayores refuerzos, de

modo tal que modifiquen de manera significativa las “ideas – anclas” o subsunsores presentes en sus estructuras cognitivas - y metacognitivas -.

#### 4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se van a presentar algunos de los resultados obtenidos en [1]; específicamente, los desempeños individuales de 4 estudiantes elegidos al azar y que fueron identificados como IC6; IC22; IC42; e IC46. Sus grados de cumplimiento alcanzados a través de las zonas de los PC en cada una de las etapas de la intervención didáctica: a. en el pretest (o PCI); b. en las actividades mediadas por las TIC (o PCLVA); y c. en el postest (o PCF); son los presentados en la Figura 1, a través de la representación gráfica tradicional del PC – diagrama de barras verticales -, donde se visualiza que, al inicio de la intervención didáctica sobre MO – a través de las zonas del PCI -, los conocimientos previos de alumnos IC6 e IC42 se ubicaron dentro del Racionalismo Clásico, mientras que IC22 e IC46 estuvieron en el Realismo Ingenuo.

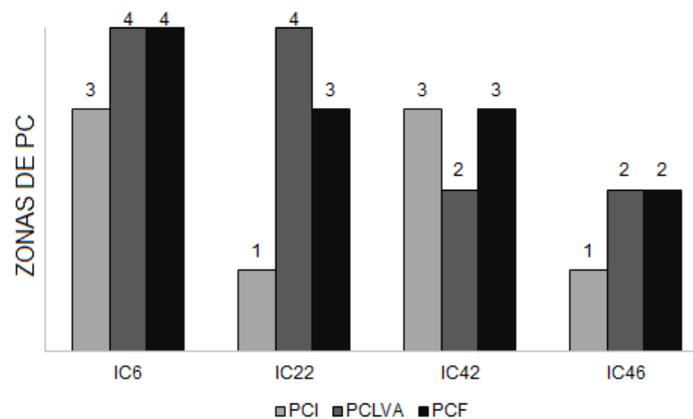


Figura 1: zonas de los tres PC para los cuatro estudiantes analizados.

Así, los dos primeros estudiantes pueden considerarse como competentes, dado que, previo al dictado de los contenidos sobre MO en Física I, contaron con aprendizajes significativos en Mecánica Clásica, y por ello pudieron emplearlos y transferirlos para el estudio en diversas actividades sobre dicho tipo de movimiento. Por su parte, los dos estudiantes restantes revelaron que sus aprendizajes todavía se encuentran en desarrollo, dado que éstos no lograron modificarse de manera significativa durante el dictado de Física I, por lo que no se trata de sujetos con competencias en desarrollo. Luego de la intervención didáctica mediada por las TIC (zonas del PCLVA), los alumnos IC6 e IC22 accedieron al Racionalismo Sistemático; es decir, arribaron a conocimientos propios de un estudiante experto, con características de un aprendizaje estratégico e interrelacionado sobre los contenidos sobre MO. Mientras que IC42 e IC46, como estuvieron dentro del Realismo Interpretativo, se pudo inferir que estos dos sujetos no lograron



potenciar el uso de las TIC para mejorar sus aprendizajes, y por ello manifestaron competencias cognitivas – y metacognitivas - del tipo elemental; tal vez debido a la presencia de un aprendizaje mecánico o memorístico, o no significativo. De hecho, sólo avanzó de zona IC46, pero al hacerlo desde la zona 1 a la 2 lo realizó dentro de los niveles propios de los conocimientos precientíficos. Al finalizar la intervención didáctica, mediante las zonas del PCF se detectaron los conocimientos que permanecieron en la estructura cognitiva de los alumnos. Así, IC6 permaneció en la zona 4, mientras que IC22 llegó a la zona 3; al igual que IC42. Por su parte, IC46 finalizó en la zona 2. Por ello, se concluye que, con relación a un análisis global sobre MO:

- IC6 avanzó desde una cosmovisión científica aislada a una interrelacionada. Por ello, pasó de ser un alumno competente a uno experto, donde sus aprendizajes significativos avanzaron desde científicos y aislados hasta ser científicos e interrelacionados o estratégicos.

- IC22 avanzó de manera significativa, desde una visión ingenua a una científica aunque aislada. De todos modos, sus expresiones escritas revelaron que sus competencias cognitivas - y metacognitivas - pasaron de ser propias de un alumno que disponía de saberes “en desarrollo”, a uno que logró ser “competente”.

- IC42 permaneció como un estudiante competente, al estar dentro de la zona 3. Expresado de otro modo, mediante la intervención didáctica no pudo mejorar sus conocimientos previos. No obstante ello, en la investigación de referencia quedó claro que este sujeto no pudo lograrlo durante el tiempo de la intervención didáctica, dado que mediante otro instrumento – cuestionario de opinión sobre uso de las TIC - se logró visibilizar que necesitó más tiempo para consolidar sus saberes cuando usó a las TIC como herramientas cognitivas y metacognitivas.

- Finalmente, IC46 no pudo acceder a las zonas de los Racionalismos. Si bien pasó de ser un sujeto con saberes “en desarrollo” al nivel de “elemental”, ambas categorías revelaron la presencia de conocimientos insuficientes para lograr un aprendizaje eficiente y eficaz. Es decir, no logró contar con las competencias sobre Mecánica Clásica antes de la intervención didáctica sobre MO, y tampoco pudo alcanzarlas debido a la intervención mediada por las TIC.

Con relación al Grado de Confianza, todos ellos incrementaron sus valores frente a los que presentaron antes de la intervención didáctica. Basada en una calificación de 0 puntos para confianza nula, hasta 10 puntos en confianza plena, IC6 pasó de 5 a 8 puntos; mientras que IC22 lo hizo de 5 a 7; e IC42 de 5 a 6 puntos. De este modo se vislumbra que, mediante el análisis de la metacognición, los dos primeros estudiantes no sólo avanzaron en sus conocimientos sino que además estuvieron muy o bastante seguros de ellos, mientras que para el último su confianza se incrementó muy poco, siendo su valor inicial medio - bajo. Finalmente, IC46 pasó de 1 a 3 puntos; lo cual indicó su muy poca confianza en relación con lo que sabe; tanto al inicio como al finalizar la intervención didáctica sobre MO.



Respecto a los resultados sobre las seis categorías de análisis, los desempeños en las zonas de sus PC han sido más clarificadores. De manera resumida, se reveló que IC6 tuvo dificultades en Energía, donde las zonas de sus PCI y PCF se ubicaron dentro del Realismo Interpretativo; es decir, no modificó sus saberes que fueron propios de un alumno con competencias del tipo elemental. IC22 tuvo deficiencias en Dinámica, y al pasar desde la zona 1 a la 2 presentó competencias desde *en desarrollo* al nivel *elemental* -. IC42 se destacó en No Conservación al movilizarse desde la zona 3 a la 4; es decir, de un estudiante considerado competente al de uno experto; mientras que IC46 sólo se destacó en Conceptos Básicos, alcanzando las características en el PCF de un alumno competente al arribar a la zona 3.

Otra herramienta desarrollada en [1] fueron las Transiciones entre zonas de PC, y las mismas mostraron cómo los aspectos cognitivos de los estudiantes *se movilizaron* a través de las zonas del PC: antes y después de dos actividades propias de una intervención didáctica. Es evidente que cuando el estudiante permanece o avanza hacia los Racionalismos Clásico, y en particular el Sistémico, ha logrado acceder a conocimientos científicos sobre el MO. Si además éstos son los propios del PCF, se trata de los que han permanecido en su estructura cognitiva al finalizar la intervención didáctica. En consecuencia, se puede afirmar que los estudiantes con este desempeño han logrado ser *competentes* o *expertos* sobre el contenido enseñado. Dichas Transiciones hacia las zonas 3 y 4 se denominaron *deseables*, y permitieron además indagar si el aprendizaje ha sido significativo, dado que estos saberes, además, están disponibles o pueden ser transferibles en actividades propias de cualquier proceso educativo; por ejemplo, en un examen de Física I. Para el estudio de los cuatro estudiantes respecto a las seis categorías de análisis sobre MO, el porcentaje de Transiciones deseables tanto totales – hacia zonas 3 y 4 - como hacia sólo la zona 4 (Racionalismo Sistémico) fueron las siguientes – Tabla 2 -:

Tabla 2. Porcentaje de Transiciones deseables de los cuatro alumnos indagados.

Alumno	Transiciones deseables totales	Transiciones deseables hacia zona 4
IC6	89%	56%
IC22	72%	38%
IC42	39%	13%
IC46	33%	0%

Para finalizar, y si bien el análisis a través de las zonas entre los PCI, PCLVA, y PCF fueron complementadas con otras herramientas desarrolladas en [1], los resultados hallados y particular para este trabajo sobre cada estudiante analizado tuvieron una relación muy fuerte con las notas finales en la materia Física I. El alumno IC6 no sólo tuvo mayores avances cognitivos – y metacognitivos – en la intervención didáctica sobre MO. Además su nota final en Física I fue la



máxima (10 puntos); en consecuencia, se trató de un estudiante que se pudo considerar como “experto”. Por su parte, IC 22 logró situarse en la mayoría de sus actividades como “competente” o “experto”, siendo su nota final de 7 puntos. IC 42 se ubicó en la mayoría de las actividades como un alumno principalmente con competencias del tipo “elemental” y en minoría como “competente”, logrando un puntaje de 6. Finalmente, IC46 se destacó por ser en la mayoría de sus expresiones como un estudiante con competencias “en formación”, seguido de “elemental”. No sólo no aprobó la materia, sino que además el año siguiente la tuvo que volver a cursar como alumno regular.

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo mostró que a través de la noción de PC es posible establecer una relación entre las competencias cognitivas – y metacognitivas – que revelan los estudiantes a través de las expresiones escritas de distintas actividades propias de una intervención didáctica.

Si bien el trabajo de referencia fue sobre el estudio del MO en una actividad mediada por las TIC, también es cierto que esta propuesta puede ser adaptada tanto para otros contenidos de Física, como de cualquier otra materia propia de una carrera de Ingeniería. Sólo queda diseñar, desarrollar, elaborar, probar y evaluar los distintos instrumentos para recolectar la información relevante sobre las competencias; como por ejemplo, la Matriz Epistemológica.

Por otro lado, también es urgente contar con nuevas herramientas para evaluar los aprendizajes. La noción de PC demostró que no es incompatible con la evaluación sumativa y a través de competencias. Lo que si queda claro es que es necesario evaluar los aprendizajes de otro modo al que se usaba de manera tradicional, porque sólo con una nota al final del proceso educativo sólo se emplea una versión reduccionista del proceso de enseñanza y aprendizaje, en el cual es mucho más importante analizar cómo se dan los procesos cognitivos – y metacognitivos – en los estudiantes y así poder actuar como docentes para que éstos logren un aprendizaje significativo durante dichos procesos, y no al final como *producto terminado*.

## REFERENCIAS

- [1] Enrique, C. *Integración conceptual de los movimientos oscilatorios armónico y amortiguado a través de actividades problemáticas significativas mediadas por TIC´s en el nivel universitario básico: diseño, desarrollo y evaluación*. Tesis doctoral, 2022. Disponible en: <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/6716>
- [2] Mortimer, E. (2000). *Lenguaje y formación de conceptos en la enseñanza de las Ciencias*. A. Machado Libros, Madrid, 2000.



- [3] Pedreros, R. *Diálogo de las perspectivas de perfil conceptual y conglomerados de relevancia*. Revista Internacional de Investigación en Educación, vol. 6, N° 12, Edición especial Enseñanza de las ciencias y diversidad cultural, pp. 119-131, 2013.
- [4] Mortimer, E. (2001). *Perfil conceptual: modos de pensar y formas de hablar en las aulas de ciencias*. Infancia y Aprendizaje, vol. 24, n° 4, pp. 475-490, 2001.
- [5] Le Boterf, G. *Ingeniería de las competencias, Volumen 4 de Colección Formación y Desarrollo Series*, Editor Gestion 2000, Barcelona, 2000.
- [6] Aldaba Corral, A. *Las competencias cognitivas y el perfil del aprendiz exitoso*. Investigación Educativa Duranguense, N° 2, pp. 11 - 22, 2003.
- [7] Flavell, J. *Metacognitive aspects of problem solving*. En: L. B. Resnik (ed.). *The nature of intelligence* (pp. 231-235). Hillsdale, N.J.: Erlbaum, 1976.
- [8] Soto, C. *Metacognición. Cambio Conceptual y Enseñanza de las Ciencias*. Bogotá, Cooperativa Editorial Magisterio, 2002.
- [9] Sepulveda, C; Mortimer, E. & El-Hani, C. *Construção de um perfil para o conceito de adaptação evolutiva*. Anais do VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. Belo Horizonte, MG: ABRAPEC, 2007.
- [10] Coutinho, F.; Mortimer, E.; El-Hani, C. *Construção de um perfil para o conceito biológico de vida*. Investigações em Ensino de Ciências, Volumen 12, N° 1, pp. 115-137, 2007.
- [11] Amaral, E., & Mortimer, E. *Uma metodologia para análise da dinâmica entre zonas de um perfil conceitual no discurso da sala de aula. A pesquisa em ensino de ciências no Brasil e suas metodologias*. Ijuí, Editora Unijuí, pp. 239-296, 2006.
- [12] Wertsch, J. *Vygotsky y la formación social de la mente*. Buenos Aires, Paidós, 1985.
- [13] Pozo, J., & Gómez Crespo, M. *Aprender y enseñar ciencia. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*. Madrid, Morata, 1998.
- [14] de Lozano, S.; Cardenas, S.; & Katz, V. *Las concepciones no newtonianas en dinámica y su incidencia en el proceso de enseñanza-aprendizaje*. Revista de Enseñanza de la Física, vol. 2, n° 2, pp. 115 – 224, 2016.
- [15] Mora, C. & Herrera, D. *Una revisión sobre ideas previas del concepto de fuerza*. Latin - American Journal of Physics Education, vol. 3, n° 1, pp. 72-86, 2009.
- [16] Pozo, J. *La historia se repite: las concepciones espontáneas sobre el movimiento y la gravedad*. Infancia y aprendizaje, vol. 10, N° 38, pp. 69-87, 1987.



## GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO PARA EL LABORATORIO DE MEDIDAS Y ENSAYOS ELÉCTRICOS DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA-FACULTAD REGIONAL SANTA FE, 2021-2013.

Lara Zingaretti<sup>1</sup>, Pablo Marelli<sup>2</sup>, Melina Scoppa<sup>3</sup>, Diego López<sup>4</sup>, Pablo Macor<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Departamento Académico de Ing. Eléctrica – UTN Facultad Regional Santa Fe – Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina – [lzingaretti@frsf.utn.edu.ar](mailto:lzingaretti@frsf.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento Académico de Ing. Eléctrica – UTN Facultad Regional Santa Fe – Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina – [pamarelli@frsf.utn.edu.ar](mailto:pamarelli@frsf.utn.edu.ar)

<sup>3</sup> Departamento Académico de Ing. Eléctrica – UTN Facultad Regional Santa Fe – Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina – [mscoppa@frsf.utn.edu.ar](mailto:mscoppa@frsf.utn.edu.ar)

<sup>4</sup> Departamento Académico de Ing. Eléctrica – UTN Facultad Regional Santa Fe – Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina – [dclopez@frsf.utn.edu.ar](mailto:dclopez@frsf.utn.edu.ar)

<sup>5</sup> Departamento Académico de Ing. Eléctrica – UTN Facultad Regional Santa Fe – Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina – [pmacor@frsf.utn.edu.ar](mailto:pmacor@frsf.utn.edu.ar)

### RESUMEN

Este trabajo se enmarca en el PID: "Gestión del conocimiento para el Laboratorio de medidas y ensayos eléctricos (Lamyen) de la UTN - Facultad Regional Santa Fe (FRSF), 2021-2023".

En la literatura estudiada, el concepto "Gestión del Conocimiento" y sus diferentes modelos, se vincula con calidad, mejoramiento continuo, posibilidad de compartir saberes y bucles de aprendizaje colaborativo. La gestión del conocimiento se vincula a los procesos de crear, localizar y compartir experiencias que puedan ser utilizados en la resolución de problemas.

En este trabajo, se comparten resultados obtenidos del relevamiento realizado a becarios de la FRSF, pertenecientes al Lamyen, respecto a las competencias que son necesarias para el funcionamiento de los procesos sociales claves del laboratorio y su quehacer como profesionales de la ingeniería. La metodología utilizada se basó en encuestas a todos los operadores y entrevistas al personal clave (dirección) del laboratorio.

Se considera que este diagnóstico parcial, permite descubrir cuáles son las competencias sociales, políticas y actitudinales necesarias para el correcto desempeño de los estudiantes becarios del Lamyen, generando un círculo virtuoso en la enseñanza de la ingeniería. Indagar sobre cuáles son estas "habilidades" claves para que los alumnos de la FRSF puedan desempeñarse con éxito en una organización, permiten generar transferencia a las cátedras y así lograr una mejora continua acercando los requerimientos del mundo laboral a la enseñanza del nivel superior.

Como resultados de este trabajo, se presentarán las respuestas obtenidas en la encuesta respecto a las competencias sociales, políticas y actitudinales requeridas para desempeñarse eficientemente en un ambiente laboral y cómo el llevar a la acción los conocimientos compartidos, generando mejora continua.

**Palabras Clave:** Enseñanza, Competencias Sociales, Gestión del Conocimiento, Laboratorios.



## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de cambio que atraviesan las universidades evidencian la importancia que ha tomado, en este último tiempo, la producción, preservación y transferencia de conocimientos. Las universidades se vislumbran, hoy, como un componente estratégico en la construcción de una sociedad donde el aprendizaje, la creatividad de la educación y la cultura, son fundamentos claves para alcanzar el desarrollo económico y social sostenible [1].

Realizando una reflexión sobre las universidades en general, y la UTN en especial, se considera importante realizar una articulación entre el sector productivo y la universidad para contribuir de manera trascendente con los requerimientos del desarrollo económico y social que demanda el país, sobre la base de universalizar la educación superior y colaborar con la movilidad social a través de la socialización del conocimiento. La sistematización de la socialización del conocimiento es parte central de la correcta gestión del conocimiento.

Dentro de la UTN – Santa Fe, existen laboratorios académicos que realizan investigación, articulando la teoría con la experiencia y la innovación; y brindan desarrollos y trabajos de transferencia a diferentes empresas que requieren esos servicios, apoyando el desarrollo del currículo de las carreras científico-tecnológicas dictadas en las distintas regionales [2].

El entorno en el cual se desarrollan estos laboratorios académicos, de servicios especiales y transferencia, trasciende a las universidades ya que las claves de su éxito y continuo mejoramiento están relacionadas con el aprovechamiento de las herramientas y del conocimiento que les proporciona la comunidad de su referencia. Así, los laboratorios incluyen estudiantes, docentes e investigadores, dando cuenta de la real necesidad de actualizar los conocimientos y aplicarlos en sus investigaciones. Así mismo, esas investigaciones se plasman en ensayos y experimentos donde sus resultados pueden ser de utilidad para las empresas. El laboratorio académico sirve de nexo entre el estudiante que brinda sus conocimientos, quien a su vez aprende acerca de las necesidades que existen en las empresas.

Considerando las relaciones antes mencionadas, se puede presentar al laboratorio académico, como un espacio multidisciplinar y multi trabajo que cubre las expectativas de distintos actores en diferentes áreas de acción, como la académica, la investigación, y el vínculo con la empresa u organización [3].

Dentro del Lamyen se desempeñan como operarios, alumnos de la carrera de Ing. Eléctrica que cursan materias como Organización y Administración de Empresas o Proyecto Final. En ambas asignaturas (por sólo mencionar algunas) se trabaja fuertemente en el entrenamiento de competencias sociales, políticas y actitudinales, tan necesarias para la eficiencia y eficacia del ingeniero en el mundo del trabajo.

En el presente trabajo, primeramente, se presentará el LAMyEN, sus áreas de incumbencia y principales actividades para luego dar paso al marco teórico de referencia (gestión del



conocimiento y competencias sociales, políticas y actitudinales). A continuación, se comenta la metodología utilizada y se exhiben los resultados obtenidos mediante encuestas y entrevistas realizadas a alumnos y docentes. Finalmente se presentan las conclusiones que articulan la teoría con la experiencia vivenciada.

## 2. DESARROLLO TEORICO

### 2.1 Presentación del LAMyEN

El laboratorio de ensayos y medidas eléctricas (LAMyEN) presenta un enfoque cuyo objetivo es favorecer las condiciones de seguridad, tanto de aparatos eléctricos de baja tensión (electrodomésticos, equipos electrónicos y sonido, herramientas manual y semi fijas, luminarias y equipos con diodos LEDS, entre otros) como de herramientas de media y alta tensión; contribuyendo al uso sostenible de la energía, centrado en el medioambiente [4].

El LAMyEN tuvo su origen en el año 1999, en respuesta a la emisión de la Resolución 92/98 de la Industria, Comercio y Minería. Ese mismo año obtuvo el reconocimiento de la Dirección Nacional de Comercio Interior. En el año 2003, fue acreditado por el Organismo Argentino de Acreditación, convirtiéndose en el primer laboratorio universitario acreditado para ensayos de seguridad eléctrica. A partir de esto, en el año 2014 y hasta la actualidad, y en conjunto con la creación del Laboratorio de Metrología (actualmente parte del Lamyen), se comenzó el proceso de acreditación, ampliando aún más su alcance y comprendiendo también las áreas de Eficiencia Energética y Compatibilidad Electromagnética. Posteriormente, se integra al LAMyEN, el laboratorio de Alta Tensión generándose una nueva área de trabajo con el objetivo de evaluar e investigar los aspectos ambientales de los sistemas eléctricos de potencia, especialmente campos electromagnéticos de baja/alta frecuencia y ruido audible, y el desarrollo e implementación de metodologías de evaluación de rigidez dieléctrica en herramientas para trabajos en media y alta tensión.

### 2.2 Gestión del Conocimiento

En la literatura estudiada para analizar el estado del arte del concepto “Gestión del Conocimiento” y sus diferentes modelos, se observaron primeramente vinculaciones con la calidad, mejoramiento continuo, posibilidad de compartir saberes y bucles virtuosos de aprendizaje colaborativo.

Los expertos Nonaka y Takeuchi, creador del modelo cognitivo [5], hacen referencia a la gestión del conocimiento vinculada a los procesos de crear, localizar, capturar y compartir conocimientos y experiencias que puedan ser utilizados en la resolución de problemas. Su principal creación se



identifica con el “Modelo de generación del conocimiento (las cuatro fases) de Nonaka y Takeuchi”. El mismo contempla que la generación de conocimiento se basa en el intercambio de información y la constante interacción entre los tipos de conocimiento tácito y explícito.

Se considera importante aclarar que el conocimiento explícito es aquel que puede ser escrito y transferido con relativa facilidad de una persona a otra. Por otro lado, el conocimiento tácito, es más difícil de articular porque a menudo surge a partir de la experiencia.

De acuerdo a lo descrito por Nonaka, existen cuatro modos de conversión del conocimiento tácito a explícito: de conocimiento tácito al conocimiento tácito, del conocimiento explícito al conocimiento explícito, del conocimiento tácito al conocimiento explícito, y del conocimiento explícito al conocimiento tácito.

En el primer caso, existe un modo de conversión del conocimiento que nos permite transformar el conocimiento tácito a través de la interacción entre los individuos. Esto debe ser tenido en consideración para el análisis (conocimiento clave para el laboratorio) ya que el individuo dentro de la organización puede adquirir un conocimiento tácito sin lenguaje; un ejemplo que se aplica es el de los alumnos que trabajan con sus docentes mentores, y aprenden a realizar ensayos de materiales eléctricos no a través del lenguaje, sino por la observación, la imitación y la práctica. Del ejemplo anterior se puede vislumbrar que la clave para la adquisición de conocimiento tácito es la experiencia. Si no existe la experiencia compartida, es extremadamente difícil que el conocimiento tácito se traslade de una persona a otra. Este proceso de creación de conocimiento tácito a través de compartir experiencias se lo conoce como socialización.

El segundo modo de conocimiento, la conversión, implica la utilización de procesos sociales para combinar distintos análisis de conocimiento explícito celebrada por los individuos. Las personas buscan intercambiar y combinar conocimiento a través de los mecanismos como reuniones y conversaciones telefónicas o de WhatsApp. La reconfiguración de la información existente a través de la clasificación, adición, re contextualización, y re categorización de conocimiento explícito puede conducir hacia nuevos conocimientos. Los modernos sistemas informáticos proporcionan un ejemplo claro de lo que se busca en este proceso de crear conocimiento explícito del conocimiento y este se transforma en combinación. El tercero y cuarto modo de conversión de conocimiento refieren a patrones de conversión que involucra tanto el conocimiento tácito y explícito. Estos modos de conversión buscan captar la idea de que el conocimiento tácito y explícito se complementan y pueden expandirse a lo largo del tiempo a través de un proceso de interacción mutua. Esta interacción involucra dos operaciones diferentes. Una de ellos es la conversión del conocimiento tácito en conocimiento explícito, denominada externalización, y la otra es la conversión de conocimiento explícito en conocimiento tácito, que tiene cierta similitud con el concepto tradicional de aprendizaje, y se lo conoce como internalización.



Considerando el acotado espacio disponible para el desarrollo de teorías, a continuación, se mencionan otros modelos de gestión del conocimiento y sus autores como representantes [6]: Modelo de gestión el conocimiento de KPMG CONSULTING. Desarrollado por Tejedor y Aguirre; Modelo Andersen. Desarrollado por Arthur Andersen; Modelo de Evaluación y Diagnostico de la Gestión del Conocimiento KMAT; Modelo holístico. Desarrollado por Angulo, E. y Negrón, M.

### 2.3 Competencias Sociales, políticas y actitudinales

A fin de desarrollar y profundizar el estudio acerca del concepto de competencia, en primera instancia, resulta conveniente comenzar recordando la mirada de expertos en el tema, tales como Perrenoud y Le Boterf, Spencer y Lévy-Leboyer entre otros. Cronológicamente, con respecto al concepto de competencia, Spencer & Spencer [7] expresan que es una característica subyacente en un individuo que está causalmente relacionada a un estándar de efectividad y/o a una performance superior en un trabajo o situación.

Del párrafo precedente, se distinguen 3 grandes características que describen a las competencias como “subyacentes” (parte profunda de la personalidad); “causalmente relacionadas” (anticipa el comportamiento); y “relacionada con el estándar de efectividad” (predice Cómo se realizará la conducta). Por su parte, Lévy-Leboyer [8], menciona que existe, “una diferencia clara entre aptitudes y rasgos de personalidad por una parte y competencias por otra. Los primeros permiten caracterizar a los individuos y explicar la variación de sus comportamientos; las segundas afectan a la puesta en práctica integrada de aptitudes, rasgos de personalidad y también conocimientos adquiridos”. Desde una perspectiva constructivista, Ansorena Cao [9], plantea que la competencia es una habilidad o atributo personal de la conducta de un sujeto, que puede definirse como característica de su comportamiento, y, bajo la cual, el comportamiento orientado a la tarea puede clasificarse de forma lógica y fiable.

Finalmente, desde el CONFEDI, se concibe como competencia a la “capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas y valores, permitiendo movilizar distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales” [10]. Esta definición permite comprender que las competencias aluden a capacidades complejas e integradas; están relacionadas con saberes; se vinculan con el saber hacer; están referidas al contexto profesional; y permiten incorporar la ética y los valores”.

Para el presente trabajo se tomarán en consideración las competencias genéricas, específicamente las subclasificadas como sociales, políticas y actitudinales: desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo; comunicarse con efectividad; actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global; aprender en forma continua y autónoma; y actuar con espíritu emprendedor [11].



La formación basada en competencias requiere asumir una nueva forma de enseñar, con propuestas que trascienden la parcelación y la fragmentación, con el fin de abordar la realidad en su multidimensionalidad; “la inteligencia parcelada, compartimentada, mecanicista, disyuntiva, reduccionista rompe lo complejo del mundo en fragmentos separados, fracciona los problemas, separa lo que está unido, unidimensionaliza lo multidimensional. [12] Por esta razón, en el modelo de educación por competencias, se requieren procesos complejos de desempeño con idoneidad en determinados contextos, integrando diferentes saberes (saber ser, saber hacer, saber conocer y saber convivir), para realizar actividades y/o resolver problemas con sentido de reto, motivación, flexibilidad, creatividad, comprensión y emprendimiento, dentro de una perspectiva de procesamiento metacognitivo, mejoramiento continuo y compromiso ético, con la meta de contribuir al desarrollo personal, la construcción y afianzamiento del tejido social, la búsqueda continua del desarrollo económico-empresarial sostenible, y el cuidado y protección del ambiente y de las especies vivas [13].

A fin de concentrar la información, este trabajo se focalizará en el estudio de las competencias vinculadas a trabajo en equipo, comunicación eficaz y aprendizaje continuo y autónomo.

### 3. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos de este trabajo, se utilizó el instrumento de encuesta semi-estructurada creada en la plataforma de google, procediendo luego al análisis de la información recabada. Haber elegido en el presente estudio a la encuesta como instrumento de recolección de información, obedece a las razones ya esgrimidas por Buendía Eisman [15], de que la misma es capaz de dar respuesta a problemas en términos descriptivos tras la recogida de información sistemática. La encuesta incluye 40 preguntas: cerradas y abiertas con limitaciones de tipo espacial no conceptual. Las preguntas cerradas contienen alternativas de respuesta. Se han incluido preguntas abiertas a la encuesta ya que son útiles sirven en situaciones donde se desea profundizar una opinión o los motivos de un comportamiento [16]. Para la elaboración del cuestionario, durante la fase previa se aplicaron 5 encuestas (a estudiantes - becarios del LAMyEN), con el fin de validar el instrumento, el tiempo de duración que demandaría responder la encuesta y la claridad o no de las preguntas. Como las encuestas fueron autoadministradas, se tomaron los debidos cuidados con las instrucciones para su realización: se agradeció a los respondientes, se garantizó su confidencialidad y se señaló la relevancia de su participación y respuestas [15]. La selección de los participantes está compuesta por alumnos de la carrera de Ingeniería eléctrica que, a la vez, son becarios del LAMyEN. En concreto se realizaron 30 encuestas a alumnos becarios, las cuales fueron respondidas completamente. La edad promedio de esta población estudiada ronda los 20-30 años y todos son estudiantes de Ing.



Eléctrica. 28 son varones y 2 mujeres. Se considera que la encuesta ha resultado un instrumento beneficioso ya que hemos logrado recabar la información pretendida.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para alcanzar los resultados que se presentan a continuación, se aplicó la encuesta con el objetivo de conocer de qué manera los estudiantes logran transferir las competencias sociales, políticas y actitudinales aprendidas en el aula a sus trabajos cotidianos en el laboratorio y, en forma inversa, cómo los aprendizajes en acción realizados en el Lamyen, fortalecen e integran las enseñanzas del aula. Del total de los becarios, 30 respondieron a la encuesta. Comenzando con la primera competencia a analizar: Comunicación eficaz, el 93,3% refiere que la principal forma de comunicación en el Lamyen es verbal, y un 90% considera como principal medio de comunicación la mensajería instantánea a través de WhatsApp como se muestra en la Figura 1.

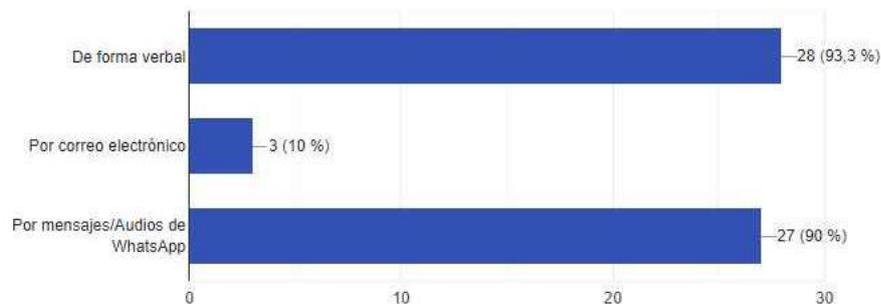


Figura 1: En el trabajo, ¿qué medios utiliza para comunicarse?

Lo anteriormente expuesto, permite entrever que los estudiantes deben ser capaces de usar eficazmente las herramientas tecnológicas apropiadas para la comunicación y esforzarse por ser claros en la redacción de sus opiniones (tal cual explica Nonaka en su modo de conversión). Asimismo, se considera los becarios utilizan los canales informales de la organización a la hora de comunicarse. La dirección de la comunicación tiende a ser vertical (hacia arriba y hacia abajo de la estructura jerárquica), y lateral (entre miembros de un mismo equipo de trabajo). La comunicación vertical hacia arriba, se evaluó a partir de indagar en qué medida los operarios consideran que pueden compartir sus opiniones y comentarios con sus superiores. En relación con ello, se evidencia que el 60% realizan feedback a sus superiores acerca de su trabajo.



Figura 2: ¿Comparte sus opiniones y comentarios con sus superiores?



De igual manera, la mayoría (representada en un 73,3%) considera que los superiores lo alientan para opinar y aportar ideas.



Figura 3: ¿Su jefe lo alienta a aportar ideas para mejorar el trabajo?

En la figura 4, se observa que el 70% de estudiantes refirió supervisión frecuente de parte de sus superiores, mediante acompañamiento y asesoramiento en las tareas diarias; y un 50% considera recibir “con frecuencia” reconocimiento de su jefe inmediato por su buen desempeño.

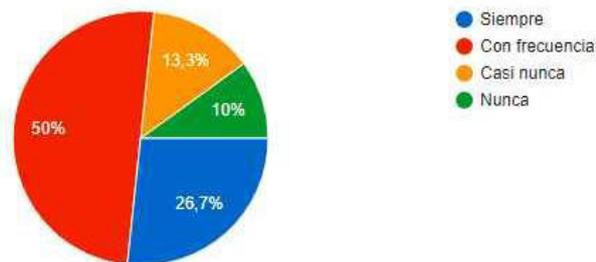


Figura 4: ¿Recibe reconocimiento de su jefe inmediato por un buen trabajo realizado/por su buen desempeño?

Lo anteriormente expuesto, repercute positivamente en los estudiantes, favoreciendo su seguridad y autoconfianza a la hora de realizar el trabajo.

Al momento de ingresar como becarios al laboratorio y a medida que se desempeñan en sus puestos de trabajo, los estudiantes deben instruirse y ponerse en conocimiento de los manuales y normas que rigen el trabajo y orientan el funcionamiento de los equipos. La mayoría (53,3%) considera que las normas y procedimientos específicos facilitan el trabajo diario.

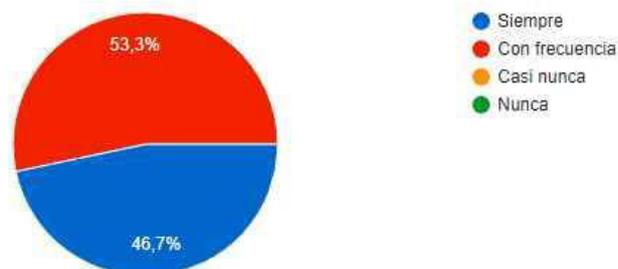


Figura 5: Las normas y procedimientos específicos, ¿facilitan su trabajo diario?

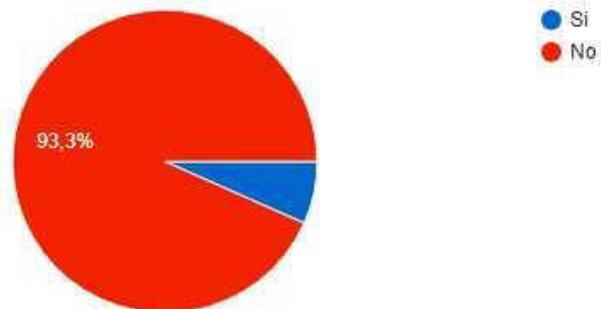


Figura 6: ¿Existe compañerismo entre becarios?

De igual manera, se solicitó a los estudiantes un ejemplo en el cual puedan evidenciar colaboración entre compañeros de trabajo. Los comentarios se asociaron a: “posibilidad de consultar a compañeros con mayor antigüedad y más experiencia, cuando se presentan dudas respecto a alguna norma, al procedimiento para realizar un ensayo o llevar a cabo una tarea”; “disponibilidad para la ayuda mutua en cualquier circunstancia que se presente y posibilidad de compartir conocimientos”; “compañerismo durante los viajes”; “coordinación en la distribución del tiempo y para cubrir horarios. Particularmente en fechas de exámenes”; “al momento de realizar ensayos a gran escala, se pone en evidencia el trabajo colaborativo en equipo”. Lo anteriormente expuesto refleja que los estudiantes logran en el laboratorio poner en práctica la capacidad para interactuar en grupos heterogéneos, apreciando y respetando la diversidad de valores, creencias y culturas de todos sus integrantes. Dentro de cada equipo de trabajo, la distribución de tareas evidencia ser clara, y los roles de cada miembro se encuentran bien definidos; esto refleja la capacidad para asumir responsabilidades y roles dentro del equipo de trabajo, aspecto importante para desempeñarse de forma efectiva dentro de un equipo de trabajo. Por un lado, el 70% de los estudiantes expresaron que los trabajadores que realizan las mismas tareas, se encuentran en un mismo nivel jerárquico.

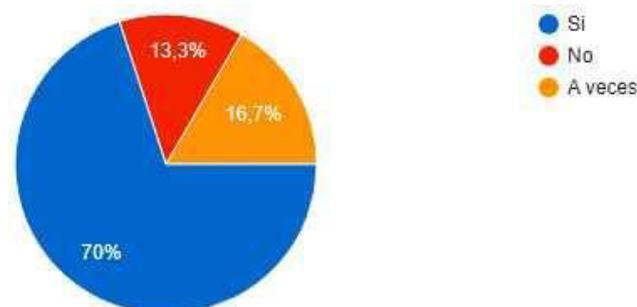


Figura 7: ¿Considera que los jefes influyen en tu motivación para trabajar en forma proactiva? Durante el trabajo en el Lamyen, los estudiantes han podido comprobar la importancia de desarrollar la competencia para aprender en forma continua y autónoma. La necesidad del aprendizaje continuo, la vieron reflejada en los desafíos diarios que encontraban en los ensayos

y tareas que debían resolver; lo que implicaba revisar las normas, los manuales de procedimiento y/o consultar a compañeros más experimentados o a los jefes.



Figura 8: ¿Recomendaría a un amigo o compañero de estudio que trabaje en el Lamyen?

Los motivos expresados fueron los siguientes: la oportunidad para aprender cuestiones relacionadas con la profesión, que a su vez aportan crecimiento personal; la posibilidad de desarrollar experiencia y adquirir nuevos aprendizajes; el aprendizaje que brinda no sólo desde lo técnico, sino también en lo que respecta a habilidades para relacionarse e interactuar con compañeros y superiores; porque se generan conocimientos y experiencias prácticas que ayudan a complementar la formación académica y a prepararse para la resolución de problemas; Porque es un ambiente que brinda apoyo a la formación profesional, con una amplia gama de tareas a resolver y con personas predispuesta a ayudar para resolver los inconvenientes que surjan.

## 5. CONCLUSIONES

Para finalizar este trabajo consideramos que los objetivos propuestos han sido satisfechos al lograr compartir las vivencias de los becarios estudiantes con respecto a sus procesos de aprendizaje de competencias sociales, políticas y actitudinales realizados en el laboratorio y la posible transferencia a otros espacios académicos y/o laborales. Se considera que el aprendizaje en acción (como instancia de gestión del conocimiento) logra asentar los conocimientos aprendidos en las diferentes asignaturas de la carrera de Ing. Eléctrica permitiendo también hacer transferencia a otros problemas tecnológicos que deban enfrentarse como estudiantes avanzados y, luego, futuros graduados. Tal como se evidencia en el análisis de resultados antes presentado, los becarios alumnos, en su mayoría, logran comunicarse con efectividad, siendo conscientes de la importancia de la comunicación clara, oportuna y precisa para transmitir órdenes, consignas de trabajo u opiniones. Los resultados de la encuesta permiten inferir que los estudiantes logran poner en práctica, en el contexto laboral del laboratorio, la sub-capacidad para seleccionar las estrategias de comunicación en función de los objetivos y de los interlocutores, y acordar significados en el contexto de intercambio.



La competencia de trabajo en equipo, se desarrolla y ejercita en el laboratorio, ya que se evidencia que la mayoría de los estudiantes logra participar activamente de los equipos de trabajo distribuyendo las tareas en forma clara y equitativa y con roles de cada miembro perfectamente definidos. Finalmente, con respecto a la última competencia estudiada: “aprendizaje autónomo y continuo”, a partir de la encuesta se observa que los becarios del LAMyEN reconocen su importancia y la ejercitan diariamente. Los estudiantes deben superar desafíos cotidianos realizando ensayos, revisando y/o interpretando normas, y/o consultando a compañeros más experimentados. Asimismo, el LAMyEN brinda capacitaciones constantes a sus becarios en diferentes instancias: inducción al laboratorio; capacitaciones sobre calidad, higiene y seguridad; uso del sistema informático; capacitación en viajes; RCP; capacitaciones para cada ensayo; entre otras. Considerando los resultados obtenidos, se considera que las competencias sociales estudiadas son aprendidas en el marco académico y logran ser transferidas y consolidadas en la práctica laboral diaria. Así mismo y gracias a la cultura colaborativa del LAMyEN, estas competencias se nutren de aprendizajes informales para ser potenciadas y desarrolladas generando así un bucle virtuoso de conocimiento en acción. La gestión del conocimiento, justamente, busca que el compartir información valiosa permita generar aprendizajes cada vez más ricos y posibles de transferir a otros espacios tanto académicos como laborales. Para concluir este trabajo se considera interesante y oportuno el estudio realizado. Primeramente, porque se ha logrado conocer la opinión de los alumnos becarios respecto a trabajar en un laboratorio académico perteneciente a la Facultad Regional Santa Fe y, en segundo lugar, porque se logra confirmar las hipótesis respecto a la importancia de formar al alumnado en competencias, no sólo técnicas sino también sociales, políticas y actitudinales. Los becarios alumnos logran comunicarse con efectividad, comprendiendo las diferencias comunicacionales y considerando la importancia de una comunicación clara, oportuna y precisa. La mayoría de los estudiantes logra participar activamente de los equipos de trabajo distribuyendo las tareas en forma clara y equitativa y con roles de cada miembro perfectamente definidos. El aprendizaje en acción asienta los conocimientos aprendidos en las diferentes asignaturas de la carrera.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Tünnermann Bernheim, C. (2011). La educación superior frente a los desafíos contemporáneos. *Lección Inaugural del Año Académico 2011*. Universidad Centroamericana Managua, Nicaragua.
- [2] Martínez de Ita, M. y otros (2013). *El papel de la universidad en el desarrollo. Telescopio newtoniano del observatorio de la BUAP*. Primera Edición: 2013 ISBN:978-607-487-631-4. México.



- [3] Casas, R. y otro (2019). *Ciencia, Tecnología y Sociedad en América Latina. La Mirada de las nuevas generaciones*. 1a Ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Asociación Latinoamericana de Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnologías-ESOCITE. Libro digital, PDF.
- [4] Extraído de página web: <https://www.frfsf.utn.edu.ar/investigacion-yvinculacion/investigacion-y-vinculacion/laboratorios/lamyen/lamyen-servicios-ensayos.08/06/2023>.
- [5] Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. New York, NY: Oxford University Press.
- [6] Acevedo, Y. (2020) *Formulación de modelos de gestión del conocimiento aplicados al contexto de instituciones de educación superior*. Coordinación General de Investigaciones, Fundación Universitaria Católica del Norte. Colombia.
- [7] Spencer, L. M., & Lévy-Leboyer, C. (2001). *Competence at Work: Models for Superior Performance*. New York, NY: Wiley.
- [8] Lévy-Leboyer, C. (2003). *Gestión de las Competencias*. Barcelona: Gestión 2000, S.A.
- [9] Ansorena Cao. Citado por Castriota, F. (2010). *Factores psicológicos que inciden en la actividad empresarial*. Tesis de Doctorado. Universidad del Salvador. Buenos Aires.
- [10] CONFEDI. (2018). *Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la República Argentina: "Libro Rojo de CONFEDI"* (R. Giordano Lerena & S. Cirimelo, Eds.). Universidad FASTA Ediciones.
- [11] CONFEDI *Propuesta de Estándares de Segunda Generación para la Acreditación de carreras de Ingeniería en la República Argentina*. Libro Rojo De Confedi. Universidad FASTA Ediciones. 2014.
- [12] Morcela, O. (2018). *La gestión de la tecnología como competencia de egreso en estudiantes de grado y posgrado*. IV Encuentro Nacional de Gestores Tecnológicos.
- [13] Morin, E. (2000). *El paradigma perdido*. Ensayo de bioantropología (6ª ed.) Barcelona: Kairós.
- [14] Tobón, S. (2008). *Gestión curricular y ciclos propedéuticos*. Bogotá: ECOE.
- [15] Buendía Eisman, L y otros (1998). *Métodos de investigación en psicopedagogía*. McGrawHill. [16] Hernández Sampieri y otros, (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill España.



## COEVALUACIÓN: UNA EXPERIENCIA EN ANÁLISIS NUMÉRICO

**Marta Caligaris, Georgina Rodríguez, Lorena Laugero y Gabriel Bertero**

Grupo Ingeniería & Educación – UTN – Facultad Regional San Nicolás  
Colón 332 (2900) San Nicolás, Argentina  
[mcaligaris@frsn.utn.edu.ar](mailto:mcaligaris@frsn.utn.edu.ar)

### RESUMEN

El proceso de evaluación en la educación superior ha cambiado en los últimos años, tendiendo a un enfoque centrado en el estudiante. La evaluación se entiende como uno o más procesos formativos que sirven para identificar, recolectar y procesar datos que permitan determinar el logro de los resultados de aprendizaje.

No hay dudas de que la evaluación es un proceso de suma importancia en cualquier sistema formativo, que cumple un rol fundamental para la determinación del cumplimiento de los objetivos de aprendizaje y en el seguimiento del progreso de los alumnos. En la actualidad, ha ido modificando su enfoque tradicional donde toda la responsabilidad recaía sobre la figura del docente, a uno mucho más abierto y flexible.

Para que la evaluación sea un proceso de mejora continua de los aprendizajes de los estudiantes, es deseable que existan, además de la evaluación por parte del docente (heteroevaluación), una evaluación de los estudiantes sobre su propio proceso de aprendizaje (autoevaluación) y otra de pares, hecha por sus compañeros de grupo, siguiendo pautas establecidas por el docente (coevaluación).

En este trabajo se muestra la experiencia de coevaluación que se desarrolló en el curso de Análisis Numérico, en el tercer nivel de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás, de la Universidad Tecnológica Nacional.

**Palabras Clave:** *Autoevaluación, Coevaluación, Análisis Numérico*



## 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación se entiende como uno o más procesos formativos que sirven para identificar, recolectar y procesar datos que permitan determinar el logro de los resultados de aprendizaje [1]. En la actualidad, la evaluación ha ido modificando su enfoque tradicional donde toda la responsabilidad recaía sobre la figura del docente, a uno mucho más abierto y flexible.

Evaluar debe servir para tomar decisiones de modo de mejorar la práctica educativa. Para que la evaluación sea un proceso de mejora continua de los aprendizajes de los estudiantes, es deseable que existan, además de la evaluación por parte del docente (heteroevaluación), una evaluación de los estudiantes sobre su propio proceso de aprendizaje (autoevaluación) y otra de pares, hecha por sus compañeros de grupo, siguiendo pautas establecidas por el docente (coevaluación). La capacidad de valorar el trabajo de otros ayuda a mantener una actitud y valoración críticas sobre el propio.

La autoevaluación y la coevaluación se consideran métodos efectivos para desarrollar el aprendizaje autorregulado, ya que requieren que los estudiantes asuman un papel activo y reflexivo, comprendan y apliquen los criterios de evaluación, busquen y utilicen la retroalimentación y evalúen su propio trabajo o el de otros [2].

La evaluación es una habilidad que se puede mejorar con el entrenamiento. Es posible que los alumnos necesiten apoyo u orientaciones en algún momento del proceso de su propia evaluación o la de sus compañeros. Desarrollar en los estudiantes la habilidad de evaluar es un elemento importante en el proceso de aprendizaje [3]. La coevaluación es una herramienta valiosa para entrenar la capacidad de proporcionar comentarios y sugerencias valiosos para mejorar el desempeño de otra persona o grupo [4]. Sin embargo, algunos autores concluyeron en sus investigaciones que la mayoría de los estudiantes piensa que estos procesos de evaluación son desafiantes, que les consumen mucho tiempo y que, en algunos casos, no los coloca en una posición cómoda, aunque son significativos para mejorar la calidad de los resultados del aprendizaje y desarrollar otras habilidades y destrezas [5].

Este trabajo tiene como objetivo mostrar la experiencia de coevaluación que se desarrolló en el curso de Análisis Numérico, en el tercer nivel de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás, de la Universidad Tecnológica Nacional durante el aprendizaje de los métodos que permiten resolver ecuaciones no lineales y sistemas de ecuaciones lineales.

### 1.1. Coevaluación

La coevaluación o evaluación entre pares puede entenderse como una forma específica de aprendizaje colaborativo en el que los estudiantes realizan una valoración sobre el proceso o producto de aprendizaje de todos o de algún estudiante o grupo de estudiantes. Este tipo de



evaluación es considerada una de las formas más efectivas para promover la colaboración y cooperación entre los estudiantes porque incrementa su intencionalidad formativa y fomenta el diálogo, la interacción enriquecedora y la creación de significados comunes con los otros compañeros e incluso con los docentes. La evaluación entre iguales es un buen procedimiento para contrastar los resultados de la autoevaluación y contribuir a que los juicios de los estudiantes sobre su propio aprendizaje sean cada vez más ajustados, lo cual ayuda a desarrollar la capacidad de autoevaluación y de aprendizaje autónomo a lo largo de la vida. [6].

Las diversas formas de coevaluación van desde simplemente asignar una calificación al trabajo de los compañeros, hasta procesos mediante los cuales los estudiantes evalúan a sus compañeros y ofrecen comentarios o son evaluados por compañeros y reciben comentarios [2].

Con respecto a la validez y fiabilidad de la coevaluación, es posible distinguir dos posibles problemas: los estudiantes pueden puntuar mejor a los amigos que a los demás o pueden no utilizar todo el rango de la escala disponible, concentrando sus puntuaciones en el tramo medio [3].

Distintos investigadores encontraron que las calificaciones de docentes y compañeros concuerdan entre sí en un nivel mayor cuando la evaluación por pares es en papel, no se realiza en forma anónima y los pares evaluadores hacen comentarios, además de proporcionarles un puntaje, entre otras consideraciones [7].

Como se muestra en la Figura 1, la evaluación entre iguales puede dividirse en tres categorías básicas: evaluación individual, evaluación intragrupo y evaluación intergrupo [4, 6].

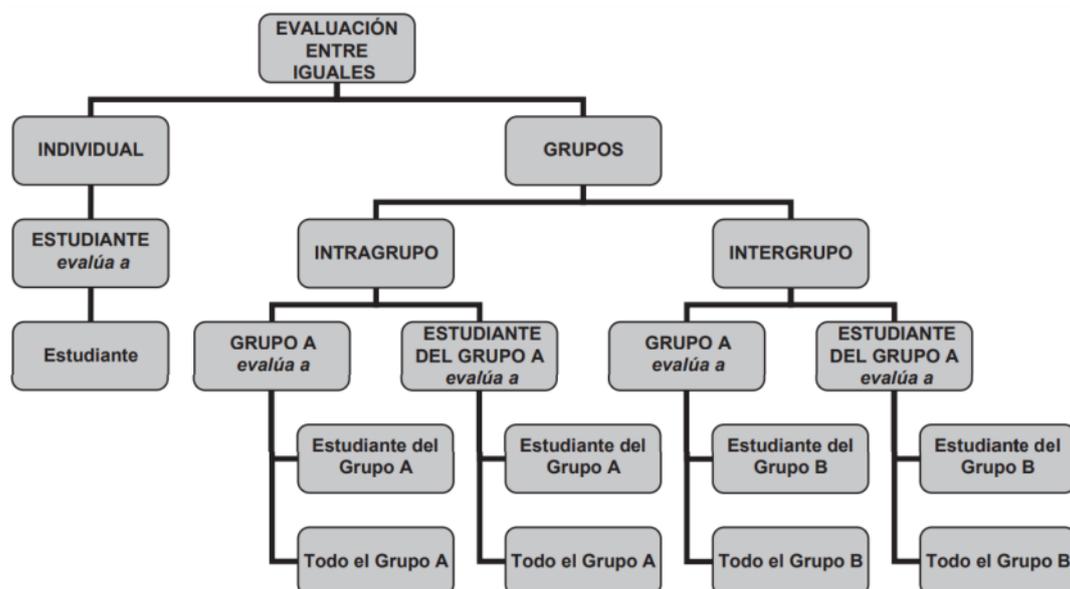


Figura 1: Tipos de coevaluación [6]



## 2. LA EXPERIENCIA EN ANALISIS NUMERICO

La experiencia de coevaluación que se describe se llevó a cabo en la cátedra de Análisis Numérico, asignatura del tercer nivel de la especialidad de Ingeniería Mecánica, durante el aprendizaje de los métodos que permiten resolver ecuaciones no lineales y sistemas de ecuaciones lineales.

### 2.1. Experiencia previa

En el ciclo lectivo 2022, se evaluaron algunas herramientas disponibles para realizar experiencias de coevaluación. Como el aula virtual de la materia se encuentra en la plataforma Moodle (Modular Object Oriented Dynamic Learning Environment), se decidió optar por la herramienta “Taller” diseñada especialmente para este tipo de tareas.

En una primera experiencia, se plantearon tres problemas de diferente complejidad para que los alumnos pudieran resolverlos en cuarenta minutos y subieran su resolución a la tarea del aula virtual. Una vez finalizada esta primera etapa, se asignó a cada uno de ellos, el trabajo práctico de un compañero para que pudiera evaluar la resolución de los problemas de acuerdo a una rúbrica diseñada por los docentes.

Luego de la actividad, se revisó minuciosamente la calificación que cada estudiante le había asignado al trabajo realizado por su compañero. De esta forma, con mayor o menor rigurosidad, los alumnos cumplieron con su rol de coevaluador.

Diversos investigadores sostienen que aumentar el número de evaluadores puede mejorar, en gran medida, la confiabilidad. Otros, centrándose en la perspectiva de la carga de trabajo de los estudiantes, han propuesto que la cantidad de pares evaluadores no debería ser demasiado alta [8]. Así, cada estudiante podría evaluar no más que a otros cinco. Un estudio mostró que tener más de seis pares evaluadores no mejora la validez de las evaluaciones [7]. Por esta razón, en la experiencia 2023, se tomó la decisión de aumentar la cantidad de pares evaluadores para revisar las distintas actividades.

### 2.2. Experiencia en la primera unidad del curso

En la primera unidad del curso, se estudian distintos métodos de aproximación de la solución de ecuaciones no lineales. Como actividad de cierre, organizados en grupos, los alumnos tuvieron que resolver una situación problemática donde debían poner en juego los conocimientos adquiridos en esa unidad y escribir un informe detallando las distintas etapas del proceso de resolución del problema propuesto.

Una vez finalizado el tiempo de entrega, se les propuso a los estudiantes la realización de una evaluación intergrupo: el informe de un grupo fue evaluado por integrantes de otros grupos, en



forma individual. Para facilitar dicha tarea, los alumnos dispusieron de la rúbrica que utilizarían los docentes para evaluar. No obstante, tenían la libertad de utilizar ese instrumento o proponer otro, justificando los criterios seleccionados.

Cabe destacar que, los docentes a cargo de la cátedra también evaluaron los informes realizados por cada uno de los grupos.

### 2.3. Experiencia en la segunda unidad del curso

En la segunda unidad del curso, se estudian distintos métodos de resolución de sistemas de ecuaciones lineales. En esta unidad, los alumnos realizaron una evaluación individual, dentro del aula virtual, con el recurso Taller. El trabajo de un taller está formado por 5 fases.

- **Fase de configuración.** Aquí, los estudiantes no hacen nada. El profesor utiliza esta fase para realizar ajustes y modificar la estrategia de calificación de los formularios.
- **Fase de envío.** En esta fase los estudiantes realizan sus envíos. El envío empieza y finaliza en la fecha (día y hora) que se haya especificado.
- **Fase de evaluación.** Si el taller utiliza la característica de evaluación por pares, esta es la fase en la que los participantes del taller evalúan los envíos que se les ha asignado.
- **Fase de evaluación de calificaciones.** La mayor tarea durante esta etapa es calcular las calificaciones finales de los envíos y de las evaluaciones realizadas por los alumnos y proporcionar una retroalimentación. Los profesores pueden sobrescribir manualmente las calificaciones calculadas.
- **Fase de cierre.** En la fase de finalización, las calificaciones finales calculadas en la fase anterior se introducen en el libro de calificaciones del curso. Los participantes pueden ver sus envíos y las evaluaciones que han realizado de otros envíos.

En esta experiencia, los estudiantes realizaron diferentes intervenciones en el taller propuesto: el envío y la evaluación. Para ello, se plantearon preguntas conceptuales, de diferente complejidad, para que los alumnos pudieran responder en un tiempo de 45 minutos y subieran sus respuestas a la tarea asignada en la plataforma virtual. Luego, cada tarea fue enviada a otros dos estudiantes para su evaluación.

### 2.4. Resultados

#### 2.4.1 Solución de ecuaciones no lineales

Los integrantes de cada grupo revisaron la actividad realizada por distintos grupos. Así, por ejemplo, los integrantes del grupo 3 analizaron las entregas de los grupos 1, 2, 5 y 6.



Como se mencionó anteriormente, los docentes de la cátedra también evaluaron los informes y, luego, compararon sus resultados con los presentados por los alumnos en la coevaluación. Se observó que los estudiantes realizaron comentarios atinados y que, en general, la evaluación realizada por ellos, coincidía con la efectuada por los docentes.

Con el objetivo de conocer la opinión de los alumnos acerca de la realización de actividades como la propuesta, se realizó una encuesta. La primera parte estaba constituida por enunciados, que fueron analizadas con una escala tipo Likert con los siguientes valores numéricos: 5, totalmente de acuerdo; 4, de acuerdo; 3, ni de acuerdo ni en desacuerdo; 2, en desacuerdo; 1, totalmente en desacuerdo. En la Tabla 1, se presenta la moda de cada uno de los enunciados de la encuesta realizada al finalizar la actividad de coevaluación de la unidad 1.

Tabla 1. Encuesta acerca de la coevaluación en “Ecuaciones no lineales”

Enunciado	Moda
Creo que tengo las habilidades necesarias para participar en un proceso de coevaluación	4
La coevaluación significa mucha responsabilidad para mí	3
La coevaluación me obligó a buscar más información sobre la actividad	2
La coevaluación me permitió detectar mis propios errores y aprender de ellos	4
La coevaluación me permitió ver el aprendizaje de manera crítica y constructiva	4

Como se puede observar, en general, los estudiantes consideran que tienen las habilidades necesarias para realizar una evaluación de las actividades realizadas por sus compañeros y que, esta evaluación, les permitió detectar sus propios errores y ver el aprendizaje de manera crítica y constructiva.

Se destaca el bajo valor obtenido al consultarles si se sintieron obligados a buscar más información. Es probable que la información la tuvieran porque ya habían realizado la actividad con su propio grupo.

En la segunda parte de la encuesta, se pidió a los alumnos que escribieran alguna reflexión o sugerencia sobre la realización de la actividad de coevaluación. Estas son algunas de las respuestas obtenidas:

*“El tener que corregirlo me parece bien, de tal forma que podemos ver donde un compañero hizo un mejor o peor trabajo. Pero siento que no tengo la facilidad de dar una buena retroalimentación de las correcciones realizadas”.*



*“Fue una buena experiencia debido a que pude ver como desarrollo otro grupo el problema asignado y así ver que le podría mejorar a un futuro trabajo práctico propio”.*

*“En mi caso la coevaluación me sirvió para afianzar un poco más los conceptos del tema anterior. Conceptos que con el trabajo práctico no habían quedado bien del todo”.*

*“No tengo ninguna sugerencia, fue una experiencia agradable”.*

#### **2.4.2 Resolución de sistemas de ecuaciones lineales**

Luego de subir sus respuestas a la plataforma Moodle, a cada estudiante se le asignó la tarea enviada por dos de sus compañeros para su evaluación.

Existen cuatro opciones de calificación posibles:

- **Calificación acumulativa:** se realizan comentarios y calificaciones sobre los aspectos especificados.
- **Comentarios:** se hacen comentarios sobre aspectos específicos, pero no se otorga calificación.
- **Número de errores:** se realizan comentarios y una calificación tipo si/no sobre las afirmaciones realizadas.
- **Rúbrica:** se realiza una evaluación de nivel respecto a los criterios especificados.

Para llevar adelante esta segunda experiencia, se eligió la opción “Comentarios”. Así, los alumnos no asignaban nota a sus compañeros.

El Taller de la plataforma Moodle, permite examinar las distintas etapas del proceso durante la realización del trabajo práctico, como se observa en la Figura 2. Por ejemplo, durante la “fase de evaluación”, se pueden ir revisando los resultados de las correcciones de los alumnos, con el objeto de detectar el mejor momento para finalizar la actividad. Los nombres de los estudiantes que aparecen en rojo, corresponden a los que aún no han terminado de evaluar. Cabe aclarar que, en esta figura se han eliminado los nombres de los alumnos para preservar sus identidades.

Como se observa en la Figura 2, las calificaciones otorgadas y recibidas tienen un valor igual a cero debido a que se eligió la opción “Comentarios”.

Es importante mencionar que, al finalizar la actividad, los docentes discutieron las respuestas en el aula, para que los estudiantes pudieran plantear sus dudas. En este espacio de intercambio que se generó, algunos estudiantes también comentaron que revisar lo que los compañeros habían escrito, les sirvió para chequear si ellos mismos habían contestado bien las distintas situaciones propuestas.

En una etapa posterior, los docentes revisaron los comentarios realizados por los estudiantes y los compararon con las correcciones propias a fin de detectar desviaciones (por exceso o defecto) en las notas otorgadas por los alumnos a sus compañeros. El 42% de los resultados coincidieron y el 49% tuvo leves desviaciones.

Nombre / Apellido(s)	Envío / Último modificado	Calificaciones recibidas	Calificación por el envío (de 0)	Calificaciones otorgadas	Calificación de la evaluación (de 0)
Alumno 2	Resolucion modificado en fecha hora	0 (0) Alumno 4	0	0 (0) Alumno 12	0
		0 (0) Alumno 19		0 (0) Alumno 10	

Figura 2: Trabajo de coevaluación en el aula virtual

### 3. CONCLUSIONES

Evaluar debe servir para tomar decisiones de modo de mejorar la práctica educativa y, esta tarea, puede ser realizada por docentes y estudiantes.

La experiencia llevada a cabo en el curso de Análisis Numérico de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás fue muy fructífera, tanto para los alumnos como para los docentes. Una cuestión para destacar es la responsabilidad con la que los alumnos llevaron adelante la tarea de coevaluar, haciendo interesantes apreciaciones de los trabajos realizados por sus compañeros.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta experiencia y la opinión dada por los estudiantes, se decidió incorporar más actividades de coevaluación durante el ciclo lectivo.



## REFERENCIAS

- [1] CONFEDI Marco conceptual y definición de estándares de acreditación de las carreras de ingeniería. Oro Verde: CONFEDI. 2017.
- [2] Yan, Z., Lao, H., Panadero, E., Fernandez-Castilla, B., Yang, L., Yang, M. *Effects of self-assessment and peer-assessment interventions on academic performance: A meta-analysis*. Educational Research Review, Vol. 37, 100484, 2022.
- [3] Marín-García, J.A. *Los alumnos y los profesores como evaluadores. Aplicación a la calificación de presentaciones orales*. Revista Española de Pedagogía, Vol. 242, pp. 79-98, 2009.
- [4] Prins, F.J., Sluijsmans, M.A., Kirschner, P.A. y Strijbos, J.W. *Formative Peer Assessment in a CSDL Environment: a Case Study*. Assessment & Evaluation in Higher Education, Vol. 30, Núm 4, pp. 417-444, 2005.
- [5] Kılıç, D. *An Examination of Using Self-, Peer-, and Teacher-Assessment in Higher Education: A Case Study in Teacher Education*. Higher Education Studies; Vol. 6, Núm. 1, pp.136-144, 2016.
- [6] Ibarra Sáiz, M.S., Rodríguez Gómez, G., Gómez Ruiz, M.A. *La evaluación entre iguales: beneficios y estrategias para su práctica en la universidad*. Revista de Educación, Vol. 359, pp. 206-231, 2012.
- [7] Li, H., Xiong, Y., Zang, X., Kornhaber, M., Lyu, Y., Chung, K.S., Suen, H. *Peer assessment in the digital age: A meta-analysis comparing peer and teacher ratings*. Assessment & Evaluation in Higher Education, Vol. 41, Núm. 2, pp. 245-264, 2016.
- [8] Tong, Y., Schunn, C.D., Wang, H. *Why increasing the number of raters only helps sometimes: Reliability and validity of peer assessment across tasks of different complexity* Studies in Educational Evaluation, Vol. 76, 101233, pp.1-8, 2023.



## Trabajo de laboratorio para potenciar las competencias en estudiantes de ingeniería mecánica

Olga Scagnetti <sup>1</sup>, Sandra Ramirez <sup>1</sup>, Eva Casco<sup>1</sup>, M. Elvira Rodriguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Materias Básicas – UTN Facultad Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina  
{oscagnetti, scamirez, ecasco, mrodriguez}@frsf.utn.edu.ar.

### RESUMEN

Los procesos de enseñanza y aprendizaje se encuentran en constante cambio, virando firmemente a estimular el aprendizaje centrado en el alumno. Por ello, en general, como docentes en ingeniería pretendemos propiciar y evaluar en el alumno el desarrollo de competencias genéricas tecnológicas, como “identificar, formular y resolver problemas de ingeniería, utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería”, así como competencias sociales, políticas y actitudinales, el desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo y comunicarse con efectividad.

Para esta experiencia, nos proponemos generar un instrumento que permita diagnosticar y evaluar competencias genéricas adquiridas por el alumno en una asignatura del ciclo básico. Para ello se pretende trabajar con un curso de Análisis Matemático II de segundo año de la carrera de Ingeniería Mecánica a partir de la realización de una actividad grupal mediada por el uso de las TICs. La evaluación de esta actividad será realizada mediante la utilización de una rúbrica que permita una valoración objetiva de los alumnos sobre su desempeño frente a la actividad. La metodología presentada revaloriza los procesos de aprendizaje y favorece el desarrollo de competencias.

**Palabras Clave:** Evaluación, Competencias, Rúbrica, TICs.



## 1. INTRODUCCIÓN

La sociedad actual demanda ingenieros que sepan resolver problemas de manera efectiva y, que, además, posean competencias sociales, políticas y actitudinales. Estos cambios provocan que los procesos de enseñanza y de aprendizaje se encuentren en constante cambio, virando firmemente a estimular el aprendizaje centrado en el alumno. Donde el estudiante pasa de ser un receptor pasivo a ser un participante activo de su propio proceso de aprendizaje.

Las nuevas políticas universitarias se orientan a formar profesionales capaces de pensar, trabajar y tomar decisiones en colaboración con otros profesionales. La educación basada en el desarrollo de las competencias es un nuevo enfoque que pone énfasis en aspectos específicos de la docencia, del aprendizaje y de la evaluación.

En resumen, este nuevo enfoque educativo busca fomentar el pensamiento crítico, la resolución de problemas complejos y la capacidad de adaptarse a un entorno en constante evolución. Se promueve el trabajo en equipo, la comunicación efectiva y el desarrollo de aptitudes interpersonales para que los ingenieros puedan colaborar de manera efectiva en proyectos multidisciplinarios.

## 2. MARCO TEÓRICO

Díaz Barriga y Ringo (citado por Irigoyen [1]) destacan que las competencias se vinculan con la adquisición de conocimientos de manera eficiente, los cuales pueden ser demostrados mediante desempeños observables. Afirman que:

Se trata de una capacidad de resolver problemas que se aplica de manera flexible y pertinente, adaptándose al contexto y a las demandas que plantean situaciones diversas. [...] La competencia no se limita a los aspectos procedimentales del conocimiento, a la mera posesión de habilidades y destrezas, sino que se ve acompañada necesariamente de elementos teóricos y actitudinales.

Por otro lado, el CONFEDI [2] define a las competencias como “la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizar (poner a disposición) distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales”.

Dentro de ellas establece las competencias tecnológicas como:



- Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.
- Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería.
- Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería.

También establece las competencias sociales, políticas y actitudinales como:

- Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo.
- Comunicarse con efectividad.
- Aprender en forma continua y autónoma.

Este nuevo enfoque de la educación basada en competencias genera cambios en la evaluación. Se considera a la evaluación de las competencias como “uno o más procesos formativos que sirven para identificar, recolectar y preparar datos que permitan determinar el logro de los resultados del aprendizaje” [3].

Existen diferentes instrumentos para realizar una evaluación auténtica de las competencias. Las rúbricas son las más convenientes por su versatilidad y potencialidad didáctica. Una rúbrica es una herramienta de evaluación donde se explicitan las competencias y niveles de rendimientos que se espera que cumplan los estudiantes. Una rúbrica analítica es una matriz de doble entrada donde en las columnas se ubican los criterios de evaluación y en las filas se ubican los niveles de dominio [4].

Según Barbera [5] algunas ventajas del uso de rúbricas son: fáciles de utilizar y de explicar, obligan al profesor a clarificar sus criterios de evaluación y los niveles de logro que el estudiante debe alcanzar, permiten que el alumno evalúe y haga una revisión final de sus trabajos, antes de entregarlos al profesor, propician el aprendizaje crítico y reflexivo, fomentan el desarrollo de competencias metacognitivas como la autorregulación de su aprendizaje.

Tobón Tobón et al. [6] categorizan cuatro niveles de dominio: nivel inicial-receptivo, donde el estudiante tiene una noción superflua del tema y requiere del apoyo continuo. Nivel básico, el estudiante posee conceptos esenciales de las competencias y es capaz de resolver problemas sencillos. Nivel autónomo, se centra en un aprendizaje formativo, donde el estudiante es criterioso y argumenta los procesos involucrados en la resolución del problema. Y en el nivel estratégico el estudiante analiza sistemáticamente las situaciones, considera el pasado y el futuro, presentando creatividad e innovación.

Se espera que los estudiantes desarrollen un nivel estratégico y un aprendizaje autónomo ya que se favorece a una formación continua y al aprendizaje a lo largo de toda la vida, para mantenerse actualizados en las nuevas tecnologías y prácticas de la ingeniería mecánica.



Las tecnologías de la información y comunicación (TICs) desempeñan un papel importante en el desarrollo de las competencias en los estudiantes. Las competencias en TICs son importantes ya que las tecnologías digitales están cada vez más presentes en los entornos laborales actuales, y en especial en las ingenierías.

Se considera que el acceso a TICs no garantiza por sí la apropiación de un conocimiento. Es la función que el docente le otorgue a las TIC la que determinará su potencialidad de estas herramientas para el desarrollo y apropiación de los conocimientos de los estudiantes.

Coincidiendo con Garza et al. [7], las TICs constituyen un medio de representación y comunicación que integran diversos sistemas, como lenguaje escrito, imágenes audiovisuales, representaciones gráficas, entre otras. Dentro del proceso de enseñanza permiten la creación de nuevas condiciones para la transmisión, el acceso y la elaboración de información.

Se propone el uso de las TICs como herramientas para apoyar:

- La organización de la información.
- La comprensión de relaciones funcionales.
- La interpretación de la información.
- La comunicación entre las personas.

Se consideran a las TICs como herramientas cognitivas, las cuales permiten a los estudiantes representar de diferentes maneras su conocimiento y reflexionar sobre el mismo, realizando una construcción más significativa. En la actividad planteada se espera que, gracias a que los estudiantes realicen un video donde resuelvan y expliquen un problema, se fomente el desarrollo de las competencias tecnológicas y actitudinales, y también se promueva el conocimiento significativo.

Según Stone Wiske [8], las tecnologías digitales y las herramientas informáticas permiten que los alumnos expresen su comprensión en una rica variedad de formas. Estas tecnologías también permiten registrar el trabajo de los alumnos en formatos que pueden corregirse, combinarse y distribuirse más fácilmente.

### 3. LA EXPERIENCIA

En los últimos años, se incorporó el uso de Sistemas Algebraicos de Cómputos (SAC o CAS) al curso de Análisis Matemático II. Esta adopción se debe a la exigencia establecida en la resolución 68/94 del Consejo Superior de la UTN [9]. Antes de la pandemia, los alumnos solían realizar un trabajo basado en la resolución de ejercicios, utilizando un software para su desarrollo. Este trabajo era entregado en formato papel y posteriormente corregido por los docentes. En el



año 2020, a causa de la pandemia producida por el virus COVID19, se debió adaptar las clases y exámenes a la virtualidad, y como consecuencia el trabajo mencionado anteriormente no pudo ser realizado. Retornando a su realización en el año 2021 en forma virtual, dicho trabajo consistía en la exposición, por parte de los alumnos, de un ejercicio práctico. Las consignas fueron ejercicios elegidos de la guía de ejercicios propuestos en el texto de cátedra [9] y que el autor cataloga como “proyectos” o de “tecnología”. Cada grupo debía resolverlos y realizar un documento que se presentaba “públicamente” al inicio de la clase virtual teórica donde en la corrección participaban tanto alumnos como docentes. Los estudiantes valoraron esta experiencia de manera positiva y los docentes consideramos que promueve las competencias básicas en los estudiantes.

Con base en lo mencionado anteriormente y tras realizar los ajustes necesarios, se llevó a cabo este estudio con un grupo de alumnos con el objetivo de sacar conclusiones en vista del nuevo diseño curricular.

La experiencia se llevó a cabo con un grupo de estudiantes de segundo año de la carrera de Ingeniería Mecánica en la asignatura Análisis Matemático II (AM II) de la Facultad Regional Santa Fe (UTN FRSF). El número de estudiantes que realizaron esta experiencia es de 39. Dicha experiencia se realizó a lo largo de todo el año lectivo 2022.

En esta investigación, el uso de las TICs, se utilizó para potenciar el desarrollo de las competencias genéricas tecnológicas y las competencias sociales, políticas y actitudinales de dichos estudiantes. Para ello, se generó una actividad virtual denominada Trabajo de Laboratorio (TL), el cual es requisito su aprobación para obtener la regularidad de la asignatura AM II.

En este caso, el TL es una actividad que se realiza en grupos de dos integrantes donde se les asigna un ejercicio o problema para ser resuelto tanto de forma analítica como gráfica. Para la resolución, los estudiantes deben utilizar un software que les permita entender mejor el problema o simplemente como medio de validación.

El diseño curricular que tradicionalmente se desarrolla en la asignatura AMII está enfocado en la evaluación de los contenidos cognitivos y se considera a la evaluación como parte del proceso de formación del ingeniero. Acompañando esta evaluación tradicional se genera una rúbrica para evaluar el TL. Esta rúbrica es un instrumento que permite diagnosticar y evaluar competencias genéricas tecnológicas, políticas y actitudinales adquiridas por el estudiante de ingeniería mecánica de la asignatura AMII.

Para este trabajo se confecciona una rúbrica, mostrada en Tabla 1, siguiendo los cuatro niveles de dominios propuestos anteriormente en [6].



Los criterios de evaluación de la rúbrica son: resolver identificando nexos con la teoría con creatividad e innovación, utilizar herramientas o software de forma creativa, expresar sus ideas y resolución en forma clara y precisa, y buscar y comparar diferentes bibliografías.

Tabla 1. Rúbrica de evaluación de competencias

Niveles de Dominio	Contenidos	Herramientas	Comunicación	Método
Inicial-receptivo	Tiene nociones del tema. Resuelve parte del problema. <b>5p</b>	No utiliza herramienta o software para la resolución. <b>5p</b>	No se expresa con claridad, no se entiende cuáles son sus ideas para la resolución. <b>5p</b>	Resuelve de manera algorítmica o mecánica el ejercicio. <b>5p</b>
Básico	Resuelve con conceptos esenciales. <b>10p</b>	Utiliza herramientas o software para mostrar la resolución <b>10p</b>	Hace una narrativa de la resolución sin justificar los pasos. <b>10p</b>	Resuelve utilizando analogía de los ejercicios resueltos con anterioridad en clases. <b>10p</b>
Autónomo	Resuelve de manera criteriosa y argumentando el proceso. <b>18p</b>	Utiliza herramientas o software como apoyo para justificar la resolución. <b>18p</b>	Expresa sus ideas y resolución con claridad y argumenta los pasos realizados. <b>18p</b>	Resuelve buscando más bibliografía que apoyan su accionar. <b>18p</b>
Estratégico	Resuelve identificando nexos con la teoría con creatividad e innovación. <b>25p</b>	Utiliza herramientas o software de forma creativa en la resolución <b>25p</b>	Expresa sus ideas y resolución en forma clara y precisa. <b>25p</b>	Resuelve y compara diferentes bibliografías. <b>25p</b>

Los estudiantes se agrupan libremente de a pares y los jefes de trabajos prácticos fueron los encargados de distribuir los problemas. Los ejercicios, relacionados con los temas desarrollados hasta el momento en la asignatura, fueron seleccionados de la bibliografía de cátedra [10] o de exámenes previos.

Cada grupo de alumnos resuelve el TL y prepara una presentación, durante este proceso tiene la posibilidad de realizar consultas al docente. Posteriormente, los alumnos realizan el video. Cada semana dos grupos de alumnos suben sus respectivos videos a una carpeta compartida

en archivos del equipo de Microsoft Teams creada para este fin. La mayoría de los grupos utilizaron el recurso grabar videos en Microsoft PowerPoint para sus presentaciones audiovisuales. Este recurso está disponible en versiones desde 2016 en adelante, y permite grabar la presentación de PowerPoint y capturar la voz, los gestos de entrada de lápiz y la presencia de vídeo por webcam. Otros grupos grabaron desde la plataforma de Microsoft Teams. Ambos recursos heredados de los años de virtualidad.

A manera de ejemplo mostramos las siguientes imágenes de la Figura 1. En ellas se pueden observar alumnos realizando el video de un trabajo donde se integran contenidos de AM II y física.



Figura 1: Imágenes capturadas de video TL.

#### 4. RESULTADOS

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos de la rúbrica de los alumnos evaluados.

Tabla 2. Resultados de la rúbrica evaluada

Niveles de Dominio	Uso de los contenidos	Herramientas	Comunicación	Métodos
Inicial - Receptivo	14,29%	14,29%	0,00%	7,14%
Básico	35,71%	21,43%	28,57%	71,43%
Autónomo	28,57%	14,29%	35,71%	21,43%
Estratégico	21,43%	50,00%	35,71%	0,00%

Puede observarse que el 50% de los alumnos tiene un dominio autónomo o estratégico en uso de los contenidos, pero el nivel de dominio en los métodos fue básico en el 71,43% de la población estudiada y ningún estudiante logró el nivel estratégico. Esto puede estar asociado al hecho de que los alumnos podían consultar sus dudas para la resolución y así resolverlo en forma más tradicional.



Sólo el 14,29% tiene un nivel inicial-receptivo en el uso de herramientas tecnológicas y el 50% logró un nivel estratégico. Promoviendo así el uso de herramientas tecnológicas para la resolución de problemas.

Un poco más del 70% de los alumnos logró un nivel autónomo o estratégico en la comunicación, siendo uno de los objetivos de este trabajo.

Para tener una valoración de los alumnos en esta experiencia, al finalizar, se realizó una breve encuesta anónima de ocho preguntas cerradas y dos preguntas abiertas.

En general las respuestas fueron positivas, más del 80% de los alumnos consideró que esta manera de presentar el TL colaboró para estudiar y comprender el tema que debió considerar, y alrededor del 70% de los alumnos consideró que le sirvió para mejorar la oralidad, el uso de herramientas tecnológicas y el estudio autónomo.

A continuación, por una cuestión de extensión del trabajo, se muestran los resultados más destacados de dicha encuesta:

Con respecto a la pregunta ¿Te sirvió el TL para estudiar y aprender el tema que te tocó?, al consultarles a los alumnos respecto de la experiencia del TL ellos respondieron:

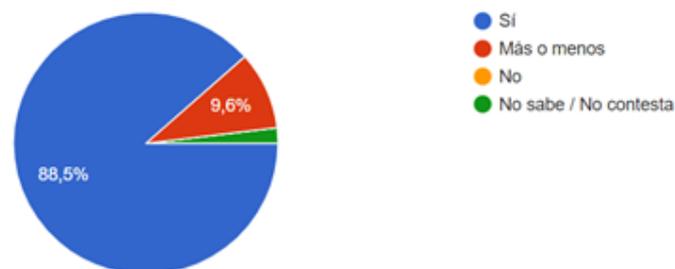


Figura 2: Respuesta de los alumnos sobre su aprendizaje en el TL

Con respecto a la competencia *comunicarse con efectividad*, al consultarles a los alumnos respecto de la experiencia del TL ellos respondieron:

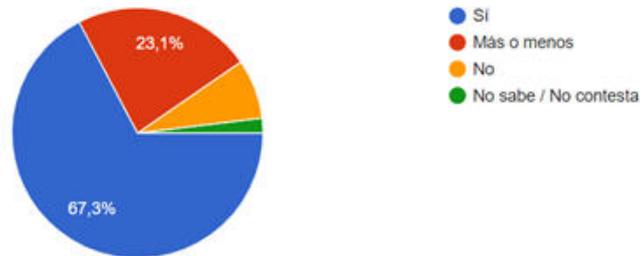


Figura 3: Respuesta de los alumnos sobre su expresión oral en el TL

Con respecto a la competencia *aprender en forma continua y autónoma*, al consultarles a los alumnos respecto de la experiencia del TL ellos respondieron:

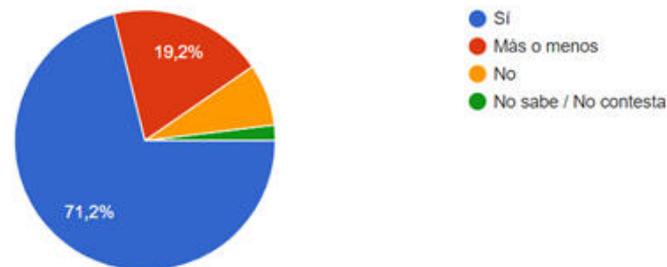


Figura 4: Respuesta de los alumnos sobre su aprendizaje autónomo para el TL

Con respecto a la pregunta ¿Te sirvió el TL para mejorar el uso del software de cálculo matemático?, al consultarles a los alumnos respecto de la experiencia del TL ellos respondieron:

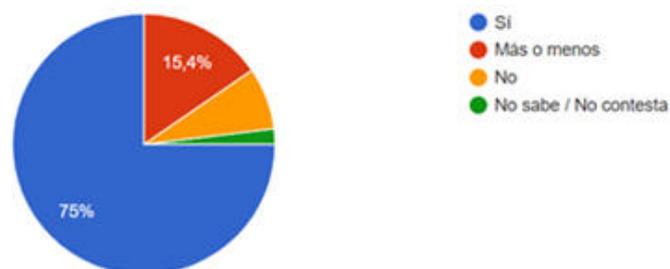


Figura 5: Respuesta de los alumnos sobre la utilización de un software para el TL



Una de las preguntas abiertas en la encuesta fue: ¿Qué recomendación nos das para mejorar el TL? (sobre cualquier aspecto), las respuestas obtenidas de los alumnos fueron, por ejemplo: “que mantengan la iniciativa, es muy dinámica y ayuda a relacionarnos mejor con nuestros compañeros y tener un poco más de expresión oral”, a su vez comentaron “que se siga haciendo de a pares y con actividades de libro. Es muchísimo más cómodo, práctico, educativo y fácil. Una vez finalizada la entrega se den los enunciados de todos los temarios como material de estudio”. Otros participantes agregan que “se realicen más seguido por ejemplo 1 por tema, que sean para todos y que, si los profesores quieren que lo expongamos, que solo se exponga uno al año”. En contraste, algunas opiniones destacan que “como los TL son asincrónicos, a algunos grupos se le puede complicar por la aleatoriedad de las fechas y las otras materias. El resto lo pasé muy bien, me gusta exponer y aprendí a utilizar una herramienta nueva”.

Además, cuando se les consultó: ¿Para qué te sirvió resolver el TL? ¿Qué aprendiste? Algunos de los alumnos encuestados respondieron que “sirvió para estar al día con la materia. Un pequeño esfuerzo extra siempre viene bien”, otros marcaron que “sirvió para trabajar la exposición de resultados. No solo era llegar a tal o cual ecuación partiendo de ciertas hipótesis, sino que también debíamos pensar en cómo mostrar el desarrollo de tal forma que se entienda”. Remarcaron también que “gran parte del trabajo fue cómo diagramar el video para que lo que teníamos desarrollado sea suficiente para una comprensión de cómo nosotros habíamos pensado la resolución del objetivo del TL” y finalmente resaltan que fue útil “para interactuar más con el programa. Lo uso para controlar los ejercicios que realizo.”

## 5. CONCLUSIONES

Basándonos en los resultados obtenidos en esta experiencia, consideramos que esta actividad, mediada por tecnología, promueve en los estudiantes competencias genéricas tecnológicas, proporcionándoles una base para identificar, formular y resolver problemas. Además, promueve competencias sociales, políticas y actitudinales, en especial en el desempeño en equipos de trabajos, la comunicación efectiva y el aprendizaje autónomo.

Además, desde el punto de vista cognitivo, esta actividad les permite a los alumnos desarrollar los temas de manera clara y comprensible, lo que resulta en una adquisición más efectiva de los conocimientos. A su vez, contamos con una videoteca de las presentaciones, las cuales se comparten en el aula virtual y pueden ser utilizadas para el aprendizaje autónomo de los temas.



Acordamos con Stone Wiske [8], por lo que estamos seguros en que seguiremos apostando a los Trabajos de Laboratorios Grupales, incorporando año a año cambios que mejoren tanto la comprensión como las competencias que alcancen nuestros estudiantes.

Finalmente, creemos que el desarrollo de estas competencias debe ser abordado como un proyecto a largo plazo. Para ello, es importante que los estudiantes participen en diversas prácticas que contribuyan a este proceso. En este sentido, consideramos que esta experiencia específica representa una valiosa contribución a dicho proyecto.



## REFERENCIAS

- [1] Irigoyen J., Yerith Jimenez M., Acuña K. *Competencias y educación superior*. Revista Mexicana de Investigación Educativa, 16, 48, 2011.
- [2] Consejo Federal de Decanos de Ingeniería – CONFEDI. *Competencias en Ingeniería*. Mar del Plata. Universidad FASTA. 2014.
- [3] Consejo Federal de Decanos de Ingeniería – CONFEDI. *Marco conceptual y definición de estándares de las carreras de ingeniería*. Oro Verde. 2017.
- [4] Cánepa L., Barturen O., Reynals J., Iturralde J. *Formación por competencias: Ejemplo de diseño de una actividad para integrar y motivar saberes, y su evaluación*. Revista en la Ingeniería Industrial AACINI- XII COINI. 2019.
- [5] Barber Ribera T., Dema Perez C., Estelles M. S. *La rúbrica como instrumento para la evaluación de competencias genéricas: análisis de una experiencia en ingeniería de la energía*. Revista INNODOCT. 2014.
- [6] Tobón Tobón S., Pimienta Prieto J., García Fraile J. *Secuencias didácticas: Aprendizaje y Evaluación de competencias*. Pearson, México, 2010.
- [7] Garza Garza J., Ferrando G., Treviño Cubero A. *El valor añadido por las TIC a la formación de competencias en estudiantes de ingeniería. Didáctica, innovación y multimedia*. Revista de opinión y divulgación, 11, 31, 2015.
- [8] Stone Wiske, M. *La enseñanza para la comprensión con nuevas tecnologías*. Paidós. Buenos Aires, Argentina, 2006.
- [9] Resolución 68/1994. Parte homogénea del diseño curricular de las carreras de la Universidad Tecnológica Nacional. Consejo Superior UTN. 1994. [http://csu.rec.utn.edu.ar/docs/php/salida\\_nuevo\\_sitio\\_rectorado.php3?tipo=RES&numero=68&anio=1994&facultad=CSU](http://csu.rec.utn.edu.ar/docs/php/salida_nuevo_sitio_rectorado.php3?tipo=RES&numero=68&anio=1994&facultad=CSU). Accedido 28 mayo de 2022
- [10] Stewart, J., Romo, J. H. *Cálculo de varias variables: Trascendentes tempranas*. (6a. ed.). Cengage Learning, México D.F., 2008.



## EXPERIENCIAS INTERACTIVAS PARA LA FORMACION POR COMPETENCIAS EN FISICA II DE INGENIERIA MECANICA

Sergio A. MIGLIOLI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias Básicas - UTN Facultad Regional Bahía Blanca

11 de Abril 461, Bahía Blanca, Argentina - [smiglioli@frbb.utn.edu.ar](mailto:smiglioli@frbb.utn.edu.ar)

### RESUMEN

Con base en el nuevo Diseño Curricular de Ingeniería Mecánica, basado en la Formación por Competencias, se presenta una experiencia que busca el desarrollo y la potenciación de capacidades y habilidades de los estudiantes, para el manejo y comprensión de los objetos de conocimiento de Física II (como asignatura homogénea de las cuatro ingenierías), con actividades desarrolladas tanto en el aula como en el laboratorio, incluyendo la creación de grupos de investigación. De este modo, se muestran y describen las competencias a las que se tributa en la matriz a tal efecto y los resultados de aprendizaje asociados para lograr dicha tributación.

Se despliegan así, los saberes, los subsaberes y las metodologías interactivas, desarrolladas para las actividades de aprendizaje con el propósito de definir, para esta asignatura cuatrimestral, el procedimiento para abordar las competencias y al mismo tiempo potenciar su tratamiento a lo largo del cursado. Como consecuencia, los resultados fueron altamente satisfactorios. De hecho, divergieron de forma positiva de aquellos obtenidos con los métodos tradicionales, utilizados hasta el año 2021, no solo observado por el nivel de aprobación de los estudiantes, sino por el espíritu participativo del grupo.

Adicionalmente, se pone de manifiesto la manera en que se emplearon estas metodologías como herramientas constructoras del complejo proceso evaluativo.

Por último, a la par de las conclusiones, se recurre a la opinión anónima de los estudiantes como método de autoevaluación docente, así como también se exponen las propuestas de mejora para el presente año surgidas del análisis de lo transitado.

**PALABRAS CLAVE:** Formación por Competencias – Tributación - Aprendizaje Centrado en el Estudiante - Motivación - Metas - Permanencia.



## INTRODUCCIÓN

### Antecedentes.

Tomando como modelo pedagógico a la Formación por Competencias y al Aprendizaje centrado en el estudiante se ha considerado lo señalado por la Federación Internacional de Sociedades de Educación de Ingeniería (IFEES) a través de su Presidente Ramiro Jordán [1], se adhiere a que “la educación basada en competencias es una orientación educativa que tiene como objetivo proporcionar respuestas a los problemas de formación en educación superior en el nuevo siglo con un enfoque en el ser humano integral.” Así, se promueve que “la educación en ingeniería, cuente con un enfoque complejo y una capacitación en habilidades e intervenciones clave, como respuesta a las necesidades educativas del futuro” [2]. En este sentido, IFEES sostiene que “las competencias se acercan a la idea de aprendizaje total, en la que se lleva a cabo un triple reconocimiento: reconocer el valor de lo que se construye, los procesos a través de los cuales se ha realizado tal construcción (metacognición) y reconocerse como la persona que ha construido.”

En ese rumbo y teniendo en cuenta lo propuesto por el Nuevo Diseño Curricular de Ingeniería Mecánica [3] de la UTN FRBB, donde se manifiesta el objetivo de formar profesionales que respondan a ingenieros íntimamente compenetrados con una formación integral, que no sea solo académica, sino que equilibradamente sepa actuar como ser humano autónomo y contextualizado con el entorno, con elevados valores morales y éticos, con dominio de la profesión y sus herramientas, es que el Proyecto de Investigación y Desarrollo Asociado “Evaluación de la formación y el desarrollo de competencias en carreras de Ingeniería” (PIDA TEAIBBB8191), integrado por equipos de las Facultades Regionales Bahía Blanca, Neuquén y San Nicolás de la Universidad Tecnológica Nacional, promueve enfoques de investigación que contemplan aspectos evaluativos, descriptivos, cuantitativos y cualitativos. Así, se pregonan cambios a partir del intercambio de experiencias y de los resultados de las investigaciones que se llevan a cabo. Estas se logran desde 3 instancias evaluativas, puestas en valor por 3 formularios, en función del año de la asignatura y de la asignatura en sí misma, como instrumentos del proceso de evaluación de las experiencias formativas.

### Objetivos de la presentación.

Esta presentación, desarrollada durante el segundo semestre del año 2022 intenta aportar información al eje temático **Experiencias Interactivas para la Formación por Competencias en Física II de Ingeniería Mecánica**, cuya aplicación se considera, alcanzó un adecuado tratamiento.

Como hipótesis, se plantea que una clase contextualizada en la formación por competencias, dinámica y centrada en el estudiante, con lugar para el debate y la discrepancia, y encuadrada en la frontera “Pi”, según lo propuesto por Kowalsky [4], conducirá a reducir fatigas y deserciones, sin reducir los contenidos mínimos propuestos en el plan de estudios.



## Descripción Procedimental.

De acuerdo al nuevo Diseño Curricular [3], cada una de las asignaturas de las carreras de ingeniería, buscan tributar a las competencias tanto Específicas como Genéricas (CE y CG). Dicha tributación es ponderada según la siguiente matriz de tributación en un rango de valoración entre 0 y 3 donde: 0 = Nada, 1 = Bajo, 2 = Medio y 3 = Alto.

Matriz de Tributación de Competencias de Egreso por Asignatura																										
Carrera: INGENIERIA MECANICA																										
Asignatura: FISICA II										Año: 2°					Comisión:											
Docente: ING SERGIO MIGLIOLI																										
Ejes Transversales (Competencias Genéricas)										Competencias Específicas																
Tecnológicas					Sociales, políticas y actitudinales					1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	4.1	5.1	5.2	5.3	6.1	7.1	8.1	9.1	10.1	11.1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																	
1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Para la asignatura Física II, perteneciente al área de Ciencias Básicas, la contribución más fuerte resulta en las Competencias Genéricas, mientras que, en las específicas, la tributación se hace más débil o nula. A continuación, se fundamenta la ponderación dentro de la matriz de tributación, ya que conducen al tipo de encauce dado a la cátedra.

Se analiza el modo de tributación de cada CE y CG en Física II.

**CG1:** “Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería”, el tratamiento de problemas eléctricos, como el empleo de EPP [5] y sistemas de seguridad, constituyó una base para otros relacionados al bloque de tecnologías básicas (electrotecnia y máquinas eléctricas).

**CG2:** “Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería”, el tratamiento de proyectos planteados (instalación eléctrica de una vivienda simple) y su exposición dialógica, busca formar el desenvolvimiento profesional (autonomía, lenguaje, etc), como acercamiento al desarrollo de un trabajo de la vida real.

**CG4:** “Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería” presenta una contribución al manejo de instrumentos de medición eléctrica de amplia utilización para tareas de mantenimiento, construcción y control, empleados en la vida profesional.

**CG6:** “Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo”. Tributación al trabajo colaborativo, mediante la interacción con pares, en pos de desarrollar y exponer un proyecto, evaluado por otros e interpelado por terceros del mismo curso. A esta competencia se aporta desde dos perspectivas diferentes, por un lado desde el desarrollo teórico y exposición de una



solución, mientras que por el otro, desde el desarrollo y exposición de la práctica de laboratorio. Esto, a su vez, contempla la identificación de metas, la acción bajo responsabilidad tanto individual como grupal y el respeto por los compromisos asumidos.

**CG7:** “Comunicarse con efectividad”, esta competencia se visibiliza en las diferentes exposiciones que deberán desarrollar, para forjar la capacidad comunicacional.

**CG8:** “Actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global” la transmisión de experiencias sobre casos reales con tratamiento de accidentes, empleando interpelaciones y debate, en un marco medioambientalista.

**CG9:** “Aprender en forma continua y autónoma” esta competencia propone el desarrollo e internalización de temas no tratados en clase, debiendo a consecuencia, el estudiantado alcanzar una opinión propia, para defender una decisión tomada sobre la selección de un procedimiento, elemento, máquina o instrumento.

**CE 2.2:** “Realizar la gestión del mantenimiento con sentido crítico, responsabilidad profesional y compromiso social” se considera la contribución, a partir de tener que confeccionar listados de materiales para el tendido eléctrico de un proyecto de iluminación de una vivienda, o el listado de tareas a realizar para el mantenimiento de un motor o tablero eléctrico. En el caso de éstos últimos se asocian sus componentes, se investigan los criterios para su mantenimiento preventivo y las formas de llevarlo a cabo según la normativa vigente.

**CE 4.1** “Proyectar y dirigir en lo referido a la higiene y seguridad en los proyectos de ingeniería mecánica según lo descrito en AR1, con sentido crítico, responsabilidad profesional y compromiso social”, está presente una importante conceptualización de casi la totalidad de los riesgos eléctricos con los que puede encontrarse una persona en su hogar o un trabajador en la industria y los medios para evitarlos.

Con el objetivo de contextualizar la propuesta de trabajo con la tributación propuesta, en una relación íntima de los descriptores de conocimiento y los contenidos mínimos, los Resultados de Aprendizaje versan en el mismo sentido que se propusieron desarrollar.

De esta manera y teniendo presente que en todo momento tenemos que explotar actividades que tengan como premisa el tratamiento de saberes, relacionados ellos a la persona, a la profesión, a la autonomía y autogestión, se expone un muy breve resumen de los mismos.



### Saberes a emplearse.

En la Resolución Ministerial N° 1541/21 [6], se establecieron los contenidos curriculares básicos para las distintas carreras de ingeniería. De esta manera se definieron los descriptores de conocimiento para cada uno de los bloques (Ciencias Básicas, Tecnologías Básicas, etc.) como así también las actividades transversales a los mismos. De esta manera, en su forma más actual, el Diseño Curricular de cada una de las carreras de ingeniería, enuncia las competencias a las que se debe buscar tributar con las asignaturas. Al mismo tiempo están indicados por bloque, los Descriptores de Conocimiento, y de estos los Contenidos Mínimos de la asignatura. Los descriptores de conocimiento, son un poco la génesis de los Objetos de Conocimiento, de los cuales los estudiantes deben empoderarse para propender adquirir el saber o los saberes que se pretenden. A continuación, se buscará visibilizar la articulación de los saberes, a partir de los objetos de conocimiento.

Se efectuará el análisis de un ejemplo muy puntual de aplicación en Física II, que se considera puede servir como trampolín tanto para el resto de esta asignatura como de cualquier otra.

No se debe perder de vista que cada una de las asignaturas, con sus descriptores de conocimiento, contenidos mínimos y, traducidos ambos en los objetos de conocimiento, buscarán formar al futuro profesional para que se desempeñe según lo aspirado por el Perfil Profesional.

Por lo tanto, la formación no debe ser sólo académica, sino que representa la aspiración a que el futuro profesional se desempeñe tanto social, práctico como personalmente.

La forma que actualmente se tiene para poder medir, de alguna manera, el nivel adquirido de los saberes transmitidos, es a través de los Resultados de Aprendizaje y su proceso evaluativo asociado. En ellos se encuentra definido: que se pretende, a nivel de que saberes y en qué medida cada uno de ellos. A continuación se hará una breve descripción de estos:

**“Saber Saber”**: es el saber académico. Resulta de internalizar los conceptos de cada uno de los objetos de conocimiento que se pretende se adquieran, para el aprendizaje de los contenidos mínimos, con el empleo correcto de las herramientas disponibles para su aplicación.

**Saber Hacer** (comprensión del problema): se trata de entender el problema o desafío, argumentándolo en coherencia contextual. Debe tener presente el portafolio de herramientas con las que cuenta para poder afrontar la resolución, de una manera eficaz y eficiente.

**Saber Ser**: involucra aspectos del ser humano, como trabajar correctamente en equipo, desenvolverse como líder de grupo, exponer frente a un auditorio el trabajo desarrollado, emplear una correcta capacidad comunicacional, manejarse con respeto para con pares y entorno, emplear un correcto lenguaje tanto técnico como específico, respetar las normas con responsabilidad y sentido social, asumir el compromiso actuando consecuentemente con la responsabilidad asumida, entre otras.



A modo de ilustrar lo enunciado, se adjunta la Tabla 1, con ejemplos del tratamiento de cada uno de los saberes:

Tabla 1. Ejemplo de Saberes – Subsaberes

Saber	Subsaber		Ejemplos
Conocer	Conceptos:		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leyes.</li> <li>• Fundamentos.</li> <li>• Métodos.</li> <li>• Algoritmos</li> </ul>
	Hechos o Datos:		Los datos obtenidos se emplearán para: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar secciones de conductores (elemento)</li> <li>• Argumentar sobre el uso de ventiladores y disipadores por efecto Joule (equipo).</li> <li>• Cuantificar pérdidas (rendimiento).</li> </ul>
	Teorías		<ul style="list-style-type: none"> <li>• De resolución de sistemas de ecuaciones</li> <li>• Sobre sistemas no conservativos</li> <li>• Necesarias de Física I</li> </ul>
	Principios		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principio de continuidad</li> <li>• De conservación de la energía.</li> </ul>
Saber	Subsaber		Ejemplos
Hacer	Procedimientos	Cognitivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicar conceptos matemáticos.</li> <li>• Articular con física I, para la aplicación de principios.</li> <li>• Emplear vocabulario técnico y profesionalmente apropiado.</li> </ul>
		Cognitivo Motrices	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escoger instrumentos de medición adecuados.</li> <li>• Producir de manera práctica en el laboratorio de física II.</li> <li>• Emplear correctamente un instrumento de medición.</li> <li>• Resolver una falla siguiendo un razonamiento lógico, empleando los recursos vistos en la teoría.</li> </ul>
		Algorítmicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para el reconocimiento de fallas por ejemplo en circuitos (cortocircuitos)</li> <li>• Para determinar consumos eléctricos (en función de los consumidores del circuito).</li> <li>• Para diferentes cálculos de un sistema.</li> </ul>
		Heurísticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicado a encontrar problemas en casos reales</li> <li>• Aplicado a contextos de peritaje (accidentes en relación a la seguridad industrial) acordes al nivel.</li> </ul>
	Técnicas		<ul style="list-style-type: none"> <li>• De medición.</li> </ul>
	Métodos		<ul style="list-style-type: none"> <li>• De trabajo.</li> <li>• Organizativos.</li> </ul>



Saber	Subsaber	Ejemplos
Ser	Valores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Responsabilidad en las entregas.</li> <li>• Respeto por los compañeros y compañeras del grupo de exposición.</li> </ul>
	Actitudes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disposición a la escucha.</li> <li>• Debatir respetuosamente con su entorno</li> <li>• Aceptar la crítica para mejorar.</li> <li>• Descubrir sus debilidades y mejorar</li> </ul>
	Normas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De convivencia</li> <li>• De participación</li> <li>• De trabajo</li> </ul>

### Descripción Metodológica I – Herramientas.

De la mano con lo propuesto por Kowalsky [7], en su conceptualización de la frontera Pi (Pedagogía e Ingeniería), la cual enmarcada por el ACE [8] y la FPC [9], con lugar para el debate y la discrepancia, es aquella que de seguro reducirá la fatiga y minimizará las deserciones, sin que se vean afectados los Resultados de Aprendizaje propuestos.

Si se considera que el elemento que coadyuva tanto al abandono como a la abulia, es el binomio “desmotivación y apatía”, resulta muy enriquecedor lo propuesto por Benilde García Cabreró [10] con su reflexión “...la motivación, por tanto, energiza y orienta las acciones de los individuos hacia las metas que pretenden lograr”. Por demás, las palabras de Bono y Huertas [11], indican que los alumnos no carecen de motivación, sino que no se motivan por lo que les transmitimos o quizás por la forma en que lo hacemos. Es así, que a través de este razonamiento se trabajó en la misma senda, considerando que huir de la convencionalidad del tratamiento de la asignatura, era un factor decisivo. Por lo tanto, se partió de asumir que el problema no se centra ni en el contenido ni en el auditorio, sino en cómo ese contenido se emite, transmite y presenta a su receptor; es decir que se trabajó en el envase del producto, en su transporte y forma de entrega.

Se hizo uso de elementos que fueron herramientas indispensables durante la pandemia (en el contexto de las clases virtuales), enmarcando el diseño del camino a seguir. Así fue, que las condiciones de contorno del proyecto debían considerar:

1. Resultar ágil. } Vinculado a la inmediatez de los tiempos líquidos [12].
2. Dar respuesta en tiempo real. }
3. Servir como actividad lúdica. } Vinculado a quitar rigidez.
4. Ser representativo de las actividades. } Aporte tanto académico como de instancia evaluativa.
5. Ser mediado por TIC's con el empleo del móvil como premisa. } Puente tecnológico.



- |   |   |
|---|---|
| 6. Servir como salto escalón en la motivación.                                | } <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Motivación y emoción.</span> |
| 7. Permitir llevar a cabo tanto una autoevaluación como una heteroevaluación. | } <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Instancia evaluativa.</span> |

Las herramientas en cuestión fueron cinco, a lo que se prevé incorporar nuevas para el 2023:

- a. “KAHOOT” [12]: Aplicación para la realización de Trivias on line, creadas por el docente.
- b. Simulador PHET de la Universidad de Colorado [13]: simulador digital de experiencias de laboratorio creadas por el usuario.
- c. Preguntas de ocasión: son preguntas sobre el tema, cuya respuesta positiva colabora en el proceso evaluativo.
- d. Preguntas por responsabilidad: al azar, se elige un integrante por equipo para responder un multiple choice, donde la calificación obtenida es la de cada miembro del grupo. El grupo depende del integrante que responde.
- e. Estudios técnicos: se presenta un caso real simple, para desarrollar un estudio técnico, debiendo entregarse en fecha establecida, con el marco normativo y legal.

Como antecedente, los resultados obtenidos de “a.” y “b.” en pandemia fueron muy alentadores. Resultados que se repitieron por dos años seguidos, en dos cohortes virtuales diferentes. Esta experiencia se replicó en la primera cohorte presencial pos pandemia (2022), enriquecida con las tres herramientas restantes, observándose por el resultado que como sistema de tracción motivadora actuó de manera eficiente. Se registraron los siguientes aspectos positivos:

Para la aplicación “KAHOOT”:

- Estableció una sana y motivadora competencia dentro del curso.
- Condujo a una autoevaluación, real y en tiempo real.
- Estableció una valoración y un reconocimiento de nota a los primeros puestos de la competencia. Principio de una motivación adicional, tal como lo manifiesta Pintrich y Schunk (2006), en el cual definen a la motivación como algo que nos impulsa a cumplir un objetivo [14].
- Se desarrolló cuando la clase perdió interés o comenzó el desgano. O al principio para mantenerlos enfocados.

Para el simulador digital “PHET”:

- Permitted abrir la puerta a una simulación con correcciones para acercarse a la realidad.
- Permitted digitalizar y efectuar mediciones, y comparar las mismas con los valores calculados.



- Permitió comparar con los valores obtenidos en el laboratorio real, determinar las desviaciones y proponer una explicación para la existencia de las mismas.

Para el “Cuestionario de Responsabilidad”:

- En la mayoría de los equipos estuvo presente la presión de la responsabilidad de saber que había integrantes que dependían del resultado.
- Fue apreciable un notable compromiso en el 45% de los casos.

Para los estudios técnicos:

- Fue quizás el trabajo de mayor participación. Se considera que despertó gran interés e incluso estuvo presente la figura del líder de grupo (natural).

### **Descripción Metodológica II – Proceso Evaluativo.**

Aporte desde las trivias:

- El uso de las mismas permitió evaluar el conocimiento y la actitud hacia el propio desafío, donde tal como lo mencionó Jimmy Yordani Ardila (2018) [15], en el ámbito educativo, la finalidad de la gamificación es promover el compromiso de los estudiantes con su propio aprendizaje.
- Fue directa e inmediata. En tiempo real tenían la calificación. Inmediatez [12].
- Permitió la competencia.

Aporte desde el simulador digital:

- El empleo de éste, permitió evaluar el desempeño del “saber – hacer”, partiendo de la base de su capacidad para interactuar con los elementos que el sistema propone, que por demás son muchos y variados, empleando el teléfono móvil.
- Permitió evaluar la autonomía para la realización de la propuesta y la adaptación a situaciones nuevas.
- Al trabajar en equipo, se visibilizó la gestión de liderazgo. Aparecieron los líderes naturales, más allá de los que uno puede imponer tácitamente.

Aporte de los cuestionarios por equipos:

- Permitió no solo indagar en su conocimiento sino en su sentido de la responsabilidad.

Aporte de los informes técnicos:

- Se evaluaron el conocimiento, sentido práctico, comunicación, gestión como equipo, responsabilidad.



**RESULTADOS (EN BASE A DATOS AÑO 2022):**

Tabla N°2 – Resultados al primer parcial

Legajo	GRUPO	Apellido	Nombre	PREGUNTAS										NOTA	KAHOOT	OCACION	CUESTIONARIO POR GRUPOS	NOTA CORREGIDA	PORCENTAJE	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
xxxxxxx	4	xxxxxxx	xxxxxxx	0.75	1	0.5	0.2			0		-0.3	1	1	4.12	1	k1*	0	4.33	5.00%
xxxxxxx	3	xxxxxxx	xxxxxxx												0.00	0		0	0.00	
xxxxxxx	1	xxxxxxx	xxxxxxx	1	1	0.3	0.25	-0.3	0.75	0.75	1	1	1	6.75	0		0	6.75	0.00%	
xxxxxxx	1	xxxxxxx	xxxxxxx	0.75	0.75	0.75	0.75	-0.3	0.48	0.75	0.75	1	-0.3	5.32	0		Q+	0	5.32	0.00%
xxxxxxx	6	xxxxxxx	xxxxxxx	0.75	1	0.7	0.8	0.8	0.8	1	-0.3	1	-0.3	6.27	0		0.5	6.77	7.97%	
xxxxxxx	6	xxxxxxx	xxxxxxx	1	1	0.56	0.25		0.25	1		1	1	6.06	0		0.5	6.56	8.25%	
xxxxxxx	2	xxxxxxx	xxxxxxx	1	1	0.56	-0.7	-0.3	1	-0.3	-0.3	1	1	4.04	1	k1*	0.5	4.74	17.38%	

Se cumplieron las siguientes **metas**:

- Participación masiva.
- Desarrollo de proyectos con tributación en aspectos tecnológicos (obligatorio).
- Desarrollo de aprendizaje basado en desafíos (opcional).
- Se aportó a las competencias a las que se proponía tributar.
- Se explotó la potencialidad del curso.
- Se exacerbó la responsabilidad de los estudiantes de los cuales dependía el resto del equipo.
- Se despertó el interés en formar grupos de investigación para explotar lo aprendido.

Lo expuesto en números:

1. La asignatura es cuatrimestral.
2. No existieron deserciones: (terminamos 43 de 43).
3. Cursaron la materia al día de hoy: 43 (100%).
4. En condiciones de A.D.: 9 (20,9%).
5. Interesados en hacer desarrollo: 8 (péndulo de Foucault) – (18,6%). (tabla N°3)
6. Participación en Kahoots: 95%.
7. Participación en preguntas de ocasión: 25%.
8. Participación destacada en proyectos de informes técnicos: 100%.
9. Se despertó el interés por aspectos sociales y por vinculación transversal con otras asignaturas.

Tabla N°3 – Opinión estudiantes Ing. Mecánica año 2022\*

Los contenidos de esta cátedra, me han permitido integrar/relacionar/comparar conocimientos con otras asignaturas.	Siempre	(53.3%)
Se ha despertado en mí el interés por participar en algún proyecto de investigación.	Si	(40.0 %)
Esta materia me ayudó a valorar el sentido social de mi futura profesión	Si	(56,7%)

\*Información extraída del sysacad sobre la opinión de los estudiantes



## CONCLUSIÓN

### Reflexiones sobre logros, dificultades y mejoras para 2023.

Las experiencias y los resultados obtenidos, evidenciaron la importancia del diseño de actividades formativas, donde el acercamiento de casos reales y la motivación resultaron relevantes, para que los estudiantes logren procesos protagónicos de integración de saberes competenciales y de desempeño. Se entiende, que estas experiencias anticipan el ejercicio de la profesión, siendo éste uno de los objetivos de la FPC y el ACE. Estas instancias se compatibilizan plenamente con las recientes Resoluciones para las Planificaciones que UTN ha promulgado, a fines de 2022 para las carreras de Ingeniería y Licenciatura.

La principal dificultad fue el tiempo. La materia es cuatrimestral, con lo que el desarrollo de las actividades se constituye en un engranaje, para poder ir vinculando cada una de las actividades. Requiere una organización pulida y una importante previsión de los tiempos.

En segundo lugar, es complejo evitar la distracción de los estudiantes ante el celular, con lo cual tuve que incorporarlo para que la atención estuviese dirigida al celular en el aspecto que se requería.

Resultó necesario mediar y definir qué recursos emplear en cada oportunidad. Todo lo que se repite más de dos veces, resulta una naturalización que termina en tedio. Es más ventajoso si los recursos a emplear son sorpresa para las y los estudiantes.

### Previsiones para el 2023:

Las previsiones son actividades cuya participación redunde en el reconocimiento académico como herramienta de evaluación en pos de una evaluación continua:

1. Continuar con los grupos de investigación.
2. Crear un eje transversal con asignaturas de primer y segundo año (Representación Gráfica, Química General y Física II) en un proyecto tecnológico. (Nuevo).
3. Armar intercambio de preguntas y respuestas entre grupos para determinados temas, elegidos por sorteo. Equipo representante empresarial y equipo comprador. (Nuevo).
4. Continuar con el tema de preguntas de ocasión.
5. Continuar con el tema de cuestionarios por responsabilidad.
6. Continuar con los informes técnicos.
7. Medición del nivel de aprendizaje de saberes. (Nuevo).
8. Empleo de "One minute paper". (Nuevo)



## BIBLIOGRAFÍA (si utilizan algunas fuentes)

- [1] Bisquerra Alzina, R. (2007). Metodología de la investigación educativa. Madrid, La Muralla
- [2] Klimovsky, G. (1994). Las desventuras del conocimiento científico. Buenos Aires, AZ Editora, p. 34
- [3] Nuevo Diseño Curricular de Ingeniería Mecánica UTN FRBB.  
<https://www.frbb.utn.edu.ar/frbb/info/secretarias/academica/planeamiento/competencias/res368.pdf>
- [4,7] Kowalsky-Posluszny Formación por competencias en ingeniería: ¿Camino o destino? Revista Argentina de Ingeniería - Año 5 - Volumen 7 - Mayo de 2016 p132
- [5] <https://www.argentina.gob.ar/srt/prevencion/epp>
- [6] Nuevos Estándares de Acreditación para Carreras de Ingeniería-Resolución N°1541/2021.
- [8] Cukierman, U. (2018). Aprendizaje Centrado en el Estudiante. Un enfoque imprescindible para la Educación en Ingeniería. Buenos Aires, UTN FRBA
- [9] La formación basada en competencias en la educación superior - Curso Iglú 2008-Sergio Tobón, Ph.D
- [10] García Cabrero, B., & Pineda Ortega, V. J. (2019). Motivación y emociones: ingredientes esenciales del interés y el involucramiento en el aprendizaje en línea. *Revista Mexicana De Bachillerato a Distancia*, 11(21).  
<https://doi.org/10.22201/cuaed.20074751e.2019.21.68553>
- [11] Bono, A. y Huertas, J, A. (2006) ¿Qué metas eligen los estudiantes universitarios para aprender en el aula? Un estudio sobre la motivación situada. Cronía, Revista de Investigación de la Facultad de Ciencias Humanas, 5 (1), 1-17.
- [12] [HTTPS://kahoot.it/](https://kahoot.it/)
- [13] [HTTPS://phet.colorado.edu/es/](https://phet.colorado.edu/es/)
- [14] Pintrich, P. (2006). Las creencias motivacionales como recursos y restricciones para el cambio conceptual. Cambio Conceptual y Educación (pp. 53-86). Buenos Aires: Aique.
- [15] Ardila-Muñoz, J. Y. (2019). Supuestos teóricos para la gamificación de la educación superior. *Revista Internacional de Investigación en Educación*, 12 (24), 71-84. Disponible <https://doi.org/10.11144/Javeriana.m12-24.stge>
- [16] Zygmunt Bauman. (2000). Modernidad líquida. Polity, Press y Blackwell Publishers Ltd.



## LA FORMACIÓN DE INGENIEROS EN EL CONTEXTO DE LA CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

María Luisa Jover <sup>1</sup>, Sergio Manterola <sup>2</sup>, María Celia Gayoso <sup>3</sup>

<sup>1</sup> UTN Facultad Regional Buenos Aires - Medrano 951, Buenos Aires, Argentina -  
[mjljover@gmail.com](mailto:mjljover@gmail.com)

<sup>2</sup> UTN Facultad Regional Buenos Aires - Medrano 951, Buenos Aires, Argentina -  
[smanterola@utn.frba.edu.ar](mailto:smanterola@utn.frba.edu.ar)

<sup>3</sup> UTN Facultad Regional Buenos Aires - Medrano 951, Buenos Aires, Argentina -  
[mcgayoso@utn.frba.edu.ar](mailto:mcgayoso@utn.frba.edu.ar)

### RESUMEN

Esta presentación se centra en el PID “La formación de ingenieros en el contexto de la cuarta revolución industrial” (TETEUBA0008678TC), radicado en la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional. Aunque este proyecto se encuentra en su etapa inicial, se halla en continuidad con la investigación precedente sobre las transformaciones del sector productivo a partir de las tecnologías 4.0, realizada por este mismo equipo multidisciplinario, que hace más de veinte años trabaja en temáticas significativas para la enseñanza de la ingeniería.

Los resultados del PID finalizado en 2022, “Las actuales transformaciones del sector productivo y del mundo del trabajo: el desafío de la formación de ingenieros en el inicio del siglo XXI” (TEUTIBA0005184TC) permiten un encuadre conceptual de los cambios de la industria 4.0, acelerados por la incorporación drástica de tecnología en todos los órdenes de la vida a partir de la pandemia del COVID 19. En el proyecto actual, el estudio empírico sobre la percepción de las modificaciones estructurales de la industria por parte de los estudiantes de ingeniería muestra su escaso conocimiento de este proceso y de las características de las tecnologías 4.0, sin diferencias significativas entre las especialidades de Ingeniería Mecánica e Ingeniería en Sistemas

La industria 4.0 requiere un alto desarrollo de las llamadas habilidades blandas y por ende demanda el diseño y gestión de recursos educativos conducentes.

El objetivo de este proyecto es identificar los espacios curriculares en los que las competencias genéricas sociales, políticas y actitudinales se desarrollan explícitamente y contribuir así a la reflexión sobre el proceso de enseñanza de la ingeniería de modo que la universidad asegure esta formación de valor para el desarrollo de la Industria 4.0.

**Palabras Clave:** Formación de ingenieros, Industria 4.0, Habilidades blandas, Currículum



## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta el PID “La formación de ingenieros en el contexto de la cuarta revolución industrial” (TETEUBA0008678TC), radicado en la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional, e iniciado en abril de 2023 en continuidad con la investigación precedente “Las actuales transformaciones del sector productivo y del mundo del trabajo: el desafío de la formación de ingenieros en el inicio del siglo XXI” (TEUTIBA0005184TC). El encuadre conceptual sobre los cambios de la industria 4.0 resultante de esta investigación finalizada y los datos obtenidos en relación con la percepción de los estudiantes respecto de tales modificaciones estructurales han dado base para aspirar a profundizar el análisis de los espacios curriculares para el desarrollo de las competencias genéricas sociales, políticas y actitudinales.

Esta comunicación presenta el contexto socioeconómico de la formación de ingenieros y el contexto socio normativo, que desde los lineamientos del CONFEDI propone un modelo de formación por competencias en consonancia con los requerimientos de la demanda laboral. A continuación se exhiben algunos resultados de la indagación sobre el conocimiento que los estudiantes de ingeniería tienen de las tecnologías 4.0 y su percepción respecto de la necesidad de formación en tales tecnologías, que permitirán esbozar algunas conclusiones iniciales para este proyecto.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Contexto socioeconómico de la formación de ingenieros

Cuando en Alemania, líder de la industria europea, se nombró como *Industria 4.0* (I 4.0) a la reconversión de la producción, el proceso de transformación estaba en marcha. La adopción generalizada de las innovaciones tecnológicas, las *tecnologías 4.0* (T4.0), ya se percibía como el motor de una Cuarta Revolución Industrial (4° RI). A diferencia de las precedentes, la 4° RI no arraiga en una nueva energía ni torna obsoleta la base tecnológica de la anterior. Por el contrario, redefine e integra las tecnologías de la información de la 3° RI al potenciar sus capacidades y explotar de modo exponencial sus innovaciones de forma de multiplicar su capacidad productiva pasando de la robotización a la digitalización de la totalidad de las prácticas y relaciones del sistema. Implica una transformación económica que afecta, en principio, la producción, su logística, la relación entre el producto y el consumidor y, en última



instancia, trasciende esta dimensión permeando la estructura cultural de la sociedad contemporánea sumida en la incertidumbre del nacimiento de una nueva civilización [1]

Desde 1975 la economía es global: funciona a escala planetaria como una unidad en tiempo real, abarca todos los procesos y factores del sistema económico. [2] Esta condición posibilitó la rápida aceptación del modelo 4.0 cuyas características relevantes son la maximización de la productividad y de la eficiencia. En la industria 4.0 estas se sostienen en la informatización, la digitalización y la integración de los procesos de producción por la convergencia de diversas tecnologías: inteligencia artificial, robótica avanzada, simulación, realidad aumentada, *big-data*, banda ancha 5G, internet de las cosas, *machine learning* y otras que se van desarrollando y articulando a una velocidad sorprendente. El factor común en esta diversidad es el desarrollo intensivo de *software*, la incorporación de electrónica en procesos y productos, la disponibilidad de gran volumen de datos para la eficaz toma de decisiones y el ahorro de energía en la gestión de recursos. Son tecnologías transversales que afectan la estructura comercial, financiera y manufacturera provocando tal cambio en la estructura productiva que, en términos de Carlota Pérez [3], puede conceptualizarse como un nuevo *paradigma tecnoproductivo*.

Sin embargo, como dice Klaus Schwab [4] “la 4º RI no consiste sólo en máquinas y sistemas inteligentes y conectados” y Brynjolfsson y McAfee [5] agregan: “Cada vez más lo que nos preocupa en la segunda era de las máquinas son ideas, no cosas: mente, no materia; bits, no átomos; e interacciones, no transacciones”. Y subrayan que como otro capital, el capital humano (capacitación, educación, experiencia y habilidades) es un activo que genera flujo de ingresos. En la I4.0 el aumento del capital humano es superior al del capital físico pues sus tecnologías incrementan el valor de las personas con habilidades de diseño, creatividad e ingeniería. El efecto es el aumento de la demanda laboral calificada; esto da lugar al llamado *cambio técnico sesgado hacia la capacitación*. [5] Estos autores coinciden en que así como esta economía crea una enorme riqueza, también crea una gran desigualdad puesto que la Industria 4.0 cambió el ritmo de aumento de la riqueza y su modo de distribución.

La inesperada y también disruptiva aparición de la pandemia del COVID 19 implicó la incorporación drástica y sin retorno de la nueva tecnología a la vida cotidiana: en los hogares, en las finanzas, en el trabajo, en la educación; en suma, afectó todas las dimensiones de la vida humana [6]. Este no es un hecho geográfico, es global; mostró y reforzó la desigualdad de recursos colectivos y personales y llevó al primer plano la problemática educativa. La situación de la Argentina es compatible con esta experiencia global, con sus particularidades y dificultades, reconocibles con independencia de las visiones con que se las analicen.

## 2.2. Contexto socio normativo de la educación de ingenieros.



En este contexto planteamos el PID actual *La formación de ingenieros en el contexto de la cuarta revolución industrial* (TETEUBA0008678TC, del 01/04/2023 al 31/03/2026). Este proyecto tiene su antecedente inmediato en el titulado *Las actuales transformaciones del sector productivo y del mundo del trabajo: el desafío de la formación de ingenieros en el inicio del siglo XXI* finalizado el 31/12/2022. Sus aportes son un insumo valioso para la investigación actual. Asumimos que el sistema productivo argentino es heterogéneo [7] y que el camino para salir del subdesarrollo es insertarse rápidamente en la tecnología 4.0 porque la ventana de oportunidad es estrecha [8]. Nuestro supuesto inicial es que la formación de ingenieros debe estar correlacionada con la tecnología paradigmática de frontera y las habilidades asociadas a la T4.0 — integración, convergencia, transversalidad, conocimiento de contexto para la toma de decisiones, creatividad — compatibles con las competencias (*skills*) que consolidan las condiciones de empleabilidad de los ingenieros y fortalecen su desarrollo profesional.

En nuestro país hace más de treinta años que el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) lidera el debate sobre la educación de ingenieros. En 2006 propuso el modelo de formación por competencias que reafirmó en el Libro Rojo de 2018: *Propuesta de Estándares de Segunda Generación para la Acreditación de Carreras de Ingeniería en la República Argentina*. Recomienda “un currículo con un balance equilibrado de competencias y conocimientos académicos, científicos, tecnológicos y de gestión, con formación humanística” y “un modelo de aprendizaje centrado en el estudiante y orientado al desarrollo de competencias, tanto genéricas de egreso del ingeniero (argentino e iberoamericano), como específicas de cada terminal”. [9] En las competencias genéricas de egreso el documento diferencia las tecnológicas de las sociales, políticas y actitudinales. A estas últimas las identifica como desempeño efectivo en equipos de trabajo, comunicación efectiva, actuar con responsabilidad profesional, ética, y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global, aprender en forma continua y autónoma, actuar con espíritu emprendedor”. En la estructura curricular estas competencias se explicitan en el bloque “Ciencias y Tecnologías Complementarias” con una asignación mínima de 365 horas, no tienen designados descriptores y se acepta que se desarrollen fuera del ámbito académico.

Las competencias que plantea el Libro Rojo están en línea con los requerimientos de la oferta laboral ligada a la industria 4.0 y que se conocen como “habilidades blandas”. [10] Estas se caracterizan por poner en juego capacidades subjetivas que, por su condición de ser personalísimas, no pueden sustituirse por algoritmos. El ingeniero es irremplazable en esta dimensión y en ella se trama el potencial mayor de la economía del conocimiento.

En este contexto socio normativo de la formación de ingenieros y a partir de los supuestos explicitados, este proyecto de investigación se plantea como problema establecer, identificar y



reconocer los espacios curriculares en los que las competencias genéricas sociales, políticas y actitudinales se desarrollan explícitamente de modo que la universidad garantice esta formación. Porque no hay discusión respecto de la necesidad de la formación en estas competencias sino en el cómo promoverlas en el exigente currículum de ingeniería.

En la UTN.BA, ámbito de referencia de esta indagación, se ha trabajado la temática en cátedras y niveles; pero advertimos que ha quedado vacante la integración y transversalidad de los distintos esfuerzos. En este sentido pensamos que el interés de este proyecto reside en esbozar en esos espacios curriculares los lineamientos de una educación 4.0, una tarea aún embrionaria, pero que las circunstancias impulsan a ser abordada en el corto plazo.

Sabemos que la dificultad para avanzar en este plan reside en la poca tradición que tiene la articulación en la educación universitaria, pero entendemos que es el reto de la hora. Para afrontar este desafío el equipo tiene tradición en el debate sobre la enseñanza de la ingeniería, experiencia docente en diferentes niveles y especialidades y cuenta con el apoyo institucional que ha recibido en sus más de veinte años de trayectoria.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Materiales y métodos

A fin de poder caracterizar el nivel de conocimiento que poseen los estudiantes de ingeniería de FRBA respecto de los núcleos fundamentales que constituyen la incipiente transformación tecnológica, conocida como industria 4.0 y las competencias y/o saberes necesarios para transitar e incorporarse a estos nuevos desarrollos, se llevó adelante una encuesta semiestructurada en las distintas carreras de ingeniería durante el segundo cuatrimestre de 2022. La encuesta fue realizada de modo virtual mediante la creación de un formulario en la plataforma Google y enviada al correo de los estudiantes para ser completada. Luego, volcadas las respuestas en un archivo Excel, que la misma plataforma genera automáticamente, fueron procesadas a través de distintos algoritmos estadísticos. Fueron elegidos en la muestra algunos cursos de los primeros y últimos años, a quienes se los invitó a participar libremente y de manera anónima, a quienes se les informó que esta encuesta formaba parte de un proyecto de investigación llevado adelante por docentes de la universidad UTN.BA. La encuesta comprendió respuestas estructuradas con las que se apuntaba a caracterizar del modo más preciso el sujeto encuestado y respuestas abiertas con el fin de captar otros matices que pudieran escaparse de una respuesta estructurada pero que fueran muy relevantes como insumo

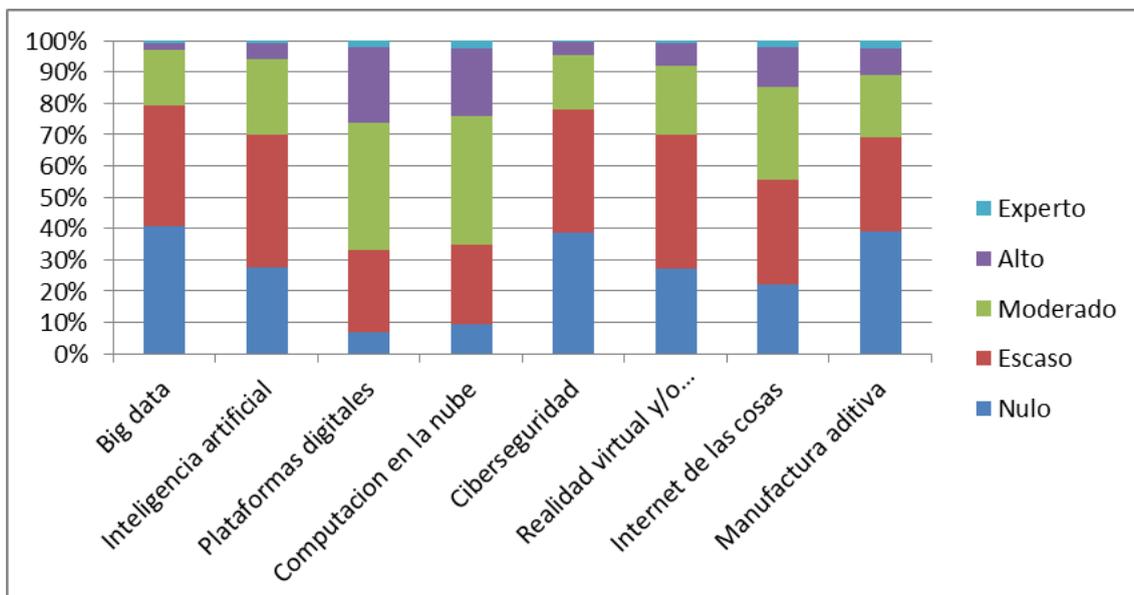


Las respuestas estructuradas nos permitieron construir distintas tablas de frecuencia de los descriptores y eso nos permitió plantear distintos test de hipótesis con el fin de dilucidar mediante test estadísticos las preguntas que nos formulábamos. El test de chi cuadrado nos permitió cuantificar las diferencias que se dan en el análisis de los datos categóricos.

En esta sección se presentan los resultados del tramo de la encuesta que explora el conocimiento de los estudiantes sobre las T4.0 y su valoración en la formación. Esta decisión se tomó en la convicción de que la experiencia estudiantil es significativa para establecer la correspondencia entre sus expectativas profesionales y la formación que brindan las carreras.

### 3.2. Conocimiento de los estudiantes de Ing. Mecánica sobre tecnologías 4.0

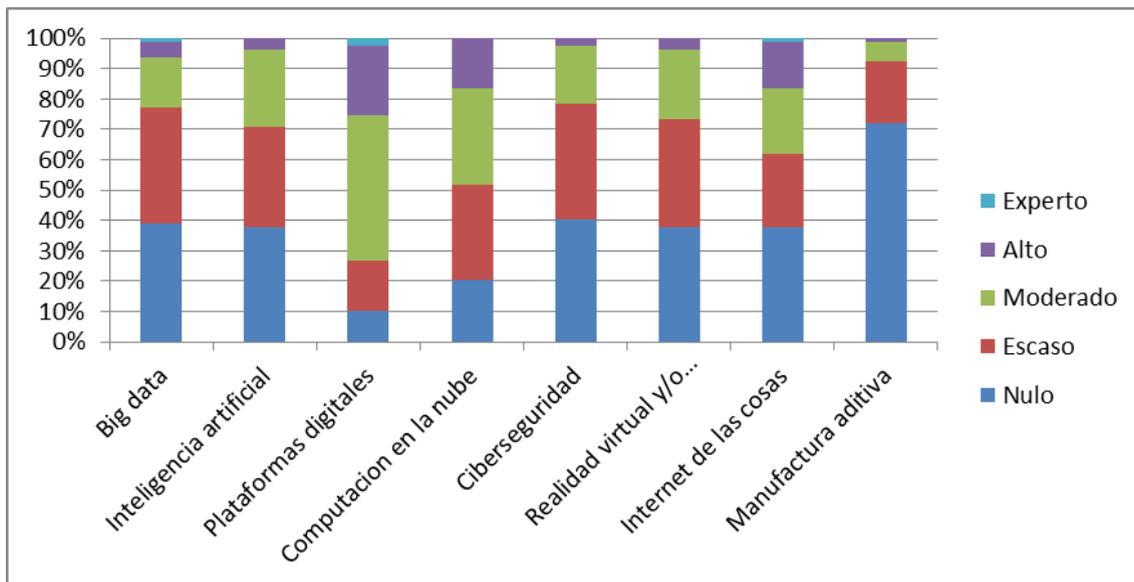
Un resultado inicial significativo cuestionó una idea previa del equipo. Uno de los supuestos que manejábamos era que los estudiantes de Ingeniería Mecánica debían presentar un mayor desconocimiento de los núcleos tecnológicos de la industria 4.0 que los estudiantes de Ingeniería en Sistemas, dado la prevalencia que tienen estos saberes en esta última Ingeniería. Para tal fin se analizaron las respuestas dadas respecto al nivel de conocimiento que poseían frente a los distintos núcleos: Big Data, Inteligencia artificial, Plataformas digitales, Computación en la nube, Ciberseguridad Realidad virtual y/o aumentada, Internet de las cosas y Manufactura aditiva. Las respuestas posibles eran: Nulo, Escaso, Moderado, Alto y Experto. En la figura 1 se muestran los resultados obtenidos para la muestra de 202 estudiantes de Ingeniería mecánica.





**Figura 1:** Resultados obtenidos para 202 estudiantes encuestados de Ingeniería Mecánica ante la pregunta: Seleccione el grado de conocimiento para cada una de las siguientes tecnologías: Se muestran los porcentajes para cada respuesta obtenida

En la figura 2 se muestran los valores obtenidos para la muestra de 79 estudiantes de Ingeniería en Sistemas.



**Figura 2:** Resultados obtenidos para 79 estudiantes encuestados de Ingeniería en Sistemas ante la pregunta: Seleccione el grado de conocimiento para cada una de las siguientes tecnologías:

Sólo se obtuvo un p valor significativo para computación en la nube ( $p$  valor=0,0358), para internet de las cosas ( $p$  valor=0,0145) y para manufactura aditiva ( $p$  valor=0,00001378). Para estas tres tecnologías el test indica que las diferencias observadas tienen que ver con la ingeniería elegida y no son al azar. Lo primero que llama la atención es que en varias tecnologías no parece haber diferencias en el nivel de conocimiento que poseen los estudiantes de distintas ingenierías, cuando uno tendería a pensar que los estudiantes de Ingeniería en sistemas deberían estar mucho más familiarizados, Y en lo que respecta a los núcleos en los que hubo diferencias significativas, los estudiantes de Ingeniería mecánica parecen tener más información en la manufactura aditiva que los de Ingeniería en sistemas. Todas estas cuestiones nos dan una primera impresión de cómo la universidad está gestionando esta transformación tecnológica, que exige con más celeridad una adaptación curricular.



### 3.3 Percepción de los estudiantes de Ingeniería Mecánica de su formación en las competencias requeridas por las tecnologías 4.0

En esta presentación nos interesa mostrar la concepción de los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la UTN.BA sobre su formación en competencias blandas, — sociales, políticas y actitudinales—, señaladas en el Libro Rojo del CONFEDI.

La encuesta, como se dijo antes, también contenía preguntas con respuestas abiertas. Es de destacar la buena disposición de los alumnos para responderlas, en particular, teniendo en cuenta que este tipo de consignas se caracteriza por ofrecer información para el análisis cualitativo dado que el encuestado testimonia en sus respuestas actitudes, sentimientos y valores que permiten enriquecer la comprensión de los aportes cuantificables. A modo de ejemplo, se transcriben algunas respuestas cuyo contenido expresa una concepción compartida por los encuestados. En este caso son opiniones respecto del interés personal en ampliar su conocimiento de las tecnologías 4.0.

“Considero que tener conocimientos en esta área es importante para comprender los entornos laborales de hoy en día. Desde el punto de vista técnico es un área con una gran oportunidad de desarrollo profesional.”

“Trato de mantener un régimen de constante aprendizaje para mejorar mis habilidades y así tener mejores oportunidades laborales”.

“Me interesa por tratarse de la industria del "mañana". Es actualizarse a lo que está sucediendo ahora y a lo que se viene en las futuras generaciones tecnológicas.”

“Creo que a la carrera de Ing. Mecánica le vendría bien (o se beneficiaría) de cualquier agregado de materias que tengan que ver con nuevas tecnologías empleadas en la actualidad, que se relacionan a la informática, a los datos, a la electrónica, a la automatización y a la gestión en general.”

“Porque es el presente en los países desarrollados, será el futuro cercano en el nuestro.”

Estas respuestas denotan interés por ampliar el conocimiento de las tecnologías como medio para la inserción laboral. La perspectiva de futuro que expresan se corresponde con una valoración positiva del aprendizaje continuo y la responsabilidad individual en el diseño de su desarrollo profesional. Además expresan su preocupación social y política cuando abordan la relación de la tecnología con el desarrollo del país. Al mismo tiempo, es posible inferir que los estudiantes perciben que en la formación actual no están suficientemente trabajadas estas tecnologías innovadoras, opinión que implica una demanda al currículum de la carrera. Esta



demanda es coincidente con el planteo del CONFEDI en la necesidad de desarrollar las competencias genéricas: sociales, políticas y actitudinales.

#### 4. CONCLUSIONES

En esta presentación se da cuenta de los resultados teóricos y de campo alcanzados en este primer tramo de la investigación que se realiza en la UTN.BA. Aunque se inició en abril de 2023, su grado de avance se debe a la experiencia del equipo interdisciplinario que la realiza, el que cuenta con más de veinte años en el estudio de la enseñanza de la Ingeniería. El proyecto actual surgió como continuidad del finalizado en 2022 y profundiza el conocimiento de la incidencia de las actuales innovaciones tecnológicas en nuestro país y en la educación de los ingenieros.

En la enseñanza de la ingeniería es significativo acercar al estudiante la caracterización de las tecnologías 4.0 y de la disrupción que provoca su abrupta incorporación al sistema productivo. El estudio empírico muestra el escaso conocimiento que tienen los estudiantes de este proceso, condición que no es exclusiva de los de Ingeniería Mecánica como surge, en el análisis cuantitativo, de la comparación con los de Ingeniería en Sistemas.

Los testimonios reveladores de expectativas, sentimientos y valores de los estudiantes —expresados en el relevamiento cualitativo— muestran su cercanía con las propuestas del CONFEDI respecto de la formación de competencias genéricas sociales, políticas y actitudinales.

Queda por delante la tarea de avanzar en esta exploración con la finalidad de contribuir a la mejora continua de la enseñanza de la ingeniería en la convicción de que en estos profesionales se juega una dimensión fundamental para el desarrollo de la Argentina.

#### REFERENCIAS

[1] Castel, R.. *El ascenso de las incertidumbres. Trabajo, protecciones, estatuto del individuo*. FCE. Argentina. 2012

[2] Castells, M. *La Era de la Información*. Alianza. Madrid.1996

[3] Pérez, C.. *Cambio tecnológico y oportunidades de desarrollo como blanco móvil*. Revista de la CEPAL

<https://www.flacsoandes.edu.ec/agora/cambio-tecnologico-y-oportunidades-de-desarrollo-como-blanco-movil>. 2010. (Recuperado 06/2020)



- [4] Schwab, K.. *La cuarta revolución industrial*. Penguin Random House. Grupo Editorial. Barcelona. 2021
- [5] Brynjolfsson, E. McAfee, A.. *La segunda era de las máquinas. Trabajo, progreso y prosperidad en una época de brillantes tecnologías*. Ed. Temas. Argentina. 2016.
- [6] Albreu, R. *A la revolución hay que hacerla. El futuro del trabajo en Argentina frente a la cuarta revolución industrial*.  
<https://www.cippec.org/publicacion/a-la-revolucion-hay-que-hacerla-el-futuro-del-trabajo-en-argentina/> 2021 (Recuperado 04/2022)
- [7] CIPPEC. *Travesía 4.0. Hacia la transformación industrial argentina*.  
<https://www.cippec.org/publicacion/travesia-4-0-hacia-la-transformacion-industrial-argentina/>  
2019. (Recuperado 10/2019)
- [8] Pérez, C. *Revoluciones tecnológicas, cambios en estilos de vida y desarrollo industrial sustentable en América Latina post-covid-19*. Agosto 2020. Webinar ONUDI-Lalics. Enlace al evento completo: <https://youtu.be/nmEfgcsAH4o> (Recuperado 03/2022)
- [9] CONFEDI. *Propuesta de Estándares de Segunda Generación para la Acreditación de Carreras de Ingeniería en la República Argentina*. Consejo Federal de Decanos de Ingeniería, Argentina.2018  
[https://confedi.org.ar/download/documentos\\_confedi/LIBRO-ROJO-DE-CONFEDI-Estandares-de-Segunda-Generacion-para-Ingenieria-2018-VFPublicada.pdf](https://confedi.org.ar/download/documentos_confedi/LIBRO-ROJO-DE-CONFEDI-Estandares-de-Segunda-Generacion-para-Ingenieria-2018-VFPublicada.pdf) (Recuperado 07/2019)
- [10] WorldEconomicForum. *Las habilidades transversales: el eje de la nueva educación para el empleo del futuro*.  
<https://www.weforum.org/es/agenda/2018/05/las-habilidades-transversales-el-eje-de-la-nueva-educacion-para-el-empleo-del-futuro> (Recuperado 05/2019)



## DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA ORIENTADA AL CONOCIMIENTO DE PROBLEMAS AMBIENTALES DE LA REGIÓN Y DESARROLLO SOSTENIBLE EN ALUMNOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

Vanina Mazzieri<sup>1,4</sup>, Mauren Fuentes Mora<sup>2,4</sup>, Maximiliano Schiappa Pietra<sup>4</sup>, Carlos Córdoba<sup>3,4</sup> y María Amparo Sánchez<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica INCAPE (CONICET- UNL), Colectora Ruta Nacional 168 Km 0, Predio CONICET, Santa Fe, Argentina

<sup>2</sup>Instituto de Desarrollo y Diseño INGAR (CONICET-UTN), Avellaneda 3657, Santa Fe, Argentina

<sup>3</sup>Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química INTEC (CONICET- UNL), Güemes 3450, Santa Fe, Argentina

<sup>4</sup>UDB Química, Departamento de Materias Básicas, Facultad Regional Santa Fe, UTN, Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina

([vmazzieri@frsf.utn.edu.ar](mailto:vmazzieri@frsf.utn.edu.ar), [mfuentes@frsf.utn.edu.ar](mailto:mfuentes@frsf.utn.edu.ar), [mpietra@frsf.utn.edu.ar](mailto:mpietra@frsf.utn.edu.ar), [cacordoba@frsf.utn.edu.ar](mailto:cacordoba@frsf.utn.edu.ar), [masanchez@frsf.utn.edu.ar](mailto:masanchez@frsf.utn.edu.ar))

### RESUMEN

La problemática ambiental ocupa cada vez más la agenda de todos los países. El deterioro de los suelos, la contaminación del agua y del aire, la inadecuada explotación agrícola y forestal, la desaparición de especies, la pobreza en que vive la población, son algunos de los problemas que enfrenta la sociedad; por lo que se hace necesario fomentar conciencia medioambiental, que consiste en la práctica y promoción de actitudes responsables con el medio ambiente.

El crecimiento económico sin sustentabilidad ambiental y equidad social destruye y agota los recursos naturales, degrada el ambiente, la calidad de vida y genera procesos poco solidarios de distribución de la riqueza. El reconocimiento de esta situación ha conducido a plantear el "desarrollo sostenible" como forma de desarrollo capaz de enfrentar exitosamente los problemas ambientales. El objetivo de este trabajo es contribuir, mediante una actividad complementaria no presencial, a que los estudiantes de Ingeniería Mecánica de nuestra facultad tomen conciencia sobre esta problemática, interpreten la influencia de la Química en el ambiente y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La propuesta consistió en investigar y realizar una presentación grupal (video) donde los alumnos expresaran su interés y conocimiento sobre algunas de las problemáticas de la agenda ambiental de nuestra Región. Los videos se compartieron en la plataforma Microsoft Teams para acceso de todos los estudiantes, se realizó una heteroevaluación por parte de los docentes en base a distintos criterios: contenido, calidad de información, dinámica de la presentación, dicción, recursos gráficos, uso de tecnología, entre otros; de manera de crear competencias tecnológicas de egreso, acordadas por el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI), entre ellas: desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo, comunicarse con efectividad, actuar con espíritu innovador y creativo, y actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social.

**Palabras Clave:** *Problemática Ambiental; Actividad Complementaria; Competencias; Heteroevaluación.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales son los efectos nocivos sobre el ecosistema que se desprenden de las distintas actividades humanas, generalmente como consecuencias indeseadas y más o menos accidentales.

Cuando este tipo de problemas no se corrigen a tiempo, ocasionan un cambio impredecible en el medio ambiente que suele traducirse en desastres medioambientales, esto es, situaciones trágicas y catastróficas que involucran (y provienen de) el deterioro del medio ambiente, por ejemplo: deforestación por tala indiscriminada de árboles y áreas verdes, contaminación del agua, la tierra y el aire, calentamiento global y pérdida de biodiversidad [1].

Los problemas ambientales son uno de los principales desafíos del mundo industrializado, cuya continua producción de bienes de consumo requiere igualmente el continuo ingreso de materias primas, extraídas directamente de la naturaleza. En ese sentido, el impacto que la Revolución Industrial y el modo de vida urbano ha tenido sobre el ecosistema global ha significado cambios mucho más vertiginosos que en el resto de la historia de la humanidad.

Los gobiernos juegan una función muy importante en la formulación de políticas que conlleven a una reducción de la contaminación y a la conservación de los recursos naturales y el ambiente. Algunos plantean como solución a los problemas ambientales un absoluto rechazo a la industrialización, por lo que significa detener el crecimiento económico de los países. Sin embargo, dicha solución no parece ser la más acertada, pues ésta no sólo frena el crecimiento sino el desarrollo productivo de los pueblos y acentúa la pobreza, provocando, incluso, una mayor presión sobre el uso de los recursos naturales por parte de la gente de escasos medios de subsistencia. Otros, plantean que la solución a los problemas ambientales pasa por la aplicación de tecnologías apropiadas y el establecimiento de un eficaz y eficiente marco jurídico, que conlleve al uso y aprovechamiento racional de los recursos naturales en la perspectiva del "desarrollo sostenible" [2].

El crecimiento económico sin sustentabilidad ambiental y equidad social destruye y agota los recursos naturales, degrada el ambiente y la calidad de vida y genera procesos poco solidarios de distribución de la riqueza. El reconocimiento de esta situación por la conciencia mundial ha conducido a plantear el "desarrollo sostenible" como estilo o forma de desarrollo capaz de enfrentar exitosamente los problemas ambientales.

Estos conceptos relacionados con el ambiente son introducidos en el curso de Química General a través de una propuesta integradora (actividad complementaria no presencial, ACNP) donde



los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la FRSF- UTN deben investigar y expresar su interés y conocimiento acerca de diferentes problemáticas ambientales de la Región; acercándolos a una realidad que es inherente al perfil profesional, con el objetivo de desarrollar competencias tecnológicas de egreso acordadas por el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) [3], entre ellas: desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo, comunicarse con efectividad, actuar con espíritu innovador y creativo, y actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social. Una persona es competente cuando puede integrarse en una tarea con los demás; es decir, aprender a ser competente es formarse en la concepción personal, cultural y socio-laboral; por tanto, la formación basada en competencias no puede referirse a la competitividad de quien sólo se forma competentemente para tener mayor poder o dominar sobre los otros, sino formarse competentemente para hacer el bien de manera cooperativa [4].

## 2. METODOLOGÍA

Como consigna de la ACNP se les solicitó a los estudiantes, organizados en grupos de tres a cuatro personas, investigar y realizar una presentación (video de 5 a 6 minutos de duración) donde expresaran su conocimiento sobre algunas de las problemáticas de la agenda ambiental, incluidos aspectos como: legislación, prácticas, proyectos, organizaciones y posibles soluciones.

Inicialmente la presentación debía contener información sobre el título del trabajo, los miembros del grupo, carrera y comisión; seguida de una introducción al tema, un desarrollo con los principales aspectos de la problemática investigada; y finalmente, un apartado con las conclusiones, recomendaciones y/o sugerencias acerca del trabajo realizado. En el trabajo se debían mencionar las principales fuentes y referencias consultadas. Se podía usar la herramienta audiovisual que fuera de su agrado, sumar fotos, música, testimonios, todo lo que sume al mensaje que se desee transmitir y en un contexto adecuado.

Para diversificar el análisis, se previeron diversos temas a investigar:

1. Contaminación del agua con efluentes industriales.
2. Contaminación del agua y el suelo con agroquímicos.
3. Descenso del agua de la laguna Setúbal: causas y efectos.
4. Quema de pastizales: efectos sobre la flora y la fauna.
5. Gestión de residuos sólidos urbanos.
6. Inadecuada explotación agrícola y forestal.
7. Acceso al agua potable y servicio de desagües cloacales.

Los estudiantes subieron los videos (Figura 1) al aula virtual del Campus en la sección “Problemática ambiental y desarrollo sustentable”, y al espacio del Microsoft Teams del mismo título (Figura 2), donde estuvieron a disposición de todos los estudiantes, con el objetivo de que pudieran realizar una coevaluación entre pares, de forma respetuosa y constructiva.



Figura 1. Algunos videos realizados por los alumnos.

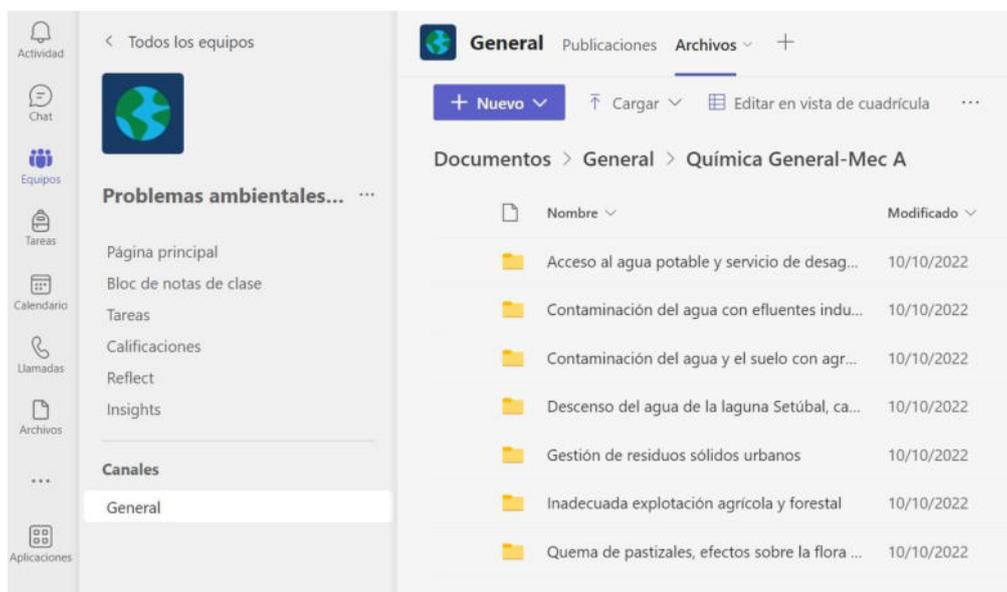


Figura 2. Aula Virtual bajo entorno Microsoft TEAMS.



Los docentes debieron realizar una heteroevaluación con retroalimentación de las presentaciones teniendo en cuenta aspectos como: originalidad, adecuación del tema desarrollado, profundidad de la investigación, análisis de referencias bibliográficas y otras fuentes, uso de recursos informáticos y de comunicación. Según Tobón et al. *“El estudiante debe tener claridad acerca de sus logros, aspectos a mejorar, puntaje y nivel de dominio de las competencias que se pretenden evaluar para que de esta manera se involucre en un proceso de mejoramiento continuo”* [5].

A continuación se establecen los criterios cualitativos usados para evaluar los trabajos, teniendo en cuenta que la actividad no requería ser calificada:

Regular (R): Sólo cumple parcialmente con la consigna o atributo, está bien orientado, pero no alcanza un nivel satisfactorio.

Bueno (B): Se aborda la cuestión clave, alcanza un nivel satisfactorio, pero no va más allá de una estructura o contenidos mínimos.

Muy bueno (MB): Se produce un cambio cualitativo en el aprendizaje y en la comprensión. Se aborda la consigna o atributo con mayores recursos, dando luz a la contribución del tema en su conjunto.

Excelente (E): Se realiza la consigna o se usa el atributo en forma completa y trasciende ampliamente. Se conceptúa en un nivel superior de abstracción y se aplica a campos nuevos y más amplios.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 1 se resumen los resultados de la heteroevaluación realizada por los docentes a los 17 trabajos de ambas comisiones A (10 grupos) y B (7 grupos) de Ingeniería Mecánica. Como se puede observar, la mayoría de los trabajos cumple con la consigna en cuanto a contenido y calidad de la información, dinámica de la presentación, gramática y recursos gráficos. Se produjeron trabajos muy interesantes donde se deja ver la profundización y el interés en las temáticas abordadas, y las habilidades adquiridas en el uso de tecnologías de la información y comunicación (TIC).

Las imágenes incluidas en la Tabla 1 muestran de forma gráfica el porcentaje del nivel (excelente, muy bueno, bueno y regular) de las respuestas, atendiendo a los diversos aspectos evaluados. Entre las principales dificultades identificadas en la heteroevaluación se pueden mencionar la dificultad para adaptarse a la norma del tiempo y formato sugeridos para la presentación, la falta de precisión en normas gramaticales y ortográficas, la ausencia de



referencias o fuentes a partir de las cuales obtuvieron la información; y, en menor medida, dificultades para expresar un mensaje o recomendación para la solución de estos problemas.

Tabla 1. Resultados de la heteroevaluación de las presentaciones grupales

Código Trabajo/ Comisión	Tema	Tiempo (min)	Aspectos evaluados*					
			Contenido/ calidad de información	Dinámica de presentación/ dicción	Gramática/ ortografía	Recursos gráficos y tecnológicos	Mensaje/ recomendaciones/ conclusiones	Fuentes/ referencias
G1-CA	1	4:34	MB	B	MB	B	MB	MB
G2-CA	2	6:35	MB	B	MB	B	R	R
G3-CA	3	9:53	E	E	E	E	E	R
G4-CA	4	6:07	B	B	B	B	B	B
G5-CA	5	13:19	E	MB	B	MB	E	E
G6-CA	6	7:27	MB	MB	MB	MB	MB	B
G7_CA	6	8:03	B	B	MB	R	R	R
G8_CA	5	6:04	E	E	B	MB	E	B
G7_CA	7	5:09	MB	MB	MB	B	MB	B
G10_CA	7	8:28	MB	MB	MB	B	B	B
G1-CB	1	12:30	MB	MB	E	B	B	R
G2-CB	2	12:18	MB	B	MB	MB	MB	B
G3-CB	3	6:38	E	E	E	E	E	R
G4-CB	4	6:33	MB	MB	MB	MB	E	B
G5-CB	5	6:18	E	B	B	B	B	B
G6-CB	6	7:09	MB	B	MB	B	MB	MB
G8_CB	1	PPT grabada	MB	B	MB	B	R	R

\*Regular (R), Bueno (B), Muy Bueno (MB), Excelente (E)

La idea es continuar con estas actividades sobre la problemática medioambiental, siendo un objetivo de la asignatura Química General. Se pretende anticipar recursos cognitivos para que los estudiantes superen estas dificultades que no hicieron posible una calidad óptima en las



presentaciones, y transversalizar el análisis desde la perspectiva de cada ingeniería, para favorecer el intercambio de experiencias y conocimientos y la participación de todos los estudiantes a través de talleres sobre estos temas.

En el siguiente link se puede acceder a los trabajos presentados por los estudiantes:

[Videos sobre problemas ambientales de la Región realizados por estudiantes de Ing. Mecánica](#)

En el espacio de M. Teams los estudiantes pudieron participar del análisis colectivo de los trabajos. A continuación, se reescriben algunos de los comentarios que forman parte de la crítica de pares:

- *“La situación del manejo de los residuos producidos por las industrias es un gran problema que requiere acciones desde las empresas. Desde mi punto de vista, las empresas deberían planear dónde van dichos residuos y generar tratamientos en la planta que estén aprobados por reglamentos, supervisados por técnicos en el tema u ordenanzas municipales que regulan dichas empresas. Además, se deberían realizar estudios del agua y del suelo para evitar posibles contaminaciones de las que no se esté enterado, como también realizar estudios de impacto ambiental”.*

- *“Las imágenes hablan por sí solas y ayudan a tomar consciencia de las consecuencias que trae la quema de pastizales”.*

- *“Muy interesante y completo el trabajo sobre la explotación de recursos forestales y agrícolas, y las consecuencias que generan para el medio ambiente. Muy buenas las sugerencias para mitigar el impacto y gracias por el aporte en cuanto a fuentes para continuar investigando sobre este tema”.*

Tanto los comentarios de pares como la retroalimentación realizada por los docentes en el ámbito de M. Teams lograron generar un ambiente propicio para el análisis de los trabajos. Específicamente, la retroalimentación se trató de sugerencias sobre aspectos de forma y contenido, siempre a través de comentarios constructivos y alentadores para favorecer la autoestima de los estudiantes. Esta experiencia contribuyó a desarrollar las competencias genéricas de egreso anteriormente mencionadas.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se mostraron los resultados de la heteroevaluación realizada a 17 presentaciones grupales realizadas por estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica de la FRSF-UTN sobre problemáticas ambientales de la Región. Se determinó un alto nivel de concientización y responsabilidad por parte de los estudiantes, la mayoría de los trabajos cumple



con la consigna en cuanto a contenido y calidad de información, y uso de TIC. Las principales dificultades detectadas estuvieron relacionadas con aspectos de formato, la ausencia de referencias y fuentes de información, y en algunos casos, no lograr transmitir un mensaje o recomendación para el abordaje y resolución de estas problemáticas, cuestiones que deberán ser revisadas y anticipadas por los docentes en próximas propuestas. Además de formar competencias genéricas en los estudiantes, es interés del grupo de investigación docente lograr un acercamiento de la experiencia al perfil de cada carrera, para que se logren identificar causas y consecuencias desde la práctica laboral, y relacionar la actividad profesional con lo que acontece.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional, y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, para realizar y financiar esta investigación.

### REFERENCIAS

- [1] Uribe Botero, E. *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*. Editorial CEPAL, Naciones Unidas. Diciembre, 2015, Santiago de Chile
- [2] Leal, J. *Ecoeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias*. Editorial CEPAL, Naciones Unidas, (ISSN impreso 1564-4189, ISSN electrónico 1680-8886). Septiembre, 2015, Santiago de Chile.
- [3] CONFEDI. *Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la república argentina*. Editorial Universidad FASTA. Octubre, 2018, Mar del Plata, Argentina.
- [4] Tobón Tobón S. *Formación Integral de Competencias. Pensamiento complejo, currículo, didáctica y evaluación*. Editorial Eco, pág 61, 2010, Bogotá.
- [5] Tobón Tobón S, Pimiento P, García F. *Secuencias Didácticas: aprendizaje y evaluación de competencias*. Pearson Educación (ISBN 978-607-442-909-1), 2020, México.



## EL PERFIL DEL INGENIERO MECÁNICO EN TÉRMINOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE: LOS DOCENTES COMO FORMADORES A FORMAR

**Esp. Lic. Andrea Mejeras<sup>1</sup>, Dr. Ing. Gustavo Cazzola<sup>2</sup>, Esp. Ing. María Dolores Gómez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Departamento Académico de Mecánica – UTN Facultad Regional Gral. Pacheco, Av. Hipólito Yrigoyen 288, Tigre, Buenos Aires, Argentina- [amejeras@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:amejeras@docentes.frgp.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento Académico de Mecánica – UTN Facultad Regional Gral. Pacheco, Av. Hipólito Yrigoyen 288, Tigre, Buenos Aires, Argentina- [gcazzola@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:gcazzola@docentes.frgp.utn.edu.ar)

<sup>3</sup> Departamento Académico de Lic. en Org. Industrial – UTN Facultad Regional Gral. Pacheco, Av. Hipólito Yrigoyen 288, Tigre, Buenos Aires, Argentina- [mdolores@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:mdolores@docentes.frgp.utn.edu.ar)

### RESUMEN

La Asociación Iberoamericana de Enseñanza de la Ingeniería (ASIBEI) ha definido la interacción entre ingeniero, desarrollo y sociedad considerando la necesidad de establecer áreas transversales en el proceso de formación de los estudiantes universitarios: la enseñanza basada en competencias (EBC).

Las Naciones, en la ONU, firmaron el compromiso de trabajar en pos de un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza y las desigualdades, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todas las personas como parte de una hoja de ruta: la *Agenda 2030 para el desarrollo sostenible*. Los gobiernos, el sector privado, la sociedad civil y las instituciones educativas (en su responsabilidad como formadores profesionales) deben contribuir al logro de las metas de dicha Agenda.

No puede negarse, entonces, que en la formación basada en competencias (EBC) del ingeniero, en general, y del ingeniero mecánico, en particular, subyace la plataforma de las intenciones emanadas desde la Agenda 2030 de Naciones Unidas.

Si se observa, a nivel mundial, y faltando 7 años para que venza el plazo de buenas intenciones en sostenibilidad, podría afirmarse que no hay cambios relevantes en la cultura social de los países más que alguna acción tendiente a corregir algún daño ya generado o pretendiendo disminuir algún impacto no deseado.

Puede pensarse que no se registren resultados notorios pues no existe formación suficiente al respecto. Y, fundamentalmente, formación académica de aquellos que, tal como lo expresa su alcance profesional, deben ostentar un perfil de ingeniero que contemple dimensiones sociales, ambientales y económicas.

En el presente trabajo pretenden ponerse de manifiesto las acciones desarrolladas en UTN FRGP tendientes a la adecuación académica de las Cátedras y al acompañamiento institucional de sus docentes, en términos de formación de profesionales para el desarrollo sostenible.

Con esta adecuación se espera que los futuros profesionales adquieran *Responsabilidad Planetaria*.

**Palabras Clave:** *Desarrollo sostenible; Carreras de Ingeniería; Implementación Académica; Formación Docente*



## 1. INTRODUCCIÓN

En agosto de 2015, la Asociación Iberoamericana de Enseñanza de la Ingeniería (ASIBEI), como parte de los avances obtenidos dentro su Plan Estratégico (establecido en Valparaíso, Chile, en 2013) respecto del perfil del Ingeniero Iberoamericano, ha definido la interacción entre ingeniero, desarrollo y sociedad considerando la necesidad de establecer áreas transversales en el proceso de formación de los estudiantes universitarios [1]: la enseñanza basada en competencias (EBC).

Por otra parte, el 25 de septiembre de 2015, 193 Naciones firmaron el compromiso de trabajar en pos de un conjunto de 17 objetivos globales (en adelante ODS) y sus 169 metas (de carácter integrado e indivisible, de alcance mundial y de aplicación universal, que tienen en cuenta las diferentes realidades sociales, capacidades y niveles de desarrollo de cada país y respetan sus políticas y prioridades nacionales) para erradicar la pobreza y las desigualdades, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todas las personas como parte de una hoja de ruta: la *Agenda 2030 para el desarrollo sostenible* [2].

Los gobiernos, el sector privado, la sociedad civil y las instituciones educativas (en su responsabilidad como formadores profesionales) deben contribuir al logro de las metas de dicha Agenda.

Si reparamos en ambas propuestas (Plan Estratégico de ASIBEI y ODS de la ONU) vemos que existe una casi simultaneidad al momento de su presentación y se observa, por tanto, que en el ADN del perfil de ingeniero iberoamericano, cuya formación se sustenta en el enfoque de la enseñanza basada en competencias (EBC), subyace la plataforma de las intenciones emanadas desde la Agenda 2030.

Si se analiza objetivamente, a nivel mundial, cómo redundó el compromiso asumido por las naciones luego de la firma del acuerdo de la Agenda 2030 y, tras 7 años de este evento (y faltando 8 para el cumplimiento del plazo que permita sacar conclusiones sobre los resultados), podría afirmarse que no hay cambios relevantes en la cultura social de los países más que alguna acción tendiente a corregir algún daño ya generado o pretendiendo disminuir algún impacto no deseado (es más, la Unión Europea, actualmente, se está cuestionando sobre el *Green whashing* o engaño que subyace en las políticas empresariales, Institucionales y gubernamentales, que promueven una imagen de conciencia ecológica sin tomar medidas significativas para respaldarla) [3].

Es posible que no se registren resultados notorios pues no existe formación suficiente al respecto. Y, fundamentalmente, formación académica de aquellos que, tal como lo expresa su ADN profesional, deben ostentar un perfil de ingeniero que contemple dimensiones sociales, ambientales y económicas [4].



En la formación de profesionales, las Universidades (a través de sus Facultades) son las que acreditan el perfil del egresado y los Directivos de las Casas de Altos Estudios son quienes confían a los Docentes de la carrera la responsabilidad de formar a nuestros Ingenieros. Gran parte de ellos (tanto Directivos como Docentes) supone que con asignaturas que consideren la *disminución del impacto ambiental, el aprovechamiento de aguas* o la educación en *energías renovables*, ya estarían formando profesionales con bases en el desarrollo sostenible.

Ese es el problema: el profesorado cree conocer y/o saber cómo adecuar sus Cátedras para que los futuros ingenieros incorporen, se apropien y busquen que su labor futura se alinee con la Agenda 2030. La realidad nos muestra (a lo largo de nuestra labor) que se incurre en un tratamiento incompleto, desalineado y sin bases sólidas que mejoren los resultados de los indicadores considerados por Naciones Unidas.

## 2. MARCO TEÓRICO Y VÍNCULO

### 2.1. La ASIBEI y el perfil de egreso

En 2013 los representantes de Instituciones de enseñanza de la Ingeniería de Iberoamérica se reunieron en la ciudad de Valparaíso (Chile), en Asamblea General de ASIBEI, con la intención de definir y dejar expresado el perfil del Ingeniero Iberoamericano. Allí dejaron plasmada su *necesidad de contar con lineamientos comunes regionales en cuanto a las competencias genéricas de egreso a lograr en los ingenieros graduados en los países de Iberoamérica, que contribuyan a fortalecer un Espacio Común Iberoamericano de Educación en Ingeniería, que orienten los procesos de búsqueda y definición de los propios perfiles en cada país y que faciliten la integración regional y los acuerdos de movilidad e intercambio académico entre las universidades* [5].

En este contexto la ASIBEI resuelve que la formación del Ingeniero no sólo debe contemplar el saber sino, fundamentalmente, el “saber hacer” y esto debe promoverse a través de un proceso de aprendizaje donde la propuesta pedagógica considere un *complex*, un entramado complejo de habilidades que se vayan desarrollando a través de actividades didácticas cuidadosamente seleccionadas, consensuadas y organizadas por el cuerpo docente y la Dirección departamental a lo largo del proceso de formación profesional. De este modo, el perfil de egreso dotará del “saber hacer” al ingeniero novel si su Plan de Estudios se desarrolla sobre un enfoque basado en competencias (EBC); así es que, el profesional recién recibido contaría con las competencias profesionales iniciales y necesarias como punto de partida en su desarrollo profesional (requerido por la sociedad y el mundo laboral) [6].

Como la formación del Ingeniero basada en competencias permite el intercambio y la movilidad del estudiante durante el proceso, esto mismo favorece la integración a niveles nacional y



regional, promoviendo la generación de profesionales con visión superadora de su contexto próximo (entiéndase supranacional o transregional) pues el intercambio y movilidad académica son un valor en sí mismo dado que ponen al alcance de los alumnos (y docentes) el conocimiento de distintas realidades, tanto sociales como económico-ambientales, dentro y fuera de su entorno (más adelante esto se tomará como *Referencia A*).

En la declaración de Valparaíso (antes mencionada) se adoptan como compendio de las Competencias Genéricas de Egreso en el perfil del Ingeniero Iberoamericano lo que el CONFEDI presentara oportunamente: 10 competencias genéricas, complejas e integradas, vinculadas a saberes (teórico, contextual y procedimental), y en estrecha relación con el saber hacer (formal, empírico y que guarda relación entre sí), que están referidas al contexto profesional (actual y posible a futuro), que apuntan al desempeño profesional (la manera en que actúa un profesional técnicamente competente y socialmente comprometido) y que contempla la ética y los valores en el perfil del profesional que se busca formar [7].

Puestos a trabajar en pos de estos lineamientos, en agosto de 2015, y como avance del Plan Estratégico de formación del ingeniero iberoamericano, la ASIBEI presenta en el “Perfil del Ingeniero Iberoamericano”, entre otras definiciones, las dimensiones y componentes estratégicas, que habían sido definidas por la Asociación, expresando que, *el ingeniero iberoamericano debe ser un ingeniero global con compromiso y pertinencia local, con bases sólidas científicas, técnicas, tecnológicas, culturales, y con arraigados valores y principios, consciente de la importancia y significado de sus nexos con la historia y el desarrollo regional, fiel a sus compromisos sociales y ambientales, atento a la identificación de los problemas y oportunidades del entorno para actuar de manera responsable y competente en cualquier escenario nacional e internacional* [8] (más adelante esto se tomará como *Referencia B*). Sobre estas bases, el perfil de egreso se focaliza, fundamentalmente, en el proceso de transformación que la educación en ingeniería debe llevar a cabo en el estudiante promoviendo la generación de estrategias en los futuros profesionales que, ante diferentes escenarios eventuales y necesidades sociales del siglo XXI en cada país de la región, puedan influir con su capacidad negociadora en la sociedad en búsqueda del desarrollo económico y tecnológico, y en el fortalecimiento de su infraestructura material y moral.

Así es que se presentan cuatro dimensiones diferenciadas pero íntimamente relacionadas asociadas al ingeniero iberoamericano: Académica, Profesional, Social y Ambiental (ver Figura 1)

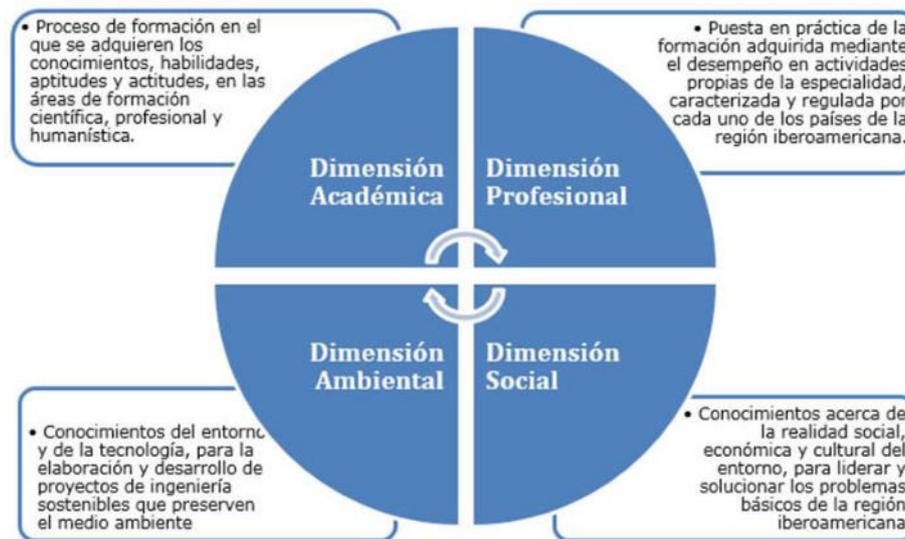


Figura 1: Dimensiones definidas para el Ingeniero Iberoamericano [8]

Queda expresado, entonces, que la relación entre ingeniero, desarrollo y sociedad considera un conjunto de aspectos económicos, sociales y ambientales que se encuentran directamente definidos en su perfil de egreso.

## 2.2. Los ODS y la Agenda 2030

Con la intención de mejorar las condiciones planetarias y sustentándose en, lo que podría referirse como las “cinco P” (planeta, personas, paz, progreso y alianzas -*partnership*, en inglés-), 193 Naciones firmaron en septiembre de 2015 un compromiso de transformación mundial conocido como *Agenda 2030 de la ONU sobre el Desarrollo Sostenible*. Allí se expresa un conjunto de 17 ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) en los que su cumplimiento y progreso se evidenciarán a través de la observancia de 169 metas asociadas a los distintos objetivos y los indicadores que a ellas refieran. Previo a este compromiso se habían puesto en marcha otras pautas de mejoras planetarias como, por ejemplo, la anterior: *La Declaración de los Objetivos para el Desarrollo del Milenio*, pautados para mejorar 8 aspectos evidenciados en objetivos referentes a la erradicación de la pobreza, la educación primaria universal, la igualdad entre los géneros, la mortalidad infantil, la mortalidad materna, el avance del VIH/sida y el sustento del medio ambiente y firmados en la ciudad de Nueva York por los integrantes de ONU para ser observados entre 2000-2015; una relectura y adecuación de los mismos dieron origen a los 17 ODS y sus metas presentes en el nuevo compromiso[9].



Sin intención de detenernos en la historia y la geopolítica que propiciaron el establecimiento y firma de esta nueva Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, si podemos hacer referencia a que este compromiso en marcha se pautó bajo el lema “no dejar a nadie atrás” [10].

Si bien los ODS son 17 y contemplan aspectos diversos e integrados que van desde poner fin a la pobreza hasta proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo, podrían agruparse en 3 (tres) dimensiones (ejes no excluyentes): ambiente, sociedad y economía (más adelante esto se tomará como *Referencia B*) (ver Figura 2).



**Figura 2.** Dimensiones de agrupación de los ODS (gráfico tomado del Diario oficial de la Unión Europea[11])

### 2.2.1 Algunos resultados de cumplimiento

Dentro de las posibilidades económicas y de desarrollo y de la logística de obtención, tratamiento y envío de datos de cada una de las Naciones firmantes, anualmente se elaboran informes respecto de la marcha de la Agenda 2030. Dichos informes expresan una descripción general del estado de avance en la implementación, el progreso y las necesidades de tomar, eventualmente algún tipo de medidas que mejoren los indicadores considerados contextualizados a la localización. Están elaborados por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, con aportaciones de las organizaciones internacionales y regionales, así como los fondos, los programas y los organismos del sistema de las Naciones Unidas [12].



En del informe 2021, algunos datos relevantes destacan los logros en el mundo en determinados ámbitos como la mejora de la salud materno infantil, la ampliación del acceso a la electricidad y el aumento de la representación de las mujeres en el Gobierno. Aun así, estos avances se han visto contrarrestados en todo el mundo por la creciente inseguridad alimentaria, las guerras actuales, el deterioro del entorno natural y las persistentes desigualdades socio-económico-culturales dominantes. Algo de esto atañe a la Ingeniería, y puesto en números:

- 119-124 millones de personas más cayeron en la pobreza extrema en 2020;
- Las personas con nutrición insuficiente en el mundo pasaron de 607 millones (2014) a 720-811 millones en 2020 (el rango tan amplio se debe a que, para algunos países, aportar datos se hace casi imposible por carecer de presupuesto para la obtención de estos);
- 2.370 millones de personas carecen de alimentos o no pueden llevar una dieta sana y balanceada de forma regular;
- más de 101 millones (el 9%) de niños del 1° al 8° grados cayó por debajo de los niveles mínimos de competencia lectora;
- 129 países no están al día para lograr recursos hídricos sostenibles para 2030; el ritmo actual de progreso debe duplicarse;
- Un tercio de la población mundial usa sistemas para cocinar peligrosos e ineficientes;
- Se necesitan acelerar las acciones para las energías renovables modernas especialmente en los sectores de calefacción y transporte;
- casi 300 millones (de los 520 millones de habitantes de zonas rurales) carecen de buen acceso a carreteras en 25 países;
- la proporción media mundial de superficie urbana destinada a calles y espacios públicos abiertos está por debajo de la meta;
- Solo la mitad de la población urbana del mundo tiene fácil acceso al transporte público;
- La "huella material" mundial aumentó en un 70% entre 2000 y 2017;
- Los residuos electrónicos siguen proliferando y no se eliminan de forma responsable (en 2000-2017 cada persona generó unos 7.3 kilogramos de residuos electrónicos pero sólo 1.7 kilogramos fueron reciclados);
- Sólo 25 de 154 países en desarrollo están formulando e implementando planes nacionales de adaptación al clima (seguridad y producción alimentaria, recursos de agua dulce, ecosistemas terrestres y de humedales, etc.);



- Las zonas oceánicas muertas (con insuficiente oxígeno para mantener la vida marina) aumentan a un ritmo alarmante (de 400 en 2008 a 700 en 2019);
- Casi la mitad de la población global – 3.700 millones de personas – todavía no tienen internet. [13]

### 2.3. Vínculo: Perfil del Ingeniero Iberoamericano y los ODS

Resulta claro que lo que la ONU pretende explicitar, al poner de manifiesto los 17 ODS, es la consideración ética y moral emanadas de los *derechos humanos*. Pero va más allá: el ambiente humano y el ambiente natural transitan y evolucionan juntos y en el devenir vemos que no podemos abordar adecuadamente la degradación que las acciones socioambientales producen (que afectan de un modo especial a los más débiles del planeta) sino a través de compromisos de esfuerzos que no se plasman en concreto ni se materializan con la simple adhesión que genera la firma de un tratado (y, a la vista está, que los resultados hasta el momento no son buenos ni alentadores).

La ecología cultural, el principio del bien común y la consideración de las generaciones futuras quedan manifestadas en la observación integral de ecología ambiental, económica y social (atravesadas por la necesidad de alianzas para el logro de objetivos) que surge de la Agenda 2030 y sus 17 ODS: exactamente lo que aparece al considerar las *referencias A y B* (expresadas más arriba) que emanan del Plan Estratégico de la ASIBEI para la formación del Ingeniero Iberoamericano.

La gran mayoría de la población desconoce la Agenda, sus alcances, metas y números; quienes creen entender algo al respecto, es probable que consideren que todo radica en revertir el cambio climático y/o desarrollar las energías renovables. Las acciones que se registran en industrias o estamentos gubernamentales son para intentar solucionar procesos ya en marcha o minimizar supuestos impactos no deseados. Y, como se mencionara anteriormente, el *greenwashing* empresarial ya no convence. Si no se educa en términos de los ODS, difícil es que los resultados que refieren a cumplimientos de metas mejore. Y qué situación más apropiada que educar en estos términos a quienes, en su perfil profesional, lleban impresas las dimensiones “ambiental, económica y social”: los futuros ingenieros.

Sobre esta necesidad y coincidencia dimensional deben desarrollarse los procesos de formación académica profesional en el marco del EBC y para ello se hace imperioso la capacitación dirigida a los Docentes de las carreras de Ingeniería.



### 3. METODOLOGÍA DE ABORDAJE DE LA CAPACITACIÓN PARA LLEVAR ADELANTE LA IMPLEMENTACIÓN ACADÉMICA

Entendemos que la implementación académica del Desarrollo sostenible en la formación del ingeniero no pasa por incorporar unidades temáticas que traten distintos ODS en particular en diversas materias (pues esto, en la mayoría de los casos, podría transformarse en “material de lectura obligatoria para cumplimentar necesidades del currículum de la materia”) sino, en desarrollar asignaturas que durante todo su tratamiento contemplen los ODS. Este proceso debe abordarse durante toda la carrera y, para ello, es menester centrarse en los Docentes y en las capacitaciones que ellos necesitan para afrontar el proceso que debe realizarse de modo jerarquizado, pautado, integral y con acompañamiento y orientación en la acción.

Para ello, en septiembre 2021, se definió un plan estratégico como política institucional en la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional General Pacheco al que, inmediatamente, se sumó el Departamento de Ingeniería Mecánica. El proceso requirió de:

- Decisión de las Autoridades Institucionales con aprobación del Consejo Directivo: para involucrar a la Facultad y desarrollar el Proyecto Académico de Formación del Ingeniero Iberoamericano en términos del Desarrollo Sostenible;
- Nombramiento del equipo de coordinación de implementación: para definir y pautar acciones, relevar datos del proceso, informar sobre avances, comunicar ajustes o adecuaciones y acompañar a los docentes involucrados en el proceso;
- Charla de sensibilización a los Directores de Departamento de Especialidad: a cargo del equipo de coordinación;
- Nombramiento de una pareja departamental como nexo con el equipo de coordinación: constituida por el Director/a de Departamento y un/a interlocutor/a por él/ella definido (de este modo, toda la información se canaliza entre el equipo de coordinación y este nexo departamental);
- Capacitación del plantel docente involucrado en términos de ODS: seminarios introductorios sobre el proyecto, charlas sobre implementación académica, etc.
- Definición de materias que llevarían a cabo la formación en Desarrollo Sostenible: se establecieron en modo voluntario (desde las intenciones docentes) dos asignaturas (como mínimo) por año de cursada en las que la currícula se trabajaría en términos de algunas metas de los ODS; cada una de estas asignaturas debe, incluso, indicar a los estudiantes la incorporación y justificación de METAS ODS en los trabajos de integración final de la materia (esto lleva al alumno, en el marco del EBC, a recorrer la página de la



ONU leyendo, buscando, e involucrándose aún más en su proceso de formación en términos de la Agenda 2030).

También el Proyecto Final de carrera debe realizarse en términos ODS: debe aparecer en la fundamentación inicial del Proyecto, en el modo en que se perseguirá la meta en cuestión (buscada dentro de los informes de resultados actualizados en los documentos que brinda la ONU a tal efecto) y en la justificación de tal alcance.

- Comunicación a los estudiantes del proyecto en el que estarían inmersos y de las intenciones de las características buscadas en el nuevo Perfil de Egreso.
- Soporte permanente de implementación: con orientación a cargo del equipo de coordinación cuando el Docente lo requiera.

### 3.1. Resultados de avance del proceso

No podemos informar en qué condiciones de formación se encuentran nuestros estudiantes respecto de la Agenda 2030 pues, hasta el momento, no hay ingenieros noveles formados en estos términos (la implementación académica transita su segundo año) de modo que su Perfil de Egreso ponga en evidencia una incorporación naturalizada de los ODS a su labor como Ingeniero y sus consecuencias. Sin embargo, si pueden mencionarse resultados preliminares observados respecto de la implementación del Proyecto Institucional:

- Gran interés de participación docente en las charlas de sensibilización inicial y seminarios de capacitación (con preguntas sobre el proceso de implementación):
  - a la primer charla (febrero 2022) asistieron 86 docentes (más de un tercio de la plantilla de 248 Docentes de Carreras de Grado);
  - posteriormente se realizaron reuniones (a pedido de los nexos departamentales) con Docentes de Especialidad en modo reducido;
  - a la capacitación de marzo 2023 asistieron 64 docentes en modo presencial y 25 en modo virtual.
- Más de dos asignaturas por nivel de curso decidieron desarrollar su currícula en términos del Desarrollo Sostenible;
- El Equipo de Coordinación fue invitado a distintas presentaciones de Proyectos Finales de Carrera para hacer la devolución respecto de la consideración de sostenibilidad de cada proyecto y del modo en que se plasmaba en el trabajo presentado (que luego sería subido al RIA -Repositorio Institucional Abierto, creado por la Ordenanza N° 1480 del Consejo Superior de la Universidad Tecnológica Nacional [14]-)



- Alineación de Proyectos de Investigación y Desarrollo (PID), Proyectos de Transferencia Tecnológica y Social (PDTs) y Proyectos de Investigación en Cátedra con reconocimiento Institucional (PRICT) con metas de los ODS.

#### 4. CONCLUSIONES

Si aceptamos que está en nuestras manos formar personas para las que el planeta, sus habitantes y las Instituciones que los administran signifiquen en términos del Desarrollo Sostenible será necesario atender a las necesidades de quienes tienen en su labor esta responsabilidad: los Docentes de las Carreras de Ingeniería.

La formación en Desarrollo Sostenible no la logra el trabajo en solitario de un docente con buena voluntad; tampoco la Facultad puede, sin más, pedir a sus docentes “formar en términos de los ODS” pues esto sería interpretado como una cuasi obligatoriedad que recaería sobre profesores que no saben qué, o no saben cómo o, simplemente, tienen una comprensión incompleta de las intenciones de la ONU.

Invitar a los formadores a conocer la Agenda 2030, lo que significa el proyecto y su vínculo directo con la acción ingenieril ha redundado en compromisos que, por voluntad y, ya con algún conocimiento, han conseguido que el profesorado empiece a involucrarse en la formación para el Desarrollo Sostenible: se ha franqueado la brecha entre la necesidad y el no saber cómo abordarla.

Recibimos a nuestros jóvenes con una lista de malestares no considerados, daños que se han provocado (adrede o no), posturas reduccionistas y descuidos que no contribuyen al ambiente ni a la sociedad ni a las Instituciones. Las generaciones que precedieron a nuestros alumnos no lo tuvieron en cuenta. Sin embargo sus docentes debemos ayudarlos a cambiar su modo de entender el entorno socioambiental para mejorar su región y, con ello, su país y su mundo.

No hay peor empresa que la que no se intenta y estamos convencidos de que, en este caso (como en tantos otros) es cuestión de aprendizaje: los futuros ingenieros deben formarse en términos de la Agenda 2030. Forma parte de sus competencias egreso y de las dimensiones de sus incumbencias profesionales enmarcadas por la ASIBEI en el perfil de egreso. Debemos involucrarnos en el proceso. Si damos la oportunidad a los formadores y los acompañamos a lo largo de la formación de nuestros jóvenes, los resultados del compromiso asumido ante la ONU pueden mejorar sus indicadores.

La Universidad debe ser eje del cambio. Formar al Ingeniero, en general, y al Ingeniero Mecánico Iberoamericano, en particular, no debe significar otorgar un título profesional que lo acredite sino, extender una credencial ética que lo certifique como “ciudadano con compromiso planetario”.



## REFERENCIAS

- [1] ASIBEI Homepage, <http://www.asibei.net/boletines/2015/agosto>, último acceso 10/04/23
- [2] CEPAL Homepage, <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible>, último acceso 10/04/23
- [3] Silvia Pérez Bou. EUROPA CONTRA EL GREENWASHING DE LAS MARCAS. THE CONVERSATION. Homepage <https://theconversation.com/europa-contra-el-greenwashing-de-las-marcas-202272>. 22 de marzo de 2023
- [4] op. Cit, [1]
- [5] ASIBEI Homepage, <http://www.asibei.net/boletines/2014/enero/index.html>, último acceso 25/04/22
- [6] A. Mejeras, G. Cazzola, J. Pérez Arrieu. "Avanzar hacia un curriculum por competencias: Acciones en el Departamento de Ingeniería Mecánica UTN FRGP". FP#649. LACCEI 2020 27 al 31 de Julio (Virtual Edition). Disponible en: <http://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/meta/FP649.html>
- [7] CONFEDI.. Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería. "Libro rojo de CONFEDI". Universidad FASTA Ediciones (2018).
- [8] op. Cit [1]
- [9] ANU-AR, Asociación para las Naciones Unidas para la República Argentina. Homepage, <https://www.anu-ar.org/notas/objetivos-de-desarrollo-del-milenio.html#:~:text=En%20la%20Declaraci%C3%B3n%20del%20Milenio,el%20sustento%20del%20medio%20ambiente>, último acceso 12/04/23
- [10] ONU. Homepage, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>, último acceso 12/04/23
- [11] Diario Oficial de la Unión Europea. Homepage, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019AE0917&from=EN>, última consulta 14/04/23
- [12] ONU. Homepage, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2021-Spanish.pdf>, último acceso 14/04/23
- [13] Op. Cit [12]
- [14] RIA. Homepage: <https://ria.utn.edu.ar/>



## Superando la inercia psicológica en el marco de la innovación sistemática de TRIZ: una experiencia de aprendizaje basado competencias en la formación del ingeniero

Ing. Juan Carlos Nishiyama <sup>1</sup>, Lic. Carlos Eduardo Requena <sup>1,2</sup>, Ing. Ricardo Marino <sup>1</sup> e Ing. Luciano Arbore <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento Académico de Ing. Mecánica – UTN Facultad Regional Pacheco  
Av. Hipólito Yrigoyen 288, Buenos Aires, Argentina- jcnishiyama@yahoo.com.ar.

<sup>2</sup>UCA-Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias. Alicia Moreau de Justo 1500.C1107AAZ, Buenos Aires, Argentina.

### RESUMEN

La inercia psicológica es un fenómeno que se manifiesta a nivel individual y organizacional, y se refiere a la tendencia a mantener patrones de pensamiento y comportamiento establecidos y a resistir el cambio. Esto puede dificultar la resolución de problemas y la innovación, ya que limita la capacidad de pensar de manera creativa y flexible.

La teoría de resolución de problemas de inventiva (TRIZ) es un método de solución de problemas que se basa en el análisis de patrones y leyes que subyacen en la historia del desarrollo tecnológico. Esta teoría propone un enfoque sistemático y metódico para romper la inercia psicológica y alcanzar soluciones creativas a los problemas.

Una de las herramientas clave de TRIZ es el análisis de contradicciones de parámetros ingenieriles, que permite identificar los obstáculos que impiden el progreso hacia una solución deseada y establecer una estrategia para superarlos. Además, TRIZ incluye un conjunto de principios inventivos que pueden utilizarse como guía para encontrar soluciones creativas a los problemas.

Para ilustrar cómo la inercia psicológica puede afectar el razonamiento y cómo las herramientas de TRIZ pueden ayudar a superarla, se pueden proporcionar ejemplos concretos de situaciones en las que se ha aplicado TRIZ para resolver problemas. Estos ejemplos pueden ser tanto propios como ajenos al ámbito de TRIZ, pero deben ser claros y relevantes para el lector.

**Palabras Clave:** *Inercia psicológica, Metodologías estructuradas, TRIZ, Enseñanza de la ingeniería, Innovación.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería es una disciplina vital que se centra en la solución de problemas que afectan a nuestra sociedad. Como expresó el ingeniero Marcelo A. Sobrevila, su objetivo principal es mejorar la calidad de vida de las personas, preservar el medio ambiente y promover la paz en lugar de la guerra. Para lograr esto, los ingenieros utilizan su creatividad y conocimientos técnicos para transformar y administrar los recursos naturales a su disposición, incluyendo los materiales y las formas de energía, y así encontrar soluciones innovadoras que marcan la diferencia.[1]

Una competencia de egreso común en las carreras de ingeniería es la capacidad de resolver problemas complejos. En este caso, una metodología estructurada; como el método TRIZ [2], puede ser enseñada para ayudar a los estudiantes a abordar problemas de manera más sistemática y encontrar soluciones innovadoras. Otra competencia de egreso común es la capacidad de trabajar en equipo.

Las metodologías son herramientas valiosas para desarrollar las competencias de egreso de los estudiantes de ingeniería, ya que pueden ayudarles a aplicar de manera efectiva los conocimientos y habilidades adquiridos en su carrera para resolver problemas y lograr objetivos (ver Figura 1) [3].



Figura 1: Educación basada en competencias

El fracaso y la inercia psicológica están estrechamente relacionados, ya que después de un fracaso, es común que las personas experimenten sentimientos negativos y una resistencia a cambiar sus patrones de pensamiento y comportamiento. Esto dificulta la capacidad de aprender del fracaso y adaptarse a nuevas situaciones o formas de hacer las cosas.

## 2. DESARROLLO

La creatividad y la innovación pueden ser obstaculizadas por la inercia psicológica, limitando la exploración de nuevas ideas y enfoques. Es esencial que los ingenieros aprendan a superar la inercia psicológica y desarrollen su capacidad para pensar creativa e innovadoramente a fin de lograr el éxito en su carrera [2].



## 2.1. Problemas Inventivos

En el ámbito de la ingeniería, la "inercia psicológica" (ver Figura 2) puede ser un obstáculo para encontrar soluciones efectivas a los problemas. A menudo, los ingenieros se basan únicamente en su experiencia previa y no consideran la exploración de tecnologías alternativas, lo que puede limitar su capacidad para generar nuevas soluciones innovadoras. Por ejemplo, un problema de aparente solución mecánica quizás pueda resolverse utilizando medios eléctricos y magnéticos, una solución fuera del alcance de su experiencia previa.



Figura 2: El problema de la inercia psicológica.

La innovación sistemática proporciona un marco estructurado para el análisis y la resolución de problemas, utilizando una serie de técnicas y herramientas que ayudan a analizar y resolver problemas de manera estructurada y creativa.

## 2.2. Breve historia de cómo se creó TRIZ

A finales de la década de 1940, el ingeniero ruso Altshuller creó TRIZ después de examinar cientos de miles de patentes en busca de problemas inventivos y sus soluciones. De las 200,000 patentes examinadas, solo 40,000 se consideraron inventivas, mientras que las demás eran mejoras rutinarias. A finales de los años 90, TRIZ se expandió por todo el mundo, primero en Israel, luego en los EE. UU., Europa, Asia oriental y América Latina, incluyendo países como México, Brasil y Chile.

## 2.3. Algunas Herramientas Clásicas de TRIZ

Altshuller y su equipo descubrieron que los inventores utilizaban sólo 39 parámetros de ingeniería en sus patentes, según su estudio. Estos parámetros se conocen como los "39 Parámetros de Ingeniería" y se muestran en la Tabla 1. Cuando se detectan parámetros en conflicto en un sistema tecnológico, se deben traducir a la terminología TRIZ para su posterior aplicación. También, de una lista de 40 principios de invención que son la deducción más directa. Esta lista, conocida como los "40 Principios de Inventiva", es una herramienta fundamental en TRIZ. Los principios se muestran en la Tabla 2 [4].



Tabla 1. 39 Parámetros de Ingeniería

1. Peso de un objeto móvil	20. Energía consumida por un objeto inmóvil
2. Peso de un objeto inmóvil	21. Potencia
3. Longitud de un objeto móvil	22. Desperdicio de energía
4. Longitud de un objeto inmóvil	23. Desperdicio de sustancia
5. Área de un objeto móvil	24. Pérdida de información
6. Área de objeto inmóvil	25. Perdida de tiempo
7. Volumen de objeto móvil	26. Cantidad de sustancia
8. Volumen de objeto inmóvil	27. Fiabilidad
9. Velocidad	28. Precisión de medida
10. Fuerza	29. Precisión de manufactura
11. Tensión, presión,	30. Factores nocivos que actúan en un objeto
12. Forma	31. Efectos nocivos
13. Estabilidad de un objeto	32. Manufacturabilidad
14. Fuerza	33. Conveniencia de uso
15. Durabilidad de un objeto móvil	34. Reparabilidad
16. Durabilidad de un objeto inmóvil	35. Adaptabilidad
17. Temperatura	36. Complejidad de un dispositivo
18. Brillo	37. Complejidad de control
19. Energía consumida por un objeto móvil	38. Nivel de automatización
	39. Productividad

Tabla 2. 40 Principios Inventivos

1. Segmentación	23. Retroalimentación
2. Extracción	24. Mediador
3. Calidad local	25. Autoservicio
4. Asimetría	26. Copiado
5. Combinación	27. Objeto barato de vida corta en vez de uno caro y durable
6. Universalidad	28. Reemplazo de sistemas mecánicos
7. Anidación	29. Uso de una construcción neumática o hidráulica
8. Contrapeso	30. Película flexible o membranas delgadas
9. Reacción previa	31. Uso de material poroso
10. Acción previa	32. Cambio de color
11. Amortiguamiento anticipado	33. Homogeneidad
12. Equipotencialidad	34. Restauración y regeneración de partes
13. Inversión	35. Transformación de los estados físicos y químicos de un objeto
14. Esferoidalidad	36. Transición de fase
15. Dinamicidad	37. Expansión térmica
16. Acción parcial o sobrepasada	38. Uso de oxidantes fuertes
17. Moviéndose a una nueva dimensión	39. Medio ambiente inerte
18. Vibración mecánica	40. Materiales compuestos
19. Acción periódica	
20. Continuidad de una acción útil	
21. Despachar rápidamente	
22. Convertir algo malo en un beneficio	

#### 2.4. Contradicciones Técnicas

Una Contradicción Técnica (CT) es una situación en la que queremos variar una característica de un sistema tecnológico y al hacerlo nos varía otra que no queremos que se modifique o que, en todo caso, se podría modificar en sentido contrario al que lo hace.

Para la resolución de contradicciones técnicas, se utiliza la "Matriz de Contradicciones Técnicas", que es una matriz de 39 por 39, y los 40 Principios Inventivos insertos estratégicamente en dicha matriz.

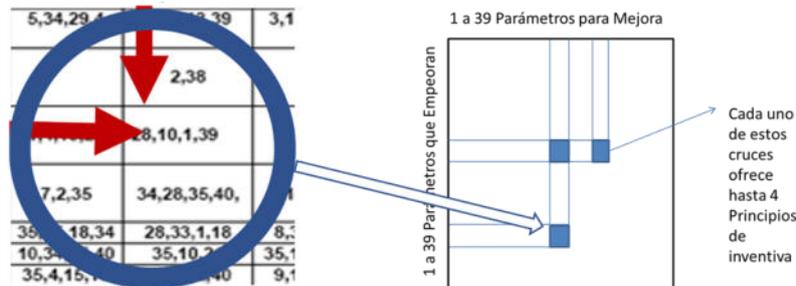
En la Tabla 3, se presenta solamente, por razones de espacio, una porción de la matriz de contradicciones técnicas [5].

La matriz de contradicciones es un cuadro de doble entrada, donde están listados los 39 parámetros de ingeniería de los sistemas técnicos y en el cruce de cada fila y columna se dan referencias a los tipos de soluciones que se pueden aplicar para variar una de las características, sin que varíe la otra. Las soluciones ofrecidas son los 40 principios de inventiva. El orden de los números se debe a que en ese mismo orden es que aparecen más patentes con el principio inventivo en que fue resuelto un problema con igual contradicción. Esto, conduce una línea de



razonamiento no para encontrar la solución, sino, alcanzar un espacio de soluciones conceptuales.

Tabla 3. Vista parcial y detalle de la Matriz de Contradicciones Técnicas



Las casillas de la matriz que quedan vacías corresponden a contradicciones técnicas que no se pueden dar o que no están resueltas y para esto último, TRIZ, tiene muchas más herramientas que por razones de extensión aquí no se expondrán [6].

TRIZ se inicia con un proceso que es abstracción, separando el problema de su contexto, y repetible pues ha demostrado ser exitoso en el pasado y reduce el tiempo, esfuerzo y presupuesto.

En el entorno educativo, se utiliza TRIZ organizando a los alumnos en grupos y se les presenta un enunciado que describe una situación problemática. Luego, ellos analizan los parámetros en conflicto, que limitan la mejora de un aspecto del sistema tecnológico al empeorar otro. Durante la actividad, los docentes de la asignatura supervisan y apoyan a cada grupo, brindando orientación sobre las dudas que puedan surgir en torno a la identificación de las contradicciones técnicas (CT) presentes en el conflicto planteado, dónde, al buen desempeño del parámetro se lo denomina Función Útil (FU) y al mal desempeño del otro parámetro se lo denomina Función Dañina (FD) [7]. Con esto se procede al armado de la Contradicción Técnica (CT) con sus dos Conflictos Tecnológicos (CT-1 y CT-2) [8]. Con estos elementos se construye el planteo de la CT en forma literal y gráfica (proforma). Así, se modeliza el problema tecnológico como una CT. En TRIZ existen otras formas de modelizar que, por motivos de espacio, no desarrollaremos aquí. Para las CT el modelo de solución es aplicar los principios de inventiva extraídos de la matriz de contradicciones. Esto es una de las competencias que, asistido por los docentes, desarrollan los alumnos. El modelo de proforma literal [9] es de la siguiente manera (Figura 4):

**CT-1:** SI, se aumenta el PARÁMETRO A (X) (MEJORA), ENTONCES, la PARÁMETRO DE CAMBIO (Y) aumenta (BUENO), PERO, los Daños PARÁMETRO B (Z) se intensifican (EMPEORA).

**CT-2:** SI, se disminuye el PARÁMETRO A (X) (EMPEORA), ENTONCES, la PARÁMETRO DE CAMBIO (Y) disminuye (MALO), PERO, los Daños PARÁMETRO B (Z) disminuyen (MEJORA).

Figura 4: Representación proforma literal de la CT con sus dos conflictos.

La Figura 5 muestra la representación proforma gráfica de la CT [8].

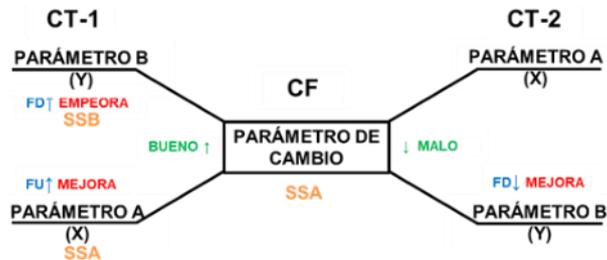


Figura 5: Representación proforma gráfica de la CT.

Como muestra la Figura 5 [9], al enfrentar la CT se busca aumentar la FU(↑) y disminuir la FD(↓) del sistema tecnológico, evitando la solución de compromiso que conduce a aumentar la FU(↑) incrementando la FD(↑) o disminuir la FD(↓) disminuyendo la FU(↓).

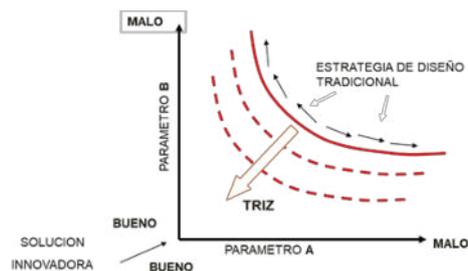


Figura 6: Gráfica de la CT dónde se muestra lo BUENO de FU↑ y BUENO de FD↓.

La necesidad de definir el Parámetro de Cambio se basa en la continuidad del análisis de modelización del problema posterior y que se realiza bajo el formato de los que se denomina Modelización por Contradicción Física (CF), tema de la unidad posterior del programa de la materia. Esta estrategia de trabajo promueve la continuidad del aprendizaje del alumno al enlazar una unidad temática con la siguiente.

Ejemplo de la retahíla de ejercicios: “El problema es que mi café está demasiado caliente para sostener. Se le pide que encuentre la Contradicción Técnica de este problema.” (Ver Figura 7).





Figura 7: Representación gráfica del ejemplo del problema de clase.

En el contexto de esta estrategia de aprendizaje de TRIZ, los alumnos son desafiados a identificar y analizar los parámetros en conflicto en un problema tecnológico dado. Es importante destacar que no todos los grupos de alumnos llegarán a las mismas conclusiones y, por lo tanto, deberán justificar y argumentar sus elecciones. En este caso, se presentará un ejemplo específico de un grupo de alumnos que identificó ciertos parámetros en conflicto.

Entre muchas interpretaciones y elecciones de parámetros, el alumnado puede elegir que el café está muy caliente (TEMPERATURA) pero así es agradable, sabroso (CONVENIENCIA DE USO). El inconveniente es que causa daño, quema los dedos (FACTORES PERJUDICIALES DEL OBJETO). Si estuviera frío sería cómodo de sostener el vasito en la mano, pero no sería rico el contenido, sin embargo, no causaría daño en la mano. Este planteo, ahora, se ordena bajo la estrategia de modelización del problema y se registra como una CT en la preforma literal (Ver Figura 8) y en la Figura 9 se muestra la preforma gráfica.

**CT-1:** Si, se aumenta la TEMPERATURA (17) (MEJORA), ENTONCES, la CONVENIENCIA DE USO (33) aumenta (BUENO), PERO, los FACTORES PERJUDICIALES DEL OBJETO (31) se intensifican (EMPEORA).

**CT-2:** Si, se disminuye el TEMPERATURA (17) (EMPEORA), ENTONCES, la CONVENIENCIA DE USO (33) disminuye (MALO), PERO, los FACTORES PERJUDICIALES DEL OBJETO (31) disminuyen (MEJORA).

Figura 8. Representación preforma literal de la CT del ejercicio del vasito de café muy caliente.

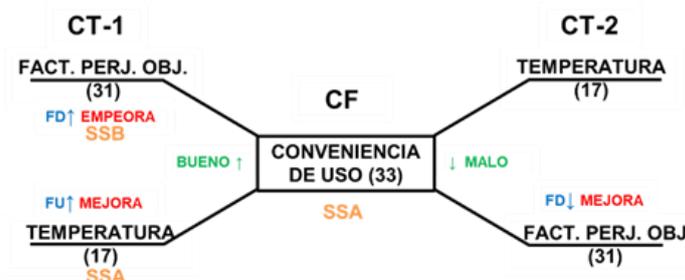


Figura 9: Representación preforma gráfica de la CT con sus dos conflictos del ejercicio del vasito de café muy caliente

Surge como una tarea adicional la identificación del Parámetro de Cambio, parámetro 33 en el caso particular de este ejercicio. Esto enlaza al tema de Contradicciones Físicas. A partir de este punto, el siguiente paso consiste en la exploración del espacio de soluciones mediante la aplicación del modelo de solución de la CT.



Podemos concluir que la metodología presentada se alinea con las directrices del "Libro Rojo de la CONFEDI", el cual se enfoca en el desarrollo de competencias para la resolución de problemas de ingeniería. [11]

## 2.5. Aplicación de las Taxonomías

La utilización de las taxonomías son un intento por plasmar lo que preferentemente se debe lograr en los estudiantes, en este caso una competencia genérica tecnológica referida a identificar, formular y resolver problemas de ingeniería. Con este mismo nivel alto autónomo [12], el estudiante de ingeniería es capaz de desarrollar un resultado de aprendizaje en el que demuestra las siguientes habilidades:

- Explica el problema tecnológico, incluyendo sus antecedentes y posibles consecuencias.
- Resuelve efectivamente las contradicciones en conflicto mediante TRIZ.
- Ejecuta las funciones de desempeño (FU y FD) alcanzando el mejor resultado posible.
- Planifica y diseña modelos de Contradicción Física (CF) de manera detallada y coherente.
- Elabora las Contradicciones Físicas (CF) con un enfoque innovador y efectivo.
- Articula el parámetro con valores opuestos, con el fin de identificar y solucionar problemas.
- Implementa una estrategia de trabajo estructurada para resolver el problema tecnológico.
- Modeliza utilizando las herramientas y técnicas adecuadas de la teoría TRIZ.

En el nivel alto autónomo, se espera que el estudiante sea capaz de comprender el problema tecnológico en profundidad, lo que corresponde al nivel de "análisis" en la taxonomía de Bloom [13]. Se espera que el estudiante sea capaz de resolver las contradicciones en conflicto, ejecutar las funciones de desempeño, planificar el modelo de contradicción física, diagnosticar el parámetro con valores opuestos, implementar una estrategia de trabajo y realizar el modelo tecnológico de análisis, lo que corresponde al nivel de "síntesis" y "evaluación" en la taxonomía de Bloom (ver Figura 10). La metodología TRIZ tiene una estrecha relación con la taxonomía socioformativa, ya que ambas buscan mejorar la capacidad de resolución de problemas de las personas y grupos. Al igual que la taxonomía socioformativa, promueve el uso de múltiples disciplinas y enfoques para abordar los problemas de manera creativa y flexible.

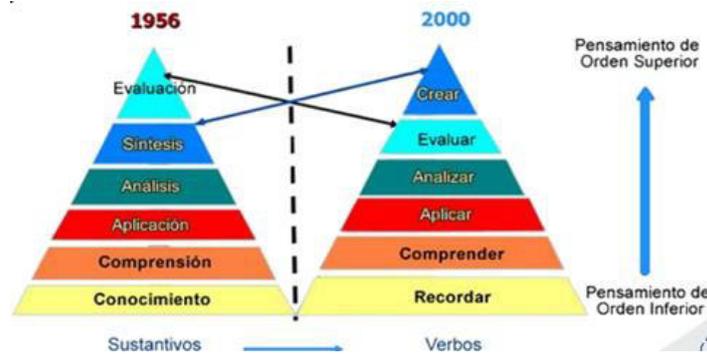


Figura 10: Representación gráfica de la Taxonomía de Bloom y su evolución en el tiempo

TRIZ se enfoca en la resolución de problemas tecnológicos, mientras que la taxonomía socioformativa tiene un enfoque más amplio en la mejora de la comunidad en general. En resumen, ambas metodologías comparten una visión transdisciplinaria y creativa en la formación y mejora de personas y grupos para resolver problemas complejos.

Se puede adaptar la metodología TRIZ para hacerla compatible con un enfoque centrado en el alumno en la educación. En lugar de centrarse solamente en la identificación de soluciones ideales y universales, se puede utilizar TRIZ como una herramienta para fomentar la creatividad y el pensamiento crítico en los estudiantes. Por ejemplo, los estudiantes pueden aplicar los principios de TRIZ para generar múltiples soluciones creativas a un problema determinado y luego realizar una evaluación crítica de cada una de ellas para determinar la mejor opción. De esta manera, TRIZ se convierte en una herramienta valiosa para la educación y el desarrollo de habilidades de resolución de problemas en los estudiantes.

En TRIZ los obstáculos son puntos de evolución y desarrollo [15]. Para los estudiantes los obstáculos son oportunidades para aprender y crecer en lugar de desalentarse y frustrarse.

## 2.6. Competencias de Egreso

El enfoque de formación con base en competencias significa darle al estudiante las herramientas necesarias para liderar su propio camino y enfrentar cualquier desafío que se le presente.[14]

En la carrera de ingeniería, la competencia de resolución de problemas es esencial y está estrechamente relacionada con la capacidad de superar la inercia psicológica y el fracaso. Los egresados de la carrera de ingeniería deben tener la habilidad de identificar estos obstáculos como oportunidades para el aprendizaje y lograr un reto motivante [15], y ser capaces de aplicar metodologías estructuradas como TRIZ para encontrar soluciones innovadoras a los problemas.

Los indicadores de logro para esta competencia incluyen la capacidad de identificar la inercia psicológica y el fracaso como oportunidades de aprendizaje e innovación. La capacidad de utilizar metodologías estructuradas como TRIZ para encontrar soluciones innovadoras a los



problemas, la habilidad de reflexionar sobre los fracasos y extraer lecciones valiosas para aplicar en futuros proyectos, y la capacidad de diseñar estrategias para superar la inercia psicológica y el fracaso en situaciones de alta presión y con recursos limitados.

Con esta competencia, los egresados de la carrera de ingeniería estarán equipados para enfrentar situaciones difíciles y desafiantes en su carrera profesional con una actitud positiva y proactiva. Además, estarán preparados para buscar soluciones innovadoras y creativas a los problemas y contribuir de manera significativa al campo de la ingeniería.

### **2.7. Resultado de Aprendizaje**

Al finalizar su formación en ingeniería, los estudiantes adquirirán la capacidad de identificar y aplicar herramientas de resiliencia y creatividad, tales como la metodología TRIZ, para superar la inercia psicológica y el fracaso en la resolución de problemas técnicos y sociales que se presenten en su entorno profesional.

El objetivo de aprendizaje es el desarrollo de la capacidad de superar la inercia psicológica y el fracaso, lo que les permitirá afrontar los retos y obstáculos de su carrera y vida profesional con una actitud resiliente y proactiva.

### **2.8. Actividad Formativa**

Objetivos: Desarrollar la capacidad de los estudiantes de ingeniería para superar la inercia psicológica y el fracaso mediante el análisis y la reflexión de casos reales. Fomentar la creatividad y la generación de ideas innovadoras para superar obstáculos y fracasos.

Descripción de la actividad: Los estudiantes trabajarán en equipos para analizar y reflexionar sobre un conjunto de casos reales de fracaso que han sido superados con éxito en diferentes ámbitos, como la ingeniería, los negocios y el deporte. Identificarán las estrategias y habilidades que permitieron superar el fracaso en cada caso y presentarán sus hallazgos a toda la clase para discusión grupal. Posteriormente, se les pedirá a los estudiantes que generen ideas innovadoras y creativas para enfrentar un problema o fracaso hipotético relacionado con su carrera y presenten sus propuestas a la clase.

Recursos necesarios: Espacio de trabajo para equipos y recursos (pizarra, proyector, etc.).

### **2.7. Resultado de Aprendizaje**

Al finalizar su formación en ingeniería, los estudiantes adquirirán la capacidad de identificar y aplicar herramientas de resiliencia y creatividad, tales como la metodología TRIZ, para superar la inercia psicológica y el fracaso en la resolución de problemas. Esta habilidad les permitirá



desarrollar soluciones innovadoras y eficientes para los desafíos técnicos y sociales que se presenten en su entorno profesional.

### 3. CONCLUSIONES

El uso de una metodología estructurada en la resolución de problemas y en la innovación sistemática aporta a las competencias de egreso de los estudiantes en las carreras de ingeniería de diversas maneras, incluyendo:

**Resolución de problemas:** Al enfrentarse a problemas complejos abordándolos de manera sistemática y hallando un conjunto de soluciones conceptuales.

**Innovación:** Identificar y solucionar problemas de manera innovadora al seguir un proceso sistemático que les permite generar ideas creativas y desarrollar soluciones nuevas y efectivas.

**Trabajo en equipo:** Se necesita la colaboración y comunicación constante para llevar a cabo el proceso de manera efectiva, desarrollando habilidades para trabajar en equipo.

**Eficiencia y efectividad:** El uso de una metodología estructurada ayuda a los ingenieros a ser más eficientes y efectivos en su trabajo, reduciendo el tiempo y los recursos necesarios para resolver problemas y generar soluciones innovadoras.

**Fomenta la creatividad:** La metodología TRIZ promueve la creatividad y la innovación al proporcionar un conjunto estructurado de herramientas y técnicas para generar soluciones creativas a problemas complejos.

**Mejora la calidad de las soluciones:** Se puede identificar rápidamente las mejores soluciones a los problemas, alcanzando soluciones de alta calidad superando las expectativas de los clientes.

**Reduce los tiempos de diseño:** Ayuda a reducir los tiempos de diseño y desarrollo de un proyecto, lo que es esencial para cumplir con los plazos y presupuestos del proyecto.

**Facilita la transferencia de conocimiento:** Se pueden desarrollar habilidades para transferir conocimientos de un área de ingeniería a otra, lo que es esencial para su éxito en su carrera.

China ha incluido esta metodología en su plan de formación de ingenieros. También en Europa y en Latinoamérica como el caso de México, Brasil, Chile. En Argentina, hay algunos cursos informativos sobre TRIZ. Es necesaria la creación de centros de formación en TRIZ como una forma de fomentar su aplicación en la educación y en el mundo laboral [16]. El potencial para desarrollar habilidades de pensamiento creativo e innovador es innegable.

### REFERENCIAS



- [1] Sobrevila, M. , *et al.* (1988). La profesión de ingeniero. Marymar. ISBN 978-950-553-167-7
- [2] Nishiyama, J. C., & Requena, C. E. (2019). Los 40 principios de inventiva de TRIZ: metodologías para el desarrollo de la creatividad en ingeniería ISBN 978-987-4998-11-8.
- [3] Jonina, R., Oget, D., & Audran, J. (2017). Teaching Competence for Organising Problem-Centred Teaching-Learning Process. In TRIZ–The Theory of Inventive Problem Solving (pp. 85-104). Chapter 4. Springer, Cham. ISBN 978-3-319-56592-7
- [4] EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA TRIZ. J. C. Nishiyama, T. Zagorodnova y C. E. Requena. V Congreso Argentino de Ingeniería (CADI 2021) – XI Congreso de Enseñanza de la Ingeniería (CAEDI 2021)- Virtual –Argentina. octubre 2021. ISBN 978-987-88-1872-6
- [5] [Maldonado, M. C., & Arzate, E. R. (2005). TRIZ, la metodología más moderna para inventar o innovar tecnológicamente de manera sistemática. Panorama Editorial. ISBN 968-38-1359-3
- [6] Bukhman, I. (2012). TRIZ technology for innovation. Cubic Creativity Company. ISBN 978-986-85635-2-0
- [7] Savransky, S. D. (2000). Engineering of creativity: Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving. CRC press. ISBN 0-8493-2255-3
- [8] Cameron, G. (2010). TRIZICS: Teach yourself TRIZ, how to invent, innovate and solve" impossible" technical problems systematically. ISBN 1456919892
- [9] Tablas y Datos para TRIZ. Publicación interna de la cátedra “Metodologías para el Desarrollo de la Creatividad en Ingeniería”. Nishiyama J. C., Marino R., Arbore L. y Requena C. 2019.
- [10] Nishiyama J. C., Arbore L., Marino R. y Requena C. Metodologías para el desarrollo de la Creatividad en Ingeniería. Manual de uso interno. UTN FRGP. 2018
- [11] Giordano Lerena, R., Cirimelo, S., & Consejo Federal de Decanos de Ingeniería-CONFEDI. (2018). Propuesta de Estándares de segunda generación para la acreditación de Carreras de Ingeniería en la República Argentina “Libro Rojo de CONFEDI”.
- [12] Sánchez-Contreras, M. L. (2019). Taxonomía socioformativa: Un referente para la didáctica y la evaluación. Forhum International Journal of Social Sciences and Humanities, 1(1), 100-115.
- [13] Churches, A. (2009). Taxonomía de Bloom para la era digital.
- [14] ASPECTOS BÁSICOS DE LA FORMACIÓN BASADA EN COMPETENCIAS Autor: Sergio Tobón Talca: Proyecto Mesesup, 2006
- [15] Serrano González-Tejero, J.M., & Pons Parra, R.M.(2011). El constructivismo hoy: enfoques constructivistas en educación. Revista electrónica de investigación educativa,13(1),1-27.



[16] Nishiyama, J. C., Marino, R., Arbore, L. N., & Requena, C. E. (2023). Problems in the Spreading of TRIZ in Argentina. In *TRIZ in Latin America: Case Studies* (pp. 129-154). Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-031-20560-6



## CRITERIOS DE DISEÑO DE PLAN DE ESTUDIOS DE TRANSICION DE LA CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

Sandra Robles<sup>1</sup>, Alberto Romeo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur  
Avenida Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, República Argentina - srobles@uns.edu.ar;  
apomeoing@gmail.com

<sup>2</sup>Facultad Regional Rosario - Universidad Tecnológica Nacional  
E. Zeballos 1341, 2000 Rosario, República Argentina

### RESUMEN

El presente trabajo se enmarca en la problemática de adaptación de los planes de estudios por competencias en la enseñanza universitaria, en particular en el campo de la Ingeniería Mecánica. Las resoluciones ME 1541/2021 y ME 1254/2018 anexo IX, establecen los nuevos estándares y las actividades reservadas al título de Ingeniero Mecánico. Los planes de estudio vigentes para la carrera de Ingeniería Mecánica, requieren ajustarse a estas resoluciones, así como a las normativas de la Dirección Nacional de Gestión Universitaria. Un nuevo y definitivo plan de estudios, requiere el tiempo para acreditar y obtener la correspondiente validez nacional, cuyos alcances cumplan con las nuevas normativas y actividades reservadas, por ello una alternativa es adaptar los planes estudio vigentes conformando una instancia transitoria, a fin de cumplir con los requisitos para la validez nacional del título.

En este contexto, es necesario realizar un diseño curricular de transición que contemple distintos aspectos, que hacen a la configuración del plan de estudios, como el sistema de ingreso, el perfil de egreso, los contenidos curriculares mínimos, la estructura curricular, la formación práctica, la carga horaria, las modalidades de evaluación, el modelo de enseñanza-aprendizaje, entre otros. El objetivo del trabajo es proponer criterios, que contemplen las relaciones de articulación entre estos aspectos, que conforman la estructura del diseño curricular de un plan de estudios, con un enfoque en competencias y un modelo de aprendizaje centrado en el estudiante. Los autores basan su propuesta en la evolución de las experiencias académicas de más de treinta años de docencia en la enseñanza superior en Ingeniería Mecánica.

**Palabras clave:** Plan de transición, ingeniería mecánica, criterios para el diseño curricular



## 1. INTRODUCCIÓN

Las resoluciones ME 1541/2021 [1] y ME 1254/2018 anexo IX [2], establecen los nuevos estándares y las actividades reservadas al título de Ingeniero Mecánico. Los planes de estudio vigentes para la carrera de Ingeniería Mecánica, requieren ajustarse a estas resoluciones, así como a las normativas de la Dirección Nacional de Gestión Universitaria [3]. En consecuencia, surge la necesidad de adecuar los diseños curriculares y adaptarlos a la enseñanza en competencias en la gestión de cada institución que dicte en particular, la carrera de Ingeniería Mecánica, con propuestas que contemplen distintos aspectos, que hacen a la configuración del plan de estudios, como el sistema de ingreso, los contenidos curriculares mínimos, la estructura curricular, la carga horaria, las modalidades de evaluación, el modelo de enseñanza-aprendizaje, el perfil de egreso del graduado. En oportunidad del período de acreditación por CONEAU de las Instituciones, se evalúa el plan de estudio de la carrera. Un nuevo y definitivo plan de estudios, requiere acreditar y obtener la correspondiente validez nacional, cuyos alcances cumplan con las nuevas normativas y actividades reservadas. Una alternativa, es adaptar diseños curriculares vigentes conformando una instancia transitoria, plan de transición, a fin de cumplir con los requisitos de la acreditación para la validez nacional del título.

El propósito de este trabajo, es destacar algunos criterios, que contemplen las relaciones de articulación entre los aspectos que conforman la estructura del diseño curricular de un plan de carrera, devenidos de la evolución de las experiencias académicas de más de treinta años de docencia de los autores, en la enseñanza superior en Ingeniería Mecánica, en cátedras específicas de la especialidad, y desde el año 2007 con aplicación de un enfoque en competencias y un modelo de aprendizaje centrado en el estudiante. Adicionalmente, de las reuniones académicas del Foro Docente del Área Mecánica de las Ingenierías (Fo.D.A.M.I.) con participación protagónica en las mismas, como así también en el Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (CAIM) que este Foro organiza conjuntamente con Instituciones Universitarias de prestigio y por ser integrantes desde su inicio de la Red Argentina de Ingeniería Mecánica (Fodamec).

## 2. ASPECTOS RELEVANTES EN EL DISEÑO CURRICULAR DE LA CARRERA

En este trabajo, se intenta destacar aquellos criterios que los autores estiman de interés tener en cuenta, para la configuración de un nuevo diseño curricular para la carrera de Ingeniería Mecánica, como plan de estudio de transición articulado con el plan vigente, a los efectos que en el curso de la acreditación pueda ratificarse o ajustarse el mismo, para obtener la validez nacional.



## 2.1. Objetivos y planificación Institucional

Las instituciones deben disponer de una planificación institucional indicando misión y objetivos, y la política educativa para el desarrollo de las actividades dentro del establecimiento, generado por las autoridades de las mismas. El criterio a sustentar, es que los autores de este artículo, estiman menester que las autoridades, deben difundir el proyecto institucional a los directores de carrera y/o comisión curricular que cumpla esa función, y transmitido, preferentemente por escrito, a los docentes. Es el documento origen que da soporte a los planes de estudios de las carreras que dicte la institución.

## 2.2. Actividades reservadas al título

Deben respetarse las aprobadas por la resolución ME 1254/2018 anexo IX [2] y utilizar las competencias asociadas como parte del análisis de los resultados del aprendizaje.

## 2.3. Perfil de egreso

El perfil del egresado está expresado en el plan vigente, el criterio es revisar y asegurar su adecuación a los nuevos estándares.

## 2.4. Alcances del título

El diseño curricular del nuevo plan de estudios, es pertinente a cada Institución que dicte la carrera. El criterio respecto de los alcances de título, debe ser concordar los mismos ajustados al desarrollo del plan de estudio de transición.

## 2.5. Requisitos de ingreso

En el informe de la Comisión Nacional de Mejoramiento de la Educación Superior (CNMES) de 2002, [4], se indicaba la necesidad de las universidades en actuar adaptando una nivelación para los aspirantes a ingresar a los estudios superiores, debido a la deficiente performance demostrada por los egresados de la enseñanza secundaria frente al ingreso a las universidades en esa época. Se debe señalar, que el principio de realidad actual, estaría mostrando que, aunque se debate mucho en jornadas, foros y congresos, se continúa sin encontrar solución satisfactoria a este tema. El criterio de los autores, es que debe incorporarse a los sistemas de ingreso, la investigación y la correspondiente metodología para favorecer la formación del aspirante en autogestión. En particular han presentado una propuesta innovadora en el VII CAIM /II CAIFE 2021 [5] y posteriormente un segundo trabajo, en las VIII Jornadas Nacionales y IV Jornadas Latinoamericanas (IPCEyT 2022) donde profundizaron la propuesta, y sugieren como tema para el proyecto integrador de investigación, un problema abierto de ingeniería, "Analizar qué instalaciones integran un Puerto Cerealero". "Si bien el análisis del problema se ejemplifica



para Ingeniería Mecánica, modificando las preguntas disparadoras guías, cabe su adaptación a otras ingenierías, como ser Ingeniería Industrial, contemplando aspectos de gestión y de logística, con Ingeniería Civil con foco en las instalaciones civiles, con Ingeniería Electromecánica a través del equipamiento afín que involucran dichas instalaciones y en el caso de Ingeniería Eléctrica el análisis de la acometida y distribución de la energía” [6].

## 2.6. Estructura del plan de estudio.

Se sostiene la adaptación a la estructura acordada del plan de estudio en los bloques: Ciencias Básicas, Tecnologías Básicas, Tecnologías Aplicadas y Complementarias, con la posibilidad de alejarse de una estructura lineal secuencial clásica, y articular descriptores de los bloques, en los distintos niveles.

Un criterio, que ha sido exitoso en la Universidad Tecnológica Nacional, es disponer un espacio curricular integrador en cada nivel que contemple el diseño del plan de estudios. La función del responsable de cátedra del espacio integrador, es la de articular con los responsables de las cátedras del nivel anterior, del mismo nivel y del próximo nivel, para acordar la mejor forma de impartir el dictado en forma coordinada entre los espacios curriculares.

## 2.7. Descriptores y carga horaria

El tiempo que demoran, quienes ingresan a estudiar Ingeniería Mecánica con el plan de duración nominal de cinco años, y un diseño del plan de estudio, que contempla entre 36 a 46 espacios curriculares, que corresponden a los descriptores establecidos dentro de la estructura curricular en las distintas instituciones, es una información relevante para el conjunto de actores y usuarios de la comunidad universitaria. Más relevante es el principio de realidad, que muestra la duración real en alcanzar la titulación por cohortes, que en general es mayor a la duración nominal. Los autores se propusieron corroborar o rectificar un estudio informal previo, por el cual observaron en distintas instituciones que los egresados en el transcurso de la carrera ingeniería mecánica, aprueban un promedio aproximado de (5) cinco exámenes finales por año. En consecuencia, se abocaron a un estudio estadístico con vistas a cuantificar, a través de la toma de datos evaluando promedios y un error factible  $\pm 5\%$ , respecto de la duración real para los egresados de Ingeniería Mecánica (I.M.), a cuyo efecto se trabajó con una muestra de 878 egresados de distintas Instituciones que dictan la carrera. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Se confirmó que la duración promedio desde el ingreso hasta la graduación es de 8,29 años, corroborando aproximadamente el dato de público conocimiento al respecto. Los datos recabados, se utilizaron además para observar que, independientemente de cual sea el espacio curricular, cada estudiante universitario aprueba en promedio  $5 \pm 5\%$  exámenes finales por año,



en el transcurso de la carrera, al menos en 9 de las más de 22 estudiadas. Si se amplía el rango del promedio a  $5 \pm 10$  % exámenes finales por año, se agregan 6 instituciones, y el promedio general, resulta 5,29. El estudio anterior muestra la necesidad de una reflexión, sobre las expectativas y el punto de vista la comunidad universitaria, respecto de la enseñanza de la ingeniería mecánica. Caben distintos recorridos posibles, que tienen que ver más con una postura Política Educativa a nivel país, que a una consideración específicamente académica: a) en el diseño curricular de duración nominal de cinco (5) años, si bien comprende compatibilizar la titulación y acreditaciones con Arcu-Sur y la posibilidad de titulaciones compartidas con Instituciones Extranjera, mayormente no refleja la situación real de los educandos b) Jerarquizar los estudios superiores tras la excelencia educativa para con los graduados de ingeniería mecánica, proponiendo un nuevo diseño curricular de seis (6) años, con visión específicamente académica, donde puede implementarse una articulación entre la enseñanza secundaria y la universidad, utilizando el primer año de desarrollo, a los efectos de la preparación y adaptación del ingresante a la vida y exigencias universitarias.

Tabla 1. Duración promedio en años y cantidad exámenes finales aprobados por año

Institución	Cantidad espacios curriculares	Horas totales plan	Cantidad egresados muestra	Duración promedio en años	Aprobadas por alumno por año
ITBA	46	-	13	6,88	6,69
UNMDP	43	4320	31	8,05	5,34
UBA	52	4858	8	9,25	5,62
UNCOMA	38	4415	21	8,25	4,61
UNLP (plan 2002)	46	3800	39	7,68	5,99
UNLZ	44	-	14	9,00	4,89
UNRC	44	3950	40	7,85	5,61
UNS (Plan 2006)	36	4040	39	8,10	4,44
UNT	45	4515	30	8,43	5,34
VARIAS UTN	43	5160	23	8,37	5,14
UTN FRBB	43	5160	65	8,41	5,11
UTN FRC	43	5160	25	8,78	4,90
UTN FRLP	43	5160	47	8,24	5,22
UTN FRRo	43	5160	88	9,34	4,60
UTN FRSF	43	5160	163	8,08	5,32
UTN FRSN	43	5160	35	8,79	4,89
UTN FRT	43	5160	70	8,63	4,98
UTN FRD	43	5160	40	8,35	5,15
UTN FRBA	43	5160	11	8,23	5,22
UNR (Plan 1998)	40	3736	46	8,65	4,62
UNR (Plan 2014)	49	4040	30	6,63	7,39
<b>Promedios</b>	<b>43,48</b>	-	<b>878</b>	<b>8,29</b>	<b>5,29</b>



Una encuesta realizada por los autores en el año 2018, para un trabajo con título: “Enseñanza-aprendizaje de componentes de máquinas”, con graduados de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, de la que participaron 108 graduados [7], se solicitaba año de ingreso y egreso; identificando plan 1994 de cinco (5) años, o anterior de (6) años, y se observó comparativamente, que mientras la duración real de la carrera estaba entre 9 y 10 años con el plan 1994 de cinco (5) años, los egresados de planes anteriores a 1994 con duración de carrera de seis (6) años mostraban una duración real entre 7 y 8 años.

Si se prioriza el recorrido a), el criterio en el diseño del plan de transición, dentro de la estructura del plan, se recomienda el desarrollo por semestre, impartiendo la totalidad de los espacios curriculares en todos los semestres y los espacios curriculares totales entre 30 y 34 dentro de los descriptores definidos, limitando el número de simultáneos a tres preferentemente, con alguno hasta cuatro por semestre, similar al criterio de la referencia [8]. Se entiende que este criterio, impactaría sobre la duración real de la carrera, dado que facilitaría acercar la duración nominal a la real, con educandos que aprueben entre 5 y  $5 \pm 5\%$  exámenes finales por año, que implicaría de 6 a 7 años de duración **promedio** de la carrera. Otro criterio de interés, es el de los espacios curriculares correlativos; para cursar una asignatura es necesario haber **aprobado** la correlativa anterior, en particular el criterio es refrendar el cumplimiento de los logros de resultados del aprendizaje. Se dice que la manera correcta de subir una escalera en forma segura, es escalón tras escalón. La experiencia de docentes ha mostrado, que en el caso de asignaturas anuales y correlativas “blandas”, es decir sólo haber “cursado” sin tener aprobada la anterior, provoca la ansiedad por avanzar en la carrera a los estudiantes, que acumulan asignaturas de la cual deben el examen final y deben atender las asignaturas que están cursando para regularizarlas, ocupándose de la realización de trabajos prácticos y la presentación de los informes, la asistencia a laboratorios si cabe y la resolución de problemas. ¿Puede un estudiante universitario “manejar” con soltura suficiente, 12 asignaturas por año, en el caso de anuales, y entre 6 á 8 en el caso de semestrales? ¿No será más efectivo que se concentre más tiempo en aprendizajes más específicos y menos diversificados? Por otra parte, teniendo en cuenta el aprendizaje centrado en el estudiante, en el trabajo de referencia [5].se muestra el análisis de las horas aplicadas al estudio de los mismos y la preocupación respecto de la “Organización del tiempo balance vida / estudio”. De priorizar el recorrido b), el criterio es similar en general, en cuanto a espacios curriculares por semestre, aunque se sugiere no más de tres simultáneos, repitiendo impartir los espacios curriculares en todos los semestres y no superar los 36 a 38 en el plan, previendo una duración real promedio de 7 años, pero posibilitando un mejor balance vida / estudio de los educandos con expectativas de mejores resultados académicos.



## **2.8. Competencias asociadas a las actividades reservadas, competencias genéricas y competencias específicas de los alcances de carrera por institución**

El título de Ingeniero Mecánico debe ser afín entre instituciones y responder al perfil del egresado definido por el CONFEDI. Las particularidades de cada una, se deben reflejar en los alcances del título que proponen. Deben concordar las competencias asociadas a las actividades reservadas, las competencias genéricas y las competencias específicas de los alcances por Institución donde se dicta la carrera [8]. El criterio que se propone, es generar las competencias de los alcances del título, como así también la forma para redactar los resultados del aprendizaje asociados, según lo expuesto en la publicación del Laboratorio MECEK, [9].

## **2.9. Resultados del aprendizaje y contenidos mínimos.**

Definidas las competencias contempladas para la carrera, deben redactarse los resultados del aprendizaje que corresponden asociados a las mismas. Una vez definidos los resultados del aprendizaje que deben satisfacer los graduados en el transcurso de la carrera, a partir de ellos deben determinarse los contenidos mínimos.

En esta instancia es importante la participación del Director de carrera y/o de la Comisión Curricular, de acuerdo a la estructura interna de la Institución, que deben convocar a los docentes responsables de cátedras para que brinden el apoyo correspondiente. Es de la recopilación y unificación de los resultados del aprendizaje que presenten los responsables de cátedra, y de la matriz de tributación, de donde deben conformarse los resultados del aprendizaje compatibilizados para la carrera en general. En este sentido y como colaboración, los autores de este trabajo, quienes son integrantes de la Red Fodamec desde su constitución en agosto de 2017, han difundido a los integrantes de la red, mayormente directores de carrera, un estudio sobre este tema, "Selección de contenidos a partir de resultados de aprendizaje" que fuera presentado en el VII CAIM / II CAIFE 2021 [10]. Es importante destacar que los planes vigentes de ingeniería Mecánica en general, están expresados en contenidos. El criterio a sustentar es que los bloques temáticos de los planes de transición, emerjan de los resultados del aprendizaje y en cuanto a los contenidos mínimos, que sean debatidos y conformados en la Red Fodamec.

## **2.10. Planificaciones de cátedras**

El criterio en este tema, es que cada institución debe prever y arbitrar los medios para proveer la capacitación y formación de los directores de carrera y de los docentes, estos últimos, para realizar adecuadamente las planificaciones de sus espacios curriculares en competencias y resultados del aprendizaje. La acción del Director de Carrera y/o de la Comisión Curricular de Carrera en el caso que corresponda, como coordinadores y con el apoyo de las autoridades académicas, tienen la importante tarea de organizar a los docentes y obtener los datos



necesarios de cada cátedra. El documento [11] puede ser utilizado como referencia para las planificaciones de cátedra. Por otro lado, se sugiere incorporar en la planificación la perspectiva de contactos virtuales de consulta en horarios establecidos entre educando y docentes.

### 2.11. Nuevas tecnologías educativas

Cualquiera sea el diseño de transición, el criterio más desafiante es **prever la incorporación gradual de las nuevas tecnologías educativas digitales, aplicadas a la enseñanza**, que podrían ser una realidad en las Universidades Argentinas dentro de los cinco a diez años próximos. El Ingeniero Irving Hidrogo Montemayor, director de Innovación con Tecnologías Emergentes en el Tecnológico de Monterrey, México, en una entrevista con un periodista del diario Clarín, expresa la incorporación de realidad virtual, realidad aumentada, metaverso entre otros, como técnicas digitales disruptivas y supone su paulatina implementación [12]. En Palo Alto, California, están utilizando en matemáticas en el nivel educativo secundario, un chatbot de inteligencia artificial (I.A.), como tutor de apoyo de autogestión a los educandos, dando cuenta del advenimiento en niveles educativos más avanzados de la I.A. y la transformación educativa emergente [13]. Por otra parte, en mayo de este año, la Universidad Nacional de Rosario, organizó un ciclo de cinco encuentros, “con el fin de reflexionar y debatir sobre esta disrupción tecnológica” [14] mostrando la vigencia de lo que llamamos la educación 4.0, que plantea la adaptación a una nueva realidad educativa, que es característica de las tecnologías digitales. El impacto de la I.A. en la educación es significativo, ya que puede cambiar la forma en que los estudiantes aprenden y los profesores enseñan [15].

## 3. CONCLUSIONES

Es menester tener certeza si se prioriza en la educación universitaria la parte política o la parte académica. El principio de realidad, muestra la dificultad de poder conciliar la parte académica, en general prioridad de las Instituciones, docentes y estudiantes, con la parte política, donde tienen primacía las decisiones y normativas emanadas desde el Ministerio de Educación (ME), la Secretaría de Políticas Universitarias (SPU), el Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) y el Consejo de Rectores de Universidades Privadas (CRUP).

Los autores han querido exponer en este trabajo, los criterios que entienden pueden sustentarse en el diseño curricular de un plan de transición de Ingeniería Mecánica, aunque tienen la convicción que la aceleración de los avances en las tecnologías educativas innovadoras hará necesario una revisión permanente y actualización del diseño cualquiera sea, es decir la incorporación en la Universidad de la Educación 4.0, que amerita una investigación aparte por sí sola y excede los propósitos de este trabajo.



## REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Educación *Resolución ME 1541-2021*
- [2] Ministerio de Educación *Resolución ME 1254-2018 anexo IX*
- [3] Dirección Nacional de Gestión Universitaria - *Interviene en el reconocimiento oficial y validez nacional de planes de estudio de carreras universitarias.*  
<https://www.argentina.gob.ar/educacion/universidades/direccion-nacional-de-gestion-universitaria>
- [4] Juri H. *Comisión Nacional de Mejoramiento de la Educación Superior (CNMES)*, (2002) Creada por Resolución Ministerial N° 169/01, República Argentina, mayo 2001.
- [5] Robles S., Romeo A. *Propuesta innovadora para ingreso a las carreras de ingeniería*, VII CAIM / II CAIFE, Universidad Tecnológica Nacional, San Nicolás de los Arroyos, República Argentina, ISBN 978-950-42-0210-3, setiembre 2021.
- [6] Robles S., Romeo A. *Sistema innovador de admisión a las carreras de ingeniería*, VIII Jornadas Nacionales y IV Jornadas Latinoamericanas, Ingreso y permanencia en carreras Científico-Tecnológicas, trabajo IPECyT 2022-T45-E3.112/14, Universidad Tecnológica Nacional, San Nicolás de los Arroyos, República Argentina. ISBN 978-950-42-0227-1, octubre 2022.
- [7] Romeo A., Robles S. *Enseñanza-aprendizaje de componentes de máquinas en competencias*, VI CAIM/ I CAIFE, FACET, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, República Argentina, ISBN 978-987-46987-04, octubre 2018.
- [8] Bruni R., Forestello R., Rivero M., Carro Pérez M., Capdevila L. *Diseño de un plan de estudios desde el enfoque por competencias. El caso de Ingeniería electrónica de la FCEfyN*, 2º Congreso Latinoamericano de Ingeniería, Cartagena de Indias, Colombia, septiembre 2019.
- [9] Kowalski V., Morano D., Erck I., Enriquez S., Cirimelo H. *Formación por Competencias, Aprendizaje Centrado en el Estudiante y Estándares de Acreditación de Segunda Generación para Ingeniería*. IV Edición, Serie Materiales de Apoyo de Laboratorio MECEK, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, abril 2021.
- [10] Romeo A., Robles S. *Selección de contenidos a partir de resultados de aprendizaje*, VII CAIM / II CAIFE, Universidad Tecnológica Nacional, San Nicolás, de los Arroyos, República Argentina, ISBN 978-950-42-0210-3, setiembre 2021.
- [11] Morano D., Cuenca Pletsch L. *Acreditación y nuevos estándares. Aspectos a considerar y pautas para abordarlos*, Publicación CONFEDI, mayo 2022.



- [12] Braginski R. *Un gurú de la educación revela una nueva tendencia en el aula que "este año va a explotar"*. [https://www.clarin.com/sociedad/guru-educacion-revela-nueva-tendencia-aula-ano-va-explotar-\\_0\\_xnRP8Ate1Q.html](https://www.clarin.com/sociedad/guru-educacion-revela-nueva-tendencia-aula-ano-va-explotar-_0_xnRP8Ate1Q.html), 8/02/2023.
- [13] Singer N. *Los nuevos tutores de IA podrían transformar por completo el aprendizaje*, Clarín.com, The New York Times International Weekly, 09/06/2023, <https://es.khanacademy.org/>
- [14] Arrabal A. *Inteligencia artificial y Universidad*, Un ciclo de cinco encuentros organizado por la Secretaría Académica de la UNR propone reflexionar sobre la inteligencia artificial y su impacto en la educación superior, mayo 2023. <https://unr.edu.ar/inteligencia-artificial-y-universidad/>
- [15] Roa González J. *El impacto de la inteligencia artificial en la educación nos trae tiempos apasionantes*, Éxito Educativo, 17 enero 2023, <https://exitoeducativo.net/impacto-inteligencia-artificial-educacion/>



## REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE PIEZAS MECÁNICAS. CORTES PARCIALES

Gerardo M. Arias <sup>1</sup>, Sandra N. Fernández <sup>2</sup>, Florencia Salaberría <sup>3</sup>, Vanesa S. Dailoff <sup>4</sup>,  
Silvana E. Gutiérrez <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)

Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina- germigari@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)

Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina- sfernand@uns.edu.ar

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)

Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina- florencia.salaberría@uns.edu.ar

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)

Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina- vanesa.dailoff@uns.edu.ar

<sup>5</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)

Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina- sgutie@criba.edu.ar

En dibujo tecnológico, para representar gráficamente piezas mecánicas y revelar adecuadamente todas sus formas y dimensiones, se recurre al empleo de vistas, cortes y secciones. En estas dos últimas representaciones, generalmente, los estudiantes suelen tener ciertos inconvenientes en la visualización de la estructura interna de las piezas y en su correspondiente dibujo. Por ello, al inicio de la cursada de la materia Diseño Mecánico Asistido, perteneciente a la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Sur, se propuso una actividad de repaso empleando piezas mecánicas modeladas e impresas tridimensionalmente. En particular, se seleccionaron modelos de piezas que presentaran orificios tales que fueran factibles de representar gráficamente empleando cortes de tipo parcial. Con un programa de Diseño Asistido por Computadora se modelaron las piezas en forma tridimensional y se las sometió a un corte adecuado para mostrar toda su configuración interna. Luego, las piezas se imprimieron tridimensionalmente, tanto en forma completa como cortada, utilizando una impresora de tecnología de modelado por deposición fundida. De esta manera, los estudiantes tuvieron la posibilidad de manipular las piezas y de analizar las configuraciones generadas por los cortes para luego poder representarlas gráficamente. Esta experiencia didáctica se enmarca en la continua búsqueda de nuevos recursos que colaboren en despertar la motivación y el interés de los estudiantes durante los procesos de enseñanza y aprendizaje.

**Palabras clave:** Dibujo Tecnológico; Representaciones; Modelado tridimensional; Impresión tridimensional.



## 1. INTRODUCCIÓN

Es frecuente que durante el desarrollo de las clases prácticas de dibujo tecnológico se observe en los estudiantes cierto inconveniente al momento de tener que realizar la representación de cortes en una pieza mecánica. Para ello es necesario que puedan visualizar adecuadamente la intersección del plano de corte imaginario con las partes macizas de la pieza y a las superficies que constituyen el contorno primitivo de dicha pieza.

Con el objeto de trabajar estas dificultades, se seleccionan dibujos de piezas mecánicas disponibles en libros de la disciplina de la expresión gráfica para Ingeniería. Luego, con la implementación de las tecnologías de modelado y de impresión tridimensional, se hace posible obtener los modelos físicos de dichas piezas para que los estudiantes puedan manipularlos y analizar su estructura interna.

Con el empleo de un programa de Diseño Asistido por Computadora (CAD) existe la posibilidad de obtener modelos digitales enfocados a una temática determinada y resolver el inconveniente de la falta de variedad y cantidad de piezas necesarias para trabajar en las clases prácticas de dibujo tecnológico. Asimismo, con esta tecnología no solo se hace posible duplicar modelos existentes, sino que también permite adaptarlos o realizar nuevos diseños originales considerando el tiempo disponible de clases y el nivel de los alumnos hacia los que va dirigido.

Por otra parte, con la tecnología de impresión tridimensional es factible la producción física de las piezas previamente modeladas. Esta técnica recibe el nombre de fabricación aditiva, pues se lleva a cabo mediante la adición de materia: el objeto cobra forma a medida que las capas se solidifican [1]. Esta nueva herramienta permite convertir modelos digitales en elementos tangibles para su manipulación. Con una metodología y recursos docentes adecuados podemos sacar partido de esta tecnología en los entornos educativos [2].

En este trabajo se exponen las tareas realizadas para generar estos modelos y su aplicación en una experiencia didáctica orientada a estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica, pertenecientes a la cátedra de Diseño Mecánico Asistido del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur (UNS).

## 2. DESARROLLO

En este documento se describen las etapas desarrolladas para obtener dos piezas mecánicas tangibles combinando las tecnologías de modelado y de impresión tridimensional: selección de las piezas considerando la temática y los estudiantes hacia los que se dirigen, modelado de las piezas con un programa de Diseño Asistido por Computadora (CAD), corte de las piezas,

conversión de los archivos enteros y cortados a un formato adecuado, impresión de los modelos físicos e implementación de una experiencia didáctica.

## 2.1. Elección y modelado tridimensional de las piezas mecánicas

Se efectúa una búsqueda y selección de dos piezas mecánicas en libros de dibujo tecnológico para Ingeniería. Se eligen aquellas que se consideraron adecuadas para abordar la temática teniendo en cuenta los alumnos hacia los que son dirigidas y el tiempo disponible de clases.

Se opta por una primera pieza, designada como A, que posee un total de seis orificios, cinco de ellos pasantes y uno con cambio de diámetro. Este último posee una morfología tal que para ser representado gráficamente resulta adecuado el empleo de un corte parcial. La pieza mecánica elegida es la parte principal de un soporte de herramientas [3].

La segunda pieza, designada como B, posee dos orificios, uno de ellos es pasante y el otro es avellanado. Para representar este último orificio, también resulta óptimo emplear el recurso del corte parcial. La pieza elegida es una base guía [4].

Ambas piezas se modelan mediante el programa AutoCAD [5], empleando principalmente herramientas de generación de sólidos por extrusión, sólidos predeterminados y ediciones de sólidos.

En la Figura 1 se muestra la pieza A dentro del entorno del programa CAD modelada en color naranja y en la Figura 2 se observa la pieza B modelada en color amarillo.

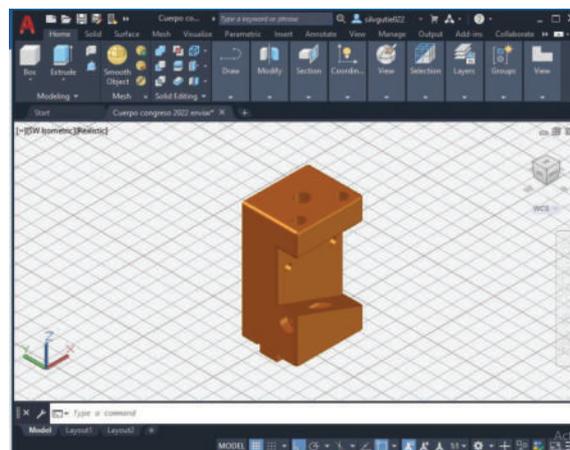


Figura 1: Pieza A modelada en programa CAD.

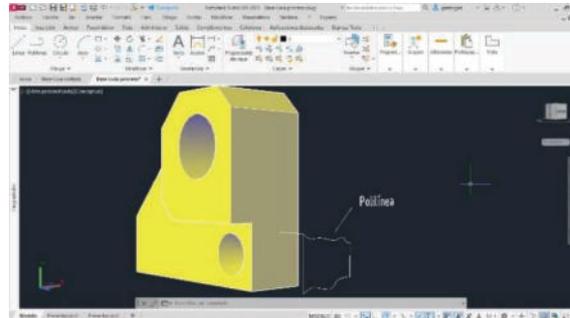


Figura 2: Pieza B modelada en programa CAD.

## 2.2. Corte de las piezas mecánicas y generación de los archivos de impresión

Después de modelar las piezas completas con el programa CAD, se procede a realizar el corte parcial correspondiente a cada una de ellas, generando así archivos diferentes en formato DWG (DraWinG). A la pieza A se la somete a un corte parcial para mostrar el único orificio que presenta cambio de diámetro, mientras que a la pieza B se le realiza un corte parcial para mostrar el orificio avellanado. El corte parcial de las piezas y la obtención de las dos partes cortadas se realiza empleando el comando polilínea y operaciones de extrusión, sustracción e intersección de sólidos. Ver Figura 3.

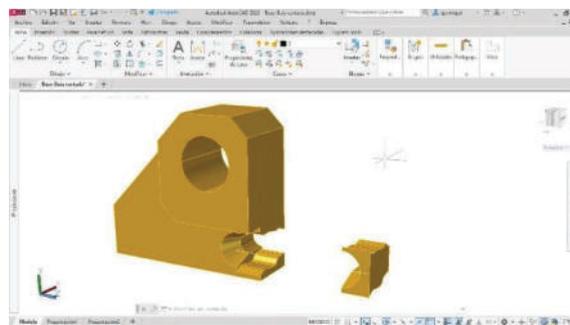


Figura 3: Pieza B cortada en programa CAD.

Antes de proceder a la impresión tridimensional, resulta necesario exportar los archivos al formato de prototipado rápido o estereolitografía STL (Standard Triangle Language). Este formato es el que permite que el equipo de impresión 3D construya el cuerpo capa a capa.

En este punto es recomendable realizar la exportación considerando la posición más conveniente para reducir la cantidad de soportes adicionales, considerando también que la superficie inferior sobre la cual se construye la impresión será la que tendrá una mejor terminación final.

### 2.3. Impresión tridimensional de las piezas mecánicas

Las impresiones se realizan en una impresora con tecnología FMD (Fused Deposited Medeling), conocida como modelado por deposición fundida. Este mecanismo utiliza una boquilla caliente que funde el plástico hasta su estado de transición vítreo, al mismo tiempo que controla la cantidad de material depositado por medio de un sistema de dosificación a través de sucesivas capas. La materia prima para realizar la impresión es un material de origen natural y biodegradable conocido como ácido poliláctico (PLA).

En primer lugar, se imprimen las dos piezas completas (sin corte parcial), por un lado, la pieza A empleando PLA de color naranja (ver Figura 4), y luego la pieza B en color amarillo (ver Figura 5).



Figura 4: Pieza A completa impresa



Figura 5: Pieza B impresa

Por último, se procede a imprimir las piezas con sus respectivos cortes parciales, que permiten observar toda la configuración interna de los orificios no pasantes, su forma, los cambios de diámetros o de forma y sus profundidades.

En las Figuras 6 y 7 se muestran los cuerpos A y B, respectivamente con los cortes parciales mencionados. Como puede observarse en dichas imágenes las impresiones realizadas mantienen el mismo color de filamento que la pieza entera correspondiente.



Figura 6: Pieza A sometida a un corte parcial



Figura 7: Pieza B sometida a un corte parcial



Para dar un mejor acabado a las piezas tridimensionales ya impresas, se eliminan los soportes de impresión y se lija dicha zona de la superficie para retirar excesos de material. En las partes roscadas es necesario finalizar su superficie empleando machos de roscar y así eliminar posibles imperfecciones internas de las piezas.

#### 2.4. Experiencia didáctica

La experiencia didáctica consiste, en primera instancia, en realizar una introducción mediante un repaso del tema Cortes y Secciones, particularmente haciendo hincapié en lo referido a cortes quebrados y parciales y la necesidad de emplear este tipo de cortes según la morfología de la pieza mecánica a representar. Para ello, se realiza una explicación teórica con aplicación de las normas de dibujo tecnológico y una exposición de ejemplos gráficos de ambos casos particulares.

Posteriormente, mediante el programa CAD, se presenta tridimensionalmente una de las piezas mecánicas modeladas con la que trabajarán los estudiantes en esta primera experiencia (la pieza A), practicando rotaciones que permitan obtener visualizaciones de todas sus caras, mostrando sus características geométricas y haciendo especial referencia al orificio que presenta. Luego se analizan sus posibles representaciones gráficas, y en particular, los criterios para plantear la resolución más conveniente para representar, de manera clara y completa, la forma y dimensiones del mencionado orificio.

A continuación, se muestra la misma pieza modelada y cortada con un corte parcial que expone la morfología completa del orificio, observando que, en conjunto con la ejecución de las vistas necesarias y suficientes para representar gráficamente la pieza, la opción de corte parcial resulta la más adecuada al momento de resolver la representación del orificio.

Por último, se entregan a los estudiantes las piezas modeladas e impresas tridimensionalmente, tanto el modelo entero como el que presenta el corte parcial, para que al momento de realizar el trabajo práctico tengan la posibilidad de establecer un contacto directo con las mismas, reconocer su forma y dimensiones reales, y particularmente visualizar la materialización del corte y la configuración resultante del mismo.

Finalmente, los estudiantes realizan el croquizado a mano alzada de dicha pieza dibujando las vistas necesarias y suficientes con el corte parcial correspondiente. Todo el dibujo se realiza aplicando la normativa IRAM [6] vigente y respetando la proporción de la pieza. En la Figura 8 se observa el trabajo realizado por uno de los estudiantes.

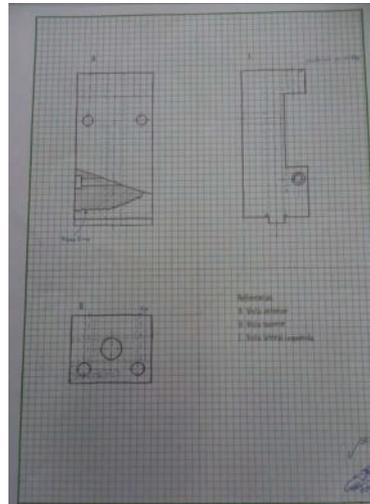


Figura 8: Dibujo de la pieza A con corte parcial.

### 3. CONCLUSIONES

Con las tecnologías CAD y de impresión 3D los docentes puede modelar e imprimir piezas de su interés que seleccionen de un libro, catálogo o página web y que de otra forma serían de difícil acceso. Asimismo, con estos recursos cuentan con la ventaja de poder modificar los modelos elegidos adaptándolos particularmente a la temática a tratar, a la carga horaria disponible y al grupo de alumnos participantes de la experiencia didáctica.

La implementación de estos nuevos recursos en la educación supone no solo un cambio en cuanto a la metodología tradicional de enseñanza, sino que además requiere que los docentes se capaciten permanentemente y puedan ir descubriendo todas las potencialidades de estas herramientas.

Con el empleo de los modelos impresos se apunta a generar una nueva experiencia orientada a motivar a los estudiantes y tratar de despertar su interés durante el desarrollo de las prácticas de dibujo tecnológico y en especial en las temáticas en las que suelen tener más dificultades.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la UNS por la financiación del Proyecto de Grupo de Investigación "Investigaciones sobre programas CAD y TIC. Implementación en la enseñanza de la Expresión Gráfica en la Ingeniería", en el marco del cual se realizó este trabajo.



## REFERENCIAS

- [1] Berchon, M., Luyt B. *La impresión 3D: guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general*. Editorial Gustavo Gili, Barcelona (España), 2016.
- [2] Canessa, E., Fonda, C., Zennaro, M. *Low-cost 3D Printing for Science*. Education & Sustainable Development. ICTP, Trieste (Italy), 2013.
- [3] Giesecke, F., Hill, I., Spencer, H., Mitchell, A., Dygdon, J., Novak, J., Lockhart, S., Goodman, M. *Dibujo técnico con gráficas en Ingeniería*. Person, México, 2013.
- [4] Spencer H., Dygdon J., Novak J. *Dibujo Técnico*. Alfaomega, México, 2003.
- [5] Autodesk. *AutoCAD 2020 User's Guide*. Autodesk, Inc., 2020.
- [6] IRAM. *Manual de normas IRAM de Dibujo Tecnológico*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires, 2017.



## Química: Asumiendo desafíos para su aprendizaje en un curso de Ingeniería Mecánica

Marcelo Alcoba<sup>1</sup>, Martín Broglio<sup>2</sup> y Javier Toledo Arana<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento Mecánica -Departamento Cs. Básicas – FI UNRC

Ruta Nac. N° 36, km 601, Río Cuarto, Argentina- [malcoba@ing.unrc.edu.ar](mailto:malcoba@ing.unrc.edu.ar).

<sup>2</sup> Departamento Ciencias Básicas – FI UNRC

Ruta Nac. N° 36, km 601, Río Cuarto, Argentina- [mbroglio@exa.unrc.edu.ar](mailto:mbroglio@exa.unrc.edu.ar).

<sup>3</sup> Departamento Ciencias Básicas – FI UNRC

Ruta Nac. N° 36, km 601, Río Cuarto, Argentina- [jtoledoarana@ing.unrc.edu.ar](mailto:jtoledoarana@ing.unrc.edu.ar).

### RESUMEN

La gran mayoría de estudiantes de los primeros años en carreras de ingeniería con orientaciones no químicas, no manifiestan interés, ven compleja y difícil la proyección de los contenidos de la Química y los desestiman en el futuro quehacer profesional. Este posicionamiento, denominado por algunos autores “quimifobia”, se profundiza al considerar la imposibilidad de los ingresantes universitarios para observar, describir, argumentar, interpretar, proponer, etc., “capacidades básicas”, que si bien debieran haber sido desarrolladas en la escuela media y son soportes indispensables para lograr el desarrollo de habilidades, destrezas y valores necesarios del profesional ingeniero que requiere la sociedad y el mundo del trabajo en el mundo actual, hoy deben ser objeto de enseñanza en las aulas universitarias.

Las experiencias relevadas en la asignatura Química para Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, están en correspondencia con la situación descrita y los resultados académicos desalentadores desafían al equipo docente a generar condiciones que contribuyan a despertar el interés por esa disciplina y cómo se relaciona con el perfil profesional, promover el valor de la lectura, la escritura y la comunicación en los procesos de aprendizaje y vivenciar el trabajo grupal colaborativo.

En este trabajo se comparte y evalúa una propuesta áulica diseñada e implementada, al inicio del cuatrimestre, durante el ciclo académico 2022, enmarcada en el desarrollo de competencias genéricas para la formación de ingenieros en Argentina y un enfoque formativo centrado en el aprendizaje del estudiante.

**Palabras Clave:** Química – Competencias en Ingeniería – Alfabetización Académica – Aprendizaje activo



## 1. INTRODUCCIÓN

En el campo de enseñanza de las ingenierías en Argentina, las nuevas directrices promueven innovaciones curriculares orientadas al diseño de planes de estudio por competencias y un aprendizaje basado en el estudiante. Se busca propiciar un modelo universitario que asegure mejores condiciones de acceso al conocimiento, una mayor inclusión educativa y atender al grado de innovación que requieren las demandas profesionales y las nuevas agendas laborales. Una formación no solo tecnológica sino también con una fuerte impronta humanística desde el respeto al desarrollo sostenible.

En la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), estas tendencias se perciben como oportunidades y actúan como disparadores para revisar el aula de Química atendiendo a una situación recurrente: la gran mayoría de estudiantes de los primeros años en carreras de ingeniería con orientaciones no químicas, no manifiestan interés por esta disciplina, ven compleja y difícil la proyección de esos contenidos y los desestiman en el futuro quehacer profesional. Este posicionamiento, denominado por Ollino [1], entre otros, como “quimifobia” se profundiza al considerar la imposibilidad de los ingresantes universitarios para observar, describir, argumentar, interpretar, proponer, etc. Todas “capacidades básicas”, que si bien debieran haber sido desarrolladas en la escuela media y son soportes necesarios para lograr el desarrollo de habilidades, destrezas y valores necesarios del profesional ingeniero que requiere la sociedad y el mundo del trabajo en la actualidad, hoy deben ser objeto de enseñanza en las aulas universitarias.

En este trabajo se comparte y evalúa el diseño y la realización de una actividad áulica implementada en el inicio del cuatrimestre del ciclo académico 2022 en la asignatura Química, materia de régimen cuatrimestral con una carga horaria de seis horas semanales distribuidas en dos encuentros durante el primer cuatrimestre del primer año de las Ciencias Básicas del Plan de Estudio para la carrera Ingeniería Mecánica. Participaron 120 estudiantes. La actividad se desarrolló con el propósito de provocar en los alumnos el interés por la química y cómo se relaciona con el perfil profesional, reflexionar sobre el valor de la lectura, la escritura y la comunicación en los procesos de aprendizaje y presentar nuevos modos de abordarlas en la Universidad desde el trabajo colaborativo revisando simultáneamente el rol docente en esta propuesta. Finalmente, se exponen algunas reflexiones sobre la experiencia vivida y su impacto.

## 2. EL CONTEXTO

*“La complejidad creciente del mundo en que vivimos, ubica a los ingenieros con mayor frecuencia, participando de diseños donde los emergentes son variados y se componen de conocimientos políticos, económicos y sociales, además de los tecnológicos. El desafío profesional que ello demanda, pone en evidencia la necesidad de la formación amplia de un*



*ingeniero no solo en sus competencias técnicas, sino en sus comportamientos, como expresión observable de sus valores personales”.*

*Ing. José Luis Roces. Valores y perfil profesional del Ingeniero. Julio 2021*

La revisión de los planes de estudio y los procesos de acreditación que atraviesan las carreras universitarias de Ingeniería en Argentina, presentan un horizonte formativo orientado al desarrollo de un currículum por competencias, entendidas estas como “capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizar (poner a disposición) distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales” [2]. La implementación de este modelo “obliga a cuestionarse alrededor de la pertinencia de los procesos educativos, invita a la educación a repensar al sujeto de aprendizaje como un agente transformador de la realidad, convoca al cuerpo docente a una reflexión y los llama a adaptarse a sus estudiantes, a sus procesos intelectivos, a sus preconcepciones derivadas de la experiencia y a sus aptitudes y no pretender aun cuando pareciera más sencillo que los estudiantes se adapten a sus docentes pues finalmente son ellos los facilitadores” [3].

En este marco curricular, el abordaje de las ciencias y su enseñanza en general, focalizándonos en la disciplina Química en particular, supera el posicionamiento reduccionista, en el que se asume literalmente el significado de la palabra *ciencia* expuesto en el diccionario de la Real Academia Española como “conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales con capacidad predictiva y comprobables experimentalmente”. Una ciencia que se presenta y transmite como la exposición de productos acabados/verdades científicas no discutibles.

La perspectiva, cuestionada en las últimas décadas, se reformula a partir de una didáctica de las ciencias, que se sostiene en el concepto “*metaciencias*”: un conocimiento científico contextualizado en un momento histórico dando respuesta a un problema a partir de las herramientas conceptuales y metodológicas disponibles y la cultura y los valores vigentes en ese momento. Recuperando las reflexiones de Astudillo [4], el objetivo es contribuir a la construcción de una imagen de ciencia más humana, relativa y contextualizada, superadora de las clásicas visiones normativas y dogmáticas trabajando sobre la naturaleza tentativa y provisoria de la ciencia, la no neutralidad de las ideas científicas, el principio de pluralidad metodológica y el carácter no acumulativo del conocimiento científico.

### **3. PREMISAS CONTEMPLADAS EN LA EXPERIENCIA AULICA**

La actividad áulica que se presenta, al decir de Carlino [5], oficia literalmente de “bienvenida al forastero/ingresante universitario” al aula de Química de la carrera Ingeniería Mecánica, ya que



se desarrolla en el primer encuentro del cuatrimestre y sienta las bases del trabajo que se sostendrá durante todo el cursado.

En la propuesta nos proponemos romper estructuras consolidadas desde el quehacer cotidiano, apostando a una nueva construcción y recreación del escenario de enseñanza y aprendizaje, promoviendo los siguientes aspectos:

#### **a) La construcción del oficio de estudiante universitario**

Iniciando una carrera universitaria, los noveles estudiantes universitarios, enfrentan múltiples dificultades para integrarse a una cultura institucional con códigos, normas, pautas, modos de ser y de hacer particulares, que dan cuenta de la necesidad de contribuir genuinamente a un proceso para que construyan su oficio, "...algo que parece obvio y al mismo tiempo (o quizás por eso mismo) inadvertido, aprender a ser estudiante universitario (...) así como otras formas de ser y de participar en diferentes situaciones sociales". La apropiación de este rol asociado a un tiempo de aprendizaje, "...no significa una suerte de evolución natural, sería falso pensar que este aprendizaje es una mera 'cuestión de tiempo'. El oficio de estudiante se aprende, no sin esfuerzo y en la interacción con situaciones que adquieren características particulares en cada institución" [6].

#### **b) La apropiación de nuevas prácticas de lectura y escritura en las disciplinas**

Carlino (2005) expresa: "lectura y escritura exigida en el nivel superior se aprenden en ocasión de enfrentar las prácticas de producción discursiva y consulta de textos propias de cada materia, y según la posibilidad de recibir orientación y apoyo por parte de quien domina la materia y participa de estas prácticas lectoescritoras". Leer y escribir, si bien requieren destrezas cognitivas generales, son prácticas situadas, "tareas culturales tremendamente imbricadas en el contexto social" como lo expresan Cassany y Morales [7] atendiendo al cómo expresarse, para qué audiencia, con qué intención, cómo argumentar y organizar el discurso.

En ese sentido, es necesario proponer nuevas prácticas en las que los docentes guiemos a los estudiantes en la tarea de 'leer y escribir para aprender' los conceptos de una disciplina. Procesos de enseñanza-aprendizaje que contemplen una cesión progresiva del control desde un andamiaje propiciado por el docente, quien asume inicialmente el mayor peso a través de la entrega de los contenidos, alentando el desarrollo de prácticas cada vez más independientes por parte del estudiante, quien luego de diversas estrategias implementadas en la secuencia pedagógica, será capaz de asumir tareas de planificación, revisión, evaluación de los contenidos y sus aprendizajes.

El acompañamiento de la lectura y la escritura, se convierte en una herramienta poderosa que permite sostener a los estudiantes, hacerles notar la importancia de un aprendizaje situado y una contribución para el desarrollo de la autonomía fortaleciendo procesos metacognitivos. Una



autonomía que les permita el control y el dominio progresivo de los textos que necesitan usar receptivamente o productivamente para participar en la comunidad discursiva de su perfil profesional.

### **c) La comprensión de la Química**

Galagovsky y Bekerman [8], sostienen que “hablar química”, no necesariamente da cuenta del “comprender química”. El comprender química está vinculado a que docentes y estudiantes puedan compartir en el aula los significados científicos del discurso de la química. Hacer uso de una multiplicidad de lenguajes para interpretar y comunicar el discurso de la química (lenguaje verbal en explicaciones y textos, lenguaje gráfico a través de dibujos y esquemas, lenguajes matemáticos a través de ecuaciones, lenguaje alfanumérico para la representación de la formulación de sustancias, etc.) al momento de presentar conceptos químicos, expone la complejidad implícita en los mismos, y en ese sentido es indispensable asumir el hecho de que, discursos científicos simplificados debido a recortes y estereotipos provenientes de decisiones didácticas, así como de las dificultades inherentes al procesamiento de información proveniente de sus complejos lenguajes, generan modelos mentales que no se corresponden con los esperados por los expertos.

### **d) El desarrollo de competencias**

El CONFEDI [9] propuso oportunamente diez competencias genéricas complejas e integradas asociadas a saberes tecnológicos -contenidos disciplinares- complementados con saberes sociales, políticos y actitudinales que, si bien se enuncian separadas, ambos grupos son indivisibles en el contexto globalizado y socioculturalmente situado [10]. La formación del Ingeniero de la Facultad de Ingeniería de la UNRC, adhiere explícitamente al desarrollo de competencias.

En particular, a través de la actividad propuesta damos inicio al desarrollo de competencias transversales cruciales para el desarrollo profesional, asumiendo cada vez más la demanda de interdisciplinariedad y trabajo colaborativo del mundo laboral [11]. Singularmente, nos proponemos comenzar a dar pautas que contribuyan a:

- Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo.
- Comunicarse con efectividad.
- Actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global.
- Aprender en forma continua y autónoma.

### **d) La motivación por el aprendizaje de la química a través de las tareas académicas y su relación con el perfil profesional**



Los estudiantes que nos ocupan, forman parte de la Generación Z. Al decir de Antúñez [12], muestran la necesidad de recibir continuamente estímulos y son más demandantes en comparación con generaciones anteriores... tienden a solo prestar atención a aquello que les interesa o que les representa un beneficio para su futuro, por lo que es importante generar motivación no solo de manera intrínseca sino también de manera extrínseca, brindando pequeños estímulos que faciliten su autoconfianza frente al estudio.

Promover el interés de los estudiantes hacia el aprendizaje es un desafío permanente para el docente. Paoloni [13], explayándose sobre motivación académica recupera un acercamiento a características que deberían reunir las tareas académicas si aspiran a fomentar en los estudiantes una orientación motivacional hacia metas de aprendizaje. Entre ellas menciona: variedad y diversidad, significatividad, funcionalidad, moderado nivel de dificultad, desafío, curiosidad, fantasía, colaboración, posibilidad de elección y de control. Los elementos mencionados oficiaron de orientación al momento de definir las características de las tareas programadas.

Por otro lado, si bien “la química está por todas partes, y sin ella la vida no sería posible”, estos jóvenes no manifiestan emoción ni entusiasmo ante la perspectiva de aprender esta disciplina, de modo que debemos enseñar a estudiantes que vocacionalmente no la han elegido y que siguen una carrera que tradicionalmente no contempla una formación importante en el área. Contemplar estos aspectos requiere propiciar el hecho de que los estudiantes aprecien la manera en que la asignatura está presente en el campo de acción profesional. Visión no solo orientadora para los estudiantes, sino también motivadora reconociendo que “para aprender es imprescindible poder hacerlo, lo cual hace referencia a las capacidades, los conocimientos, las estrategias y las destrezas necesarias (componentes cognitivos), pero además es necesario querer hacerlo, tener la disposición, la intención y la motivación suficientes (componentes motivacionales) [14].

#### **4. SOBRE LA ACTIVIDAD. ¿POR QUÉ ESTUDIAR QUÍMICA EN INGENIERÍA MECÁNICA?**

Durante el primer encuentro presencial del cursado de la asignatura Química, proponemos una secuencia de tareas con el objetivo de poner en común el propósito del estudio de esta disciplina en el Plan de estudios de Ingeniería Mecánica, así como también el valor de la lectura, la escritura y la reflexión crítica como favorecedores de la comprensión en los procesos de enseñanza-aprendizaje en el ámbito universitario.

La estrategia utilizada para esto es el taller, pues se trata de una forma de enseñar y, sobre todo de aprender, mediante la realización de “algo”, adhiriendo a la definición propuesta por Ander-Egg [15] que se lleva a cabo conjuntamente. Es un aprender haciendo en grupo, un trabajo



permanente de acción-reflexión entre docentes coordinadores y estudiantes participantes privilegiando el aprendizaje por sobre la enseñanza.

Desde las consignas, se promueve el trabajo cooperativo, apostando al aprendizaje en estas circunstancias, como antesala del modo de aprender que con frecuencia podría manifestarse en la carrera y en el desarrollo de la profesión. Morera [16] define al aprendizaje cooperativo como una filosofía de interacción y una forma de trabajo que combina diferentes estrategias basadas en habilidades interpersonales: confianza mutua; complementariedad; comunicación; coordinación; compromiso; apoyo mutuo y resolución constructiva de conflictos. Se trabaja para metas comunes que generen beneficio personal y para los otros integrantes del equipo. Se consigue que la productividad resultante sea superior, por mucho, a la mejor producción de cualquiera de los componentes del equipo. Se hace esencial, entonces, una acabada planificación para lograr los resultados de aprendizaje deseados, entre todos y para cada uno.

Las actividades están previstas para ser desarrolladas en pequeños grupos de 3-4 integrantes con la intención de promover el reconocimiento del otro/otros, el trabajo grupal y la conformación de grupos de estudio. Se intercalan instancias de intercambio grupales compartiendo producciones para apreciar distintas maneras de abordar y resolver una tarea.

#### 4.1. Los momentos de trabajo:

- *Primer momento “una imagen vale más que mil palabras”*: Los estudiantes, desde la observación e interpretación de un conjunto de imágenes compartidas en la pantalla en el aula, y accesibles también ingresando al aula virtual de la asignatura a través de celulares y/o notebooks realizan un **trabajo grupal de producción escrita**.

El disparador visual utilizado es un registro fotográfico que expone el “Desastre de Bophal”, catástrofe industrial en la planta de la empresa norteamericana Union Carbide (diciembre de 1984 - Bophal, India), a partir del escape de un gas tóxico que mató a miles de personas del lugar como consecuencia de negligencias en el diseño y ubicación de las instalaciones, la elección de la tecnología, sistemas de operación y mantenimiento, información y capacitación, manejo de la emergencia, etc.

La tarea, de desarrollo gradual, contempla las siguientes instancias:

- Observación y puesta en común de palabras o frases (lluvia de ideas).
- Organización de las palabras y/o frases en una producción textual grupal.
- Lectura reflexiva del texto e instancia de autoevaluación. Ajustes y reescritura.
- Socialización a partir de la lectura de producciones seleccionadas al azar para todo el auditorio. Intercambio colectivo.



- Nueva revisión y reflexión grupal a partir de las presentaciones realizadas, el intercambio de pares y con los docentes.

La estrategia apela al valor de las imágenes como recurso para activar procesos cognitivos complejos para articularse luego con el desarrollo de un texto, así como también jerarquiza su uso, permitiendo la reflexión sobre su valor como facilitador del aprendizaje particularmente, cuando es una opción siempre presente en los manuales universitarios. “La percepción de una imagen está en estrecha relación con la manera en la que cada individuo puede captar la realidad, y al mismo tiempo está vinculada con la historia personal, los intereses, el aprendizaje, la motivación” [17].

Desde las ideas iniciales al texto final la recuperación de lo transitado, el intercambio entre pares y con los docentes, que, además, desde una participación activa y atenta, y apelando a las preguntas orientan, acompañan, cuestionan... se promueve un proceso de enseñanza aprendizaje en el que las producciones de otros se convierten en posibilidad para profundizar la interpretación de las imágenes, ampliar las observaciones, revisar los textos propios y los modos de comunicar.

- *Segundo momento:* apelando a las experiencias personales de los estudiantes en los niveles educativos previos, se les solicita nuevamente de manera grupal, evocar conocimientos previos y experiencias sobre la “Química” y su “objeto de estudio” en el marco de la actividad desarrollada proponiendo sentidos a la presentación de las imágenes y la producción de textos en el contexto de la asignatura Química para Ingeniería Mecánica. La instancia se completa compartiendo colectivamente las reflexiones grupales que son recuperadas por los docentes y posibilitan la profundización a partir de las ideas generales que circulan, aclarando, destacando, orientando, revisando y ajustando ideas sobre la temática abordada.

- *Tercer momento:* En la continuidad de las tareas, los estudiantes acceden al enlace [https://es.wikipedia.org/wiki/Desastre\\_de\\_Bhopal](https://es.wikipedia.org/wiki/Desastre_de_Bhopal) para complementar y profundizar lo realizado hasta el momento. Las tareas se organizan en las siguientes instancias:

- Lectura exploratoria individual y grupal del material disponible en el enlace. Guía de trabajo con orientaciones para abordar contenidos y características de la publicación -autor, fuentes, audiencia destinataria, estructura organizativa del texto, la química como contenido, etc.-)
- Socialización y puesta en común.
- Comparación de la publicación con los textos producidos en el primer momento.
- Puesta en común integrando los tres momentos.
- Instancia de autoevaluación grupal disponiendo para ello, de una *lista de cotejo*.
- Conclusiones.

En el segmento no solo se aborda la lectura de un texto y su interpretación sino también el uso de las páginas web como un conjunto de bibliotecas a través de las cuales accedemos a



información que se actualiza permanentemente navegando de esta manera, a través del conocimiento. En relación a esto, Sánchez Ilabaca [18] remarca en su trabajo sobre usos educativos de internet “es labor del facilitador orientar a los aprendices en su relación con la información y mediar su uso, construcción, síntesis, análisis y evaluación”.

En la Figura 1 se presentan parte de las consignas propuestas a los estudiantes para el trabajo en el aula.

Recuperamos las reflexiones sobre las imágenes, las producciones grupales escritas, lo registrado en el pizarrón y, sumando el texto “Desastre de Bhopal”, nuevamente evaluamos el sentido de esto en el contexto de la asignatura Química para Ingeniería Mecánica.

*¿Es posible vincularlo al rol del Ingeniero Mecánico?, ¿De qué manera?*

Para seguir pensando y proyectando tareas para el cuatrimestre: el texto de la web presenta una explicación que nos da la posibilidad de comprender, de modo general, el desastre de Bhopal.

*¿Podrían identificar el segmento del artículo en el que aparece tal explicación?*

Ahora bien, releendo ese segmento **posicionados en el aula de Química:**

*¿Podrían identificar fenómenos o procesos que puedan ser explicados por la Química?*

*¿Cuáles? ¿Qué términos o expresiones les ofrecen pistas para reconocerlos?*

*¿A qué fuentes podríamos recurrir para profundizar el conocimiento de esta explicación?*

*¿Quiénes podrían ser los posibles autores de estas fuentes?*

**A modo de cierre y nuevos inicios:**

Con esta última actividad les proponemos comenzar a pensar nuevas alternativas de encuentro con el conocimiento.

Las situaciones identificadas en el texto se presentan desde el **hablar química**, sin embargo, en el transcurso del cursado esperamos profundizar la interpretación de fenómenos, identificar leyes y teorías que los explican y modelizan, con la intención de potenciar genuinamente el **comprender química**.

Figura 1: Fragmento de las consignas de trabajo de la actividad.

El abordaje del texto disponible en el enlace sobre Bhopal también habilita para: recuperar las reflexiones sobre las imágenes y las producciones grupales escritas a partir de ellas, integrar la sistematización de las puestas en común registradas en el pizarrón, autoevaluar el trabajo colectivo a partir de la lista de cotejo y, facilita el dialogo e intercambio y da nuevos sentidos a las tareas y a los contenidos disciplinares en el contexto de la carrera Ingeniería Mecánica.

#### 4.2. Valoración de los estudiantes

La actividad, desafiante y novedosa para los 120 estudiantes ingresantes que asistieron al encuentro, los confronta con otros modos de abordar el conocimiento, el trabajo en grupo, el rol de la lectura, la escritura y la comunicación, el sentido de la Química en el plan de estudio, el perfil de la profesión, entre otros aspectos.



La revisión del proceso transitado se realiza a partir de la implementación de una “*lista de cotejo*”, expuesto en la Figura 2, como instrumento sencillo de autoevaluación del desempeño grupal, registrando la presencia o ausencia de conocimientos, competencias, habilidades y actitudes puestas en juego para llevar adelante la tarea contemplando como dimensiones o descriptores generales *la interpretación de imágenes, tareas de lectura y escritura, el trabajo grupal y la vinculación disciplina-profesión*, a partir de indicadores acordes para cada una de ellas.

Dimensión de Evaluación		Cumple	
<b>Observación de las imágenes (lluvia de ideas)</b>		<b>SI</b>	<b>NO</b>
Indicadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconocemos lugar y tiempo del hecho presentado.</li> <li>- Identificamos el suceso y sus consecuencias.</li> <li>- Incluimos conjeturas e hipótesis sobre el hecho a partir de experiencias personales.</li> <li>- Mencionamos sensaciones y sentimientos personales sobre el suceso con sentido crítico y juicio de valor.</li> </ul>		
<b>Tareas de escritura (texto final producido - el lenguaje y su estructura)</b>		<b>SI</b>	<b>NO</b>
Indicadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizamos el listado de palabras generado a partir de la lluvia de ideas y las organizamos en una narración en la que es posible reconocer un <i>inicio</i>, un <i>desarrollo</i> y <i>conclusiones</i>.</li> <li>- Usamos las palabras con precisión.</li> <li>- Presentamos oraciones bien construidas.</li> <li>- Cada oración expresa una idea.</li> <li>- Organizamos el texto en párrafos y cada párrafo expresa ideas relacionadas.</li> <li>- Incluimos información suficiente para que los posibles lectores comprendan el mensaje.</li> <li>- Presentamos un texto ordenado y de fácil lectura (<i>legibilidad</i>).</li> </ul>		
<b>Tareas de lectura</b>		<b>SI</b>	<b>NO</b>
Indicadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificamos elementos del texto que ayudan a la comprensión del mismo (título, párrafos, referencias, imágenes, etc.)</li> <li>- Reconocemos el tipo de texto <i>-informativo-</i> y audiencia a la que está dirigido.</li> <li>- Realizamos inferencias a partir de la lectura del texto: construimos nuevos significados a partir de la información dada por las diversas claves del texto y el contexto.</li> <li>- Parafraseamos con nuestras propias palabras el contenido abordado.</li> <li>- Identificamos las fuentes bibliográficas y les asignamos valor académico acorde a las tareas desarrolladas y a las características del texto.</li> </ul>		
<b>El trabajo grupal</b>		<b>SI</b>	<b>NO</b>
Indicadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Participamos y nos involucramos comprometidamente en la actividad.</li> <li>- Usamos adecuadamente el tiempo para cada una de las tareas propuestas.</li> <li>- Compartimos ideas, sostuvimos el dialogo y logramos consensos en un ambiente de respeto mutuo.</li> </ul>		
<b>Vinculación Química-Ingeniería Mecánica</b>		<b>SI</b>	<b>NO</b>
Indicadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconocemos palabras del texto/expresiones que exponen contenidos específicos de la disciplina Química</li> <li>- Identificamos procesos/fenómenos que son explicados desde la Química.</li> <li>- Exponemos interacciones entre la Química y el desarrollo y la responsabilidad profesional del Ing. Mecn.</li> </ul>		
<b>Valoración grupal de la actividad:</b>			
.....			

Figura 2: Lista de cotejo

La elección del instrumento responde al hecho de que el mismo proporciona elementos objetivos para la realimentación y, desde un enfoque de evaluación diagnóstica, actúa como detonante para tomar conciencia del punto de partida con el que se ingresa al cursado y la importancia de acercarse al conocimiento desde una perspectiva integral y crítica. En el instrumento reconocemos las ventajas asociadas al atender al desempeño, aportar una perspectiva analítica de las secuencias procedimentales e incluir la valoración de aspectos actitudinales [19].



Además, la inclusión de un segmento final de desarrollo libre en el instrumento, en la que es posible incluir una reflexión grupal, da genuina cuenta del cumplimiento de la propuesta a partir de la palabra de sus protagonistas:

*“Nos brindó una idea de la importancia de la formación, capacitación y cumplimiento de normas en la profesionalidad del mundo laboral”*

*“La actividad nos hizo dar cuenta de la responsabilidad de la profesión”*

*“... este tipo de trabajo nos permite poder analizar, interpretar y ver de otra manera ciertos temas en distintos ámbitos y asignaturas... los alumnos no estamos acostumbrados y no ampliamos nuestro campo de interpretación. Nos cerramos en la info que tenemos”*

*“La actividad nos sirvió para conocernos como equipo de trabajo y darnos cuenta que a veces obviamos datos o información relevante”.*

*“La actividad nos ayuda a desarrollar un buen equipo de trabajo mediante la colaboración, comunicación y una buena participación profesor-alumno adquiriendo un pensamiento crítico, logrando entender el porqué de diferentes textos y actividades, llegando a una conclusión que nos ayuda a crecer como personas”*

*“Nos sorprendió, tuvimos una clase más interactiva. Pudimos corregir errores escuchando a nuestros compañeros y recordando estrategias para la resolución y comprensión de las actividades dadas. Es una forma de aprender diferente y todos poder estar en un mismo ritmo”.*

*“Pudimos desarrollar un texto informados a partir de ideas provenientes de imágenes, explicando un hecho ya ocurrido. Todo a partir del dialogo en equipo”.*

## 5. CONCLUSIONES

La propuesta resulta efectivamente orientadora para los estudiantes de primer año. Les permite tomar contacto con la Química y aproximarse a sus características, comenzar a generar articulaciones disciplinares con la profesión a partir de situaciones reales, identificar criterios para seleccionar material bibliográfico más accesibles para el estudio; reconocer las secuencias características de un texto y a través del conocimiento de las mismas, comenzar a desarrollar las operaciones o habilidades de pensamiento asociadas para generar autonomía en la lectura y escritura y en consecuencia desempeñar en mejores condiciones su rol de estudiante universitario y proyectarlo en el desarrollo profesional. Simultáneamente se pone en agenda efectiva el desarrollo de competencias genéricas y específicas y posibles modos de implementación en las aulas de ingeniería.

El sesgo de todas estas situaciones aporta a generar condiciones de ingreso más accesible. Una universidad para todos y todas acompañado por docentes presentes, orientadores en los aprendizajes.



## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] López Guerrero, M., Blanco Lopez, A., Serrano Angulo, J. *Valoración de la utilidad de la Química por estudiantes de Ingeniería Mecánica: Efecto de una propuesta didáctica*. Educación Química (2017) 28, 14, 2021.
- [2] CONFEDI. *Competencias en Ingeniería*. Universidad FASTA Ediciones, Mar del Plata, 2014.
- [3] Salas Zapata W. A. *Formación por competencias en educación superior. Una aproximación conceptual a propósito del caso colombiano*. Revista Iberoamericana de Educación, 36, 9, 2005
- [4] Astudillo C., Rivarosa A. *Un papel para la epistemología en la enseñanza de las ciencias*. Ciencia escolar: enseñanza y modelización, 2, 2, 2012.
- [5] Carlino P. *Escribir, leer y aprender en la universidad. Una introducción a la alfabetización académica*. Fondo de Cultura Económica de Argentina, Buenos Aires, 2005.
- [6] Velez G. *El ingreso: la problemática del acceso a las culturas académicas de la universidad. Colección de cuadernillos de actualización para pensar en la cultura universitaria*. Univ. Nac. Río Cuarto, Año 2, N° 1, 2005.
- [7] Morales O. A., Cassany D. *Leer y Escribir en la Universidad: hacia la lectura y la escritura crítica de géneros científicos*. Revista Memoria, Barinas, 1-14, 2008.
- [8] Galagovsky L., Bekerman D., Di Giacomo M. A., Alí S. *Algunas reflexiones sobre la distancia entre "hablar química" y "comprender química"*. Ciência & Educação (Bauru), 20, 4, 785-799, 2014.
- [9] CONFEDI. *Acuerdo sobre Competencias Genéricas*. Córdoba: XLI Plenario CONFEDI, 2008.
- [10] Morcela O., Wisky C., Milani E. *Medición del estado flow como indicador de aprendizaje, en el desarrollo de competencias para la comunicación*. IV Congreso Argentino de Ingeniería – X Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería, Córdoba, 2018.
- [11] Berglund A., Heintz F. *Integrating soft skills into engineering education for increased student throughput and more professional engineers*. In Proceedings of LTHs 8: e Pedagogiska Inspirations konferens. Universidad de Lund, Suecia, 2014.
- [12] Antunes R. *¿Cuál es el futuro del trabajo en la era digital?* Observatorio Latinoamericano y Caribeño, 4, 1, 2020.
- [13] Paoloni P.V. *Estudios sobre motivación: enfoques, resultados, lineamientos para acciones futuras*. Cuadernillo de motivación para el aprendizaje. Avances conceptuales e implicancias metodológicas. Univ. Nac. Río Cuarto, 31-38, 2010.
- [14] Núñez Pérez J. C., González García J. A., García García S. I., González-Pumariega Solís S. *Motivación en el ámbito universitario: concepto de inteligencia, metas de estudio, elección de tareas y aproximaciones al aprendizaje*. Revista de Educación, 310, 337-360, 1996.
- [15] Ander-Egg E. *Introducción a la planificación*. Siglo XXI, Madrid, 1991.
- [16] Morera I., Climent M. J., Iborra S., Atienza J. *Aprendizaje cooperativo. Metodologías Activas Grupo de innovación en metodologías activas (GIMA)*, 43-56, 2008.
- [17] Aparici, R., Garcia Montilla, A. *Lectura de Imágenes*. España. Ediciones de la Torre. 1998.
- [18] Sánchez, J. *Usos educativos de Internet*. Revista Enlaces, N 18, año 5, 32-39. Instituto de Informática Educativa, Universidad de La Frontera. Chile, 1999.
- [19] Morales López, S., Hershberger del Arenal, R., Acosta Arreguín, E. *Evaluación por competencias: ¿cómo se hace?* Revista de la Facultad de Medicina (México), 63(3), 46-56, 2021.



## DESARROLLO DE CAPACIDADES EN EL ÁMBITO AEROSPAZIAL: MODELADO, CONTROL DE ACTITUD Y SIMULACIÓN DE UN SATÉLITE TIPO CUBESAT

**Pedro Benjamin Gelid<sup>1</sup>, Lucas Damián Fraga<sup>2</sup> y Tomás Carmelo Jiménez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Departamento Académico de Mecánica – FCEyT Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. [benjamingelid@hotmail.com](mailto:benjamingelid@hotmail.com)

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Eléctrica – Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. [fragalucasdamian@gmail.com](mailto:fragalucasdamian@gmail.com)

<sup>3</sup> Estudiante de Ingeniería Electromecánica – Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. [carmelotjimenez12@gmail.com](mailto:carmelotjimenez12@gmail.com)

### RESUMEN

El presente trabajo se encuadra en un Proyecto de Investigación de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE) que tiene por objetivo desarrollar capacidades dentro del ámbito aeroespacial. Se trata del primer proyecto en este campo en la Universidad y el inicio de una nueva etapa de investigación, formación, experimentación y transferencia.

El trabajo consiste en tres secciones fundamentales: Modelado, Control de Actitud y Simulación, finalizando en una breve sección que trata acerca de la estimación de parámetros para desarrollar una maqueta que permitirá apreciar determinados fenómenos en un grado de libertad.

En la sección del modelado se expone al satélite como un cuerpo rígido y se obtiene el modelo no lineal a partir de la Ecuación de Euler. Seguidamente se obtiene el modelo lineal a partir del cual se propone el control de actitud.

Para el control de actitud se utilizó el control proporcional-derivativo y se hacen referencias de otras técnicas de control más avanzadas. Para la simulación se utilizó el software Matlab/Simulink y se obtuvo gráficas que evidencian los principios que rigen en un satélite. Por último, se mencionan los elementos y estiman parámetros para desarrollar una maqueta en un grado de libertad.

Se concluye que este trabajo sirve como guía para iniciarse en una de las temáticas de los CubeSat, específicamente en el control. Además, permitió idear una futura maqueta que con su desarrollo se profundizará la investigación en este campo. Por último, se destaca que este trabajo contribuye enormemente en la formación del grupo de investigación.

**Palabras Clave:** Modelos de Sistemas, Control, Simulación, Satélites



## 1. INTRODUCCIÓN

El problema de control de un satélite es un tema importante en la ingeniería de control. Un cuerpo que orbita la Tierra sufre perturbaciones tendientes a afectar la actitud deseada del satélite. Aquí el sistema de control toma importancia evitando la pérdida de orientación y fracaso de la misión.

Los satélites pequeños (SmallSat) se han convertido en una forma cada vez más viable de acceso al espacio debido a su bajo costo y rápido tiempo de desarrollo. Los CubeSat son una clase de SmallSat con requisitos estrictos de tamaño, forma, masa y configuraciones de lanzamiento. Una de las características más destacadas es la estructura escalable ya que consisten en cubos de 10 cm de lado donde cada uno se le llama "1U" (1 unidad) y se puede extender hasta 12U [1]. Son ampliamente utilizados por universidades, agencias gubernamentales y no gubernamentales para la investigación científica y demostraciones de nuevas tecnologías.

Es destacable que en un satélite se combinan una gran cantidad de conceptos provenientes de la física, matemática, álgebra, electrónica y control, por lo cual es un desafío el formarse sobre esta exclusiva temática.

El presente trabajo está organizado en secciones para facilitar la comprensión del tema y se anuncian en los párrafos siguientes.

La sección 2 trata sobre el modelado del sistema. Abarca la matemática y física puesta en consideración para lograr representar un satélite. Para tal fin se trata sobre la dinámica tridimensional del cuerpo rígido, cinemática mediante ángulos de Euler y modelos de actuadores mediante ruedas de reacción.

La sección 3 trata sobre el control de actitud del satélite. Se justifica el controlador a adoptar, a partir del cual se desprende el uso de un control proporcional derivativo el cual se sintoniza con la ayuda de Matlab.

La sección 4 trata sobre la simulación y resultados. Primero se refiere a los parámetros utilizados para simular y luego se simula un escenario de apuntamiento (pointing).

La sección 5 trata acerca de la estimación de parámetros para desarrollar una maqueta que permitirá apreciar determinados fenómenos en un grado de libertad.

La sección 6 trata sobre las conclusiones, donde se hacen comentarios de las secciones pasadas y se plantean posibilidades de mejora y ampliaciones tomando como base este trabajo y en vista

de que corresponde a un Proyecto de Investigación de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).

## 2. MODELO DE SISTEMA

### 2.1. Marcos de Referencias

Un marco de referencia es un conjunto de tres ejes ortogonales usados para expresar direcciones de los fenómenos físicos y matemáticos. En la temática de los satélites se suele considerar tres marcos de referencia que se enuncian a continuación.

Marco Inercial (N): el origen de este marco está localizado en el centro de masa de la tierra, el eje Z es perpendicular al plano del ecuador mientras los ejes X e Y se encuentran en dicho plano y sus sentidos se obtienen por la regla de la mano derecha.

Marco Vertical Local y Horizonte Local (LVLH): el origen de este marco está localizado en el centro de masa del satélite. El eje Z apunta hacia el centro de la tierra (Nadir), el eje X apunta tangente a la trayectoria de la órbita y el eje Y completa con la regla de la mano derecha resultando normal al plano de la órbita.

Marco Cuerpo (B): el origen de este marco está localizado en el centro de masa del satélite y está ligado al mismo, con lo cual acompaña al movimiento del cuerpo.

En la Figura 1 se observan los marcos de referencia enunciados, extraído de [2].

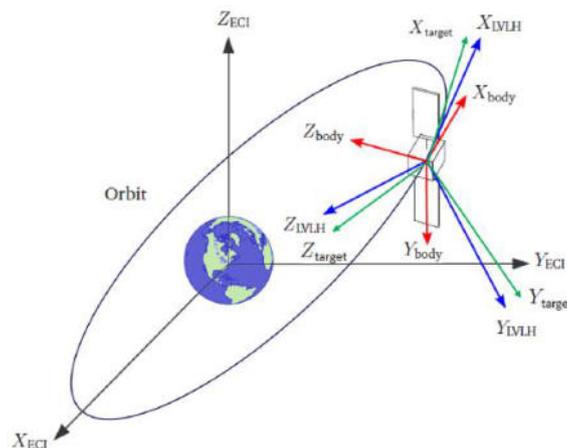


Figura 1: Marcos de referencias



## 2.2. Dinámica

Considerando un cuerpo rígido en movimiento relativo respecto a un marco de referencia inercial, la ecuación dinámica se puede obtener a partir del análisis de los momentos angulares. En este sentido la Ecuación de Euler se expresa como indica la Ecuación (1). [3]

$$T = \dot{H} + \omega \times H \quad (1)$$

Donde,  $H$  es cantidad de movimiento angular del cuerpo en el marco B,  $T$  son los momentos que actúan en el cuerpo y  $\omega$  es la velocidad angular del marco de referencia B.

El momento angular  $H$  puede escribirse, en función del tensor de inercia  $I$  del cuerpo y su velocidad angular  $\omega$ , de la manera que se enuncia en la Ecuación (2).

$$H = I\omega \quad (2)$$

Luego, bajo la consideración de que el cuerpo se tratará como un sólido rígido, el término  $\dot{H}$  resultará como se enuncia en la Ecuación (3).

$$\dot{H} = \frac{d}{dt}(I\omega) = I \frac{d\omega}{dt} = I\dot{\omega} \quad (3)$$

Reemplazando la Ecuación (2) y Ecuación (3) en la Ecuación (1) se expresa la Ecuación (4).

$$T = I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) \quad (4)$$

Es posible simplificar el sistema dinámico teniendo en consideración que existe un conjunto de ejes para los cuales el tensor de inercia  $I$  es diagonal, dicho conjunto son los ejes principales de inercia. Si el marco de referencia  $B$  ligado al cuerpo se hace coincidir con los ejes principales de inercia, la ecuación vectorial puede representarse como un conjunto de tres ecuaciones diferenciales no lineales. De esta forma se logra expresar el modelo dinámico de un cuerpo rígido mediante tres ecuaciones, una por cada eje, como se enuncia en la Ecuación (5).

$$\begin{aligned} T_x &= I_x \dot{\omega}_x - (I_y - I_z) \omega_y \omega_z \\ T_y &= I_y \dot{\omega}_y - (I_z - I_x) \omega_z \omega_x \\ T_z &= I_z \dot{\omega}_z - (I_x - I_y) \omega_x \omega_y \end{aligned} \quad (5)$$

Considerando velocidades angulares bajas se realiza la linealización de la Ecuación (5) resultando como se enuncia en la Ecuación (6).

$$\begin{aligned} T_x &= I_x \ddot{\phi} \\ T_y &= I_y \ddot{\theta} \\ T_z &= I_z \ddot{\psi} \end{aligned} \quad (6)$$



### 2.3. Cinemática

La orientación del sistema puede representarse mediante los ángulos de Euler y los vectores pueden multiplicarse por matrices de rotación para pasar de un marco de referencia a otro. Sin embargo, las matrices de rotación usan nueve parámetros para representar tres grados de libertad, con lo cual resulta en alta redundancia además de presentar singularidades para ciertas orientaciones. Por tales motivos, en las aplicaciones aeroespaciales se utilizan los cuaterniones (quaternions) para los cálculos, dejando relegado a los ángulos de Euler solo para la representación gráfica e interpretación de resultados. Sin embargo, dado el objetivo de este trabajo, será suficiente el uso de los ángulos de Euler.

Las expresiones de velocidad angular ( $\dot{\theta}$ ) y aceleración angular ( $\ddot{\theta}$ ) se enuncian en función de la rotación de los ángulos de Euler como se observa en la Ecuación (7) y a partir de la cual se aprecia la simpleza obtenida por la linealización.

$$\ddot{\theta} = \frac{d\dot{\theta}}{dt} = \frac{d^2(\theta)}{dt^2} \quad (7)$$

### 2.4. Actuadores

Los actuadores para el control de actitud en satélites generalmente son ruedas de reacción, bobinas de par magnético y propulsores. En satélites pequeños y del tipo CubeSat se utilizan los dos primeros, sin embargo, en este trabajo se contempla solamente ruedas de reacción.

El momento  $T$  de la Ecuación (6) puede escribirse como se enuncia en la Ecuación (8).

$$T = T_w + T_d \quad (8)$$

El momento  $T_w$  es la reacción, como consecuencia de la Tercera Ley de Newton de las ruedas, mientras que  $T_d$  es el momento de las perturbaciones.

El momento  $T_w$  referido al marco inercial se puede expresar en función del momento angular de las ruedas como se muestra en la Ecuación (9).

$$T_w = -\dot{H}_w - \omega \times H_w \quad (9)$$

Por último, supuesto que  $\omega$  tiene un valor bajo y haciendo que el torque de control hacia las ruedas de reacción sea  $T_c = \dot{H}_w$  se escribe la Ecuación (10).

$$T_{dx} + T_{cx} = I_x \ddot{\phi} \quad (10)$$

### 3. CONTROL DE ACTITUD

Controlar la actitud significa utilizar las medidas del estado actual y una referencia para calcular una demanda de torque que deberán suministrar las ruedas de reacción con el objetivo de que el estado medido sea igual a la referencia.

#### 3.1. Justificación del controlador

Despreciando el momento de las perturbaciones de la Ecuación (10), puede escribirse la función de transferencia de la planta de la manera como enuncia la Ecuación (11).

$$\theta(s)/T(s) = 1/(Is^2) \quad (11)$$

Se se trata de una planta con doble integrador (dos polos en el origen). No sería necesario implementar un controlador PID, basta con un controlador PD (proporcional-derivativo) [4].

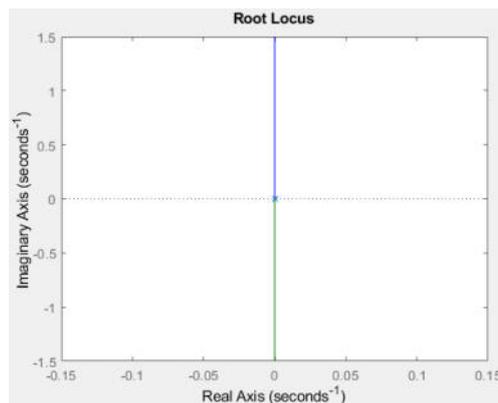


Figura 2: Lugar de las raíces de la planta

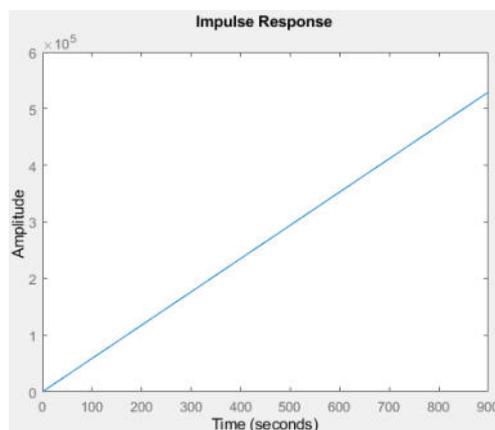


Figura 3: Respuesta de la planta en lazo abierto a una entrada impulso

En la Figura 2 se muestra el lugar de las raíces de la planta. Se trata de una planta inestable puesto que la respuesta al impulso tiende a infinito en la medida que transcurre el tiempo [5]. En la Figura 3 se muestra la respuesta al impulso para una planta con inercia  $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$ .

Por otra parte, la Ecuación (12) muestra la función de transferencia para un modelo simplificado de ruedas de reacción [6]:

$$T_R(s)/T_C(s) = 1/(\tau s + 1) \quad (12)$$

Del análisis de la Ecuación 12 se observa que es una función de transferencia de primer orden, con polo en el semiplano izquierdo, con lo cual dicho modelo es estable.

La ecuación (13) muestra la función de transferencia de la planta combinada con la rueda de reacción (con  $\tau = 1$ ). Se obtiene un sistema de tercer orden que sigue siendo inestable.

$$\frac{\theta(s)}{T_C(s)} = \left( \frac{1}{s+1} \right) \left( \frac{1}{1,7 \cdot 10^{-3} s^2} \right) = \frac{1}{1,7 \cdot 10^{-3} s^3 + 1,7 \cdot 10^{-3} s^2} \quad (13)$$

Implementando un control proporcional derivativo el sistema se vuelve estable. El cero que añade el control derivativo modifica el lugar de las raíces en el semiplano negativo y lo hace estable. La Figura 4 muestra el lugar de las raíces del sistema con control PD.

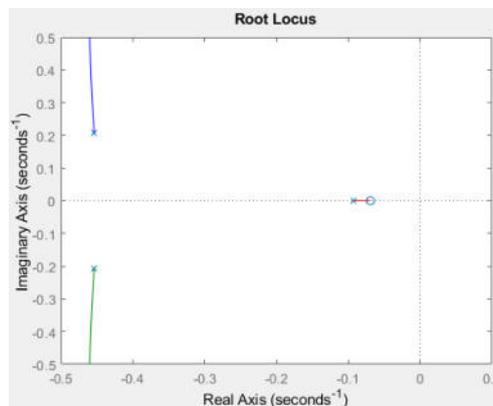


Figura 4: Lugar de las raíces del sistema con control PD

En este trabajo se utiliza el control PD y es suficiente para el objetivo del mismo, sin embargo, se tiene presente que existen otras formas de control alternativas, como el control por realimentación de cuaterniones [7], control LQR [8], y otras técnicas no lineales más avanzadas como el control por modo deslizante, y las teorías de Lyapunov [9].

### 3.2. Diseño del controlador

La ley de control PD para controlar la actitud del satélite puede escribirse como la Ecuación (14), donde  $K_p, K_d$  son las ganancias del controlador PD, y  $\theta_e$  es el error de orientación.

$$u = K_p \theta_e + K_d (d\theta_e/dt) \quad (14)$$

Se realizó el modelo del sistema en un eje en Matlab-Simulink y se le agregó saturación en el torque, se muestra en Figura 5. En trabajos futuros se contemplará la saturación en la cantidad del momento angular de las ruedas para apreciar la saturación de las ruedas [10].

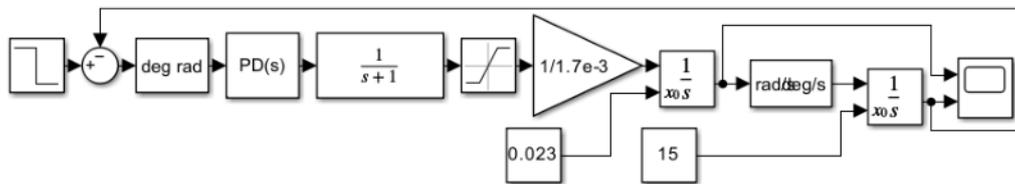


Figura 5: Modelo del sistema en un eje, realizado en Simulink

Se utilizó el paquete Control Design de Matlab para obtener los parámetros del controlador, de lo cual resulta  $K_p = 2,28 \cdot 10^{-6}$  y  $K_d = 1,49 \cdot 10^{-4}$ . En la Figura 6 se muestra la respuesta del sistema a la entrada escalón, mientras que en la Tabla 1 se muestra el desempeño.

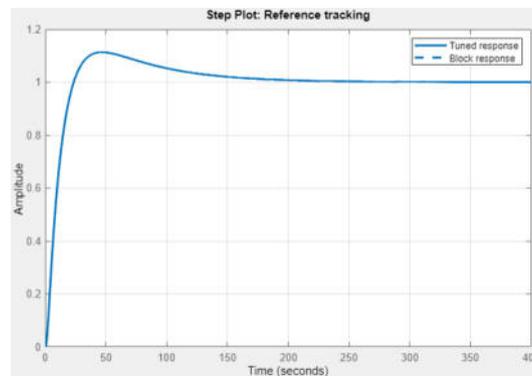


Figura 6: Respuesta al escalón en lazo cerrado con control PD (con ajuste)



Tabla 1: Desempeño del controlador

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	15.7 seconds
Settling time	151 seconds
Overshoot	11.3 %
Peak	1.11
Gain margin	31 dB @ 1.46 rad/s
Phase margin	72.9 deg @ 0.0892 rad/s
Closed-loop stability	Stable

#### 4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestra los parámetros utilizados en el modelo. La simulación se realizó en Matlab-Simulink, y el escenario es de apuntamiento, cuyo objetivo es llevar los ejes coordenados hacia las referencias.

Tabla 2: Parámetros del modelo

ítem	Valor	Descripción
I	1,70E-03	Inercia del sistema en un eje Kgm <sup>2</sup>
Tw	0,0075	Torque máximo de la rueda Nm
Kp	2,28E-06	Ganancia proporcional
Kd	1,49E-04	Ganancia derivativa

Luego de que un satélite se desmonta de su lanzador (operación de detumbling) y su velocidad angular se ha reducido lo suficiente, comienza la etapa de apuntamiento (pointing). Un satélite en órbita LEO con una altitud de 400 km se considera que ha concluido el detumbling cuando su velocidad angular ha disminuido a 0,13 grados/s (equivalente a 0,0023 rad/s) o menos [11].

Para la simulación del escenario de apuntamiento se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: velocidad angular inicial del satélite 0 rad/s; orientación inicial del satélite 15°; orientación de referencia 0° con entrada aplicada a los 50 segundos.

En la Figura 7 se presenta, en la parte superior la orientación del satélite, mientras en la parte inferior el torque provisto por la rueda.

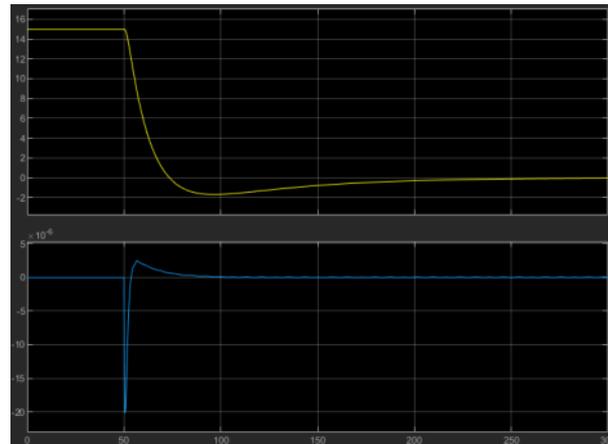


Figura 7: Orientación del sistema y torque de reacción en apuntamiento

En la Figura 7 se observa que el satélite permanece con orientación  $15^\circ$  hasta los 50 segundos, momento en el cual se aplica el cambio de referencia para llevar la orientación hacia los  $0^\circ$ . Se observa que para orientar al satélite hacia la nueva referencia la rueda de reacción debe proveer del torque necesario. También se verifica la estabilidad del sistema ya que se ha utilizado el controlador proveniente del análisis realizado en la sección 3.

## 5. TRABAJO FUTURO

Se prevé la construcción de una maqueta que permitirá visualizar los fenómenos tratados en este trabajo. Las medidas y masa serán con el concepto de un CubeSat de 1U, para ello se adoptarán las medidas de 0,10m de lado y 1,33 kg de masa total. La maqueta quedará suspendida desde un soporte mediante un hilo, con lo cual se restringe el movimiento a un grado de libertad como se ha planteado en este trabajo.

El eje de actuación de la rueda de reacción debe ser coincidente con la vertical y su ubicación lo más centrada posible en el interior de la maqueta. La rueda puede ser una pieza torneada, cuyos diámetros deberán calcularse para lograr determinada inercia. El motor puede ser de tipo brushless, para lo cual será necesario un controlador de velocidad electrónico (ESC) y una batería. A su vez se utilizará un Arduino para el comando del ESC.

Se requerirá de una unidad de medida inercial (IMU) para la cual se disponen de sensores compatibles al planteo. Dichos sensores pueden ser acelerómetro, giróscopo, o una combinación de ellos.

Finalmente, la maqueta puede dotarse de comunicación inalámbrica que permita al usuario enviar una instrucción, como ser el cambio de referencia. Sin esta comunicación se puede dejar programada la estabilización del sistema, es decir el mantenimiento de una referencia.



## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha abordado una temática vinculada con los satélites la cual se enmarca en un proyecto de investigación de la Universidad Nacional de Santiago del Estero.

En primer lugar, se ha tratado sobre el modelo del sistema. Para ello se analizaron los aspectos de la dinámica, la cinemática y las ruedas de reacción como actuadores.

Luego se trató ampliamente sobre el control de actitud del satélite. Primero se justificó la necesidad de implementar un controlador, de donde surge la propuesta del control proporcional derivativo. Luego se realizó el diseño del controlador - utilizando la extensión Control Design de Matlab - para conocer sus parámetros y evaluar el desempeño.

Luego se realizó la simulación en Matlab-Simulink del escenario de apuntamiento en el cual se obtuvieron resultados favorables tanto en estabilidad como en performance.

La simulación con Matlab favoreció al entendimiento del fenómeno. Además, se destaca que mediante el software se pueden observar diversas señales (orientación, torque, velocidad, error), modificar parámetros (inercia, torque máximo de las ruedas, ganancias del controlador) y evaluar las diferencias acontecidas para reforzar la comprensión.

El presente trabajo también sirve para poner de manifiesto la cantidad de cuestiones a analizar cuando se pretende modelar, controlar y simular un satélite.

En este caso se ha limitado la aplicación a un grado de libertad, pero en trabajos futuros se trabajará en el caso tridimensional y con otras variantes de controladores. También se prevé la construcción de una maqueta que complemente a las investigaciones y simulaciones.

## AGRADECIMIENTOS

El autor P.B.Gelid agradece a la Universidad Complutense de Madrid y a la UNED por la culminación de su etapa de formación del Máster de Ingeniería de Sistemas y Control, que ha despertado la vocación en la investigación y principalmente en la temática de los satélites. También hace extensivo el agradecimiento, en conjunto con los autores Fraga y Jiménez, a la UNSE por apoyar a la investigación en esta temática.



## REFERENCIAS

- [1] "Cubesat 101 basic concepts and processes for first-time cubesat developers". NASA CubeSat Launch Initiative, 10 2017. [Online]. <https://www.nasa.gov/sites>.
- [2] Lavezzi G., Grøtte M., & Ciarcià M. (2019). "Attitude Control Strategies for an Imaging CubeSat". 10.1109/EIT.2019.8833806.
- [3] J. L. Junkins and H. Schaub. Analytical mechanics of space systems. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [4] Ślęczek, Jakub & Zaborowski, Filip. (2021). Reaction Wheel Control System for Cubesat Nanosatellite. Journal of KONBiN. 51. 127-137. 10.2478/jok-2021-0027.
- [5] Bolton W. (2002). Ingeniería de Control. 2a Edición, Alfaomega, 2002. ISBN 9701506367, 9789701506363.
- [6] Molina, Juan & Ayerdi, Victor & Zea, Luis. (2016). Attitude Control Model for CubeSats. Techn Session VII: Attitude Determination and Control Systems. IAA-BR-07-01. 2016.
- [7] Blanke, M., & Larsen, M. B. (2010). Satellite Dynamics and Control in a Quaternion Formulation (2nd edition). Technical University of Denmark, Department of Electrical Engineering.
- [8] Eze, Charles U., Dr Mbaocha, Christian C., Dr Onojo, James O. (2016). Design of Linear Quadratic Regulator for the Three-Axis Attitude Control System Stabilization of Microsatellites. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 6, June-2016 834. ISSN 2229-5518
- [9] Topland, Morten & Gravdahl, Jan. (2004). Nonlinear Attitude Control of the MicroSatellite ESEO. Proceedings of the 55th International Astronautical Congress.
- [10] F. Landis Markley & John L. Crassidis (2014). Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0802-8>. 2014
- [11] Borsted A., Claus G., et al (2005). Attitude Control System for AAUSAT-II. Technical Report, Institute of Electronic Systems, Aalborg University, 2005.



## DESARROLLO DE COMPETENCIAS EN EL PROCESO ENSEÑANZA APRENDIZAJE DE MATEMÁTICA EN INGENIERÍA MECÁNICA

Eduardo Gago <sup>1</sup>, Caren Brstilo <sup>2</sup>, Vanina Amaya <sup>3</sup> y Carolina Pozzebon <sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Laboratorio Informático y Multidisciplinar de Ciencias Básicas – UTN Facultad Regional  
Rosario

Zeballos 1341, Rosario, Argentina - [eagago@gmail.com](mailto:eagago@gmail.com)  
[brstilocaren@gmail.com](mailto:brstilocaren@gmail.com) - [va\\_amaya@hotmail.com](mailto:va_amaya@hotmail.com).

<sup>4</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue  
Buenos Aires 1400, Neuquén - [cgpozzebon@gmail.com](mailto:cgpozzebon@gmail.com)

### RESUMEN

En la formación de un estudiante de Ingeniería se debe distinguir el desarrollo de un pensamiento sistémico sustentado en la adquisición de las competencias básicas indispensables para que pueda abordar el análisis y la resolución de problemas sencillos de la disciplina matemática.

Las estrategias didácticas aplicadas deben abordar modelos ideales en el campo ingenieril mediante el vínculo integrador de la matemática computacional con las tecnologías básicas y aplicadas en Ingeniería.

La enseñanza mediante un enfoque por competencias es un recurso que permite resaltar las capacidades básicas que deben desarrollar los estudiantes propiciando un proceso de formación integral bajo este modelo educativo. Incentivar las competencias profesionales en un marco institucional de nivel educativo superior, hace referencia al proceso que permite a los estudiantes formarse no solo en los conocimientos y habilidades para desempeñar sus funciones profesionales y laborales sino también por su proceso de desarrollo personal y social.

Basados en estas premisas, se expone en el presente trabajo el diseño de una clase en la asignatura Cálculo Avanzado, materia del tercer nivel de la carrera, con el propósito de desarrollar una situación problemática del ámbito de la Ingeniería Mecánica. Se pretende analizar el caso de un sistema masa-resorte desde la perspectiva matemática de la resolución de los sistemas de ecuaciones diferenciales aplicando Autovalores y Autovectores. Para llevar adelante este cometido se trabaja en el Laboratorio Informático y Multidisciplinar de Ciencias Básicas.

La presente propuesta pretende describir cómo sería la programación de una actividad que muestra las posibilidades que aportan las herramientas tecnológicas, considerando tanto el cálculo simbólico como la interfaz gráfica, como motivadores de futuras líneas de investigación.

En este sentido, la asignatura se considera importante para que el alumno inicie un proceso de gestión del aprendizaje de contenidos de situaciones sencillas similares al ámbito ingenieril, respaldado por el uso de herramientas matemáticas necesarias para modelar y resolver los problemas inherentes a su profesión.

**Palabras Clave:** Enseñanza Aprendizaje, Competencias, Autovectores, Sistema Mecánico.



## 1. INTRODUCCIÓN

El vertiginoso crecimiento de los recursos tecnológicos, junto con los sofisticados sistemas comunicacionales exige a la sociedad moderna estar preparada para enfrentarse a estos profundos cambios. De esta influencia no está exenta la Educación Superior y se ha instalado en varios ámbitos del quehacer universitario la necesidad de revisar y adecuar su gestión académica. Esto se ha constituido, sin lugar a dudas, en un principio de subsistencia de cualquier organización, institución, empresa y por consiguiente en el elemento central de gestión universitaria en estos tiempos.

Los sistemas de enseñanza de la educación superior son permeables a estas transformaciones que provocan la necesidad de: Revisar y adecuar la gestión académica, reorganizar, producir modificaciones en los programas docentes, y en consecuencia cambiar los procesos que moderan la enseñanza y el aprendizaje dentro de la comunidad universitaria [1].

Actualmente en el tránsito por la carrera de ser ingeniero, se propone una definición más amplia y humana al profesional en formación, entendiendo que la materia orienta su desempeño por una formación independiente, ética, creativa y responsable. Además de impartir conocimientos, se pretende una formación más holística del alumno que incluya no solo el desarrollo y evaluación de diferentes competencias, sino que apueste a algo más, como los valores educativos.

El enfoque por competencias implica, además del desempeño propio de las funciones requeridas, considerar la participación de un alumno que construye e integra sus habilidades conceptuales, procedimentales y actitudinales en su desempeño eficiente en escenarios de trabajo heterogéneos y cambiantes [1,2].

De esta forma, en la asignatura Cálculo Avanzado se considera importante para que el alumno inicie un proceso de gestión del aprendizaje tratar situaciones sencillas similares al ámbito ingenieril, respaldado por las herramientas matemáticas necesarias para modelar y resolver los problemas inherentes a su profesión.

Basados en estas premisas, se expone en el presente trabajo el diseño de una clase en la asignatura Cálculo Avanzado, materia del tercer nivel de la carrera, con el propósito de desarrollar una situación problemática del ámbito de la Ingeniería Mecánica. Se pretende analizar el caso de un sistema masa-resorte desde la perspectiva matemática de la resolución de los sistemas de ecuaciones diferenciales con Autovalores y Autovectores. Para llevar adelante este cometido se trabaja en el Laboratorio Informático y Multidisciplinar de Ciencias Básicas [3].

La presente propuesta pretende describir cómo sería la presentación de una actividad con el apoyo de las herramientas tecnológicas, considerando tanto el cálculo simbólico como la interfaz gráfica, como motivadores de futuras líneas de investigación.



## 2. METODOLOGÍA

En el proceso de enseñanza aprendizaje de Cálculo Avanzado en carreras de Ingeniería es necesario introducir actividades que involucren modelos sencillos para motivar a los estudiantes. En general, estas actividades suelen estar basadas en sistemas ingenieriles ideales debido a la escasa preparación que tienen los estudiantes cuando cursan esta asignatura.

Esta postura pedagógica permite desarrollar en los estudiantes competencias que potencian las habilidades, destrezas y conocimientos básicos a través de la elaboración de propuestas para dar respuesta a los problemas de la especialidad. Además, enfrenta a los alumnos con actividades de tinte ingenieril desde muy temprano en la enseñanza [3].

Para llevar adelante esta tarea se requiere que los alumnos trabajen en forma colaborativa, mediante la constitución de grupos de estudiantes reducidos, ya que esto posibilita que sean artífices de su propio aprendizaje. El trabajo en equipo fomenta autonomía y responsabilidad en los estudiantes, ya que ellos son los encargados de comenzar de manera incipiente a planificar la actividad, estructurar el trabajo y preparar los resultados para resolver las cuestiones planteadas.

La labor de los docentes en esta forma de implementar la enseñanza se limita a ser una guía, auxiliar del proceso de enseñanza-aprendizaje y brindar contención a lo largo de la experiencia. Además de coordinar una actividad secuenciada que se traduce en una actividad que fortalece el proyecto.

En esta propuesta metodológica se presenta el contenido matemático a partir de la búsqueda de un modelo que simula la situación a plasmar o la situación técnica en términos matemáticos, para lo cual se presenta una situación simplificada, esta situación se traduce a terminología matemática, y se trabaja con ese modelo.

El interés por el descubrimiento y la búsqueda de nuevos conocimientos se estimula en el uso de los aspectos formativos de las Matemáticas, relacionados con otras áreas de la cognición y relacionados con otras disciplinas.

La interacción alumno-alumno tiene como objetivo que en toda sesión de clase los alumnos trabajen de manera colaborativa como lo harán en su futura vida profesional, pero siempre contando inexorablemente con la supervisión de los docentes.

Se tiene presente el hecho de que la formación de alumnos por competencias considera el dueto de las competencias específicas y también las competencias genéricas, que se retroalimentan entre sí y son la raíz para valorar el perfil del futuro profesional.

Cuando se habla de competencias profesionales en un marco institucional de nivel educativo superior, se hace referencia al proceso que permite formar profesionales dúctiles no sólo en los



conocimientos y habilidades para el desempeño de sus funciones profesionales y laborales, sino también para su desarrollo personal y social [3,4].

### 3. OBJETIVOS

La actividad que se programa para el desarrollo de la clase se sustenta en el hecho de relacionar el tratamiento de los sistemas de ecuaciones diferenciales aplicando Autovalores y Autovectores con un sistema sencillo del campo ingenieril como lo es un sistema masa resorte. Esto se hace con el propósito de responder a dos cuestiones que siempre preguntan los alumnos: ¿Esto para qué me sirve? ¿Dónde aplico este contenido de matemática?

La línea de trabajo que se propone para el diseño de las actividades de la clase contempla una transformación del aprendizaje que lleva al alumno a abandonar el lugar central que históricamente ha tenido dentro del aula para ocupar otro espacio en la dinámica de la clase; espacio necesario para interactuar con los compañeros y con la propuesta de trabajo.

El uso de una herramienta de cálculo simbólico y recursos informáticos conectan las Matemáticas y los modelos reales, y desarrollan una enseñanza basada en competencias contribuyendo al desarrollo de las habilidades básicas de los estudiantes [5].

La resolución de problemas de complejidad creciente que requieren el uso de software específico hace que el alumno aporte, desde las ciencias básicas, las herramientas necesarias para la modelización y la adquisición de competencias básicas.

El diseño y planificación de este tipo de experiencias dentro del área de Matemática avanzada pretende desarrollar habilidades en los estudiantes para abordar el estudio prototipos mecánicos, fortaleciendo las competencias que permiten resolver problemas básicos dentro de la Ingeniería.

### 4. ANÁLISIS DEL ENFOQUE POR COMPETENCIAS DE LA EXPERIENCIA

Se propone dentro del espacio de la asignatura Cálculo Avanzado, poner énfasis en el desarrollo de Matemática Superior como herramienta útil para el modelado de problemas, fomentando el análisis, discusión, planteo y resolución de problemas básicos, pero a diferencia de otras asignaturas de niveles inferiores, se centra el interés en problemas de la Ingeniería Mecánica.

El tema se abordará desde un punto de vista pragmático y conceptual, considerando que el modelado traduce la información y los datos físicos a una expresión o expresiones matemáticas (en el caso propuesto la transformación de una ecuación diferencial de segundo orden en un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden). La selección y aplicación de herramientas matemáticas apropiadas usando software de cálculo simbólico, además de interpretar el significado y las implicancias de la solución matemática del caso en términos de la Ingeniería.



#### 4.1. Relación de la asignatura con el Perfil del egresado

El espacio curricular de Cálculo Avanzado otorga herramientas con el propósito de formar cuadros de ingenieros capaces de operar tecnologías existentes, adaptarlas a las necesidades locales y desarrollar procesos y maquinarias susceptibles de permitir la competencia internacional, además de realizar investigación y desarrollo, creando nuevas tecnologías [6].

El análisis preliminar de la actividad que se diseña en este trabajo está pensada la necesidad de atender a las variables didácticas que se ponen en juego para una mejor comprensión del tema.

Por otra parte, la asignatura da herramientas elementales para la actividad reservada del Ingeniero Mecánico como diseñar, proyectar y calcular máquinas, estructuras, instalaciones y sistemas mecánicos, térmicos y de fluidos mecánicos, sistemas de almacenaje de sólidos, líquidos y gases; dispositivos mecánicos en sistemas de generación de energía; y sistemas de automatización y control [6].

#### 4.2. Relación de la asignatura con las competencias genéricas

La asignatura desarrolla saberes que tributan de manera directa a las siguientes competencias genéricas (CG) expresadas en el Libro Rojo del CONFEDI:

CG 1: Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería: En la actividad diseñada por los docentes se manifiesta a través de habilidades en la manipulación de instrumentos de cálculo para su aplicación en casos prácticos (en el caso propuesto: ecuaciones diferenciales de segundo orden, sistemas de ecuaciones diferenciales de primer orden y Autovalores y Autovectores).

CG 4: Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería. En el diseño de nuestro clase se pretende utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería: Mediante la asociación de un problema básico a través de las ecuaciones diferenciales, la interpretación física de las condiciones de contorno y/o iniciales y su solución matemática, y a través del uso de software de cálculo simbólico como herramienta de apoyo en la solución de los problemas de ingeniería [7].

CG.7: Fundamentos para una comunicación efectiva. En la propuesta se prevé que los alumnos tendrán que comunicar los resultados y la secuencia de su trabajo de manera efectiva, y trabajar con respeto y solidariamente con sus compañeros.

CG.10: Fundamentos para el aprendizaje continuo: Implementar actividades con problemas de modelización fomenta la motivación y creatividad en los estudiantes, y desarrolla un espíritu emprendedor con interés por el descubrimiento. Esto hace que quieran aprender más allá de lo establecido en los contenidos de la asignatura.



### 4.3. Relación de la asignatura con las competencias específicas de egreso

Según lo establecido en la Ord. 1901/22 CSU UTN, las competencias específicas de egreso (CEE) de acuerdo a la matriz de tributación indican que la planificación y metodología propuesta para la asignatura, y también para el caso propuesto, hace que los saberes del espacio curricular sirvan de fundamento o relación a las siguientes competencias específicas establecidas en el Libro Rojo:

CEE 1.2: Calcular e implementar tecnológicamente una alternativa de solución. Se tributa desde el cálculo y la modelación matemática de problemas elementales de la ingeniería para su posterior implementación tecnológica.

CEE 2.2: Realizar la gestión del mantenimiento: Se tributa desde la fundamentación matemática para la gestión del mantenimiento que utiliza concretamente los contenidos teóricos de los Sistemas de ecuaciones diferenciales aplicando Autovalores y Autovectores.

CEE 2.3: Operar y controlar proyectos de Ingeniería Mecánica: Se tributa desde la fundamentación de la teoría de las Ecuaciones diferenciales y los Autovalores y Autovectores, elementos que se utilizan para la teoría de control de procesos [7].

En Cálculo Avanzado no se tributan el resto de las competencias específicas de egreso.

### 4.4. Resultados de aprendizaje

Se pretende como resultado de aprendizaje con el diseño de la clase que los alumnos modelen y resuelvan problemas de contorno con Ecuaciones diferenciales aplicando Autovalores y Autovectores en el estudio de problemas de Ingeniería, teniendo en cuenta para dicha resolución el uso de recursos informáticos.

## 5. PLANIFICACIÓN DE LA EXPERIENCIA

En la enseñanza universitaria, el modelado de sistemas es una actividad que potencia las competencias matemáticas. Los estudiantes deben ser capaces de analizar e interpretar diferentes modelos, no se espera que produzcan nuevos desarrollos pero deben lograr conectar los conocimientos adquiridos con diferentes herramientas que permitan la resolución y validación de situaciones ante escenarios cambiantes.

Para ello se tiene previsto la organización de una clase a futuro con la modalidad de taller, donde se presentará la propuesta a los alumnos con aplicación de software específico. Se utilizará para la clase material digitalizado que estará disponible en el campus virtual, además se brindará información sobre la bibliografía y otras fuentes de búsqueda que complementen el material de estudio e investigación.



En la planificación de la propuesta se propone que los alumnos formen grupos de tres o cuatro integrantes, y la clase se estructurará de manera que en primera instancia los estudiantes analicen el material bibliográfico relacionado con el tema Autovalores y Autovectores. Una vez terminada esta etapa los alumnos estarán en condiciones de analizar el caso propuesto.

### 5.1. Modelización de un sistema mecánico

Se propondrá a los estudiantes analizar el sistema mecánico representado en la Figura 1 que considera una versión muy simplificada de un sistema de suspensión de la rueda de un vehículo.

El sistema incluye un resorte y un amortiguador. El resorte tiene una rigidez propia del material con el que fue diseñado y esto determina la constante del resorte  $k$ . El amortiguador es quien ejerce la fricción en el sistema de suspensión y suaviza en mayor o menor medida los vaivenes del resorte. Esta capacidad de contrarrestar el movimiento del resorte está caracterizada por la constante de amortiguamiento  $b$ .

El modelo que rige el comportamiento del sistema es el que se expresa en la Ecuación (1).

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = F \quad (1)$$

Siendo,  $y$ : elongación en función del tiempo,  $m$ : masa del sistema y  $F$ : fuerza restauradora.

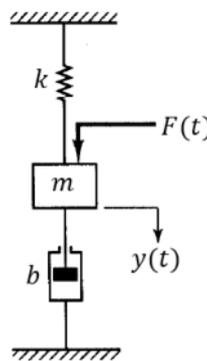


Figura 1: Sistema mecánico

Las condiciones iniciales para el modelo propuesto son: la elongación inicial  $y(0) = 0$  y la velocidad de salida inicial también cero, o sea  $y'(0) = 0$ .

Los alumnos deberán encontrar una expresión que determine la función elongación en función del tiempo para este caso, siendo que el prototipo a escala del sistema de suspensión considera los siguientes datos:  $m = 2 \text{ kg}$ ;  $k = 2 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ ,  $b = 5 \text{ N} \frac{\text{s}}{\text{m}}$  y  $F = 10 \text{ N}$  [7].

Para ayudar a los estudiantes a organizar su trabajo, se sugerirán las siguientes preguntas orientadoras:



- ¿Cuál es el sistema de ecuaciones diferenciales equivalente a la Ecuación (1) que representa el modelo propuesto?
- ¿Cuáles son los valores propios y los vectores propios asociados al sistema de ecuaciones diferenciales?
- ¿Cuál es la matriz fundamental asociada al sistema y cuál es su respectiva inversa?
- ¿Cuál es la función que determina la elongación en función del tiempo para los datos indicados?
- ¿Cuál es la gráfica del modelo?
- ¿Qué características se pueden presentar en este modelo?
- ¿Qué sucede con el comportamiento del sistema si se varía alguno de los coeficientes de la Ecuación (1) manteniendo constantes los otros?

La fuerza externa  $F(t)$  es el elemento en la entrada para el sistema, y el desplazamiento  $y(t)$  de la elongación es la salida. El desplazamiento  $y(t)$  se mide a partir de la posición de equilibrio en ausencia de una fuerza externa. Este sistema tiene una única entrada y una sola salida.

El amortiguador es quien ejerce la fricción en el sistema de suspensión y suaviza en mayor o menor medida los vaivenes del resorte. Esta capacidad de contrarrestar el movimiento del resorte está caracterizada por la constante de amortiguamiento que se simboliza con la letra  $b$  [8], [9].

En primera instancia, los alumnos determinarán el sistema de ecuaciones diferenciales equivalente a la Ecuación (1)

$$S') \begin{cases} \frac{dy}{dt} = x \\ \frac{dx}{dt} = -\frac{k}{m}y - \frac{b}{m}x + \frac{F}{m} \end{cases} \quad (2)$$

Las condiciones iniciales asociadas al sistema  $S'$  son:  $y(0) = y'(0) = x(0) = 0$ . A partir de estos datos, los alumnos reemplazarán en  $S'$  los datos suministrados en el problema, resultando el sistema de ecuaciones diferenciales (3) [10].

$$S) \begin{cases} \frac{dy}{dt} = x \\ \frac{dx}{dt} = -y - \frac{5}{2}x + 5 \end{cases} \quad (3)$$

## 5.2. Resolución matemática del sistema mediante herramientas computacionales

Una vez reemplazados los datos en la Ecuación (3), está previsto que los alumnos utilicen el software Mathematica para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales. Cabe aclarar que

los alumnos de Cálculo Avanzado en Ingeniería Mecánica desarrollan toda la asignatura utilizando dicho software. Además, los alumnos de todas las carreras de Ingeniería de la Facultad Regional, tanto en primero como en segundo año, realizan trabajos prácticos de temas específicos con dicho programa en Análisis Matemático I, Análisis Matemático II y Álgebra y Geometría Analítica.

In[1]:= $a = \{\{0, 1\}, \{-1, -5/2\}\}$	In[7]:= $\text{Reduce}[p[-1/2] \cdot \{\{u1\}, \{u2\}\} = \{0, 0\}, \{u1, u2\}]$
Out[1]:= $\{\{0, 1\}, \{-1, -5/2\}\}$	Out[7]:= $u2 = -\frac{u1}{2}$
In[2]:= $\text{Eigenvalues}[a]$	In[8]:= $b = \{\{-1/2, -2\}, \{1, 1\}\}$
Out[2]:= $\{-2, -\frac{1}{2}\}$	Out[8]:= $\{\{-\frac{1}{2}, -2\}, \{1, 1\}\}$
In[3]:= $\text{Eigenvectors}[a]$	In[9]:= $c = \text{Inverse}[b] \cdot a \cdot b$
Out[3]:= $\{\{-\frac{1}{2}, 1\}, \{-2, 1\}\}$	Out[9]:= $\{\{-2, 0\}, \{0, -\frac{1}{2}\}\}$
In[4]:= $p[k_] = \{\{-k, 1\}, \{-1, -5/2 - k\}\}$	In[10]:= $c \cdot u$
Out[4]:= $\{\{-k, 1\}, \{-1, -\frac{5}{2} - k\}\}$	Out[10]:= $\{\{-2 u1\}, \{-\frac{u2}{2}\}\}$
In[5]:= $u = \{\{u1\}, \{u2\}\}$	In[11]:= $\text{DSolve}[-2 u1[t] == u1'[t], u1[t], t]$
Out[5]:= $\{\{u1\}, \{u2\}\}$	Out[11]:= $\{\{u1[t] \rightarrow e^{-2t} C[1]\}\}$
In[6]:= $\text{Reduce}[p[-2] \cdot \{\{u1\}, \{u2\}\} = \{0, 0\}, \{u1, u2\}]$	In[12]:= $\text{DSolve}[-\frac{u2[t]}{2} == u2'[t], u2[t], t]$
Out[6]:= $u2 = -2 u1$	Out[12]:= $\{\{u2[t] \rightarrow e^{-t/2} C[1]\}\}$

Figura 2: Trabajo a realizar por los alumnos en PC (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 2 se enuncia la secuencia de los pasos que los alumnos tendrán que realizar con la computadora para resolver el caso propuesto. Según lo expresado en la Figura 2, los alumnos determinarán que  $u_1 = c_1 e^{-2t}$  y  $u_2 = c_2 e^{-\frac{1}{2}t}$ , en consecuencia ahora estarán en condiciones de expresar la familia de funciones  $y(t)$ , señalada en la Ecuación (4)

$$y = c_1 e^{-2t} + c_2 e^{-\frac{1}{2}t} + 5 \quad (4)$$

De acuerdo a los datos suministrados para el caso a analizar, en la Figura 3 se representa un ejemplo del cálculo que los alumnos deberán hacer con el software para encontrar la expresión matemática definitiva asociado al modelo de la Figura 1. Con este propósito deben aplicar las

condiciones iniciales asociadas al sistema de ecuaciones diferenciales (2).

```
In[13]:= Y[t_] = c1 Exp[-2 t] + c2 Exp[-1 / 2 t] + 5
Out[13]= 5 + c1 e-2t + c2 e-t/2

In[14]:= Solve[{y[0] == 0, y'[0] == 0}, {c1, c2}]
Out[14]= {{c1 -> 5/3, c2 -> -20/3}}
```

Figura 3: Solución final del problema (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 3 se observan los resultados que obtendrán los alumnos siendo:  $c_1 = \frac{5}{3}$  y  $c_2 = -\frac{20}{3}$ , y consecuentemente podrán enunciar la ley de la función elongación en función del tiempo.

$$y(t) = \frac{5}{3} e^{-2t} - \frac{20}{3} e^{-\frac{1}{2}t} + 5 \quad (5)$$

### 5.3. Interpretación gráfica del modelo

Los estudiantes determinarán que el gráfico de la Figura 4 representa la respuesta del sistema en función del tiempo. Se les solicitará que describan que sucede con la elongación a medida que transcurre el tiempo y se discutirá, si es que lo han desarrollado en otras asignaturas, cómo es el comportamiento del sistema (Críticamente amortiguado, hiperamortiguado o subamortiguado).

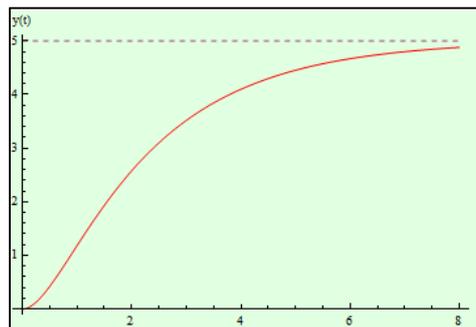


Figura 4: Respuesta del sistema (Fuente: Elaboración propia)

También se les pedirá que en una misma gráfica comparen qué sucede cuando varían el valor de uno los coeficientes en la Ecuación (1), mientras mantienen constante las otras magnitudes.

En la Figura 5 se enuncia un ejemplo del trabajo de los alumnos para obtener una gráfica donde variarán el valor de la constante de amortiguamiento manteniendo los valores del coeficiente del



resorte y la masa. En esta etapa del futuro trabajo los alumnos deberán identificar y analizar qué sucede en el sistema cuando se establece un cambio de unos de los coeficientes de la Ecuación (1) e indicar qué pasaría en el caso de variación sea de otro coeficiente.

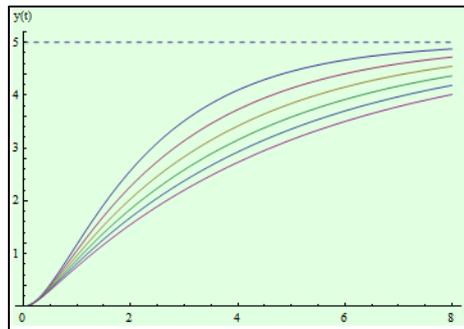


Figura 5: Diferentes respuestas del sistema (Fuente: Elaboración propia)

## 6. CONCLUSIONES

Desde una línea de innovación educativa en Ingeniería, como la que se implementa en la experiencia, se trabaja sobre nuevos paradigmas de enseñanza que se reformulan constantemente.

La intención es lograr un mayor desarrollo de capacidades intelectuales, adquisición de destrezas, sustitución de técnicas obsoletas por medios más eficientes y rápidos, y una mejor integración de conocimientos en el proceso de enseñanza aprendizaje. En función de esto, y con la inclusión de la informática, la utilización de nuevas metodologías pedagógicas y diversas estrategias didácticas, apuntan al trabajo multidisciplinar.

El abordaje de actividades de carácter multidisciplinar desde las Ciencias Básicas, a través de la exploración de nuevos conocimientos, fomentan la creatividad a partir del análisis y el manejo de la información, lo que redundará en un proceso de enseñanza aprendizaje sustentable.

Actividades de este tipo en la enseñanza en Ingeniería debe adoptar una plataforma de gestión de contenidos que brinden la posibilidad de comunicación entre disciplinas y además establezcan una conexión que propicie el desarrollo de los conocimientos.

El diseño de este tipo de actividades de aprendizaje en la enseñanza en Ingeniería pretende que al finalizar el curso el alumno haya logrado conocimientos que le permitan abordar problemas que requieran la modelización matemática aplicando apropiadamente los distintos métodos de solución de ecuaciones diferenciales y sistemas de ecuaciones diferenciales

Si bien en este trabajo se relata la planificación de una experiencia que todavía no se ha puesto en práctica, se debe tener en cuenta los comportamientos posibles de los alumnos, así como el



análisis de en qué forma estos comportamientos suponen la adquisición de los conocimientos que se desean alcanzar.

## REFERENCIAS

- [1] Chickering, A., Ehrmann, S. *Implementing the seven principles: Technology as a lever*, AAHE Bulletin, Vol. 49, Nº 2, pp. 3-6, 1996.
- [2] Kontos, G. *Best Practices in online teaching and learning*. 12th International Conference and Education and New Learning Technologies, ISBN: 978-84-09-17979-4, ISSN: 2340 -1117, 6 y 7 de julio 2020, España.
- [3] Beckers, J., Crinon, J., Simons, G. *Aprendizaje por competencias: Reducir las desigualdades de aprendizaje entre los alumnos*. Popular, Argentina, 2014.
- [4] Mahmud, M., Gutiérrez, O. *Estrategia de Enseñanza Basada en el Cambio Conceptual para la Transformación de Ideas Previas en el Aprendizaje de las Ciencias*. Revista Formación Universitaria. Vol. 3, Nº 1, pp. 11-20, 2010.
- [5] Gago, E., Szekieta, P., Mascheroni, A. Knowledge Integrator Projects: Transdisciplinary Approach Teaching Mathematics in Mechanical Engineering. 13th. International Conference on Education and New Learning Technologies, ISBN: 978-84-09-31267-2, ISSN: 2340-1117, 5 y 6 de julio de 2021. España.
- [6] UTN Rectorado. *Diseño curricular para la carrera Ingeniería Mecánica*, Argentina, 2022.
- [7] CONFEDI. *Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la República Argentina (Libro Rojo)*. Fasta Ediciones, Argentina, 2018.
- [8] Ricardo, H. *Ecuaciones diferenciales: Una introducción moderna*. Reverté, España, 2008.
- [9] Ogata, K. *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación, España, 2010.
- [10] Lay, D. *Álgebra Lineal con aplicaciones*. Pearson Educación, México, 2012.



## LA ENSEÑANZA DE MATEMÁTICA AVANZADA MEDIANTE ACTIVIDADES MULTIDISCIPLINARIAS Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Eduardo Gago <sup>1</sup>, Marcelo Zurbriggen <sup>1</sup> y Matías Romero <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio Informático y Multidisciplinar de Cs. Básicas – UTN Facultad Regional Rosario

Zeballos 1341, Rosario, Argentina - [eagago@gmail.com](mailto:eagago@gmail.com)  
[marcelozurb@gmail.com](mailto:marcelozurb@gmail.com) - [mati\\_rom@hotmail.com](mailto:mati_rom@hotmail.com)

### RESUMEN

La enseñanza de Matemática Superior en carreras de ingeniería busca promover situaciones de aprendizaje que migren de los problemas algorítmicos que aparecen en la bibliografía tradicional a modelos ingenieriles. Esta apreciación acuerda con el enfoque de un modelo pedagógico basado en competencias que actualmente rige en todos los programas en ingeniería.

El propósito de este trabajo es presentar una actividad que se desarrolla dentro de la clase en la asignatura Cálculo Avanzado en la carrera Ingeniería Mecánica mediante el uso de diferentes herramientas para el modelado de un sistema físico dinámico, considerando la complejidad del sistema, señalando la importancia de interpretar sus funciones a través de herramientas básicas que involucran el modelado matemático y los sistemas de transferencia de calor.

Se pretende mostrar a los alumnos un sistema de transferencia de calor de un termómetro sumergido en un baño de agua simulando el proceso de circulación de energía calorífica que experimentan los intercambiadores de calor en la industria.

El trabajo se enfoca en la necesidad de vincular y conectar la matemática computacional con los modelos que se desarrollan en ingeniería mecánica; para lograrlo, se plantea una situación particular, y se analizan los parámetros que deben controlarse para lograr una respuesta adecuada.

Se analizan las características del sistema proponiendo una situación de entrada al sistema, y analizando la respuesta adecuada utilizando los conceptos de la Transformada de Laplace, identificando cómo estos se pueden aplicar en modelos ingenieriles.

En este caso los alumnos gestionan el aprendizaje mediante el uso de herramientas computacionales que por su potencialidad brindan la posibilidad de resaltar el carácter multidisciplinar en la enseñanza de Matemática.

Las innovaciones curriculares deben incluir aspectos multidisciplinarios, enfatizando los puntos de vista de los sistemas e introducir problemas de ingeniería, desde muy temprano en la enseñanza.

**Palabras Clave:** Modelización, simulación, Multidisciplina, Enseñanza de Matemática.



## 1. INTRODUCCIÓN

Con la creciente utilización de los sistemas de control numérico en la industria, el análisis dinámico de los mismos se torna relevante a la hora de implementarlos en sistemas. La esencia del análisis dinámico puede por consiguiente establecerse como: dada alguna forma de representación matemática de un proceso, investigar la respuesta a diferentes cambios en la entrada del proceso.

Dado un modelo del proceso en estudio se pretende hallar la respuesta  $y(t)$  a una entrada  $x(t)$ , incluyendo las constantes físicas del sistema mecánico. Cualquier análisis dinámico satisfactorio requiere enfatizar en dos puntos a tener en cuenta: un modelo del proceso y funciones de entrada bien caracterizadas para lograr inducir la respuesta  $y(t)$  de la salida observada.

La tarea de obtener la respuesta del sistema dinámico involucra la resolución de ecuaciones diferenciales matemáticas que surgen cuando una entrada es incorporada en el modelo del proceso [1]. Como se espera una performance satisfactoria de esta tarea, se requiere de ciertas herramientas matemáticas de análisis tales como modelos representados por ecuaciones diferenciales lineales y no lineales, ordinarias y parciales; una familiarización con tales ecuaciones, especialmente en el modo en el que pueden ser resueltas será importante para realizar un análisis dinámico.

El propósito de este trabajo es presentar una actividad que se desarrolla dentro de la clase en la asignatura Cálculo Avanzado en la carrera Ingeniería Mecánica mediante el uso de diferentes herramientas para el modelado de un sistema físico dinámico, considerando la complejidad del sistema, señalando la importancia de interpretar sus funciones a través de herramientas básicas que involucran el modelado matemático y los sistemas de transferencia de calor.

## 2. CÁLCULO AVANZADO EN EL CURRÍCULO DE INGENIERÍA MECÁNICA

La estructura del currículo de Cálculo Avanzado existente, con asignaturas por año, se organiza en un tronco integrador de asignaturas hacia arriba y en un sistema horizontal de asignaturas correlativas, de forma que los alumnos puedan integrar los conocimientos en orden creciente de complejidad. Un material inclusivo tiene como objetivo crear, a lo largo de la carrera, un espacio de síntesis multidisciplinario que permita al estudiante comprender las características de la práctica de la ingeniería, a partir de la resolución de problemas abiertos de la Ingeniería Mecánica.

La forma en que se produce la articulación horizontal y vertical de los contenidos se da, principalmente, a través de dos áreas: Una de 1° y 2° nivel y otra de 3°, 4° y 5° nivel. Las materias integradoras son: Ingeniería Mecánica I, Ingeniería Mecánica II, Ingeniería Mecánica III,



Elementos de Máquinas y Proyecto Final. Estas materias incluyen la principal conexión horizontal de las relaciones de la ingeniería con las disciplinas y ciencias que se dictan cada año y la vertical de un año a otro [2].

El plan de estudios vigente se organiza en cuatro bloques interrelacionados: Ciencias Básicas, Tecnologías Básicas, Tecnologías Aplicadas y Materias Complementarias, estando orientado a la formación de profesionales para dos niveles de jerarquía según el contexto argentino.

La primera aplicación incluye tareas de uso y operación de tecnologías consolidadas. El segundo, desarrollo, implica tareas del más alto nivel técnico con uso de tecnologías avanzadas para lo cual los profesionales deben ser capaces de abordar proyectos, diseños, investigaciones, desarrollos e innovaciones técnicas. La carrera ofrece la posibilidad de asignaturas optativas, en dos áreas, Diseño y Termomecánica en el cuarto y quinto nivel respectivamente.

El bloque de ciencias básicas incluye las asignaturas de Análisis Matemático I, Análisis Matemático II, Álgebra y Geometría Analítica, Probabilidad y Estadística, Física I, Física II, Química General, Sistemas de Representación, Fundamentos de Informática y Cálculo Avanzado.

Materias o conocimientos vinculantes con Cálculo Avanzado son: Análisis Matemático I, Álgebra y Geometría Analítica, Análisis Matemático II, Fundamentos de la Informática, Física I y Física II, Análisis Termodinámico, Diseño Mecánico, Mecánica de Sólidos, Electrónica y Sistemas de Control, Tecnología del Calor.

La enseñanza de Matemática Superior en carreras de ingeniería busca promover situaciones de aprendizaje que migren de los problemas algorítmicos que aparecen en la bibliografía tradicional a modelos ingenieriles. Esta apreciación acuerda con el enfoque de un modelo pedagógico basado en competencias que actualmente rige en todos los programas en ingeniería.

Se propende que en Cálculo Avanzado, asignatura del tercer nivel de la carrera, se establezca un puente para que los alumnos comiencen a interpretar algunas situaciones sencillas de la ingeniería.

### 3. METODOLOGÍA

Se describen a continuación las estrategias metodológicas establecidas dentro del contexto institucional actual y de los materiales y métodos que se utilizan.

#### 3.1 Contexto institucional

Según lo establecido por el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI), las competencias pueden clasificarse para un mejor abordaje del tema en [3]:



- Competencias específicas: son las competencias profesionales comunes a los ingenieros de la misma especialidad.
- Competencias genéricas: se adopta un significado local de competencias genéricas, vinculado a las competencias profesionales comunes a todos los ingenieros.

En este nuevo contexto educativo el docente debe jugar un rol fundamental, rol que tiene que ver con un facilitador de situaciones y experiencias durante los procesos de aprendizaje, capaces de evaluar el desarrollo de competencias como resultado integrador de muchos elementos que implican para el futuro [4]. El núcleo central de este nuevo escenario educativo vislumbra el saber y hacer profesional en entornos dinámicos y complejos.

La Asociación Iberoamericana de Instituciones de Educación en Ingeniería (ASIBEI) promueve el desarrollo de ingenieros que respondan a las necesidades y desafíos sociales actuales con proyectos adecuados que involucren el uso de habilidades creativas, sociales y éticas. Para ello, ha establecido, a través de la Declaración de Valparaíso, las diez competencias genéricas del ingeniero iberoamericano [5].

Las competencias tecnológicas que se tienen en cuenta para el desarrollo de esta actividad son: Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería, desarrollar las competencias sociales, políticas y actitudinales, actuar con eficacia y comunicarse efectivamente en entornos de trabajo, aprender de forma continua y autónoma.

La competencia para identificar, formular y resolver problemas de ingeniería se desagrega en capacidades que requieren la articulación efectiva de diversas capacidades, entre las que se pueden detallar: Habilidad para identificar y formular problemas. Esta capacidad puede implicar, entre otros, ser capaz de [5]-[6]:

- identificar una situación presente o futura como problemática.
- identificar y organizar los datos pertinentes al problema.
- evaluar el contexto particular del problema e incluirlo en el análisis.
- definir el problema y formularlo de forma clara y precisa.
- realizar una búsqueda creativa de soluciones y seleccionar cuidadosamente la alternativa más adecuada.

### 3.2 Materiales y métodos

La clase que se relata en el trabajo se desarrolla en el Laboratorio Informático y Multidisciplinar de Ciencias Básicas en la UTN – FRRO, institución en la cual trabajan los docentes que llevan adelante esta experiencia de cátedra. El Laboratorio cuenta con 25 computadoras con



conectividad a internet y además con una pequeña biblioteca para consultar diversos temas en modelado matemático. Los alumnos también pueden consultar bibliografía en la biblioteca de la facultad.

Se diseña una clase teórico práctica de carácter tecnológico que se desarrolla en dos sesiones de tres horas cátedras cada una, en las cuales se quiere conducir a los alumnos en un proceso significativo del aprendizaje del tema propuesto, mediante el análisis de un sistema dinámico de transferencia de calor.

Las etapas diseñadas para llevar adelante la clase son: armado de los grupos de trabajo, presentación del sistema a analizar, investigación teórica sobre los sistemas de transferencia de calor, repaso de los contenidos desarrollados en la clase de teoría, modelación y análisis de los parámetros e interpretación de los resultados.

En la clase de Laboratorio, se trabaja con grupos de alumnos que no superen los tres integrantes, y para llegar a cabo la tarea prevista se les presenta una aplicación ingenieriles sencilla, con el propósito que los alumnos se apoyen en el uso de las herramientas informáticas.

Los alumnos tienen la libertad de formar los grupos de trabajo de acuerdo a su criterio, pero se fija cómo condición indispensable que se trabaje en equipo propiciando un ambiente colaborativo. Cada grupo dispone al menos de una computadora de escritorio, pero también se admite que traigan sus computadoras personales para trabajar [5].

Se analizan las características del sistema proponiendo una situación de entrada al sistema, y analizando la respuesta adecuada utilizando los conceptos de la Transformada de Laplace, identificando cómo estos se pueden aplicar en modelos ingenieriles.

En este caso los alumnos gestionan el aprendizaje mediante el uso de herramientas computacionales que por su potencialidad brindan la posibilidad de resaltar el carácter multidisciplinar en la enseñanza de Matemática.

#### 4. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es formular modelos ingenieriles en la enseñanza de la asignatura Cálculo Avanzado, en este caso analizar un sistema de transferencia de calor interpretando sus funciones a través de herramientas básicas matemáticas.

En la actualidad la enseñanza de Matemática Superior en la carrera Ingeniería Mecánica se enfoca en la necesidad de vincular la matemática computacional con la mecánica; para lograrlo, se plantea una situación particular de uso, y se examinan los parámetros que deben controlarse para lograr una respuesta adecuada. El argumento anterior se sustenta dentro de los postulados que propone la enseñanza bajo el enfoque por competencias.



En el desarrollo de la clase se propone analizar las características del sistema dinámico contemplando distintas situaciones de entrada, explicando la función de cada parte de la misma en el sistema. Esto se puede lograr gracias a la aplicación del contenido Transformada de Laplace, que se desarrolla en la asignatura, y a la utilización de un software de matemática.

Las acciones que se implementan para desarrollar las actividades programadas tienen como objetivo realizar experiencias donde los alumnos practican un trabajo autogestionado y colaborativo con el propósito de internalizar los conceptos del tema mediante el diseño de una situación ingenieril relacionada con los temas de Cálculo Avanzado aprovechando los recursos que suministran las plataformas de simulación.

Se pretende con la experiencia convertir la clase en un aula taller donde los alumnos experimenten un aprendizaje generado por técnicas de interacción entre el docente como sujeto pasivo y el alumno como un sujeto activo del conocimiento.

La comunicación es parte esencial del desarrollo humano y social. En esta dirección, las competencias comunicativas son indispensables en los individuos y la sociedad, sobre todo cuando vivimos en un mundo repleto de diversa y múltiple información que circula a través de los diversos medios. Requerimos de información para comprender lo que acontece, pero a la vez necesitamos comprender la información para tomar decisiones [6].

Esta línea de trabajo, permite delinear una clase de aprendizaje que conduce al estudiante a abandonar el lugar central que históricamente ha tenido dentro del aula para ocupar otro espacio en la dinámica de la clase; espacio necesario para interactuar con sus compañeros y con la propuesta de trabajo [7].

Aun así, hablar de una Matemática que interesa en la carrera es algo insustancial, daría lugar a pensar que se enseña una Matemática que es adecuada. Las experiencias de aprendizaje no son válidas en la medida de la información que proveen, sino en la dimensión de las capacidades que generan y en la evolución intelectual que determinan. El pensamiento matemático incluye tópicos propios de la especialidad y procesos avanzados, como abstracción, justificación, visualización, estimación o razonamiento mediante hipótesis. Es una red de conceptos, simples y complejos, va más allá del mero manejo de técnicas asociadas [8]

## 5. ESPACIO CURRICULAR DE APRENDIZAJE

Se presenta a los alumnos un sistema conformado por un termómetro que se encuentra a temperatura ambiente con un tubo de ensayo que lo recubre, los cuales están inmersos en un baño de agua que está a una temperatura estable pero mayor que la temperatura ambiente. El termómetro se introduce en el tubo de ensayo con 2 ml de glicerina y el agua está contenida en un vaso de precipitado. La Figura 1 muestra un esquema del sistema a estudiar.



Se analizan las características del sistema proponiendo una situación de entrada al sistema, y analizando la respuesta adecuada utilizando los conceptos de la Transformada de Laplace, identificando cómo estos se pueden aplicar en modelos ingenieriles.

En este caso los alumnos gestionan el aprendizaje mediante el uso de herramientas computacionales que por su potencialidad brindan la posibilidad de resaltar el carácter multidisciplinar en la enseñanza de Matemática.

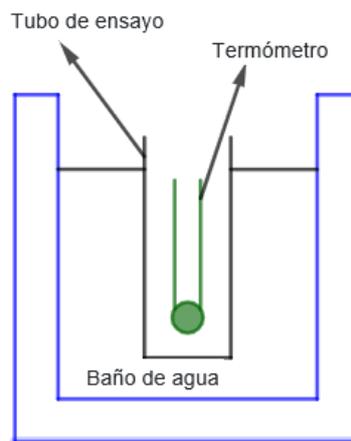


Figura 1: Esquema del dispositivo

Se desea conocer cómo evoluciona la temperatura del termómetro cuando se le aplica una función escalón dada por el hecho de introducirlo en un baño a una temperatura distinta a la del ambiente [1].

La temperatura del baño de agua  $\mu_b$  depende del tiempo y la ley de la función a aplicar que excita al sistema es:

$$\mu_b(t) = \begin{cases} 23 & \text{si } t = 0 \\ 77 & \text{si } t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

En primera instancia se van a identificar las variables que dependen del tiempo con las que se trabaja para el desarrollo de la actividad. Se fijan los siguientes símbolos:  $\mu_i$ : temperatura del tubo de ensayo,  $\mu_o$ : temperatura del termómetro.

Para que los alumnos puedan resolver la actividad propuesta, se les presenta una guía que sirve de orientación para que puedan dar solución al solicitado. De acuerdo a ello, se plantearon las siguientes consignas:

- Realizar el balance de energía que experimenta el sistema.
- Encontrar la ecuación del modelo que representa al sistema.
- Indicar si el sistema es de primer orden o es de orden superior.



- Realizar una gráfica que identifique el comportamiento del sistema.
- Justificar la necesidad de utilizar la Transformada de Laplace como herramienta matemática en la solución del modelo.

### 5.1 Balance de Energía

Los alumnos con la guía de los docentes realizan el balance de transferencia de calor del sistema.

En el análisis de los elementos que componen el sistema se denomina  $q_1$  al calor que entrega el baño y que es transmitido a través de la pared del tubo de ensayo, donde se produce una acumulación de calor a la cámara de aire que existe entre esta y el termómetro, finalmente al termómetro, donde se vuelve a producir una acumulación de calor.

Si se considera despreciable la resistencia al paso del calor del material del tubo de ensayo, se tiene que el flujo térmico del calor transmitido al tubo de ensayo es igual al calor acumulado en el tubo de ensayo más el calor que fluye al termómetro.

$$q_1 = h_1 A_v (\mu_b - \mu_i) \quad (2)$$

Donde:  $h_1$ : coeficiente de transmisión del material constitutivo del tubo de ensayo (vidrio),  $A_v$ : sección transversal del tubo de ensayo.

La Ecuación (2) puede expresarse también de la siguiente manera:

$$q_1 = m_v C_{pv} \mu'_i(t) + q_2 \quad (3)$$

Donde:  $m_v$ : masa del tubo de ensayo,  $C_{pv}$ : calor específico del material de la tubo de ensayo,  $q_2$ : calor que fluye y se acumula en el termómetro.

$$q_2 = h_2 A_T (\mu_i - \mu_o) \quad (4)$$

Donde:  $h_2$ : Coeficiente de transmisión del material constitutivo del termómetro,  $A_T$ : Área del termómetro,

La Ecuación (4) también puede expresarse con se observa en (5)

$$q_2 = m_T C_T \mu'_o(t) \quad (5)$$

Donde:  $m_T$ : masa del termómetro,  $C_{pvT}$ : calor específico del elemento sensible del termómetro.

Si ahora se define como  $R$  a la resistencia al paso del calor, y dicha resistencia es inversamente proporcional al coeficiente de transmisión del calor, entonces  $R$  es el que se enuncia en la Ecuación (6)



$$R = \frac{1}{h A} \quad (6)$$

Además, en la Ecuación (7) se define la capacidad térmica  $C$  como el producto de la masa por el calor específico, mientras que en la Ecuación (8) se define la constante de tiempo  $\theta$  como el producto de dicha capacidad térmica por la resistencia al paso del calor [1].

$$C = m C_p \quad (7)$$

$$\theta = R C \quad (8)$$

## 5.2 Modelado del sistema

De la combinación de las Ecuaciones (2), (3) y (5) los alumnos obtienen una expresión que permite calcular la temperatura del baño de agua dentro del vaso de precipitado, y si se considera, según los conceptos que se observan en las Ecuaciones (6), (7) y (8), resulta:

$$\mu_b = C_v R_v \mu'_i + R_v C_T + \mu_i \quad (9)$$

Con igual razonamiento despejan la variable  $\mu_i$  de las Ecuaciones (4) y (5), si se sabe que  $C_T$  es la capacidad térmica del termómetro y  $R_T$  la resistencia al paso del calor correspondiente al termómetro por lo que resulta la Ecuación (10)

$$\mu_i = \mu_o + R_T C_T \mu'_o \quad (10)$$

Luego derivan miembro a miembro la Ecuación (10) respecto de la variable tiempo, y obtienen la Ecuación (11)

$$\mu'_i = \mu'_o + C_T R_T \mu''_o \quad (11)$$

De la combinación de las Ecuaciones (9), (10) y (11) obtienen la ecuación diferencial (11) que rige el modelo del sistema dinámico

$$a \mu''_o + b \mu'_o + \mu_o = \mu_b \quad (12)$$

Donde:  $a = \theta_v \theta_T$ ,  $b = \theta_v + \theta_T + R_v C_T$ . Las condiciones iniciales aplicadas a la Ecuación (12) son:  $\mu_o(0) = 23$  y  $\mu'_o(0) = 0$ .

De acuerdo a la estructura de la Ecuación (12), los alumnos infieren que el sistema es de segundo orden y por ser  $\mu_b$  una función por tramos enunciada en la Ecuación (1), la ecuación diferencial (12) no es una ecuación diferencial ordinaria y se debe recurrir a utilizar la Transformada de Laplace [9].

## 5.3 Función de Transferencia y la Función temporal

Los alumnos a partir de la Ecuación (12) y aplicando los conceptos estudiados en el tema

Transformada de Laplace determinan la función de transferencia del sistema. Si realizan la Transformada de (12), resulta [5]:

$$\mu_b(s) = s(\theta_v \theta_T s^2 \mu_o(s) + (\theta_v + \theta_T + R_v C_T) s \mu_o(s) + \mu_o(s)) \quad (13)$$

A partir de la Ecuación (13) y realizando adecuados pasajes algebraicos deducen la Ecuación (14) encontrando la función de transferencia del sistema:

$$\frac{\mu_o(s)}{\mu_b(s)} = \frac{1}{s(\theta_v \theta_T s^2 + (\theta_v + \theta_T + R_v C_T) s + 1)} \quad (14)$$

Para finalizar y con ayuda de un software matemático aplicado a la Ecuación (13) determinan la función temporal del sistema [9].

$$\mu_b(t) = 23 + 77 \left(1 - e^{-\frac{tF}{D}} \left[ \cosh\left(\frac{tA}{D}\right) - \frac{F}{A} \sinh\left(\frac{tA}{D}\right) \right] \right) \quad (15)$$

Donde:  $A = \sqrt{(\theta_v + \theta_T + R_v C_T)^2 - 4\theta_v \theta_T}$ ,  $B = -\frac{1}{2\theta_T} - \frac{1}{2\theta_v} - \frac{R_v C_T}{2\theta_v \theta_T}$ ,  $D = 2\theta_v \theta_T$  y  $F = \theta_v + \theta_T + R_v C_T$ .

## 6. RESULTADOS

Con los datos suministrados a los alumnos proceden a realizar la gráfica correspondiente al modelo formalizado en la Ecuación (15). En el caso propuesto los valores de los parámetros adoptados son:  $\theta_v = 40 \text{ seg}$ ,  $\theta_T = 34 \text{ seg}$ ,  $R_v = 0,3$  y  $C_T = 0,02$ , que son los que utilizan para realizar la gráfica que se muestra en la Figura 2 [6].

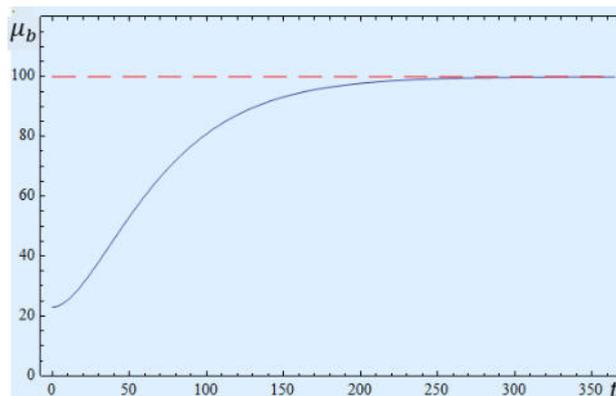


Figura 2: Gráfica del comportamiento del sistema

Los alumnos determinan que la Figura 2 muestra la gráfica que determina la evolución de la temperatura que registra el termómetro en función del tiempo, advirtien además, que al principio la temperatura se incrementa lentamente. A partir de los 50 seg. La suba de temperatura es significativa y en alrededor de los 170seg el sistema se aproxima a alcanzar su máxima



temperatura.

Además, del análisis de la Figura 2, los alumnos observan que la gráfica no posee extremos relativos, en consecuencia, la función temperatura es siempre creciente. Sin embargo, existe un punto de inflexión aproximadamente a los 50 seg, y partir de dicho punto la gráfica crece exponencialmente.

Por las características del sistema, y siguiendo con el mismo análisis, los alumnos concluyen que el sistema es hiperamortiguado, e indican con línea de puntos la asíntota que determina el valor de la temperatura final del tubo del termómetro, y que además pueden verificar este resultado calculando con el software el  $\lim_{t \rightarrow \infty} \mu_o(t)$  que permite comprobar el valor de 100°C.

## 7. CONCLUSIONES

El abordaje de actividades de carácter multidisciplinar desde las Ciencias Básicas, a través de la exploración de nuevos conocimientos, fomentan la creatividad a partir del análisis y el manejo de la información, lo que redundará en un proceso de enseñanza aprendizaje innovador.

La experiencia realizada destaca la importancia de introducir en clase modelos dinámicos relacionados con el quehacer ingenieril, esta situación, según la opinión de los alumnos fortalece el proceso enseñanza aprendizaje.

Desde la óptica de los estudiantes, la motivación juega un papel fundamental para internalizar los conceptos de los temas que se presentan en Cálculo Avanzado, y según ellos, este tipo de experiencias tienen ese propósito.

El uso de herramientas computacionales no solamente sirve para realizar la gráfica del modelo presentado, sino que en este caso fue el elemento fundamental que permite encontrar la ecuación matemática real. Esta situación es impensada hace algunos años atrás. El uso de las herramientas digitales dota de mayor significatividad y sentido a todo el proceso educativo.

Pese a que la ecuación que modela el sistema es compleja, los alumnos encuentran que la investigación del marco teórico de la experiencia es importante para poder arribar al modelo conceptual del caso.

La integración de la matemática computacional con las áreas tecnológicas en el currículum de Ingeniería permite incorporar nuevos estilos de trabajo a partir de principios organizadores que favorecen la vinculación de los saberes y les otorgan sentido, transformando lo que generan las fronteras disciplinarias.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar su profundo agradecimiento a la docente e investigadora, nuestra gran maestra, Mg. Ing. Alicia María Tinnirello, por ser para nosotros una referente en el campo de la investigación. Su dedicación generosa y apasionada nos permitió profundizar en la relación de la Matemática Computacional y los sistemas dinámicos.

## REFERENCIAS

- [1] Ogata, K. *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación, Madrid, 2003.
- [2] Tinnirello A., Gago E. *Integrating Mathematics Technology with Mechanical Engineering Curriculum*. 9th International Conference on Education and New Learning Technologies, ISBN: 978-84-697-3777-4 ISSN: 2340-1117, 3-5 July, 2017, Barcelona, Spain. Appears in: EDULEARN17 Proceedings Publication year: 2017. Pages: 1496-1505.
- [3] CONFEDI. *Competencias en Ingeniería*. Confedi, Argentina, 2014.
- [4] M. Rosen, *Engineering Education: Future Trends and Advances*, Proceedings of the 6<sup>th</sup>. WSEAS International Conference on Engineering Education, Vol. 1, 2009, pp. 44-52.
- [5] Gago, E., Tinnirello, A., Szekieta, P., D'Alessandro, L. *The Role of Technology in Competency-based Teaching in Engineering Curriculum: An Experience in Basic Sciences*. 11th International Conference on Education and New Learning Technologies, ISBN: 978-84-09-12031-4. ISSN: 2340-1117., 1-3 July, 2019, Palma de Mallorca, Spain. Appears in: EDULEARN19 Proceedings Publication year: 2019. Pages: 7512-7521.
- [6] R. Posada Álvarez, *Formación Superior Basada en Competencias, Interdisciplinariedad y Trabajo Autónomo del Estudiante*, Revista Iberoamericana de Educación, Vol. 1, N° 10, pp. 6-8, 2011.
- [7] Tinnirello A., Gago E., D'Alessandro, L. *La Emergencia de la Matemática Computacional en Ingeniería: Proyectos Integradores en Cálculo Avanzado en Ingeniería Mecánica*. IV Congreso Argentino de Ingeniería (CADI) - X Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería (CAEDI), ISBN: 978-950-33-1453-1, 19 al 21 de septiembre de 2018, Córdoba, Argentina.
- [8] Cantoral, R. *Enseñanza de la Matemática en la Educación Superior*. Sinéctica, Vol 1, N° 19, pp.3-27. 2001.
- [9] James, G. *Matemáticas Avanzadas para Ingeniería*. Prentice Hall, México, 2002.



## LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE, DURANTE Y POST PANDEMIA

Rodolfo Neira<sup>1</sup>, Rodolfo Neira (H)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento Ingeniería Electromecánica – UTN Facultad Regional San Francisco  
Av. De la Universidad 501, San Francisco (Cba), Argentina- rodolfoneira8@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento Ingeniería Electromecánica – UTN Facultad Regional San Francisco  
Av. De la Universidad 501, San Francisco (Cba), Argentina- neirarodolfo@yahoo.com.ar

### RESUMEN

Este trabajo da cuenta de las actividades de enseñanza y aprendizaje antes, durante y después de la pandemia mundial del SARS-COVID 19, en la UTN Facultad Regional San Francisco. En el mismo proporcionamos las adecuaciones, metodologías de enseñanza, adaptaciones en los aprendizajes y formas de evaluaciones. Antes de la pandemia, las clases se desarrollaban en forma presencial con un enfoque tradicional, durante la pandemia, se pasó a un entorno totalmente virtual, donde se modifican totalmente las interacciones personales. Los aspectos más relevantes en relación al uso de los materiales educativos digitales tienen que ver con la motivación del estudiante durante el desarrollo de las asignaturas, con una mejor comprensión de las temáticas así como el acceso de material didáctico complementario de la teoría y de las clases convencionales. Después de la pandemia, se debe estudiar la posibilidad de clases híbridas a partir de las experiencias vividas durante el aislamiento social, preventivo y obligatorio, porque se modifica la forma de encarar la educación, mediada por las tecnologías de la información y la comunicación, pasando a un entorno donde se comparten la presencialidad y la virtualidad. Se debería adecuar el dictado de clases en formato dual (presencial y virtual), como así también los materiales didácticos, trabajos prácticos y, las formas de evaluación.

**Palabras Clave:** Aprendizaje; Enseñanza; Pandemia; Educación Híbrida



## 1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías, en general, y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), en particular, en los últimos veinte años, han irrumpido en nuestra vida cotidiana cambiando la forma de relacionarnos, de trabajar, de capacitarnos, es decir, produjeron un cambio estructural profundo que no tiene retorno, y el ámbito educativo no escapa a esta realidad, donde cambian en forma sustancial los roles de docentes y alumnos.

Las TIC, en los últimos diez años, han comenzado a formar parte del cotidiano pedagógico en las universidades nacionales argentinas, donde las han abordado reservando un espacio especial en torno a equipamiento – laboratorios o salas informáticas - han acondicionado las aulas con dispositivos electrónicos conectados a la red de redes.

Las TIC se han ido incorporando lentamente y en diversas modalidades, a la enseñanza en todas las carreras de Ingeniería y las licenciaturas, en la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) en general y, en la Facultad Regional San Francisco, en particular.

Cuando se desató la pandemia, la educación en general y las universidades en particular, no estaban preparadas para impartir educación a distancia a todos los estudiantes de manera igualitaria. Durante este aislamiento social, preventivo y obligatorio de los años 2020 y 2021, se modifica la forma de encarar la educación mediada por las TIC.

Pasamos de un entorno educativo presencial a uno totalmente virtual, por lo tanto, se hizo imprescindible la adecuación de todos los materiales didácticos en formato papel e investigación en bibliotecas a materiales didácticos digitales.

En este documento el objetivo es conocer las actividades de la enseñanza y el aprendizaje durante y después de la pandemia, que se desarrollaron en la UTN Facultad Regional San Francisco.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Antes de la pandemia

La UTN a partir de 1997 fue llevando a cabo de manera no coordinada diversos desarrollos virtuales en las distintas facultades. Recién en 2007 se originó el Proyecto “Campus Virtual Global” (CVG) de la UTN.

En 2006 desde la Secretaría TIC de la UTN, se decidió adoptar un software libre que se acomode a las necesidades de la Universidad y que sea un proyecto coordinado institucionalmente. La



Facultad Regional San Francisco se adhirió al CVG, y actualmente usa los servicios de dicho campus virtual (video conferencia, capacitación de posgrado, entre otros).

La Secretaría TIC creada en 2006, es la que se encarga de la planificación, desarrollo y promoción de las actividades vinculadas con las TIC, y comprende dos áreas: la de informática, que entiende en las cuestiones vinculadas a los sistemas de información de la UTN y, el área de comunicaciones, que se encarga del mantenimiento y operatividad de las redes de comunicación de voz, imágenes y datos. El CVG se utiliza como un espacio de interacción y como “extensión de la presencialidad” con lo cual no hay oferta de carreras “en línea” y la decisión de trabajar o no con este “campus virtual” depende de cada Facultad Regional.

Al año 2008, 25 Facultades Regionales se encontraban implementando el “campus virtual” provisto por el Rectorado lo que implica que cuenta con alrededor de 5000 “usuarios” en distintos puntos del país y más de 200 asignaturas que están utilizando este entorno.

Para algunas sedes el CVG se ha convertido en un instrumento de trabajo intensivo -si bien no compite con el correo electrónico- y en algunos casos le han descubierto otros usos, por ejemplo, como herramienta de trabajo en “equipos virtuales”.

Como primera experiencia de funcionamiento del CVG se incluyó su uso en el marco del Proyecto de Mejoramiento de la Enseñanza en Ingeniería (PROMEI), que es un programa de la Secretaría de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación que promueve el mejoramiento de la enseñanza de carreras vinculadas a ingeniería.

El objetivo principal de trabajar con el CVG es lograr una “presencialidad extendida”, es decir, utilizar al “campus” como un complemento de trabajo en el aula. Desde el año 2008, la gran mayoría de las sedes lo está usando de forma más o menos intensiva. Algunas de ellas tienen un propio “campus virtual” y además adoptaron el provisto por la sede del Rectorado y trabajan en paralelo puesto que cada facultad regional cuenta con autonomía en materia de tecnología para decidir sus proyectos, tal como se ha manifestado en páginas anteriores.

Antes de la irrupción de la pandemia a nivel mundial del SARS-COVID 19, nuestra UTN Facultad Regional San Francisco, desarrollaba un proceso educativo tradicional con sus características propias, con escasa utilización del CVG. Se usaba un método expositivo, la evaluación del aprendizaje era reproductiva y, se centraba en la calificación del resultado.

La relación profesor-estudiante era unilateral, se fundamentaba en la concepción del estudiante como receptor de información, también conocida como educación bancaria, donde se depositan los saberes. El educador tradicional es analítico, sintético, lógico. Esto se evidencia en la preparación del material didáctico, en la forma de exposición y en el proceso de evaluación. En el aula no se potencia la individualidad y la creatividad de los estudiantes, ya que tienden a ser sujetos pasivos, con poco interés en el proceso de aprendizaje. Algunas características de la



pedagogía tradicional son el magistrocentrismo: el profesor es el pilar fundamental para que se lleva a cabo la educación. Es quien garantiza el conocimiento y, con un modelo rígido y de poca interacción.

Se usa el mismo método de enseñanza en todas las ocasiones, es verbalista y pasivo; el repaso es entendido como la repetición de lo que el maestro explica. Las clases son organizadas, ordenadas y programadas. La pedagogía constructivista presenta un desarrollo de pensamiento limitado y poca participación del estudiante.

Algunos elementos que describen este proceso son:

Metodologías: El docente presenta el tema a desarrollar a través de exposición a los estudiantes.

Material de apoyo: Se utiliza pizarra, eventualmente con esquemas, diagramas y, también en ocasiones con presentaciones digitales.

Evaluaciones: En formato tradicional, con preguntas de desarrollo de los temas expuestos.

Motivación: Los estudiantes en clase al constituir grupos reducidos y observables por el docente, se encontraron motivados en un 70 %.

Comprensión: Al presentar trabajos de ejercitación para realizar en forma diferida, no se evidencia por parte de los estudiantes una real comprensión del tema expuesto.

Competencias comunicativas: Los estudiantes no sabían ni se los preparaba para producir trabajos y exponerlos.

## 2.2. Durante la pandemia

La pandemia viene a irrumpir en la sociedad toda de un modo tal que produce un reacomodamiento no buscado de las relaciones sociales, laborales y educacionales.

El aula tradicional fue reemplazada por programas que permiten hacer una clase en vivo conversando cara a cara, tales como Zoom, Google Meet, Jitsi y Teams. Para las presentaciones se debieron utilizar programas tales como Power Point, Prezi, Canva, Google Slides, Genially.

La clase virtual debió adecuarse a un ritmo más rápido que brinda la mediación de la tecnología, con exposiciones breves, actividades prácticas concretas para reforzar el contenido brindado y la incentivación para una participación más activa del estudiante, aunque en las clases virtuales eran pocos los estudiantes que tenían encendidas sus cámaras y audios.

Las comunicaciones en forma presencial fueron cambiadas por el correo electrónico y las herramientas brindadas por las redes sociales (Whatsapp, Youtube), generando grupos de contactos en los cuales se compartían archivos. Los materiales de apoyo eran depositados en repositorios digitales soportados por programas tales como Google Classroom y Moodle. Los



trabajos prácticos, su seguimiento y evaluación fueron pasados a formato digital y subidos a las plataformas mencionadas.

Además, las evaluaciones, debieron modificarse en virtud de las herramientas tecnológicas disponibles y la utilización de aulas virtuales aprovechando el espacio que brindan.

El armado de las evaluaciones requirió de un aprendizaje de las herramientas brindadas por estas plataformas educativas, debiendo incorporar preguntas sobre la base de datos correspondientes para generar los instrumentos evaluativos necesarios.

En la Facultad Regional San Francisco generaron acciones tendientes a incorporar herramientas digitales complementarias para afrontar tales desafíos.

En forma paralela, desde la Secretaría Académica de la Facultad Regional y, con el apoyo de la Secretaría Académica del Rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional, se implementan cursos de capacitación para el manejo de todas las herramientas disponibles en el Campus Virtual Global y, también en la capacitación correspondiente en herramientas de evaluación.

En este contexto, se produce un intercambio significativo entre los pares de todas las carreras que se cursan en la Facultad Regional, donde cada uno aporta sus saberes previos en este tema, logrando una sinergia que genera beneficios antes impensados.

Surgen así instancias de capacitación entre pares en temas de elaboración de materiales didácticos digitales como así también en la generación de herramientas de evaluación, como los cuestionarios en línea, archivos en dispositivos drive y, guías de evaluación subidas al CVG.

Debemos mencionar que durante el proceso de pandemia, la evaluación también ha tenido un reordenamiento, ya que las mismas se desarrollaban mediante guías escritas y fueron reemplazadas por los medios digitales correspondientes.

Se tuvo que trabajar en la adecuación del diseño de situaciones de evaluación mediadas por tecnologías donde se puede mencionar el seguimiento de los trabajos solicitados y subidos al CVG, análisis de las calificaciones obtenidas en las distintas instancias, uso de material audiovisual, evaluaciones en conjunto con los estudiantes y, presentación de trabajos de los estudiantes con sus producciones, que ilustren el logro de sus desempeños.

En este proceso de pandemia, pasamos de tener las evidencias de aprendizaje en forma diferida a una etapa de recolección de información de manera automática y en línea, dando la posibilidad a un intercambio con los estudiantes, toda vez que éste vive en una realidad muy acelerada. [1]

### **2.2.1 Los docentes y las TIC**

Las TIC han irrumpido en nuestra vida cotidiana cambiando la forma de relacionarnos, de trabajar, de capacitarnos, es decir, produjeron un cambio estructural profundo que no tiene



retorno. Estas tecnologías han dado lugar a un proceso de globalización formidable donde las empresas, gobiernos y fuerzas productivas están íntimamente ligadas.

Parafraseando a Manuel Castells (1997), en los albores del tercer milenio, la sociedad toda se ha transformado. [2]

En el marco de este contexto, la Facultad Regional de San Francisco, no se mantuvo al margen de lo señalado en los párrafos anteriores. Sus autoridades permanentemente destacaron la importancia de la incorporación e integración de las TIC en las aulas y algunos profesores se hicieron eco de estas afirmaciones.

La utilización de las nuevas tecnologías muestra su carácter de herramienta mediadora pero también traspasa los límites de su utilización en sentido político, pedagógico y didáctico. Su carácter de innovación es justamente ese traspaso de carácter de herramienta. Su verdadero desafío consiste en transformar la situación en la que se enmarca, con independencia de su valor narrativo o comunicacional, en un lugar de no exclusión. [3]

Las TIC, en los últimos diez años, han comenzado a formar parte del cotidiano pedagógico en las universidades argentinas. Es lugar común referirnos a ellas con la naturalidad con la que se nombran las cosas del entorno cercano; cada vez ganan más adeptos entre docentes y estudiantes; las casas de estudio les reservan un espacio especial – laboratorios o salas informáticas - o acondicionan las aulas con dispositivos electrónicos conectados a la red de redes. Nadie duda ya de los avances y las transformaciones que se producirán en los sistemas de educación superior y en las culturas institucionales en esta nueva era de la información caracterizada según palabras de Manuel Castells (1997), por la “cultura de la virtualidad real”.

La investigación sobre TIC en educación ha pasado por distintas etapas en las que se han producido cambios, tanto en los planteados en investigación como en las metodologías. El aumento en la producción de trabajos sobre TIC y Educación (ya sea libros, artículos de revistas especializadas, documentos electrónicos en la Red, congresos, informes de investigación, entre otros) es un hecho palpable.

Tomamos las palabras de Roderá y Barberá (2010) cuando dice:

“Deberíamos plantearnos seriamente la posibilidad de establecer un “cambio educativo”, tanto práctico como conceptual y actitudinal, antes de hablar y escribir párrafos y más párrafos ya que, falta cultura social. Todavía estamos fuertemente anclados, única y exclusivamente, a la cultura del lápiz y el papel (o cultura 2D). Sin perder de vista que el cambio no se encuentra en las tecnologías “per sé” y sí en el uso educativo que se hace de las mismas encaminado a potenciar el aprendizaje y el papel activo del alumnado”. [4]



Los docentes que utilizaban las TIC en los procesos de enseñanza y aprendizaje les fue mucho más sencillo adaptarse a esta nueva realidad que se vivió en el período de aislamiento obligatorio, que aquellos que no incorporaron las TIC a sus prácticas docentes.

### **2.2.2 Los jóvenes y las TIC**

El mundo, como señala Thomas Friedman (2007), es cada vez más plano, en el sentido de que muchas fronteras tradicionales, como las de geografía, las restricciones comunicativas y las ideas arcaicas, están disolviéndose y, la interacción a través de esas fronteras se ha vuelto normativa y esencial. El futuro demanda que los jóvenes adquieran habilidades necesarias para desempeñarse en este mundo “plano”. Algunas de estas habilidades son básicas y técnicas, pero hay un requisito más importante en cuanto a los modos de pensar y abordar la experiencia y el descubrimiento de problemas, que difieren mucho de los que eran habituales en la vida del siglo XX y están consagrados e insertos en la práctica educativa convencional, sobre todo en los procedimientos de evaluación. [5]

Las nuevas tecnologías son ampliamente utilizadas por los jóvenes para interactuar social e informalmente, apoyados en este caso por los dispositivos móviles inteligentes y las redes sociales.

La incorporación de estas prácticas al aula ha sido bastante lenta.

El punto de partida es el usuario individual que se conecta con otros usuarios ya sea individualmente o a través de las redes existentes y, con diversas fuentes de información.

El conocimiento se distribuye, en vez de quedar dentro de una sola mente. [6]

Esto indica que está produciéndose una nueva “mentalidad”.

Es decir, aún no se ha aprovechado al máximo la destreza tecnológica de los jóvenes ni tampoco, lo que es más importante, todo lo que implican estas nuevas prácticas para concebir la educación.

Estos avances tienen el potencial de trastocar muchos de los modelos y creencias sobre el aprendizaje que son la base de la práctica docente y, tienen particular importancia para la educación técnica.

En general, la práctica educativa ha tardado en adaptarse a las implicaciones de las nuevas tecnologías. El uso de aparatos tecnológicos se considera “recreativo” y a los estudiantes en general se les dice que dejen sus “móviles” fuera del aula. Incluso cuando se usan nuevas tecnologías en clase, estas tienden a ser extensiones mínimas del acceso a la “biblioteca” a través de una computadora en el aula o proyectos controlados por el docente.



Con este proceso de incorporación de las TIC aparece en escena, lo que muchos autores denominan como “Sociedad Red”, es decir, nuevas formas sociales en las que las personas no están obligadas a vivir “cara a cara”. Surgen sociedades virtuales (corporaciones, bibliotecas, clases) y, prácticas relacionadas con ellas también virtuales. Caracterizan a esta sociedad la complejidad, la interdependencia, la imprevisibilidad, como así también la sobreinformación y el ruido. Además se destacan la rapidez de los procesos productivos y sus consecuencias, la preeminencia de la imagen y del espectáculo, de lo concreto sobre lo abstracto y simbólico, de lo narrativo sobre lo analítico, de lo dinámico sobre lo estático de la emoción sobre la razón y del sensacionalismo sobre lo previsible “el hecho importante a destacar es que, al primar esta forma de expresión, la cultura de la imagen y del espectáculo está contribuyendo también a desarrollar en las personas unas determinadas maneras de hacer, de pensar y de sentir”. [7]

Nos encontramos con una sociedad que presenta una dinámica relacional que choca con la mecánica institucional tradicional.

Los jóvenes se adaptaron con mayor rapidez a las clases virtuales en época de pandemia, debido a los conocimientos informáticos y redes sociales, sin temores a esta nueva forma de aprendizaje mediada por tecnologías.

Las modificaciones que se produjeron son:

Metodología: Planteo de un problema a resolver, análisis del mismo a través de videoconferencia. Investigación personal para su resolución, consultas y producciones parciales.

Material de apoyo: Se emplean las TIC con todas las herramientas disponibles (campus virtual, plataformas digitales de aprendizaje, dispositivos de almacenaje y consulta como Google Drive, Classroom)

Evaluaciones: Se emplean pruebas objetivas, cuestionarios digitales con opciones múltiples, Verdadero/Falso con justificación, rúbricas, listas de cotejo, retroalimentación inmediata (audio o videoconferencia). Retroalimentación diferida mediante foros, correo electrónico, grupos en redes sociales, portafolios, mapas conceptuales.

Motivación: Durante los primeros tiempos de pandemia se los encontró desmotivados por lo que fue necesario implementar nuevas estrategias, un 50 % de los estudiantes apagaba sus audios argumentando distintas motivaciones (cortaban la videoconferencia), por lo general, señalaban causas técnicas propias de la conexión. Más adelante la situación cambió.

Comprensión: Al no tener presencialidad y, por distintas causas algunos temas no eran bien comprendidos y, eso se percibía en las evaluaciones.

Competencias comunicativas: Se empezó con pequeñas producciones no siempre de buena calidad.



### 2.3. Post pandemia

En la Facultad Regional San Francisco, en esta etapa, la enseñanza y el aprendizaje volvieron a sus estados de interacción en el aula presencial, con las clases expositivas por parte del docente y, la escasa participación de los estudiantes.

Además, los docentes continuaron con la utilización de las herramientas provistas por el CVG en cuanto a subir los materiales digitales para el contenido teórico y, las actividades prácticas integradoras, como así también las instancias de evaluación.

En todos los casos la educación formal se enfrenta con el más fundamental y general de los problemas: cómo abordar la complejidad. El objetivo de la educación consiste en ayudarnos a aprender aquello que no adquirimos naturalmente durante nuestra vida diaria. La educación siempre debe preguntarse qué puede hacerse para hacer accesibles el conocimiento y las prácticas estimulantes.

Para Perkins (2018) esta pregunta cobra particular importancia en ámbitos formales de aprendizaje como es la universidad, donde los cursos suelen ser numerosos y los contenidos vastos. Brinda a los estudiantes una visión global que les permite dar un mayor significado a los desafíos que se les presentan. Y brindan también la oportunidad de desarrollar el conocimiento en gran parte implícito en la participación activa. [8]

Dejar de aprender acerca de algo para pasar a hacer el todo, evitando la exageración del estudio de las partes en forma separada, para que al final se vea el resultado completo.

Pasar a un proceso donde el aprendizaje y la enseñanza se realicen en una acción integradora.

Respecto de la tecnología en educación, cuando se la utiliza correctamente, la actual tecnología de la información brinda enfoques valiosos para el aprendizaje. Puede acercar a los estudiante a las simulaciones por computadora, las herramientas de investigación en línea y, la comunicación por correo electrónico y las redes sociales, pueden contribuir a que los estudiantes lleven a cabo investigaciones colaborativas o debates críticos y reflexivos acerca de temas complicados.

En esta etapa, es importante lograr mantener las incorporaciones de las TIC en el proceso de enseñanza y aprendizaje amalgamados a las clases presenciales. Y así lograr que los docentes y los estudiantes continúen utilizando los beneficios de la tecnología de la información con la implementación de las clases híbridas.

Las modificaciones que se produjeron son:

Metodologías: Investigaciones, trabajo colaborativo (pequeños grupos). Exposiciones.

Material de apoyo: Utilización de material impreso (libros, apuntes) y, uso de las TIC.



Evaluaciones: Trabajos de producción escrita. Exposiciones orales de los estudiantes. Discusiones grupales.

Motivación: Hoy se los ve más motivados. Las clases presenciales les permiten una interacción más fluida y, las virtuales les facilitan el tiempo necesario para leer y analizar el material, confrontar ideas con compañeros y luego, llevar al aula sus inquietudes. La motivación ha aumentado y, las clases se hacen más productivas y dinámicas. Al finalizar el año se realizará una evaluación en la que se tomarán en cuenta 56 estudiantes de un total de 80 estudiantes de segundo año de las carreras de ingeniería (cursos dictados por el mismo docente), según lo que se ha planteado con anterioridad.

Comprensión: Al exponer sus producciones en clase, se modifica el rol de los docentes y de los estudiantes, mejoró y, eso se percibe en los trabajos que se presentan y en las exposiciones que realizan. La presencia del docente como observador y participante en el estudio personal facilita la comprensión. A fin de año se evaluará este ítem después de llevar a cabo la siguiente actividad ya planificada: Al grupo clase se le darán unas veinte cuestiones (temas) que deberán resolver mediante la investigación bibliográfica y, de manera autónoma. De ellas elegirán una para desarrollar. Reunido el material deberán presentar un informe donde deben consignarse las cuestiones nodales del tema (esto permitirá ver el nivel de comprensión de los estudiantes) y, se finalizará con una exposición ante el grupo clase.

Competencias comunicativas: Las exposiciones mejoraron notablemente las competencias comunicativas y la habilidad para seleccionar material bibliográfico adecuado.

### 3. RESULTADOS

Los resultados relevados muestran que los docentes y estudiantes fueron modificando su forma de participación e interacción en el proceso de enseñanza y aprendizaje de acuerdo con la etapa que les tocó vivir.

Esto se evidenció en las observaciones realizadas antes, durante y post pandemia, donde tuvieron que sortear las situaciones que se les presentó, pasando abruptamente de las clases presenciales a los entornos totalmente virtuales.

Se pudo llevar a cabo el trabajo en entornos virtuales de enseñanza y de aprendizaje por parte de los docentes de manera rápida y efectiva y, de parte de los estudiantes una adaptación sin complicaciones debido a los conocimientos digitales adquiridos con anterioridad.

Después del aislamiento social, preventivo y obligatorio, las clases retornaron a ser presenciales, con la incorporación de las tecnologías de la información brindadas por el CGV.



#### 4. CONCLUSIONES

Para incorporar estas tecnologías en el proceso educativo del siglo XXI, es necesario un cambio cultural en la educación, donde el docente debe modificar su rol en la enseñanza, pasando de ser la fuente del conocimiento a ser un guía de los contenidos que debe apropiarse el estudiante.

La educación antes de la pandemia se llevaba adelante siguiendo la forma de la enseñanza tradicional y, no se vislumbraba en un futuro próximo, un cambio tecnológico en la enseñanza y el aprendizaje.

Debido al aislamiento social, preventivo y obligatorio, se debió adecuar el dictado de clases virtuales, como así también los materiales didácticos, trabajos prácticos y, las formas de evaluación.

En relación con los aspectos pedagógicos, es posible observar que se les da diversos usos a los materiales educativos en formato digital, pero en general, éstos brindan una conexión con la realidad y, permiten relacionar contenidos. También se destaca la posibilidad de trabajar en un proceso de autogestión del aprendizaje donde los materiales digitales constituyen una oportunidad concreta.

La cuestión de la motivación de los estudiantes se evaluará con una lista de cotejo en la que aparecen los siguientes ítems: 1) Asistencia, 2) Presentación de trabajos en tiempo y forma, 3) Cantidad de consultas realizadas vía virtual o presencial, 4) Trabajos prácticos aprobados, 5) Parciales aprobados.

Teniendo en cuenta esta nueva realidad, es menester que los docentes incorporen a su práctica, escenarios que incluyan clases híbridas, las cuales evidencien solidez y coherencia, para facilitar a los estudiantes su adaptación a este modelo nuevo de aprendizaje, lo que redundará en un beneficio futuro para ambos.

#### REFERENCIAS

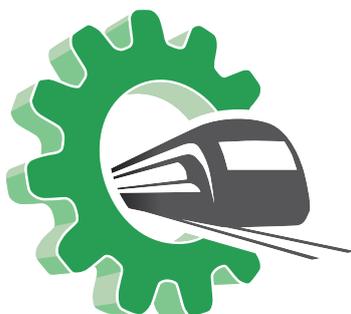
- [1] Anijovich, R., Cappelletti, G. *La evaluación como oportunidad*. Paidós, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2018.
- [2] Castells, M. *La Galaxia Internet. Reflexiones sobre Internet, empresa y sociedad*. Areté, Madrid, 2001.
- [3] Burbules, N. C., Callister, T. *Educación: riesgos y promesas de las nuevas tecnologías de la información*. Granica, España, 2001.



- [4] Roderá, A. M., Barberá, E. *LMS y web 2.0 una relación simbiótica en las aulas universitarias. Diseño e integración de actividades pedagógicas 2.0 en una plataforma Blackboard*. RED. Recuperado a partir de <https://revistas.um.es/red/article/view/244341>, 2010
- [5] Friedman, T. *The world is flat: a brief history of the twenty-first century*. Picador, Nueva York, 2007.
- [6] Haste, H. *Nueva ciudadanía y educación: Identidad, cultura y participación*. Paidós, Buenos Aires, 2017.
- [7] Coll, C., Monereo, C. *Psicología de la educación virtual*. Morata, Madrid, 2008.
- [8] Perkins, D. *El aprendizaje pleno. Principios de la enseñanza para transformar la educación*. Paidós, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2018.

Área Temática

# Industria 4.0 y Transformación Digital





## Digitalización de un tanque de transporte de leche cruda como herramienta para la toma de decisiones en la planificación de la producción en una empresa láctea

María Luciana Roldán<sup>1</sup>, Pedro Querini<sup>2</sup>, José Luis Torres<sup>3</sup>, Martín Bär<sup>4</sup>, Walter Colombo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> INGAR (CONICET/UTN), Facultad Regional Santa Fe,  
Universidad Tecnológica Nacional, [mroldan@frsf.utn.edu.ar](mailto:mroldan@frsf.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento de Ing. Industrial, Facultad Regional Santa Fe,  
Universidad Tecnológica Nacional, [pquerini@frsf.utn.edu.ar](mailto:pquerini@frsf.utn.edu.ar)

<sup>3</sup> CIESE, Facultad Regional Santa Fe,

Universidad Tecnológica Nacional, [jltorres@frsf.utn.edu.ar](mailto:jltorres@frsf.utn.edu.ar),

<sup>4</sup> Faculty of Technology, University of Applied Sciences Emden/Leer  
Emden, Germany, {[martin.baer](mailto:martin.baer), [armando.colombo](mailto:armando.colombo)}@hs-emden-leer.de

### RESUMEN

El concepto “Industria 4.0” hace referencia a una nueva forma de producción a través de la adopción de tecnologías 4.0, es decir, soluciones enfocadas en la interconectividad, automatización, el aprendizaje automatizado y los datos en tiempo real. Esta nueva revolución industrial no solo abarca la producción de bienes y/o servicios de una empresa, sino toda la cadena de valor, ya que reconfigura tanto los procesos de fabricación y servicios de los productos, como la gestión empresarial, la relación con clientes y proveedores y, en un sentido más amplio, modelos de negocio.

En este trabajo se presenta un proyecto de digitalización que aplica los conceptos de Industria 4.0 a la producción láctea, concretamente en el sector primario. Se identificó un negocio específico que tiene como objetivo mejorar la toma de decisiones en la planificación de los procesos productivos de la fábrica de lácteos a partir del conocimiento anticipado de la calidad de la leche en la etapa de acopio y recolección. En particular, se presenta una propuesta de digitalización de la cisterna del camión de transporte de leche y sus componentes. Para guiar el proceso de digitalización llevado a cabo, se utilizó el marco de referencia RAMI 4.0. En este trabajo se presenta cada etapa llevada a cabo y una prueba de concepto del activo digitalizado.

**Palabras Clave:** *Industria 4.0; Transporte de Leche Cruda; Digitalización; Gemelo digital; RAMI 4.0*



## 1. INTRODUCCIÓN

En la provincia de Santa Fe existen cerca de 3800 tambos y 520 mil vacas que producen el 25% de la leche nacional. Esto convierte a la cuenca lechera santafesina en una de las más importantes de Argentina y Latinoamérica [1]. A nivel industrial, la provincia concentra a las principales empresas elaboradoras y exportadoras de productos lácteos. El sector se caracteriza por su alto número de PyMES que abastecen el mercado local y que, además, representan un dinamizador fundamental de las economías regionales.

La Industria 4.0 refiere a una nueva manera de producir mediante la adopción de tecnologías enfocadas en la interconectividad, la automatización y los datos en tiempo real. Esta transformación no solo abarca a la producción de bienes y/o servicios de una empresa, sino a toda la cadena de valor, dado que reconfigura tanto los procesos de elaboración y las prestaciones de productos, como la gestión empresarial, las relaciones clientes y proveedores y, en un sentido más amplio, los modelos de negocios.

En este trabajo se presenta una propuesta de aplicación de los conceptos de la Industria 4.0 a la producción láctea, específicamente en el sector primario. En este contexto, el presente trabajo surge de la importancia que tiene para la industria preservar al máximo la calidad de la leche transportada desde el tambo a la planta, para asegurar también la calidad de los productos finales que ofrece a los consumidores. Se emplea el modelo RAMI 4.0 [2], que brinda un marco de trabajo de referencia para la digitalización. El trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se describe la problemática de la recolección de leche y su traslado y recepción en una planta láctea, y se identifica cuál es beneficio o “negocio” que se espera obtener mediante la digitalización. En la sección 3, se propone una solución basada en la digitalización de activos para alcanzar el beneficio buscado. En la sección 4 se presentan trabajos a futuro y conclusiones.

## 2. PROBLEMÁTICA E IDENTIFICACIÓN DE LA OPORTUNIDAD DE MEJORA

En la industria láctea, el proceso de recolección de leche en tambos es fundamental. Comienza con el ordeño de las vacas dos veces al día, idealmente cada 12 horas, a una temperatura de 37°C. Para asegurar su conservación, es necesario enfriarla rápidamente. La empresa láctea envía camiones cisterna a los tambos para retirar la leche, la cual se almacena en tanques refrigerados a 4°C hasta su transporte. Los camiones cisterna están equipados con un tanque térmico, una bomba de carga y un caudalímetro. Cada tanque tiene compartimentos aislados (cuyo volumen está entre los 5 y los 10 m<sup>3</sup>) para separar la leche de diferentes tambos y evitar contaminaciones. La recolección se organiza en función de los horarios de ordeño, las condiciones meteorológicas y la estación del año, tiene como objetivo minimizar el tiempo de transporte para evitar la degradación de la calidad de la leche. Antes de la carga, se realiza una prueba de alcohol para detectar la presencia de leche ácida debido al metabolismo bacteriano. Si la leche no pasa la prueba, ésta no se carga en el camión. Durante la recolección, se guarda



una muestra de la leche cargada en cada tambo para análisis posteriores en el laboratorio, que pueden demorar hasta 12 horas. Los volúmenes de leche producida por los tambos varían entre 1 y 5 m<sup>3</sup>. La empresa cuenta con aproximadamente son 50 tambos que la abastecen.

Una vez en la planta, se realizan pruebas de aptitud de la leche previa a la descarga de los camiones. Estas pruebas incluyen una prueba de alcohol (de mayor concentración que la realizada en los tambos), medición de acidez mediante titulación y un test rápido de detección de antibióticos. Si la leche pasa todas las pruebas, se procede a la descarga. Además, se realiza un muestreo general del tanque para controlar la composición de la leche y detectar la presencia de agua. Si se encuentra un alto porcentaje de agua, se analizan las muestras individuales de los tambos para identificar la fuente de adulteración. La calidad de la leche se determina por su composición (sólidos totales, grasas y proteínas) y su estado higiénico-sanitario (células somáticas y bacterias). Factores como la rutina de ordeño, la higiene, la conservación, el transporte y la presencia de mastitis afectan la calidad higiénico-sanitaria. Según el Código Alimentario Argentino [3], la leche se clasifica en diferentes categorías (A, B, C, D, E) en base a criterios establecidos. En la planta, la leche descargada se mezcla en silos de almacenamiento general, pero también se puede dirigir a sectores productivos específicos según los objetivos de producción (Figura 1). El proceso actual de descarga se realiza por orden de llegada de los camiones, lo que puede generar demoras de hasta 15 horas. Estas demoras perjudican la calidad de la leche, ya que el crecimiento bacteriano está relacionado con la temperatura y el tiempo. Los tanques de los camiones no son refrigerados, lo que contribuye al aumento de la temperatura y los microorganismos, y, como resultado, a un incremento en la acidez de la leche.

Se identifica que existe una oportunidad de mejora en la planificación de la producción cuando se conocen en tiempo real los valores de las variables que definen la calidad de la leche durante su transporte. Contar con dicho conocimiento permite anticipar la calidad final de la leche y ajustar el plan de producción de acuerdo con el producto final deseado. Además, posibilita tomar decisiones respecto a la necesidad o no de implementar mejoras en los tanques de los camiones, como sistemas de refrigeración, para mantener la temperatura adecuada durante el transporte y evitar la proliferación de bacterias.

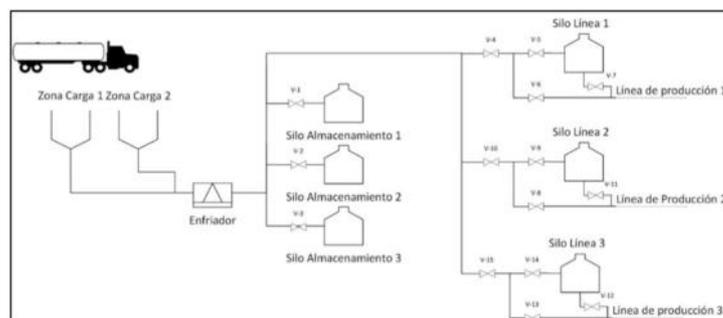


Figura 1: Esquema de descarga de camiones en planta



La optimización del proceso de recolección y descarga de leche en la industria láctea es crucial para preservar la calidad del producto final. Mediante la implementación de tecnologías de digitalización y de prácticas más eficientes enfocadas en la integración de sistemas y aplicaciones a diferentes niveles de la industria, es posible reducir los tiempos de transporte, mejorar la conservación de la leche y garantizar su integridad desde el tambo hasta la planta procesadora.

### 3. PROPUESTA

El desarrollo de la propuesta se basó en el modelo RAMI 4.0, impulsado por la Plataforma I4.0 de Alemania. RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industry) se basa en un conjunto de estándares organizados en un modelo de 3 dimensiones para describir aspectos críticos de la Industria 4.0, permitiendo la descomposición de interrelaciones complejas en grupos más pequeños y simples. La integración horizontal (cadena de valor) se basa en el estándar IEC 62890, mientras que la integración vertical se logra a través de niveles de jerarquía, basado en el estándar IEC 62264. La digitalización de los procesos de producción y activos es fundamental para implementar los conceptos de I4.0. Mediante el uso del modelo RAMI, se pueden identificar los activos que intervienen en una problemática, analizar su ubicación en la pirámide de automatización y en el ciclo de vida, y descubrir nuevas oportunidades a partir de la digitalización de los activos identificados, integrándolos a diferentes niveles de las tecnologías de información. Para comprender el dominio, se realizaron relevamientos con actores de la industria sobre las problemáticas y necesidades actuales, a partir de los cuales se identificó la necesidad de mejora indicada en esta propuesta: mejorar la toma de decisiones en la planificación de los procesos de producción de una fábrica láctea a partir del conocimiento anticipado de la calidad de la leche en la etapa de recolección. Los datos proporcionados por los activos digitalizados permitirán contribuir a: (i) Estimar la hora de llegada de camiones, (ii) Asignar cisternas a sectores de almacenamiento o productivos, (iii) Elaborar un plan de producción adecuado, (iv) Priorizar descargas según la calidad de la leche y el tiempo de transporte, (v) Proponer modificaciones en la configuración física de la planta, como, por ejemplo, incrementar la cantidad de dársenas de descarga o de silos, y (vi) Predecir la degradación de la calidad de la leche durante el transporte. La solución propuesta consiste en una aplicación basada en la digitalización del camión cisterna (activo), integrada al sistema de planificación y control de la producción de la empresa. Se delineó la arquitectura lógica de la solución, identificando los stakeholders involucrados. La aplicación se centra en obtener, servir y procesar información en tiempo real sobre la calidad de la leche transportada, incluyendo volumen, temperatura, pH y geolocalización del camión. Se requiere integración con la infraestructura IT de la planta y un modelo predictivo basado en datos históricos y en tiempo real. Con esta solución, se puede prever la calidad de la leche durante el recorrido desde los tambos hasta la planta de elaboración.



### 3.1. Identificación del activo a digitalizar

Una vez propuesta una arquitectura lógica de la solución, se avanzó identificando a los activos críticos a digitalizar para lograr la solución buscada. El activo más crítico lo constituyen los tanques térmicos en los camiones de transporte de leche cruda. El tanque del camión de transporte es un activo físico compuesto por diversos componentes. Se considera que la empresa láctea es la propietaria del tanque y la encargada de su gestión (logística de recorridos, limpieza, mantenimiento, etc.). La empresa de lácteos terceriza el transporte, siendo los tanques entregados en comodato. A efectos de alcanzar la aplicación deseada, se define que el camión cisterna es un activo formado por varios componentes:

- 2 Tanques térmicos que poseen compartimentos (cisternas): 1 tanque que se encuentra instalado en el chasis del camión con 2 cisternas, 1 tanque que se encuentra instalado en el acoplado del camión que tiene 3 cisternas.
- 1 caudalímetro con sensor de temperatura incorporado.
- 5 termómetros o sensores de temperatura digitales, uno por cada cisterna.
- 1 dispositivo para seguimiento GPS
- 5 dispositivos de medición del pH de la leche, uno por cada cisterna.
- 1 termómetro para medir la temperatura externa del tanque (clima).

Entonces, a partir de estos componentes en el activo se pueden obtener diferentes datos que conforman diferentes tipo información:

a) *Información relativa al tanque y componentes:* Patente, Marca y Modelo, Conductor a cargo del recorrido del camión, Cantidad de cisternas y volúmenes máximos, N° del remito generado en el recorrido, Marca, modelo y fecha del último mantenimiento del caudalímetro, Marca, modelo y fecha del último mantenimiento de cada pHímetro (dispositivo medidor del PH), Marca, modelo y fecha del último mantenimiento de cada sensor de temperatura, Ubicación en tiempo real, junto con datos de marca, modelo y fecha de último mantenimiento del GPS.

b) *Información relativa a la leche (cruda) transportada:* Fecha y hora de recolección, Tambos que produjeron la leche, Temperatura de la leche al momento de la carga (el caudalímetro posee sensor de la temperatura), Temperatura de la leche durante su transporte (cada cisterna dispone de un sensor de temperatura individual, durante el transporte se genera una serie de temperaturas, según una frecuencia de sensado), PH de la leche (en cada cisterna se medirá el PH regularmente a cierto intervalo de tiempo prefijado), cantidad de litros de leche cargada en cada tambo en cada cisterna (medido mediante el caudalímetro), Tiempo total que permanece la leche en el camión (este tiempo se puede calcular a partir de otros datos: Hora de inicio de carga en cada tambo, Hora de descarga en tanque de acopio en planta).

### 3.2. Arquitectura funcional

Habiendo identificado y caracterizado el activo seleccionado se procede a describir cómo se

ubica éste dentro de la Arquitectura funcional (Figura 2) de la solución propuesta a fin de comprender el rol que juega en el alcance de la solución, o las funciones que presta en relación a otros actores, específicamente ofreciendo datos para la toma de decisiones. Las principales funciones del activo a digitalizar se dividen según el momento en que se obtienen y los datos a servir: al momento de la carga de leche en el tambo, al momento del transporte de la leche, y al momento de la descarga en la planta. Por otro lado, en la planta se contará con el sistema Manufacturing Execution System (MES), el cual tiene las funciones de planificar la producción a partir de la información recibida y que trabajará apoyado en un modelo predictivo con funciones de predecir la calidad final de la leche transportada.

Al definir la arquitectura funcional, ya no es suficiente considerar al activo físico, sino que se requiere acoplar a este lo que se conoce como el “Administration shell” para dotarlo de una representación digital, que permita incorporar al activo en la solución para desempeñar las funciones definidas. Para integrar al activo digitalizado, se definen las diferentes capas de interoperabilidad (según indica la dimensión Layers de la RAMI 4.0), que posibilitarán que comuniquen o intercambien datos e información los diferentes activos y sistemas para lograr el funcionamiento de la aplicación.

**Capa de integración:** es la capa que posibilita la transición del “mundo real” o físico al mundo digital. Se requiere que el activo “tanque de transporte leche” realice 2 funciones claras: medición y transmisión de variables en el tanque (camión). En esta capa nos enfocamos en la obtención de los datos físicos o los valores de las variables deseadas.

- Durante la carga en tambo: se mide temperatura de ingreso de la leche en las cisternas del tanque de transporte
- Durante el transporte de la leche: se mide la temperatura y el PH de la leche en cada cisterna. Además, con un termómetro externo se mide la temperatura ambiental externa.
- Durante la descarga: se mide la temperatura de descarga

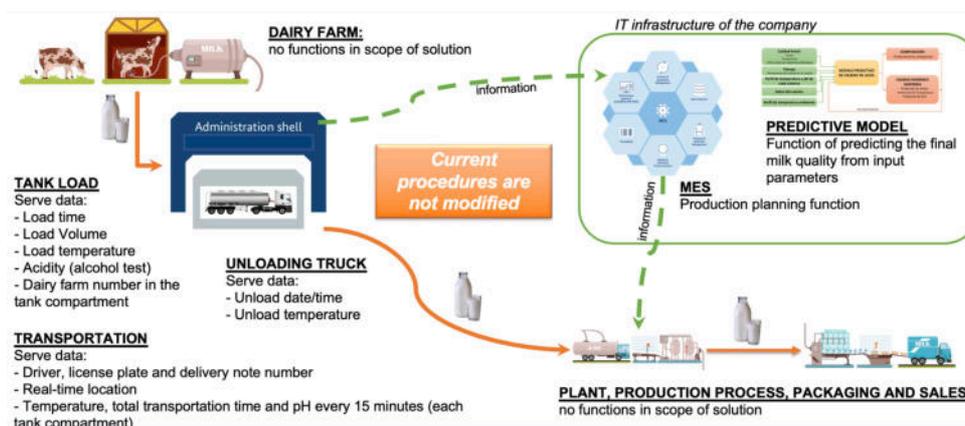


Figura 2: Arquitectura funcional de la solución propuesta



Además, el camión está dotado de un GPS que posibilita conocer los datos de geolocalización en tiempo real.

**Capa de comunicación:** describe el acceso seguro a la información (IT) y a las funciones de un activo conectado con otros activos. En otras palabras, describe qué datos se usan, dónde se usan y cuándo se distribuyen. Para lograr la solución propuesta, se requiere el intercambio de datos entre el activo (tanque), las aplicaciones que emplearán esos datos y los sistemas existentes de la empresa (particularmente el MES, que incluye el Planificador de la producción). Para la transmisión de los datos obtenidos por los dispositivos se propone usar un enlace que comunicará el camión, con las aplicaciones y/o servicios de la empresa láctea.

**Capa de información:** en esta capa se especifica el Asset Administration Shell (AAS) [4] del tanque de transporte de leche. Un AAS es una representación digital estandarizada de un activo, y se lo considera la piedra angular de la interoperabilidad entre las aplicaciones que gestionan los sistemas de fabricación. Permite identificar al activo, contiene modelos digitales de diferentes aspectos o dominios técnico del activo (denominados submodelos) y describe la funcionalidad técnica que es expuesta. Para la identificación de los elementos que componen al AAS se eligió utilizar el formato de IRI (Internationalized Resource Identifier), el cual permite identificar un recurso o un nombre en internet, y así permitir la interacción entre éste y otros recursos en Internet u otros tipos de redes.

Para la generación del AAS se utilizó la herramienta AASX Package Explorer<sup>1</sup> que permite visualizarlos y editarlos, generando un paquete de extensión .aasx. Por cuestiones de espacio, en este trabajo no se presenta el AAS completo, pero puede accederse a la especificación disponible en un repositorio externo<sup>2</sup>. A continuación, se describe cómo se estructuraron los datos del AAS del Tanque de transporte de leche. Se organizó con submodelos (Figura 3): Submodelo de propiedades generales, Submodelo de datos de GPS, Submodelo de datos de caudalímetro, Submodelo de termómetros (externo y en cada cisterna), Submodelo de phímetros (en cada cisterna), y Submodelos de cisternas 1, 2, 3, 4, y 5.

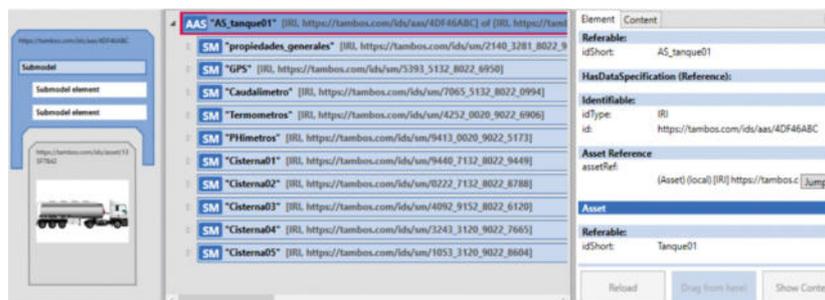


Figura 3: AAS del camión cisterna

<sup>1</sup> <https://github.com/admin-shell-io/aasx-package-explorer>

<sup>2</sup> <https://github.com/lucianaroldan/MilkTankerTruckAAS>



En cada submodelo, se define una serie de elementos que poseen un nombre (IdShort), tipo de dato, categoría (Parameter, Variable o Constant), valor ejemplo, y descripción.

El submodelo “Propiedades generales” (Figura 4) define una serie de parámetros que caracterizan al vehículo de transporte en que está instalado el tanque (patente), marca y modelo del tanque, su conductor, y la ruta a seguir (remito). El submodelo “GPS” define los parámetros que caracterizan al dispositivo GPS (marca, modelo, fecha de mantenimiento) y la variable que indica la localización del camión en tiempo real. Por otro lado, el submodelo Caudalímetro define los parámetros que caracterizan al dispositivo empleado para medir los litros de leche cargados. De manera similar, se definió el submodelo “Termómetros” que considera a los termómetros o sensores de temperatura instalados en cada cisterna, y al termómetro externo del camión. Por cada termómetro se define una “Submodel Collection” que contiene los parámetros que caracterizan al termómetro (marca, modelo, fecha de mantenimiento). En particular, para el termómetro externo se define una variable para representar la temperatura externa medida en tiempo real.

El submodelo “PHímetros” abarca a las características de los dispositivos para medición del PH en cada cisterna. Por cada PHímetro se define una “Submodel collection” que contiene los parámetros que caracterizan al dispositivo (marca, modelo, fecha de mantenimiento). Las mediciones realizadas por estos dispositivos, se representan en los submodelos de cisternas que se indican más adelante.

Finalmente, se definió un submodelo “Cisterna” por cada cisterna que posee el tanque (Figura 5). La representación propuesta posibilita agrupar los datos según los momentos de carga (“Submodel collection” Carga), transporte, y descarga (“Submodel collection” Descarga) de cada cisterna. Dado que en cada cisterna puede cargarse leche de más de un tambo (máximo 3), dentro de Carga, se definen Submodel Collections para agrupar los datos relativos a la carga en cada tambo. Entre las variables, se destacan aquellas que representan las mediciones realizadas por los dispositivos en el camión como Volumen\_cargado, Temperatura\_carga, y Temperatura\_descarga (datos generado por el caudalímetro), temp\_cisterna (dato generado por el termómetro en cada cisterna), y PH\_cisterna (dato generado por el PHímetro en cada cisterna).



Figura 4: Submodelos propiedades generales, GPS, y Caudalímetro

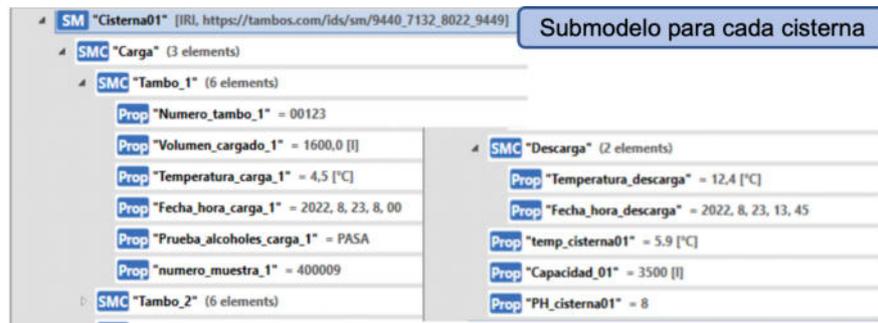


Figura 5: Submodelos Cisterna

### 3.3. Arquitectura Física (Técnica) de la solución

En la Figura 6 se representa la arquitectura técnica de la solución propuesta para un camión en particular, aunque el despliegue de la aplicación implicaría una red de dispositivos que reporten los datos en tiempo real. Desde la infraestructura IT de la planta, una aplicación específica trabaja recuperando los datos, los almacena en una base de datos y los prepara para que puedan ser utilizados como datos de entrada del Modelo Predictivo de la degradación de la leche. Posteriormente los resultados de las predicciones de la degradación de la leche pueden ser usados como entrada para la toma de decisiones a niveles de negocio, es decir pueden ser utilizados por el MES o una función del MES para re-planificar la producción si fuera necesario. Además, los resultados del modelo predictivo pueden ser usados para, en caso de superarse ciertos umbrales, enviar alertas a otras aplicaciones (en la figura se representa una notificación a una aplicación móvil que usan los choferes de camiones). Una solución completa que brinde soporte al negocio identificado requiere de la existencia de AAS de otros activos, por ejemplo, de la aplicación específica de para la solución mencionada, y el Planificador del MES (lo cual no se ha abordado en el alcance de este trabajo). Para complementar la descripción de la solución propuesta, se presenta a la izquierda de la Figura 6 un diagrama de bloques que describe las actividades que abarca la solución. Las actividades enunciadas no necesariamente se realizan de manera secuencial, pero sí se ejecutan tomando como entradas a las salidas o resultados que se obtienen en la actividad anterior. Por ejemplo, las acciones “Publicación de datos en el AAS” y “Solicitud de datos de aplicación” son actividades asíncronas entre sí y se ejecutan con diferente frecuencia. El AAS actualiza los datos de mediciones de temperaturas y PH cada 1 minuto, mientras que la aplicación solicita esos datos cada 15 minutos. El AAS se puede implementar en un dispositivo electrónico de bajo costo con capacidad de procesamiento y almacenamiento para ser instalado en un tanque (camión). El enlace de comunicaciones entre el dispositivo y las aplicaciones que requieran la información recolectada podrá ser realiza mediante comunicación GPRS (o LoraWan), dado que al ser un equipo en movimiento no se pueden plantear soluciones cableadas o inalámbricas de corto alcance.



En cuanto al protocolo que se usará para el intercambio de datos, se plantea comunicación con OPC UA ya que es el estándar que mayor adopción tiene por parte de fabricantes de tecnologías industriales. De esta manera, en el host (o servidor) donde se encuentren las aplicaciones o servicios corriendo que hacen uso de los datos provistos por el tanque del camión (el MES, etc) deberá correr un cliente OPC UA que comunicará con los dispositivos recolectores de datos (la electrónica instalada en cada camión). Por otro lado, el camión requiere estar dotado de un dispositivo de computación de placa reducida y bajo costo, con potencialidad suficiente para correr un servidor OPC UA que logre disponibilizar los datos actualizando los mismos con frecuencia de un minuto. A la hora de seleccionar la tecnología más conveniente para la solución propuesta se evaluaron distintos aspectos: Eficiencia para resolver la necesidad, Confiabilidad Costo, Disponibilidad y Capacidad de ampliación.

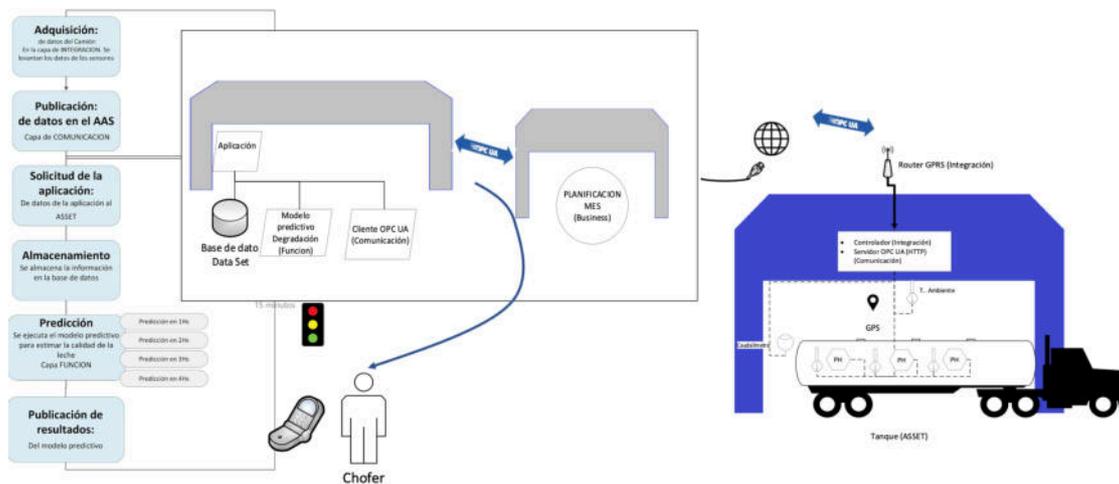


Figura 6. Arquitectura Física (Técnica) de la solución

Como resultado de la evaluación se decidió que alternativas basadas en Raspberry Pi serían una opción acertada por la facilidad provisión, el bajo costo, la gran variedad de librerías disponibles para comunicaciones (como la que se plantea en esta solución OPC UA) y de módulos para conexión con diversos sensores o detectores. De esta manera se puede configurar una placa de la Raspberry Pi 4, con una placa de conversión analógico-digital para las entradas de sensores, y un módulo de comunicación GPRS. Con esta configuración de hardware definida se podrán leer las mediciones de temperatura y PH, de los correspondientes instrumentos. Por otro lado, el dato del caudalímetro se lee mediante comunicación serie. Los datos mencionados son leídos y enrutados a nivel digital por el AAS (que se comunica mediante OPC UA) implementado en el mismo dispositivo, a través de ethernet vía un router GPRS, que se conecte mediante VPN con la aplicación que corre en un host de la fábrica. En base a los criterios mencionados, se propone una arquitectura de hardware compuesta de una Raspberry Pi 4 de 8Gb de memoria RAM con procesador Cortex-A72 64-bit quad-core (MicroSD 32 GB), y una Raspberry Pi HAT de baja



potencia con GPS y GPRS incorporados<sup>3</sup>. Se conectan al módulo 5 sensores de temperatura DS18B20 en topología bus<sup>4</sup>, un sensor de temperatura ambiente<sup>5</sup> y 5 sensores de PH Líquido (PH-4502C) con electrodo E201-BNC<sup>6</sup>.

Se considera que las aplicaciones o desarrollos de software que se requieren correrán dentro de la infraestructura existente de la planta. Además, que la lectura o solicitud de datos al AAS ocurre con una frecuencia dada por un intervalo de 15 minutos. Esto significa que, cada 15 minutos se le solicitará al AAS del tanque, que genere un muestreo completo de las variables. La respuesta con esta información será almacenada (y suministrada posteriormente), en la base de datos que se utiliza para alimentar un modelo predictivo.

El último componente de la solución conceptual es el modelo predictivo que toma los registros de la base de datos para poder prever la degradación de la leche a futuro, entregando como resultados las probables condiciones higiénico sanitarias (es decir el estado de degradación) de la misma a futuro, expresado en plazos de una hora, dos horas, 3 horas y 4 horas. Esta predicción permite conocer con anticipación si la leche se degradará demasiado (inclusive al punto de tirarla) en las próximas horas, y así permitir tomar acción para evitarlo. La utilización de lógica difusa o de redes neuronales son alternativas de implementación para el modelo predictivo teniendo en cuenta que la base de datos contaría con un dataset de información diaria suficientemente grande para que el modelo sea entrenado y realice predicciones con buena precisión.

Para implementar la solución completa sería adecuado contar con un AAS de la aplicación y de la función de planificación del MES para que ambas se comuniquen entre sí mediante OPC UA. Una vez que el MES analice la información suministrada podrá tomar acción, como solicitar a la aplicación que envíe un mensaje al chofer para que tome una acción específica, que puede ser que se dirija a la zona de descarga o bien que interrumpa su recorrido previsto y se dirija a planta.

#### 4. CONCLUSIONES

Se presentó una propuesta de digitalización para mejorar la toma de decisiones en la planificación de los procesos de producción en la industria láctea. El objetivo es anticipar la calidad de la leche recolectada desde el tambo a la planta, lo que proporciona una mayor rentabilidad al respetar la planificación actual y permitir una re-planificación oportuna según los volúmenes y calidades de la leche cruda. Además, se busca prevenir costos por descartar leche en mal estado durante el transporte. La implementación de la solución propuesta se centra en la digitalización del camión cisterna de transporte de leche. Mediante la creación de un

<sup>3</sup> [https://www.waveshare.com/wiki/GSM/GPRS/GNSS\\_HAT](https://www.waveshare.com/wiki/GSM/GPRS/GNSS_HAT)

<sup>4</sup> <https://components101.com/sensors/ds18b20-temperature-sensor>

<sup>5</sup> <https://components101.com/sensors/dht11-temperature-sensor>

<sup>6</sup> <https://www.amazon.com/-/es/HAT-SIM7600G-H-comunicaci%C3%B3n-inal%C3%A1brica-globalmente/dp/B0852KJ7TL>



Administration Shell, se pueden obtener datos sobre el estado de la leche transportada y compartirlos con otros sistemas, como un Modelo de predicción de degradación de la leche y el sistema Planificador del Manufacturing Execution System (MES) de la empresa. La recolección de leche ocurre diariamente, lo que permite alimentar constantemente el modelo predictivo con nuevos datos y validar sus predicciones. Es posible ajustar y entrenar nuevamente el modelo según las características constructivas del camión y su recorrido.

Se derivan de la propuesta otros posibles beneficios adicionales como trabajos futuros. En primer lugar, los datos de temperatura interna y externa del camión podrían venderse a la empresa fabricante de tanques para realizar modificaciones en el diseño. Además, los datos pueden utilizarse para optimizar las rutas y reducir la mezcla de leche de diferentes calidades en la misma cisterna. Otra propuesta es establecer un mecanismo de pagos diferenciados que premie la ausencia de agua en los tambos y la calidad higiénico-sanitaria de la leche, lo cual requeriría datos adicionales de análisis composicionales y de presencia de agua. También se sugiere compartir datos de geoposicionamiento del camión con los tambos para monitorear el recorrido y establecer un régimen de ordeño adecuado. En resumen, la propuesta de digitalización busca mejorar la planificación y toma de decisiones en la industria láctea al anticipar la calidad de la leche recolectada. La implementación se centra en la digitalización del camión cisterna, permitiendo compartir datos con otros sistemas y facilitando posibles beneficios adicionales en el diseño de tanques, optimización de rutas, pagos diferenciados y seguimiento del recorrido del camión.

## AGRADECIMIENTOS

Contribuyeron a este trabajo: Mariela Formía, Ignacio Arguimbau, Andrés Gatti. Se agradece al BID, al Min. de Educación de la Nación y al German-Argentine University Center (CUAA-DAHZ) por el financiamiento recibido para realizar el curso de posgrado "I4.0 y SFCI", dictado por la Hochschule Emden/Leer (HSEL), Alemania, y la UTN FRSF y UTN FRM, Argentina.

## REFERENCIAS

- [1] Min. de Producción, Ciencia y Tecnología de Santa Fe, Informe diciembre 2021, Sector Lácteo Pcia. de Santa Fe, <https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/235296>.
- [2] Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI 4.0). 91345:2016-04, 2016, <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91345/250940128>.
- [3] Resolución Conjunta SPRel N°252/2014 y SAGyP N° 218/2014: CODIGO ALIMENTARIO ARGENTINO -. Capitulo - Artículo 556-tris.-.
- [4] S. Bader, E. Barnstedt, H. Bedenbender, M. Billman, B. Boss, and A. Braunmandl (2020): Details of the Asset Administration Shell Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0. En: *Plattf. Ind. 4.0*.



## TRANSFORMACIÓN DIGITAL DE SERVICIOS DE INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN COMERCIAL

Rodrigo Agosta <sup>1</sup>, Fabián Gon <sup>2</sup>, Matías Orué <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo GIEDI – UTN Facultad Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina- [ragosta@frsf.utn.edu.ar](mailto:ragosta@frsf.utn.edu.ar).

<sup>2</sup> Grupo GIEDI – UTN Facultad Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina- [fgon@frsf.utn.edu.ar](mailto:fgon@frsf.utn.edu.ar)

<sup>3</sup> Grupo GIEDI – UTN Facultad Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina- [morue@frsf.utn.edu.ar](mailto:morue@frsf.utn.edu.ar)

### RESUMEN

La incidencia ambiental de los grandes sistemas de refrigeración, demandan técnicas apropiadas de detección de fallas. Cambios sutiles producidos por las pérdidas graduales de capacidad quedan ocultos por las etapas de operación propias de cada unidad servida, las reposiciones de productos, la frecuencia de observación y la capacitación del observador. La observación intuitiva de parámetros de funcionamiento y las revisiones periódicas de las instalaciones pueden ser influenciadas por factores climáticos.

La inversión en tecnología digital puede reducir significativamente los costos operativos actuales. Puede optimizar los procesos empresariales existentes y reducir costos de mantenimiento de equipos, gasto energético y gastos en gestión de recursos humanos. La recolección y procesamiento estadístico de los datos, puede aportar importantes avances sobre la detección temprana de fallas que progresivamente reducen la capacidad de la instalación.

Este trabajo presenta el desarrollo de un proceso de transformación digital aplicado sobre los equipos de una cadena comercial, con el objetivo de su mejorar la gestión de inspección y mantenimiento del servicio de refrigeración para productos perecederos.

**Palabras Clave:** Refrigeración Comercial, Transformación Digital, Detección Temprana de Fallas.

### 1. INTRODUCCIÓN

Debido al impacto ambiental y los riesgos sanitarios, los reglamentos de aplicación europeos obligan a las empresarios a realizar de inspecciones periódicas [1]. Pero en Argentina no existen tales instrumentos. Por lo tanto, los procedimientos y objetivos quedan a criterio de las partes interesadas.

El desempeño inadecuado de las instalaciones de refrigeración tiene un fuerte impacto económico, afectando la relación con el cliente y la reputación de la empresa. Por este motivo,

los Supermercados e Hipermercados implementan algún tipo de control y asignación de responsabilidades. Por este motivo, las empresas suelen abordar múltiples metodologías.

En la práctica, es común tercerizar el servicio de mantenimiento a empresas con competencia en el rubro. Mientras que las acciones preventivas incluyen inspecciones mensuales y actividades programadas, las acciones correctivas que requieren solución a muy corto plazo deben ser detectadas por los encargados locales.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Práctica tradicional

Los sistemas remotos centralizados (SCR) de expansión directa o “centrales de refrigeración”, son equipos que sirven a más de un consumidor (Figura 2). La capacidad de refrigeración es modulada con la variación del tándem de compresión y el conjunto de condensación. El fluido frigorífico es distribuido a las unidades evaporadoras, de acuerdo a la demanda individual. La instalación se dimensiona con la capacidad adecuada para extraer el calor de los diversos equipos conectados [2].

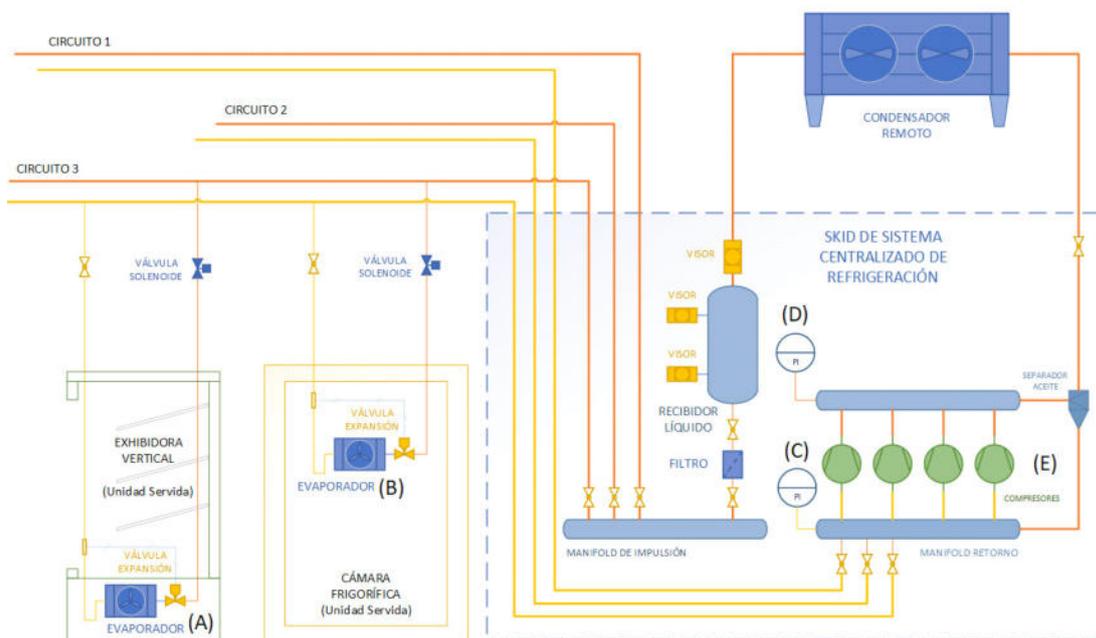


Figura 2: Esquema general de un sistema remoto centralizado de expansión directa.

Actualmente, es habitual que todas las unidades refrigeradas cuenten con un termómetro, permitiendo un registro local de observaciones y niveles de control (alarmas).

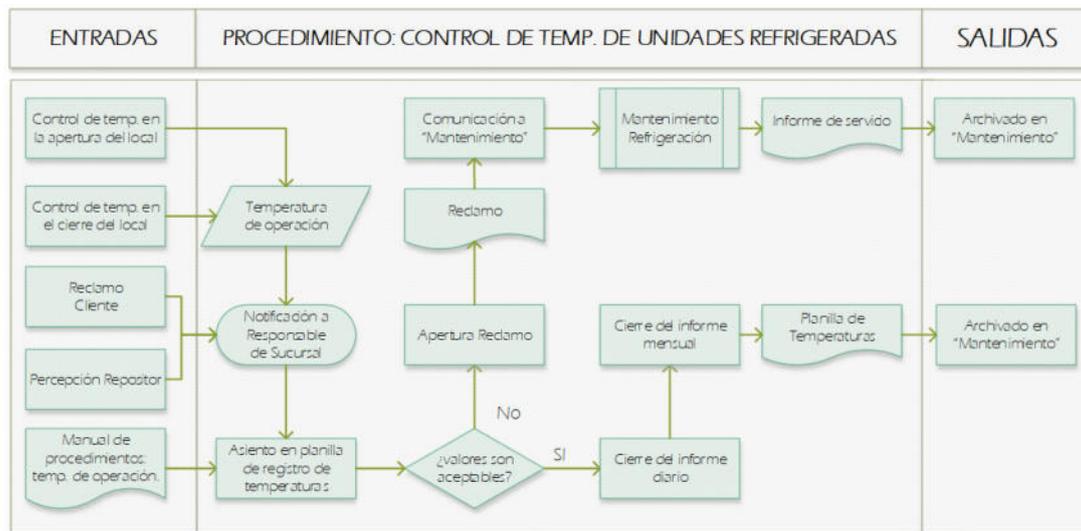


Figura 1: Ejemplo de procedimiento de control de equipos de refrigeración

Siguiendo procedimientos de inspección sensorial (Figura 1), es posible detectar fallas graves del servicio. Pero tratándose de equipos con comportamiento variable (refrigeración, descongelado, parada nocturna), afectado por factores externos (temperatura, humedad, horarios de apertura y cierre de la sucursal), alterado por condiciones de uso (reposición de mercadería, proceso de limpieza) y con objetivos de desempeño dependientes de la mercadería (carnes, lácteos, pastas, vegetales, etc.), la interpretación de valores inadecuados de funcionamiento puede convertirse en una tarea exhaustiva y de alta capacitación.

Como resultado, los responsables del comercio habitualmente solo detectan fallas cuando se presentan niveles muy altos de temperatura. En el peor de los escenarios, los clientes son los que manifiestan que la mercadería exhibida se encuentra en condiciones inadecuadas.

## 2.2. Transformación Digital

La Internet de las cosas (IoT) “permite una comunicación de forma multidireccional entre máquinas, personas y productos, facilitando la toma de decisiones en base a la información que la tecnología recoge de su entorno. Utiliza nuevos sensores y actuadores que, en combinación con los análisis... de computación en la nube, permite máquinas autónomas y sistemas inteligentes” [3].

La arquitectura de la información basada en Internet “permite el intercambio de bienes y servicios entre todos los elementos, equipos y objetos conectados a la red. La IoT se refiere a la interconexión en red de todos los objetos cotidianos, que a menudo están equipados con algún tipo de inteligencia. En este contexto, Internet puede ser también una plataforma para dispositivos que se comunican electrónicamente y comparten información y datos específicos con el mundo que les rodea. Así, la IoT puede verse como una verdadera evolución de lo que



*conocemos como Internet añadiendo una interconectividad más extensa, una mejor percepción de la información y servicios inteligentes más completos.” [4]*

Diversas metodologías de adquisición se han materializado en la práctica en casos prácticos y en laboratorios experimentales de adquisición de datos, empleando sistemas embebidos programables. Para estos fines, se registran experiencias con plataformas de desarrollo ARDUINO [5, 6, 7] o equipos de uso frecuente en la industria, como Termistores (RTD pt100) y dispositivos HMI (human-machine interfaces) [8, 9, 10].

El mercado cuenta con diversos dispositivos específicamente destinados al seguimiento y control de sistemas de refrigeración, provistos por marcas de alcance internacional. Ejemplos de estos son: SITRAD [11], NOVUS [12], entre otras aplicaciones. Su implementación ofrece al usuario importantes ventajas (soporte técnico, intercambiabilidad de dispositivos, actualización de hardware y firmware, entre otras).

### 3. METODOLOGÍA

El relevamiento de datos se ejecutó empleando el paquete comercial SITRAD [12], provisto por Full Gauge Control (Figura 3). Para la captura y resguardo de datos, se empleó computación de borde. Con este enfoque, el procesamiento y almacenamiento de los datos se produce en la sucursal donde se generan, evitando pérdidas asociadas a inestabilidades de comunicación en la intranet de la cadena. Los datos almacenados en el servidor local pueden ser transferidos como paquetes de información periódicos, cuando son requeridos para su análisis.

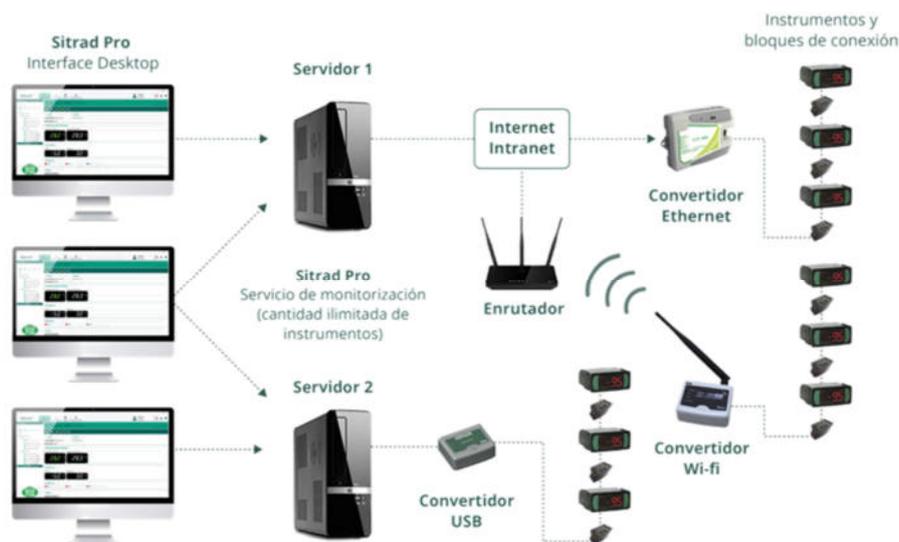


Figura 3: Estructura del sistema instalado.

Las variables de funcionamiento seleccionadas para relevamiento fueron:



- Temperatura de consumidor (temperatura del aire en la succión de los forzadores de los evaporadores). (Figura 2, A y B): Estaciones 3; 10; 11 y 12.
- Presión de Baja en el colector de succión de los compresores (aproximadamente igual a la presión de evaporación y línea de retorno). (Figura 2, C): Estación 7.
- Presión de Alta en el colector de descarga de los compresores (aproximadamente igual a la presión en condensador y línea de distribución). (Figura 2, D): Estación 8.
- Tensión de alimentación (Fase R, S y T). (Figura 2, E). Estación 9.

Durante la etapa de puesta a punto del sistema, las recolecciones de datos se realizaron sin observación en tiempo real, ni intervención en el proceso de decisión. El objetivo fue reunir datos adecuados para el desarrollo de cartas de control [13], operando con el sistema tradicional.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Datos recolectados

Se trasladan las gráficas de datos obtenidos durante el período 01/09/2015 al 01/03/2017, para ejemplificar la variabilidad de los datos y su contraste con la variabilidad de las temperaturas ambientes.

Los datos graficados corresponden a los valores medios de cada turno de trabajo diario, permitiendo observar la variabilidad entre franjas horarias e incidencia de luz solar. Se presentan, además, los datos de temperaturas máximas y mínimas diarias, declaradas por el servicio meteorológico nacional.

#### 4.1.1. Temperatura de consumidores

La Figura 4 muestra las lecturas de temperatura de dos estaciones distintas (3 y 11). A cada una de ellas le corresponde una temperatura objetivo distinta, asociada con el producto a preservar. La gráfica presenta una variabilidad importante de las lecturas, acompañada por la variabilidad de la temperatura ambiente. Además, en la estación 3 se puede observar la incidencia de un efecto escalón (cambio de nivel) entre abril de 2016 y febrero de 2017, correspondiente a un cambio de configuración del equipo.

En forma similar, la Figura 5 muestra las lecturas de temperatura de las estaciones 10 y 12. A partir de mayo de 2016 se observa un claro efecto de cambio de nivel en la estación 10, debida a un cambio de configuración del equipo. La estación 12 presenta varios cambios de nivel. Esta gráfica pone de manifiesto la diferencia entre la variabilidad de temperaturas entre distintos equipos. La estación 12, por ejemplo, presenta una variabilidad muy superior a la estación 10.

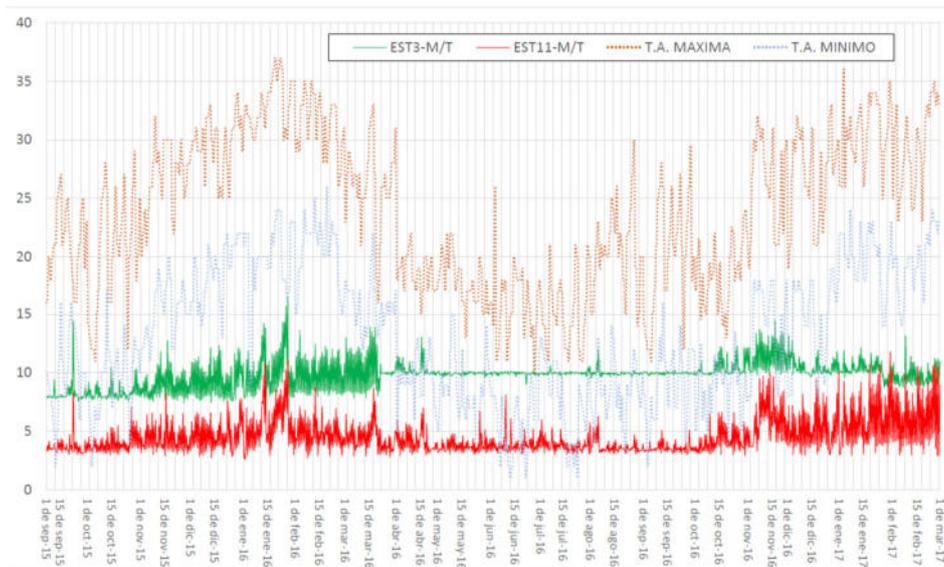


Figura 4: Temperaturas de las estaciones 3 y 11

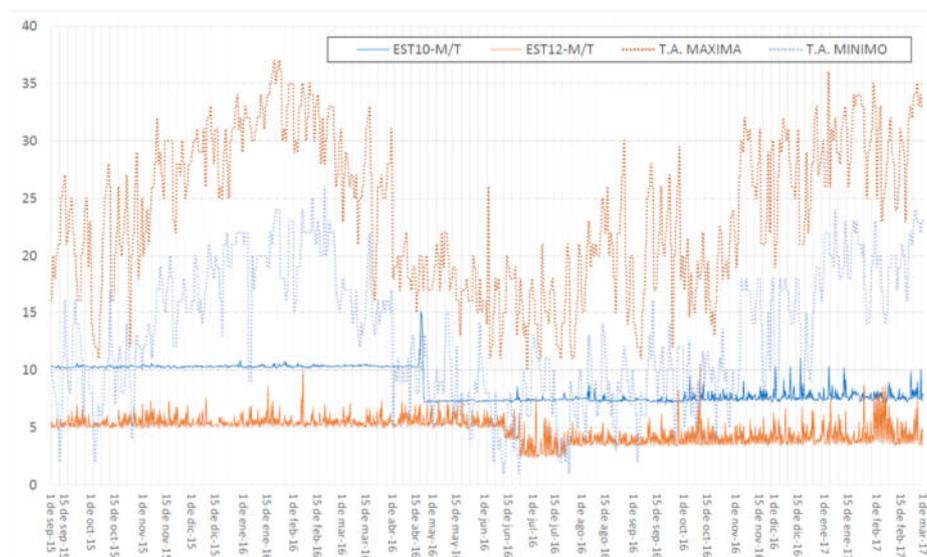


Figura 5: Temperaturas de las estaciones 10 y 12

#### 4.1.2. Presión

La Figura 6 pone de manifiesto los datos recolectados de presión de alta (estación 7) y presión de baja (estación 8).

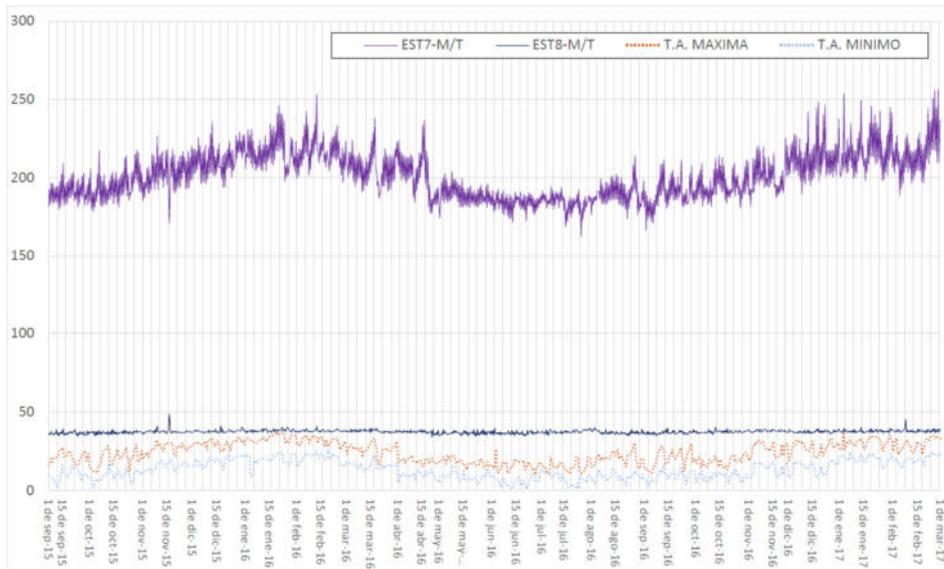


Figura 6: Presiones en las estaciones 7 y 8.

#### 4.1.3. Tensión de alimentación

La Figura 7 muestra los datos de tensión de alimentación a pie de tablero de la central de refrigeración.

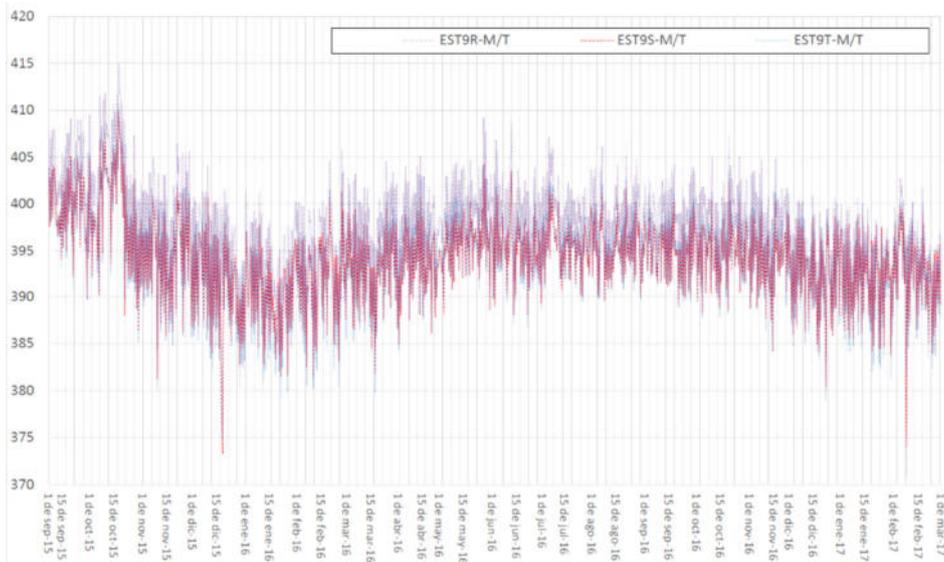


Figura 7: Tensiones de alimentación

#### 4.2. Desarrollo de un evento de falla.

Durante la recolección de datos para el estudio preliminar del sistema, se produjo un evento de falla por pérdida de estanqueidad (Figura 8). A medida que la se redujo la carga de fluido frigorífico, el sistema perdió capacidad. En las gráficas de evolución de temperaturas de la estación, se observa como las temperaturas se incrementan con el paso del tiempo.

A partir de la fecha 01/11 comenzó el aumento progresivo de las temperaturas medias del recinto refrigerado. Durante las observaciones diarias, los responsables locales no detectaron el evento, incluso cuando las condiciones se agravaron a partir del 04/11. La detección se produjo después del 07/11. La restitución del sistema fue posterior al 11/11.

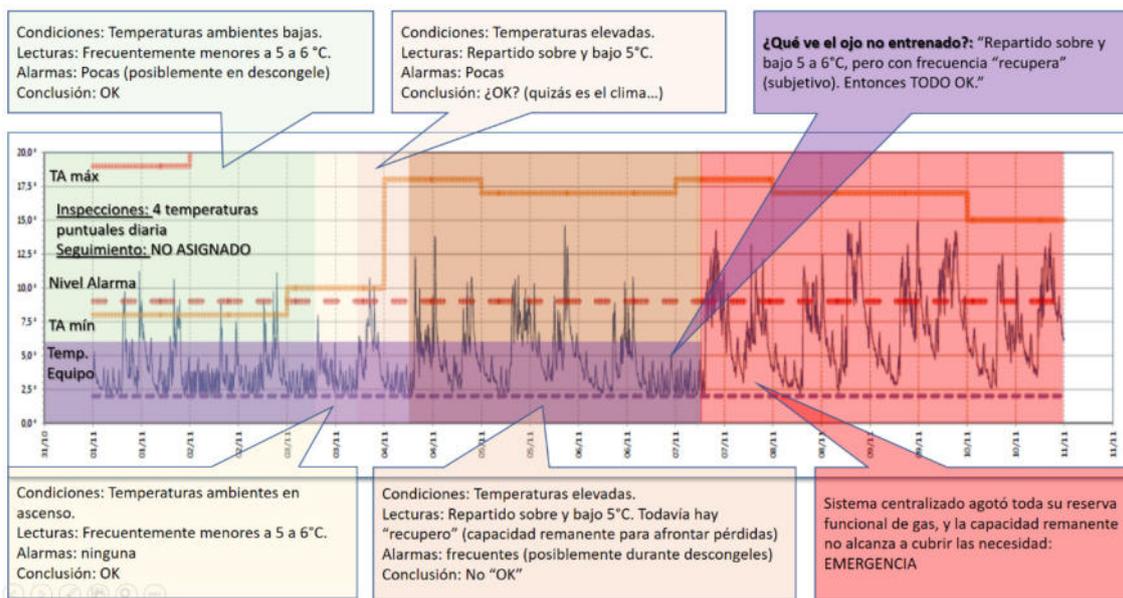


Figura 8: Caso real de desarrollo de una falla por pérdida de estanqueidad

Los datos procesados, permite observar que las temperaturas medias aumentaron entre el 04/11 y el 07/11, respecto a las lecturas entre el 31/10 y el 02/11.

## 5. CONCLUSIONES

Los datos recolectados en diversos equipos presentan comportamientos de interés para su análisis. Las lecturas de temperatura de equipos cambiaron en variabilidad y valor medio, durante el período observado. Durante un evento de falla corroborado, se registraron cambios en el comportamiento respecto a los períodos de funcionamiento normal. Esto indica una factibilidad de la detección de funcionamientos irregulares, empleando los datos relevados.

Sin embargo, distintos factores de servicio inciden en el desempeño de los equipos (meses del año, días de la semana, turnos del día, jornadas laborales, condiciones particulares de marcha, temperatura ambiente, etc.), lo cual representa un obstáculo para el análisis intuitivo, influyendo negativamente en el proceso de toma de decisiones. En adición, la complejidad de



esta tarea aumenta, considerando el seguimiento de múltiples equipos con características disímiles.

Por lo tanto, se concluye que es necesario un procesamiento estadístico, que aisle efectos de factores externos, transformando los datos en información útil.

La transformación digital aplicada al seguimiento del desempeño del servicio de refrigeración, permite obtener un número importante de mediciones, en frecuencias considerables. Esto facilita la visualización de comportamientos ocultos para las metodologías tradicionales, posibilitando la detección temprana de eventos de falla progresivas.

Los datos digitalizados, pueden ser trasladados a requerimiento, para su procesamiento. La centralización otorga al personal capacitado los medios adecuados para el análisis y comparación de diversos escenarios. Estas ventajas potencian las competencias del personal, mejorando la eficiencia y eficacia de los miembros altamente capacitados de la organización. Permite la toma de decisiones informada y una distribución racional de recursos.

## REFERENCIAS

- [1] Boletín Oficial del Estado Español. *Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias*. Boletín Oficial del Estado, Real Decreto 552/2019. Año 2019.
- [2] Creus J. A. *Tratado práctico de refrigeración automática (Doceava Edición)*. Marcombo SA. Barcelona, Año 1971. ISBN: 84-267-1140-5.
- [3] OECD. *Enabling the Next Production Revolution: the Future of Manufacturing and Services - Interim Report: Meeting of the OECD Council at Ministerial Level*. Paris, 2016.
- [4] Silvestre S., Salazar, J. *El mundo Internet of Things (IoT) (Primera edición)*. Erasmus+, Año 2019.
- [5] Chavarría-Domínguez F., Jimenez-Silva I., Hernandez-Barabata F., Noble-Perez H. *Diseño de interfaz de control y adquisición de datos para un prototipo didáctico de refrigeración*. Revista del Diseño Innovativo, Volumen 3, Número 7, páginas 1-7, Año 2019. <https://doi.org/10.35429/jid.2019.7.3.1.7>
- [6] Corte E., Flores C., Jara N., Cesar Isaza C. *Sistemas de refrigeración doméstica - estado del arte de las mejoras en la eficiencia energética*. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca Ecuador, Número 9, Año 2015.
- [7] Roffé F., Lombardero G. O., Sánchez G. *Desarrollo de un sistema para el registro de variables termodinámicas en un equipo de enfriamiento*. Revista Elektron, Volumen 5, Número 1, página 7-14, Año 2021. <https://doi.org/10.37537/rev.elektron.5.1.123.2021>
- [8] Cuevas C., Fonseca N. *Modelado de un sistema de refrigeración caracterizado en un rango amplio de condiciones de operación / Modelling of a refrigeration system characterized under extended operating conditions*. Ingeniare, revista chilena de ingeniería, Volumen 24, Número 4, Año 2016. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052016000400016>



- [9] Mendoza-Miranda J. M., Belman-Flores J. M., Gallegos-Muñoz A., Mota-Babiloni A., Navarro-Esbrí, J. *Computational tool for experimental refrigeration system analysis using spreadsheets | Herramienta computacional para analizar un sistema experimental de refrigeración usando hojas de cálculo*. Revista Dyna (Spain), Volumen 89, Número 6, Año 2014. <https://doi.org/10.6036/7255>
- [10] Ochoa G. V., Rodríguez K. C., Agudelo L. M., Guerra C. P. y Abella J. C. (2017). *Instrumentación y control de un banco de fallas de refrigeración y acondicionamiento de aire utilizando LABVIEW®*. Revista Espacios, Volumen 38, Número 57, página 10, Año 2017. ISSN 0798 1015.
- [11] Full Gauge Controls. SITRAD. USER GUIDE. 2014
- [12] Novus Automation, SUPERVIEW, Manual de Instrucciones. ([www.novusautomation.com](http://www.novusautomation.com))
- [13] Pulido H. G., La Salazar, R. D. V. *Control estadístico de la calidad y seis sigmas (Tercera Edición)*. McGraw Hill Education. Año 2013. ISBN: 978-970-10-6912-7



## Laboratorio Autocontenido de Hidroponía 4.0

Agustín Mattei <sup>1</sup>, Matía Orué <sup>2</sup> y María Laura Caliusco <sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Grupo de Investigación GIEDI – UTN Facultad Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina- [amattei@frsf.utn.edu.ar](mailto:amattei@frsf.utn.edu.ar), [morue@frsf.utn.edu.ar](mailto:morue@frsf.utn.edu.ar).

<sup>3</sup> Centro de Investigación CIDISI - UTN Facultad Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina- [mcaliusco@frsf.utn.edu.ar](mailto:mcaliusco@frsf.utn.edu.ar).

### RESUMEN

La hidroponía es el método de cultivo con ausencia de suelos, es decir, las plantas crecen en diferentes sustratos o incluso sólo sobre una película de agua. Esta técnica se está utilizando para el cultivo de hortalizas y verduras ya que el rendimiento de los cultivos hidropónicos puede duplicar o más los de los cultivos de suelo.

Los avances tecnológicos aplicados al control y ejecución de procesos han hecho de la automatización del cultivo hidropónico una realidad que ha permitido la incorporación de este tipo de método en diferentes industrias como la farmacéutica. Dichas industrias están interesadas en cultivar con sistemas hidropónicos plantas medicinales para fabricar medicamentos para el tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas. El desafío existente actualmente es que la cosecha de este tipo de plantas se realiza en su estado silvestre, por lo cual se da en la mayoría de los casos por recolección artesanal. Por lo tanto, la información disponible sobre producción hidropónica para estos insumos vegetales es aún escasa.

Con el advenimiento de la Industria 4.0 y el concepto de digitalización que incorpora, se puede ir más allá del control del proceso de hidroponía para digitalizar información necesaria que permita vincular parámetros de la calidad de una planta con los factores ambientales que se consideran prioritarios en el proceso de cultivo.

Este trabajo presenta el diseño e implementación de una unidad autocontenida, basada en tecnologías de la Industria 4.0, para realizar ensayos de procesos hidropónicos, registrando y procesando información interviniente en la totalidad de factores decisivos para el crecimiento de las plantas, buscando resultados que optimicen y estandaricen su proceso de cultivo. Así, utilizando estas unidades autocontenidas se podrá llegar a la definición de los valores adecuados para los diferentes parámetros controlados, como la luz, la humedad, la temperatura y el caudal de agua, para el cultivo de plantas de interés para las industrias farmacéuticas.

**Palabras Clave:** Hidroponía, Industria 4.0, Laboratorio autocontenido, plantas medicinales.



## 1. INTRODUCCIÓN

La hidroponía es un sistema de cultivo que hace crecer las plantas en una solución de agua con nutrientes. En esta técnica las raíces se sumergen en la solución nutritiva, la cual presenta los macronutrientes y micronutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo [1]. Entre muchos métodos de crecimiento de plantas, los sistemas hidropónicos artificiales son ampliamente utilizados ya que permiten un manejo más fácil de las plantas y una mejor reproducibilidad con un bajo daño a las raíces y una menor absorción de metabolitos [2].

Durante los últimos años se han realizado muchos avances en lo que respecta al diseño e implementación de sistemas hidropónicos automatizados [3]. Esto se debe principalmente a que estos tipos de sistemas tienen la ventaja de proporcionar un gran rendimiento, alta eficiencia y no requieren mano de obra especializada. Además, las tareas que se llevan a cabo en un sistema hidropónico se pueden automatizar fácilmente [4].

La creciente demanda de alimentos, tanto en cantidad como en calidad, ha hecho que los sistemas hidropónicos automatizados sean ampliamente utilizados como método agrícola [5]. Sin embargo, hay un interés particular por las industrias farmacéuticas en cultivar con sistemas hidropónicos plantas medicinales para fabricar diferentes tipos de medicamentos [6]. Uno de ellos es aquellos para el tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas. Las plantas que se usan para esta clase de medicamentos son plantas silvestres y, por lo tanto, la información disponible sobre producción hidropónica para estos insumos vegetales es aún escasa.

Con el surgimiento de la Industria 4.0 se ha introducido en diferentes sistemas el concepto de digitalización, el cual refiere a la conversión de datos de sensores adquiridos del mundo físico en sus modelos digitales que ofrecen oportunidades invaluable para la predicción y optimización de las operaciones de fabricación [7]. Teniendo esto en mente, se puede ir más allá del control del proceso de hidroponía para digitalizar información necesaria que permita vincular parámetros de la calidad de una planta con parámetros del ambiente que se controlan en un proceso automatizado de hidroponía. Esto permite poder tener un cúmulo importante de información que luego pueda ser procesada por diferentes algoritmos para encontrar las relaciones entre diferentes parámetros del cultivo hidropónico y la calidad de la planta, abordando así el problema planteado anteriormente.

El objetivo de este trabajo es presentar el diseño e implementación de una “unidad autocontenida” basada en tecnologías de la Industria 4.0, para realizar ensayos de procesos hidropónicos, registrando y procesando información interviniente en la totalidad de factores decisivos para el crecimiento de las plantas medicinales, buscando resultados que optimicen y estandaricen su proceso de cultivo. Así, utilizando estas unidades autocontenidas se podrá llegar a la definición de los valores adecuados para los diferentes parámetros controlados, como la luz, la humedad, la temperatura, el caudal y características fisicoquímicas del agua, concentración de nutrientes, para el cultivo de plantas de interés para las industrias farmacéuticas.

Para cumplir con el objetivo planteado anteriormente, el presente trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se analiza el sistema hidropónico a utilizar, en la Sección 3 se introducen los conceptos principales de la Industria 4.0, en la Sección 4 se presenta el diseño e implementación



del Laboratorio Autocontenido de Hidroponía 4.0 y finalmente, en la Sección 5 se discuten la conclusiones y trabajos futuros.

## 2. HIDROPONÍA DE PLANTAS MEDICINALES

La hidroponía es una técnica de cultivo en la que no se utiliza suelo, los nutrientes que necesita la planta para crecer son provistos a través de un flujo de agua. Las ventajas de esta modalidad de cultivo son reducción del requerimiento de espacio, higiene de los cultivos, comodidad del trabajador, optimización del uso del agua, producción en sitios donde el recurso de tierra es escaso o es de mala calidad, o donde el clima es muy variado.

Algunas limitaciones de la hidroponía se relacionan con la necesidad de inversión inicial, la mayor necesidad de especialización, la dependencia energética y el requerimiento de agua de buena calidad.

### 2.1. Sistemas hidropónicos

Un sistema hidropónico se refiere a las herramientas y equipos que se empaquetan juntos para cultivar plantas hidropónicamente. Existen diferentes tipos de sistemas hidropónicos que se pueden implementar. A continuación, se describen los sistemas que fueron analizados como alternativas.

- **Sistema “Raíz flotante”:** para el cultivo de hortalizas en la cual las plantas se sostienen por alguna estructura flotante, como placas de telgopor perforadas, mientras sus raíces están sumergidas en una solución nutritiva. El contenedor debe ser opaco para evitar entrada de luz y así estimular el crecimiento de algas que puedan afectar su desarrollo.
- **Sistema “Nutrient Film Technique”:** La técnica NFT involucra el paso de una delgada lámina de solución nutritiva a través de un caño con perforaciones donde se insertan las plantas de hoja. Los caños deben ser opacos para evitar la entrada de luz y de colores claros en el exterior para reducir el calentamiento. La circulación de la solución se controla mediante temporizadores para evitar el arrastre de las plantas, y se recomienda un caudal de 1 a 2 litros/minuto.
- **Cultivo en sustrato:** El sustrato es un material que reemplaza al suelo como sostén de la planta. Puede ser orgánico o inorgánico. La solución nutritiva se aplica a través del riego, generalmente por goteo. Se recomienda lavar el sustrato periódicamente para evitar la acumulación de sales. Ideal para f rutilas, pimientos, tomates, etc.

### 2.2. Plantas Medicinales

Una planta medicinal es aquella que se puede utilizar, entera o en parte (hojas, flores, frutos, cortezas, tallos o raíces) para tratar afecciones de personas o animales. Su acción terapéutica es debido a la existencia de unas sustancias químicas denominadas principios activos.

Las plantas medicinales, por su actividad farmacológica, han servido tradicionalmente como remedios para aliviar síntomas o tratar enfermedades. Se pueden preparar como infusiones, cataplasmas, aguas medicinales, aceites medicinales, ungüentos, pomadas, vapores, tinturas,



enjuagues o en formas industrial a través de ventas en farmacias como cápsulas o comprimidos. Algunas de las plantas medicinales más conocidas son las que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de plantas medicinales

Planta	Propiedades farmacológicas
MENTA. <i>Mentha rotundifolia</i> .	Se emplea como carminativo, estomacal para digestiones difíciles, para evitar el vómito y protector hepático (colerético).
ESPLIEGO. Lavándul a <i>latifolia</i> .	El aceite esencial tiene propiedades como antibacteriano, antiinflamatorio, antifúngico, antiséptico, antiespasmódico, estimulante moderado y diurético.
HINOJO. <i>Foeniculum vulgare</i> .	Se puede utilizar como carminativa, tónico estomacal y digestiva, favorece la digestión. La raíz es diurética. Estimula la producción de leche en la lactancia materna.
HISOPO. <i>Hyssopus officinalis</i> L.	La esencia, a dosis bajas tiene propiedades antisépticas, como aperitivo para abrir el apetito, para digestiones difíciles y carminativo. Indicado para catarros.
GALEGA. <i>Galega officinalis</i> L.	Como vermífugo, hipoglucemiante y diurético. En infecciones del aparato respiratorio, como diurética. Aumenta la producción de leche en las m adres.
LAVADIN. <i>Lavandula hybrida</i> Rev.	Como antiespasmódica, antiséptica, se utiliza en llagas, eczemas, picaduras de insectos, quemaduras, en cefaleas, migrañas y estados depresivos, en la ansiedad, insomnio, relajante muscular en baños.
MEJORANA. <i>Origanum majorana</i> .	En infusión tiene propiedades carminativas, digestivos, evitan la formación de gases, estimulan el apetito, en las estomatitis y en las gastritis.
ROMERO. <i>Rosmarinus officinalis</i> L	El alcohol de romero se utiliza para paliar el dolor y la inflamación en pacientes con artrosis o artritis reumatoides. En el tratamiento de la alopecia como estimulante del cuero cabelludo, fortalece el cabello y las uñas.
SALVIA. <i>Salvia lavandulifolia</i> Vahl.	En infusión es comúnmente utilizado para curar las inflamaciones de las encías, de la boca y de la faringe. Es antiséptico y antifúngico.
SIEMPREVIVA AMARILLA. <i>Helychrisum stoechas</i> (L.) DC.	Antiflebitico, en los hematomas y edemas, antiespasmódico, como cicatrizante, antitusivo, anticatarral, como expectorante y mucolítico.

### 2.3. Definición del tipo de sistema hidropónico a utilizar

Dada las características de muchas de las plantas mencionadas, se entiende que el sistema que mejor se adapta es el de tipo NFT, las plantas recibirán los nutrientes a través de un flujo de agua, estos serán aportados en un tanque de mezcla principal, a través del cual se extraerá el agua (circulante por el sistema de cañerías) y donde retornará el excedente. Las plantas reposarán en cestas rellenas con material sustrato en contacto con el fluido nutritivo.

La herramienta a desarrollar necesitará controlar y dejar registro de la totalidad de parámetros intervinientes en el desarrollo de la planta, entre los que se encuentran los referidos al microclima en el que se desarrollan. Esta razón es la que lleva a que el sistema NFT sea de tipo "Indoor", así se podrá tener control sobre características como irradiancia de luz, temperatura, humedad ambiente, etc.

Se hace notar la variedad de tamaños entre los ejemplares a cultivar, también son diversas sus necesidades, teniendo en cuenta esto y si bien el proyecto está basado en un sistema de tipo NFT



con determinadas medidas, se marca la importancia de lograr un diseño fácilmente escalable y personalizable.

### 3. INDUSTRIA 4.0

#### 3.1. Conceptos básicos

Industria 4.0 se refiere a la interconexión inteligente de máquinas y procesos para la industria con la ayuda de la tecnología de la información y la comunicación. Como fin último, la arquitectura desarrollada busca dar una organización y formato a los datos para que sean interoperables en el ecosistema asociado.

Algunas de las características principales son:

- Internet está en todas partes, simple y económico.
- Los activos o “Assets” están digitalizados y conectados en red.
- Los activos se están volviendo cada vez más inteligentes.
- Aplicado inteligentemente, abren un nuevo mundo de servicios expuestos y/o consumidos por sistemas cibernéticos.
- Vincula a todas las partes interesadas de la cadena de suministro y el flujo de valor en procesos comerciales innovadores en un ecosistema digitalizado.
- Los datos y la información de proveedores, clientes y empresas internas se están interconectando.
- Análisis y ciencia de datos que respaldan el proceso de toma de decisiones
- Reconfiguración y flexibilidad tanto a nivel de tecnologías de las operaciones (OT-Operational Technologies) como tecnologías de la información (IT – Information Technologies).
- Colaboración usando Edge/Cloud y otras Tecnologías de la Información y la Comunicación.

#### 3.2. Modelo de Arquitectura de Referencia para Industria 4.0 “RAMI4.0”

Para comprender el proceso de digitalización en el contexto del modelo diseñado, es importante seguir los lineamientos generales de la RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0) [8]. La industria 4.0 implica la necesidad de representar y conectar virtualmente objetos o “activos” (assets) En este sentido, el Modelo de Arquitectura de Referencia para Industria 4.0 “RAMI4.0” está destinado a crear reglas de descripción digital de un activo a lo largo de toda su vida útil, desde su desarrollo, producción y uso hasta su disposición, y de los cambios de valor asociados, como así también todos los aspectos relevantes para él. Un componente Industria 4.0 representa virtualmente un activo, usando información estructurada.

RAMI4.0 proporciona una descripción de los elementos principales de un activo utilizando un modelo de niveles que consta de tres ejes (Figura 1).

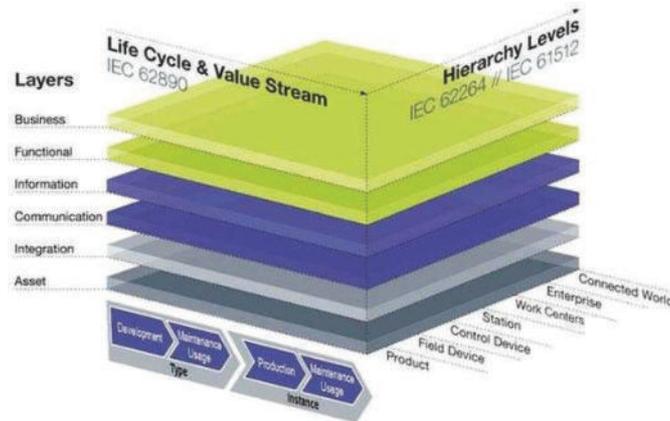


Figura 1: Sistema de coordenadas tridimensional que contiene los aspectos esenciales de Industria 4.0.

El eje vertical “Capas (Layers)” es el de la arquitectura, con seis capas para describir las propiedades estructurales de un activo o combinación de activos. Para todos los componentes, se considera la funcionalidad de información y comunicación, sus partes constitutivas y estructura. La capa de comunicación se ocupa de los protocolos y la transmisión de datos y archivos, la capa de información contiene los datos relevantes, la capa funcional todas las funciones necesarias (definidas formalmente) y la capa de negocio mapea los procesos de negocio relevantes.

El eje horizontal izquierdo de la Figura 1, “Ciclo de vida y flujo de valor (Life Cycle & Value Stream)”, permite dar trazabilidad a los activos a lo largo de su ciclo de vida. Este eje se basa en el estándar IEC 62890, Gestión del ciclo de vida de sistemas y productos, utilizados en la medición, control y automatización de procesos industriales.

El eje horizontal derecho se denomina “Niveles de jerarquía (Hierarchy Levels)”, y representa las diferentes jerarquías técnicas y/u organizativas dentro de las fábricas o instalaciones a las cuales se asignan los activos. Este eje se basa en las normas DIN EN 62264, la serie de estándares internacionales para sistemas de control y TI empresariales, y DIN EN 61512-1, que define modelos de referencia para el control de lotes tal como se utilizan en las industrias de procesos y la terminología que ayuda a explicar las relaciones entre estos modelos y términos.

Para comenzar a implementar el concepto de Industria 4.0, lo primero que se debe hacer es definir el negocio o “business”, es decir, el propósito de la digitalización, el que guiará luego todo el proceso de digitalización.

#### 4. Diseño e implementación del Laboratorio Autocontenido de Hidroponía 4.0

##### 4.1. Identificación del “business” y los “assets”

En este caso, la propuesta se centra en la digitalización del proceso de crecimiento de plantas medicinales como “business” principal, con el objetivo de estandarizar y optimizar su desarrollo. La principal función de este proceso es obtener valores que permitan, por un lado, optimizar el crecimiento de la planta y por el otro estandarizar los parámetros de cultivo que garanticen la calidad de la materia prima para diferentes tipos de productos farmacéuticos.

Por lo tanto, los “assets” son las plantas cultivadas utilizando hidroponía y los parámetros asociados a su crecimiento, como el fluido nutritivo y el microclima.



Una vez identificados los activos a digitalizar es necesario definir las características que se van a considerar de los mismos. Para determinar qué tipo de información debe ser recolectada se conformó un grupo interdisciplinario de profesionales, esto permitió detallar los puntos de interés, contemplando la viabilidad técnica para dejar registro de sus valores. De modo tal que se divide la información en tres conjuntos diferentes basado en los tres activos a digitalizar del sistema hidropónico: el microclima, el fluido nutritivo y las características del cultivo (Tabla 2).

Tabla 2. Familias de información

Microclima	Fluido nutritivo	Cultivo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura ambiente [°C].</li> <li>• Humedad ambiente [%].</li> <li>• Ciclos lumínicos/ irradiancia lumínica [W/m<sup>2</sup>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calidad [mS/cm] y cantidad de agua consumida por el cultivo [L/h]</li> <li>• Tipo y cantidad de aditivos incorporados al agua [ppm]</li> <li>• Caudal de fluido nutritivo [L/h].</li> <li>• Descripción física del fluido (temperatura [°C] y velocidad [L/h])</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de cultivo.</li> <li>• Tiempo de crecimiento [días]</li> <li>• Retroalimentación de calidad final del cultivo.</li> </ul>

#### 4.2. Identificación de componentes para digitalizar.

Como la premisa fundamental de este trabajo no es sólo realizar el control automático del proceso, sino la digitalización de los datos y procesarlos en tiempo real para alimentar modelos que den información para la toma de decisiones precisas e inmediatas, se debe implementar un sistema ciberfísico (CPS) con la capacidad de comunicar esta información en formatos preestablecidos para el entorno (capas "Integration" y "Communication" de la Figura 1). Existe una serie de componentes de bajo costo que se decidió utilizar para este cometido y que se describen en la Tabla 3. Cabe aclarar que la información referida al cultivo en el modelo de decisión se cargará en forma manual y no automática como la demás información.

Tabla 3. Componentes para captura de información y tipo de información que captura

Microclima	Fluido nutritivo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Módulo termohigrómetro (humedad relativa y temperatura ambiente).</li> <li>• Relay 12 Vdc Simple Inversor 10A/220Vca</li> <li>• Módulos Led de amplio espectro (control de ciclos lumínicos e irradiancia lumínica).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Módulo y sensor de PH (calidad de agua)</li> <li>• Caudalímetro 1 A 30 L/min (agua consumida, cantidad de aditivos y velocidad de fluido nutritivo)</li> <li>• Módulo medidor conductímetro (calidad del fluido nutritivo)</li> <li>• Sensor digital temperatura sumergible (temperatura del fluido nutritivo)</li> <li>• Bombas para el control de caudal (fluido nutritivo y aditivos).</li> </ul>

El dispositivo elegido compatible con estos sensores y actuadores (con capacidad de control, procesamiento y comunicación de datos) es la Raspberry Pi. Igualmente, es importante explicar que



esta es la parte que aún está en desarrollo, ya que entre las decisiones arquitectónicas está en discusión si finalmente toda la información residirá en la nube, que se tiene prevista establecer en el cluster informático de UTN FRSF (ver Figura 2), o podrá ejercer como servidor la misma Raspberry Pi, basados en el concepto de “Edge computing”; sin embargo la segunda discusión que subyace es tecnológica, ya que se debe evaluar si desarrollar el/los servidores conforme a los protocolos de red para intercambio de datos OPC UA (OPC Unified Architecture) o MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).

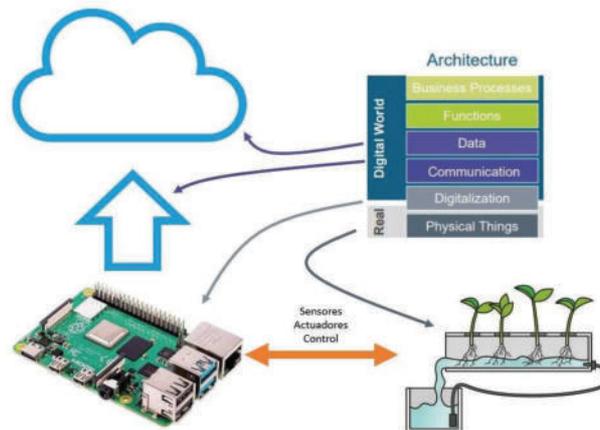


Figura 2: Esquema de recolección de datos, automatización y almacenamiento en la nube.

Los datos recolectados son volcados en la red, lo que abre camino a la implementación de conceptos de Cloud Computing; quitando la necesidad de contar con servidores físicos y haciendo uso de “SaaS” (software as a service) lo que implica una ventaja económica y competitiva: contar con los datos en las nubes permite tener una arquitectura fácilmente escalable a las necesidades y abre nuevos horizontes comerciales, datos disponibles para distintos actores de las cadenas productiva.

A su vez, en el procesamiento de datos, entra en juego la aplicación de técnicas referidas a la “Ciencia de Datos” y se deberá evaluar si las técnicas de programación tradicionales bastarán para obtener conclusiones relevantes. La estrategia de aplicación de diferentes técnicas de análisis de datos para arribar a definir las relaciones entre las variables recolectadas queda fuera del alcance de este trabajo.

### 4.3. Diseño y resultado

Definida la arquitectura del prototipo, se pretende lograr un diseño fácilmente escalable y personalizable; por lo que toma un rol importante el uso de programas de diseño paramétrico, que faciliten realizar cambios en el modelo. La implementación de este tipo de tecnologías permite generar una representación digital exacta (Digital Twin) tanto en características relevadas, como en modelos de comportamiento (que pueden ser alimentados en tiempo real); esto no sólo facilita realizar modificaciones, sino que también permite evaluar las respuestas dinámicas antes de su fabricación y dejar registros de los cambios en su etapa de prototipado. La etapa de diseño fue llevada a cabo por medio de SOLIDWORKS, que es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. Se eligió este software,



ya que abre un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del prototipo, ofreciendo la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño, y rediseñar fácilmente ante cualquier cambio. Este software ha permitido contar con un tipo de gemelo digital, conocido como "digital shadow", del prototipo desarrollado, y sus características paramétricas permitieron ejecutar y evaluar cambios decisivos para un diseño óptimo.

En la etapa de desarrollo de la estructura y envoltorio, se decidió avanzar sobre un gabinete metálico con puertas abatibles, capaz de contener la totalidad de componentes y de conservar las condiciones del microclima en su interior.

La totalidad del cuerpo ha sido diseñado para ser fabricado con chapa metálica plegada revestido con pintura epóxica (Figura 3 a).

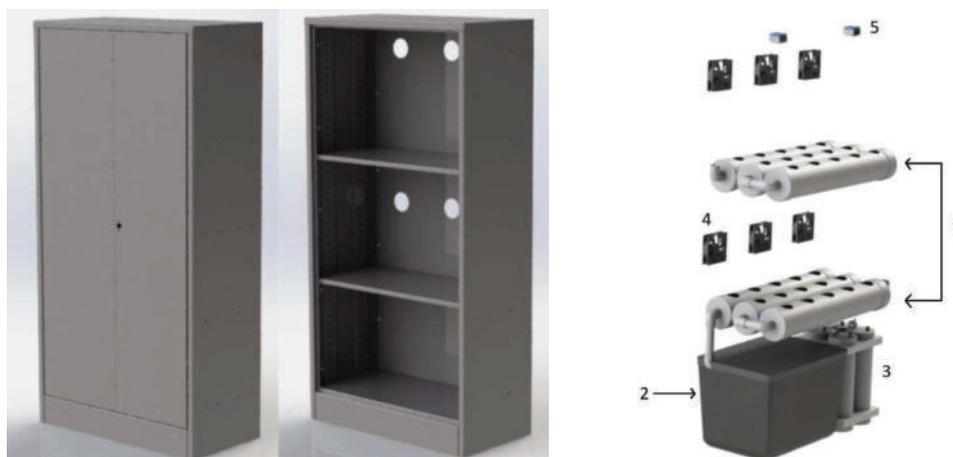


Figura 3: (a) Diseño de la estructura envolvente del sistema. (b) Subsistemas del proceso.

El cuerpo está diseñado para soportar dos "estantes hidropónicos", a su vez, las medidas adoptadas son estándar en armarios metálicos industriales. En el interior del cuerpo se encuentran los diferentes subsistemas (Figura 3 b) encargados de llevar a cabo el proceso:

- El sistema hidropónico tipo NFT, queda conformado por los ítems 1, 2 y 3.
- El flujo de agua es canalizado por caños de PVC (ítem 1), en donde a su vez reposarán las macetas hidropónicas.
- El fluido nutritivo es almacenado y preparado en el "recipiente principal" (ítem 2). En su interior se encuentra alojada la bomba "Bomba principal" sumergible.
- El sistema cuenta con un subconjunto denominado "Control de Aditivos" (ítem 3), éste tiene por función, aportar y sensor los aditivos que son diluidos en solución acuosa en el tanque principal. Cuenta con 4 recipientes: sales nutritivas de tipo A y B y 2 cuerpos más para control de PH (control ácido y básico). Cada recipiente tiene control de caudal y nivel, componentes definidos en la Tabla 3.
- El sistema de iluminación queda conformado por un conjunto 4 módulos led full espectro mediante los cuales se pretende simular diferentes condiciones de irradiancia lumínica (ítem 5).
- El sistema de control de temperatura del microclima está compuesto por 10 coolers de los



cuales 6 producen la ventilación forzada de los cultivos y 4 la refrigeración de los módulos LED.

A continuación, se puede ver el contraste entre el diseño y el resultado obtenido (Figura 4):



Figura 4: (a) Diseño del sistema. (b) Sistema real.

#### 4. CONCLUSIONES

Se logró el diseño de un prototipo que sienta las bases para la creación de una herramienta para digitalización del proceso de cultivo de plantas medicinales por métodos hidropónicos, utilizando componentes compatibles con la industria 4.0 y haciendo uso de las tecnologías que son tomadas como pilares en estos procesos.

Se destaca la versatilidad del sistema, capaz de contener cualquier tipo de cultivo hidropónico, totalmente customizable, con la aptitud de generar información útil para la totalidad de actores presentes en la cadena productiva de productos medicinales.

Una vez ajustadas las características del proceso conforme al eje de "Ciclo de Vida", este podrá ingresar en la etapa de "Instance", donde el sistema será potencialmente capaz de producir de forma continua; como por ejemplo: una empresa farmacéutica que cultive plantas medicinales con características organolépticas y fisicoquímicas particulares, podrá optimizar y estandarizar sus procesos productivos ajustando la parametrización de dicho sistema, a vez, contará con información del comportamiento de los aditivos utilizados y como afectan el crecimiento del cultivo, todo disponible en la red, con datos fácilmente comunicables e interoperables. Por otra parte, esta información podría ser de utilidad para los productores de aditivos, ya sea para generar nuevos productos, u optimizar los procesos productivos propios.

Poder crear condiciones y escenarios específicos en el microclima y la alimentación de los cultivos, dejando registro de ello, brinda un cúmulo de información para evaluar el desempeño de todo tipo de planta en diferentes condiciones, generando gran cantidad de modelos a partir de ello, y así obtener gemelos digitales que puedan ser puestos a prueba, sin la necesidad de invertir tiempo y dinero en experimentos reales.

Este prototipo, deja a las claras, que es una herramienta útil no sólo para cultivo de plantas medicinales sino para todo tipo de plantas que sean susceptibles de ser cultivadas mediante el



método de hidroponía, de modo tal que facilite la tarea de laboratorios relacionados al cultivo de plantas en términos generales. Como trabajo futuro se avanzará en el diseño e implementación de la arquitectura de captura de información y un sistema para gestionar los datos recolectados.

### Agradecimientos.

Los autores agradecen al soporte financiero recibido por la Maestría Binacional en “Informática Industrial – Mención Sistemas Físico Cibernéticos Industriales” en el marco del programa binacional CUA-DAHZ entre la UTN-Facultad Regional Santa Fe (Argentina) y la Universidad de Emden/Leer (Alemania).

### REFERENCIAS

- [1] Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R. y Cesco, S. *Hydroponic solutions for soilless production systems: issues and opportunities in a smart agriculture perspective*. *Frontier Plant Science*, 10, pp.923, 2019.
- [2] Jung Eek Son, Hak Jin Kim, Tae In Ahn, *Chapter 20 - Hydroponic systems*, Editor(s): Toyoki Kozai, Genhua Niu, Michiko Takagaki, *Plant Factory (Second Edition)*, Academic Press, pp. 273-283, 2020.
- [3] Modu, F., Adam, A., Aliyu, F., Mabui, A., Alhaji Musa, M. *A Survey of Smart Hydroponic Systems*. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 5. pp. 233 - 248, 2020.
- [4] Rajeswari, A., Saipriya, S. *A survey on Hydroponic methods of smart farming and its effectiveness in reducing pesticide usage*. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 119, no. 12, pp. 1503-1510, 2018.
- [5] Thakur, P., Malhotra, M. *Role of IOT in Automated Hydroponic System: A Review*. En: Dutta, P., Chakrabarti, S., Bhattacharya, A., Dutta, S., Piuri, V. (eds) *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security*. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 491. Springer, Singapore, 2023.
- [6] Atherton, H, Li, P. *Hydroponic Cultivation of Medicinal Plants—Plant Organs and Hydroponic Systems: Techniques and Trends*. *Horticulturae*. 9. 349, 2023.
- [7] Morteza Ghobakhloo, M. *Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 252, 2020.
- [8] Deutsches Institut für Normung (2016) “Reference architecture model industrie 4.0 (RAMI4.0)”. Accesibel en: <https://www.en-standard.eu/din-spec-91345-reference-architecture-mod-el-industrie-4-0-rami4-0/>



## DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA LA OBTENCIÓN DE METRICAS EN FIBRAS TEXTILES: ANÁLISIS ECONÓMICO

Abet Jorge <sup>1</sup>, Arcidiácono Marcelo <sup>2</sup>, Carrizo Blanca <sup>3</sup> y Sofía Enamorado <sup>4</sup>

Dpto. Ingeniería Mecánica e Industrial / GICCAP “Grupo de Investigación en Control Avanzado de Procesos y Producción”

Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional

Calle Maestro Marcelo López esq, N° S/N, Ciudad Córdoba, País Argentina

Correo: [jorgeabet@gmail.com](mailto:jorgeabet@gmail.com) / [bcarrizo@frc.utn.edu.ar](mailto:bcarrizo@frc.utn.edu.ar)

### RESUMEN

El Proyecto “Optimización de producción textil animal a partir de la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático” comenzó sus actividades en el año 2020 con el objetivo de proporcionar un método automático de extracción de características biomecánicas para la clasificación de fibras textiles de origen animal y la consecuente obtención y medición de parámetros específicos que permitan determinar un valor de calidad.

El comercio internacional de fibras sufre pocas regulaciones y básicamente responde a la oferta y demanda. Argentina históricamente ha sido muy competitiva en el mercado mundial de lanas. La competitividad se basa en el volumen que ofrece el país, el bajo costo de producción y la alta calidad de sus productos textiles.

Los bajos costos de producción se deben a la localización de la producción en ambientes de pastizales naturales y manejo extensivo con bajo nivel de insumos. La calidad de las lanas más finas patagónicas se centra en un muy buen grado de blanco y brillo, pureza, bajos niveles de contaminación vegetal y buena suavidad y en el caso de las fibras de los camélidos silvestres el país tiene grandes oportunidades considerando que es primero en población de guanacos y segundo en vicuñas.

Sin embargo, el acceso del productor medio a tecnología para obtener información precisa y relevante que le permita contar con una ventaja competitiva es escaso.

La propuesta del presente trabajo consiste en el desarrollo de una aplicación móvil que utiliza un método de detección y clasificación de las características biométricas más relevantes basado en las técnicas usuales de segmentación de imágenes que reemplazan los tradicionales para incrementar la calidad de las fibras textiles a través de la incorporación de sistemas de visualización automáticos que emplean cámaras y rutinas de procesamiento de imágenes para entrenar una red convolucional.

La aplicación permitirá a los usuarios interesados tener el control sobre las muestras (crear, editar, eliminar) enviadas para su análisis y clasificación y visualizar los resultados.

Con este desarrollo se busca captar el interés de los pequeños y medianos productores para que puedan acceder al mercado y tener las mismas oportunidades que las grandes empresas que actualmente dominan gran parte del mercado.

**Palabras Clave:** Fibra textil animal. Productor. Calidad. Tecnología. Comercialización



## 1. INTRODUCCIÓN

Argentina se posiciona como el primer exportador mundial de lanas certificadas para el mercado de lujo ya que el 98% de la producción se destina al exterior. Sin embargo, existen muchos factores que no permiten que los pequeños y medianos productores de este sector se sigan expandiendo como por ejemplo la falta de tecnología que acompañe el proceso productivo, políticas económicas desfavorables y factores naturales como las sequías, nevadas e incendios.

La cadena de valor de la lana es de suma importancia para la matriz económica y productiva del país, ayuda al desarrollo de los pueblos y sustenta un número significativo de empleos directos e indirectos.

Es por esto que el proyecto busca brindarles a los productores una herramienta ágil y sencilla que les permita contar con un método accesible y económico para reconocer y clasificar tipos específicos de fibras y obtener así una medida de calidad confiable que permita optimizar la producción. Con este desarrollo se busca captar el interés de los pequeños y medianos productores para que puedan acceder al mercado y tener las mismas oportunidades que las grandes empresas que actualmente dominan gran parte del mercado.

## 2. SITUACIÓN ACTUAL

### 2.1. Mercado

Según datos de la Federación Lanera Argentina, la población ovina alcanza 12,5 millones de cabezas en el país y es en la Patagonia sur donde se concentra la actividad más importante: el 25% de las ovejas se encuentran en Chubut y un 18% en campos de Santa Cruz. La provincia de Buenos Aires, con un 15%; Corrientes, con el 8% y Río Negro con el 7%, completan los cinco primeros lugares en el mapa de población ovina. [1]

En el último año Argentina produjo en promedio 39.000 toneladas de lana de los cuales se exportaron 31.400 toneladas.

Argentina cuenta con razas capaces de producir fibras de alta calidad que son criadas en ambientes sanos, naturales y libres de contaminación buscando siempre lograr una gestión sustentable de los recursos naturales.

Más del 50% del stock ovino argentino corresponde a razas productoras de lana (Merino) y doble propósito (Corriedale, Rommey Marsh, Lincoln) y Criolla dado que lo que se busca a la hora de la venta de lana es la finura ya que una lana fina se cotiza mucho mejor que la lana gruesa.

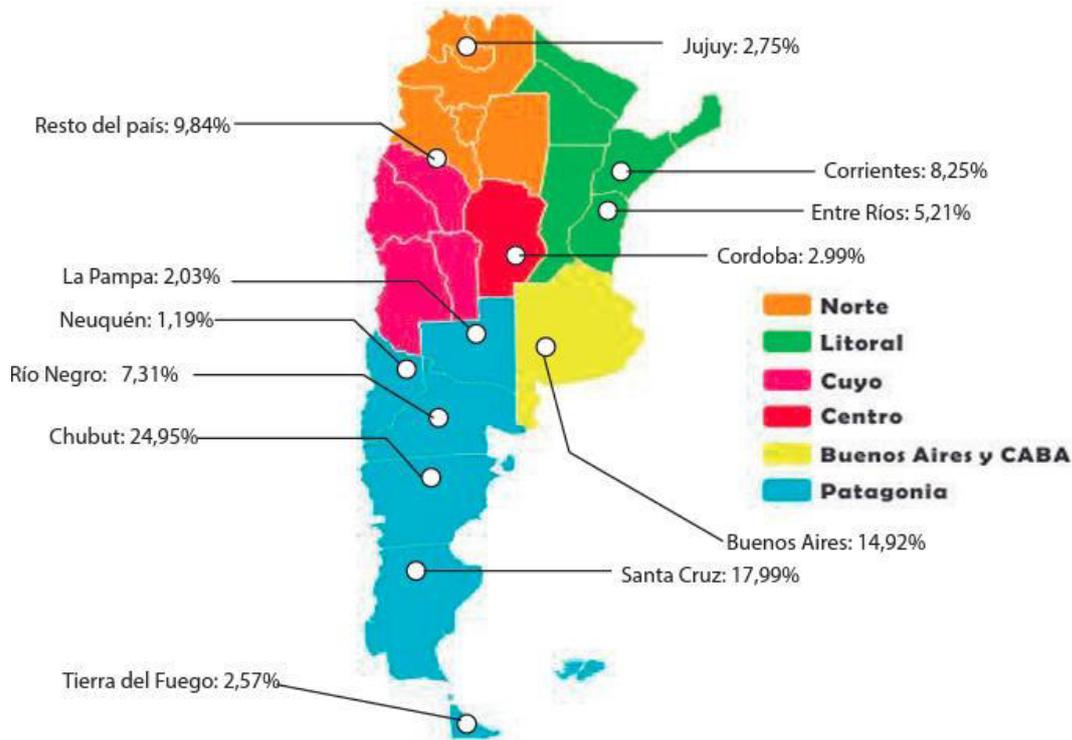


Figura 1. Distribución del Ganado en Argentina. Fuente: Federación Lanera Argentina

### 2.1. Principales consumidores

El 93% de la producción lanera del país se orienta al mercado externo, ya sea Sucia, Lavada, Peinada, Blousse ó Subproductos. Alemania es el principal comprador, con el 33% de la lana exportada, seguida por China (18%), Italia (12%), Turquía (9%), Perú (7%) y México (5%). [1]

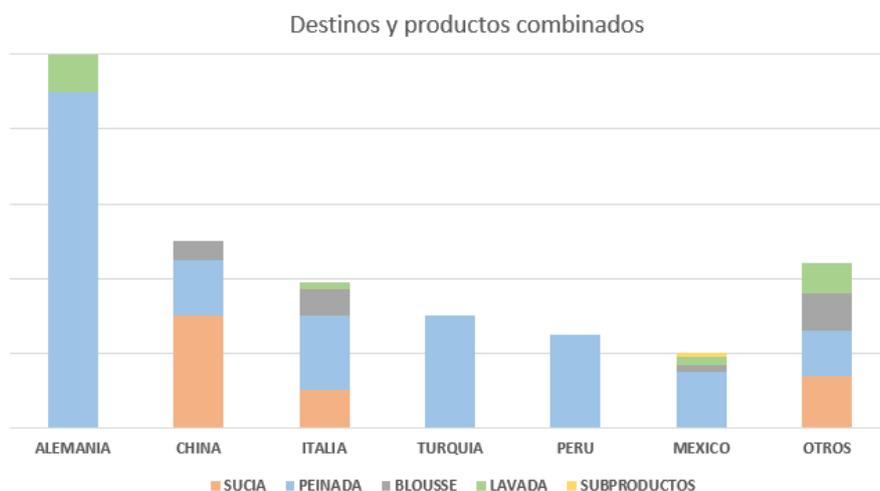


Gráfico 1. Elaboración propia en base a los datos de la Federación Lanera Argentina -



## DESTINOS

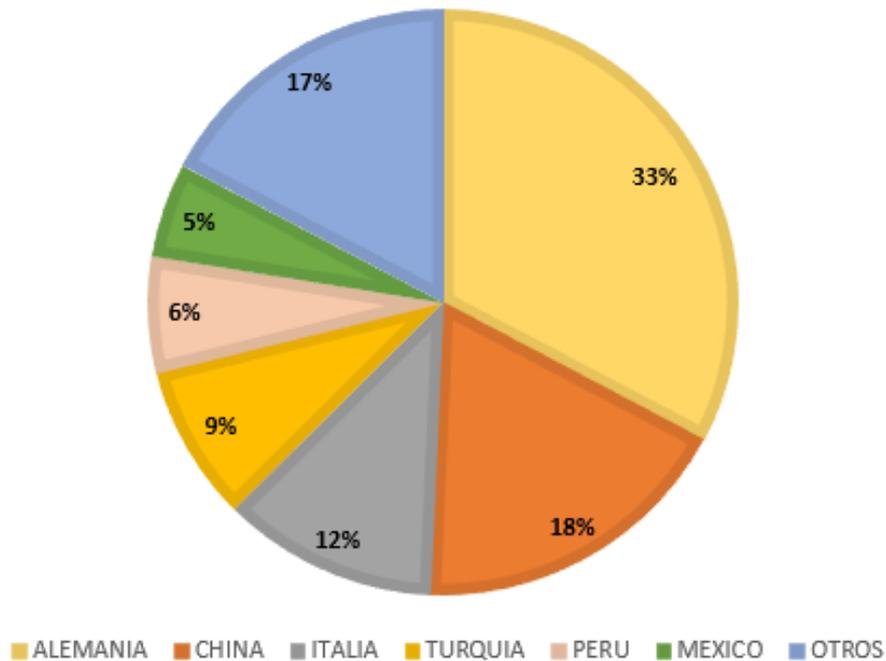


Gráfico 2. *Elaboración propia en base a los datos de la Federación Lanera Argentina*

Como ventaja, Argentina tiene el mercado de compradores internacionales distribuido en varios países, lo que permite diversificar el riesgo ante los vaivenes de la coyuntura internacional. Sin embargo, hay que tener en cuenta la realidad que atraviesa cada país en un contexto mundial de creciente inflación ya que, más allá de que la lana que se produce en el país está muy bien posicionada en cuanto a estándares de calidad, no es ajena a esta crisis.

### 2.3. Políticas Públicas

Existen actualmente algunas políticas implementadas por el gobierno que buscan financiar, entre otras cuestiones, programas que estimulen la producción y el desarrollo de pequeños y medianos productores y productoras y de economías regionales. [2]

Entre ellas podemos mencionar las siguientes:

- **Programa para el Mejoramiento de la Calidad de la Lana (PROLANA).** Fue creado con el propósito de asistir al productor lanero de todo el país para el mejoramiento de la calidad de la lana, de su presentación y condiciones de venta. Fue implementado bajo la Resolución 1139/94.



Recientemente, y gracias a este programa, en el mes de mayo de este año se comercializaron 49.991 Kilos de lana posparto proveniente de la provincia de Neuquén, certificada bajo protocolo PROLANA de la zafra en curso (2022/2023). La calidad promedio ponderada del lote fue 22,54 micrones y 59,83% de rinde. [3]

- **Programa de Compensación Económica para Pequeños y Medianos productores de lana ovina de la Región Patagónica (LANAR).** Establecido a partir de la Resolución 11/2023 tiene el objetivo de estimular la producción, el desarrollo y el fortalecimiento de la cadena.
- **Programa de incremento exportador para economías regionales** que se implementó bajo el Decreto 194/2023. Busca promover el arraigo territorial, el agregado de valor, la industrialización en origen y el incremento de las exportaciones a través del desarrollo socioeconómico armónico, entre los distintos eslabones de las cadenas de valor de las economías regionales
- A través del Decreto N° 410/21 se modificaron los derechos de exportación del rubro lanas, entre otros, dando como resultado una baja en la retención de lana y pelo fino u ordinario, cardados o peinados medida que beneficia a los productores.

#### 2.4. Calidad y Certificaciones

La industria de la moda, que utiliza la fibra de camélidos como materia prima con calidad de exportación, se encuentra inmersa en un mercado mundial exigente donde resulta importante tomar en consideración las preferencias del consumidor conociendo sus gustos y su forma de escoger las prendas que va a adquirir.

El confort que brinda una prenda elaborada con fibra animal es una de las cualidades más apreciadas por el cliente. Esta comodidad podría relacionarse con el porcentaje de fibras mayores a 30 micras ( $\mu\text{m}$ ) que posee el vellón conocido como el factor confort.

Es decir que, el factor de confort se define como el porcentaje de las fibras menores de 30  $\mu\text{m}$  que tiene un vellón, donde:

- Si más del 5% de fibras son mayores a 30  $\mu\text{m}$ , entonces el tejido resulta ser no confortable para su uso por la picazón.
- Contrariamente, el porcentaje de fibras mayores a 30  $\mu\text{m}$  se conoce como el factor de picazón.

Argentina, cuenta con certificaciones de calidad y de responsabilidad medioambiental cuyo objetivo es conservar la biodiversidad y los ambientes de la estepa y también contribuir al



sustento y calidad de vida de los productores que, a través de estas certificaciones logran posicionar sus productos en el mercado nacional e internacional.

#### **2.4.1 Estándar de Lana Responsable (RWS)**

Es un estándar internacional voluntario que aborda el bienestar animal en las granjas y la cadena de custodia de la lana desde las granjas certificadas hasta el producto final. Los productos pueden contener 100% lana certificada o mezclas que van desde el 5% hasta el 99% de lana certificada. Solo los productos que contienen 100% de lana certificada pueden etiquetarse con el logotipo de RWS. [4]

En nuestro país desde octubre de 2018, *Fuhrmann*, que es el establecimiento que más lana exporta es proveedor oficial de la lana certificada RWS. [5]

#### **2.4.2 WFEN y WCS Argentina**

*Wildlife Friendly* (WFEN) junto con *Wildlife Conservation Society* (WCS) son dos organizaciones no gubernamentales sin fines de lucro que buscan proteger la vida silvestre en tierras agrícolas intermedias, certificando empresas que garanticen la coexistencia y prosperidad de las personas y la naturaleza. [6]

En 2021 doce productores de Neuquén recibieron la certificación internacional en reconocimiento a sus esfuerzos para promover la coexistencia con la fauna nativa de la estepa patagónica mediante el manejo sustentable de su producción [7]

Estas certificaciones les dan a los productores un marco de confianza, respeto, responsabilidad y trazabilidad a los materiales posicionándolos en un lugar estratégico en el mercado internacional que repercute positivamente en las economías regionales.

### **3. OBJETIVO**

En el contexto de la sustentabilidad productiva de fibras textiles, la oportunidad de contar con un método accesible, económico y amigable con el medio ambiente para reconocer y clasificar diversos tipos de fibras que permita optimizar el proceso productivo, es de vital importancia.

La incorporación de estos sistemas automáticos permite mejorar la velocidad y la calidad de los controles que se realizan, por lo tanto, la incorporación de esta nueva tecnología es un factor clave que aumentan la competitividad de las empresas del rubro ya que disminuyen el tiempo de inspección y los resultados obtenidos son precisos, de esta manera se logra una reducción de costo incrementando las ganancias.



Se propone en este sentido el desarrollo de una aplicación móvil que utiliza un método de detección y clasificación de las características biométricas más relevantes basado en las técnicas usuales de segmentación de imágenes que reemplazan los tradicionales para incrementar la calidad de las fibras textiles a través de la incorporación de sistemas de visualización automáticos que emplean cámaras y rutinas de procesamiento de imágenes para contar con un conjunto significativo de datos que permitan entrenar una red convolucional.

La aplicación permite a los usuarios interesados tener el control sobre las muestras (crear, editar, eliminar) enviadas para su clasificación y visualizar los resultados de forma rápida y en su celular.

Con este desarrollo se busca captar el interés de los pequeños y medianos productores para que puedan acceder al mercado y tener las mismas oportunidades que las grandes empresas que actualmente dominan gran parte del mercado.

Es importante mencionar, además, que los algoritmos de procesamiento que se han sido investigados y desarrollados pueden ser aplicados no sólo a la industria textil sino a una gran variedad de procesos que involucren el reconocimiento de patrones morfológicos en fibras naturales y sintéticas y la determinación de aquellos descriptores cuyo valor generen un alto impacto en sus propiedades físicas y/o mecánicas

#### **4. CONCLUSIONES**

La industria de la lana, que hoy en día incluye a los fabricantes y productores, es una red compleja de empresas basadas en tecnologías que abarcan la física, la química, la biología y la ingeniería. Todos estos campos contribuyen a una mejor comprensión de las propiedades únicas de las fibras y al desarrollo de nuevos procesos que la transforman en productos deseables.

Como se ha señalado, la cadena de valor de la lana tiene una importancia muy significativa en la matriz económica y productiva del país, motoriza a la mayoría de los pueblos y sostiene un número importante de empleos directos e indirectos.

Es por ello que se busca desarrollar una herramienta que va de la mano de la innovación industrial trabajando con procesos tecnológicos que impacten significativamente en los modelos de negocio y en los sistemas de producción aplicables a economías familiares y de mediana escala.



## 5. REFERENCIAS

- [1] Estadísticas Laneras Argentinas. Federación Lanera Argentina. Buenos aires, Argentina, 2023
- [2] Boletín Oficial de la República Argentina. (Enero de 2023).
- [3] Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2023). Informe venta de lana mediante licitación conjunta. Buenos Aires.
- [4] Organización Internacional Agropecuaria. (Mayo de 2023). OIA.
- [5] FUHRMANN. (Mayo de 2023). fuhrmann-argentina.
- [6] Wildlife Friendly. (Junio de 2023).
- [7] Wildlife Conservation Society. (Junio de 2023).
- [8] 1° Congreso Latinoamericano de Ciencia, Tecnología y Sociedad que se realizará en la provincia de San Juan, República Argentina, los días 8,9,10 y 11 de noviembre de 2022. ISBN : 978- 950-605-922-4



## MONITOREO REMOTO DE CONDICIÓN DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS PARTE II: ARQUITECTURA MODULAR PARA INTEGRACIÓN DE MÚLTIPLES SENSORES

Martín Baudino<sup>1</sup>, Pablo Garrone<sup>1</sup>, Diego Vicente<sup>1</sup> y Lucas Leguizamón<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Pampa

Calle 110 N°390, General Pico, La Pampa, Argentina

[mbaudino@ing.unlpam.edu.ar](mailto:mbaudino@ing.unlpam.edu.ar), [vicente@ing.unlpam.edu.ar](mailto:vicente@ing.unlpam.edu.ar), [pdgarrone@gmail.com](mailto:pdgarrone@gmail.com),

[lucas.leguizamon.ing@gmail.com](mailto:lucas.leguizamon.ing@gmail.com).

### RESUMEN

Desde la introducción de las computadoras electrónicas digitales en los procesos de manufactura, la convergencia entre las Tecnologías de Operación (OT) y las Tecnologías de la Información (IT) ha sido uno de los principales desafíos en la industria. Para alcanzar este objetivo es necesario integrar los requerimientos divergentes, que existen entre la gestión de los datos y la gestión de los activos físicos, respecto a factores como: velocidad, determinismo, disponibilidad, conectividad y seguridad, entre otras.

El avance de la Internet Industrial de las Cosas (IIoT) facilita la integración de las OT con las IT, lo que permite la construcción de sistemas ciber-físicos que impulsan la cuarta revolución industrial. Un ejemplo de éstos son los sistemas autónomos para monitoreo de condición de elementos de máquinas, en los que grandes volúmenes de datos, provenientes de diferentes dispositivos IIoT, son procesados de manera automática. La creación de métricas detalladas del estado de salud de una máquina exige la capacidad de analizar datos provenientes de múltiples fuentes, como, por ejemplo, sensores de temperatura, presión, corriente, acelerómetros, etc. En este marco es vital disponer de una infraestructura, que sea flexible, segura y escalable.

En este trabajo se presentan los últimos avances en el desarrollo de un sistema modular de monitoreo de condición, que utiliza sensores inalámbricos inteligentes. Se parte de la descripción de la arquitectura de un sistema de adquisición y procesamiento de datos, desarrollado en trabajos anteriores como un único dispositivo. Luego se fundamenta su transformación en un conjunto de módulos de hardware y software interconectables, que forman parte de una plataforma flexible y adaptable a diferentes tipos de aplicaciones. La plataforma desarrollada es una herramienta para el prototipado rápido de sensores inteligentes, cableados e inalámbricos, con recolección automática de datos, y destinada a aplicaciones de monitoreo de condición de máquinas u otro tipo.

**Palabras Clave:** *Sistemas Embebidos; Diseño Modular; Internet Industrial de las Cosas; Sensores Inalámbricos Inteligentes.*



## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la Internet Industrial de las Cosas (IIoT) está transformando, de manera muy rápida, la forma en que operan las industrias al acelerar la convergencia de las Tecnologías de Operación (OT) y las Tecnologías de la Información (IT) [1]. Esta convergencia es especialmente relevante en aplicaciones de monitoreo de condición de máquinas, donde la IIoT desempeña un papel fundamental. La conectividad y capacidad de recopilación de datos en tiempo real que proporciona la IIoT, permite que las empresas implementen sistemas avanzados de monitoreo capaces de proporcionar una imagen detallada del estado de las máquinas.

Las aplicaciones de monitoreo de condición requieren la integración de múltiples sensores y dispositivos para recabar información acerca de los principales parámetros de máquina (temperatura, presión, vibración, corriente eléctrica, etc.). En ocasiones, estos dispositivos deben poseer capacidades y características especiales para adaptarse a los requerimientos y dificultades particulares que impone cada caso. La inserción de sensores en algunos elementos de máquinas requiere superar dificultades que tienen que ver con restricciones de acceso, espacio reducido e imposibilidad de utilizar conexiones cableadas.

En la Parte I de este trabajo [2] se presentó un sistema para monitoreo de temperatura en cojinetes de biela, en el que los sensores no pueden alimentarse ni comunicarse mediante cables. En la Figura 1 se muestra un esquema del sistema donde el lector que se comunica, mediante la técnica de Identificación por Radio Frecuencia (RFID), con sensores adosados a las bielas. Cada sensor es una etiqueta RFID inteligente que adquiere información de termocuplas insertas en los cojinetes. Para evitar utilizar baterías en la alimentación de cada sensor, se utilizó una interfaz RFID pasiva. De esta manera, en cada ciclo de comunicación, el lector le transfiere al sensor energía de Radio Frecuencia (RF), para que se active, realice las mediciones y se las comunique [3].

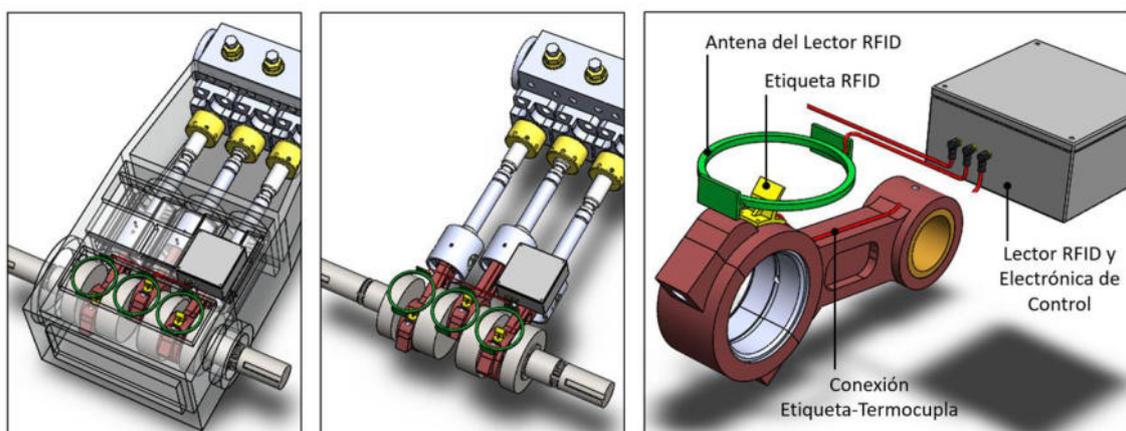


Figura 1: Esquema de montaje y operación del sensor RFID.



Aunque la arquitectura original del sistema satisface los requisitos relacionados al monitoreo de temperatura en cojinetes, no es lo suficientemente flexible como para permitir una rápida expansión hacia a otro tipo de sensores y diferentes posibilidades de captación de energía. El prototipo se desarrolló sobre la base de una interfaz RFID de Texas Instruments [4] que utiliza tecnologías propietarias, con protocolos no estándar para el manejo de las fases de comunicación y transferencia de energía. El firmware embebido en las etiquetas es a medida de la aplicación, pero carece de facilidades para readaptarlo a otro contexto y entorpece el despliegue ágil de redes de dispositivos IIoT.

De lo anterior se desprende la necesidad de contar con una plataforma de adquisición de datos que permita el prototipado rápido de sensores y dispositivos, adaptable a diferentes tipos de aplicaciones y condiciones. Por lo tanto, es necesario que la plataforma sea flexible en sus dos dimensiones principales, el hardware y el firmware embebido. En este trabajo se presenta la reingeniería del prototipo original, para dotarlo de mayor flexibilidad y extender su alcance a otro tipo de aplicaciones de monitoreo de condición de máquinas (con otros tipos de sensores, otras formas de captación de energía, otras formas de comunicación), o incluso de otro ámbito como la ganadería de precisión, por ejemplo. Para ello se aplica el concepto de diseño modular sobre el hardware y firmware embebido, tomando como punto de partida el sistema original [2].

## 2. DISEÑO DE ARQUITECTURA MODULAR

El proceso de rediseño se inició con un análisis de las prestaciones del prototipo original y se las compró con los requisitos necesarios para lograr la flexibilidad y extensibilidad deseadas. En la Figura 2 se muestra un diagrama de bloques del sistema original, presentado en la Parte I del trabajo. Las etiquetas en las bielas se componen de un microcontrolador (MSP430), que por un lado se comunica con un acondicionador de señal para termocuplas (ADS1018), y por otro, con un transponder RFID (TMS37157). El microcontrolador se encarga de las mediciones de temperatura, mientras que el transponder RFID se encarga de gestionar la comunicación con el lector, y la fase de captación de energía RF proveniente del lector [3].

La rigidez de la arquitectura monolítica de la arquitectura original radica principalmente en que el hardware y el firmware de la etiqueta están ideados para un único tipo de sensor (las termocuplas) y una única interfaz de comunicación y de captura de energía (la interfaz RFID). Además, los circuitos integrados (ICs) de la interfaz RFID utilizan tecnologías propietarias, con interfaces y protocolos no estándar. Esto imposibilita la interoperabilidad en redes de sensores, lo que dificulta la implementación ágil de tecnologías como Internet de las Cosas (IIoT).

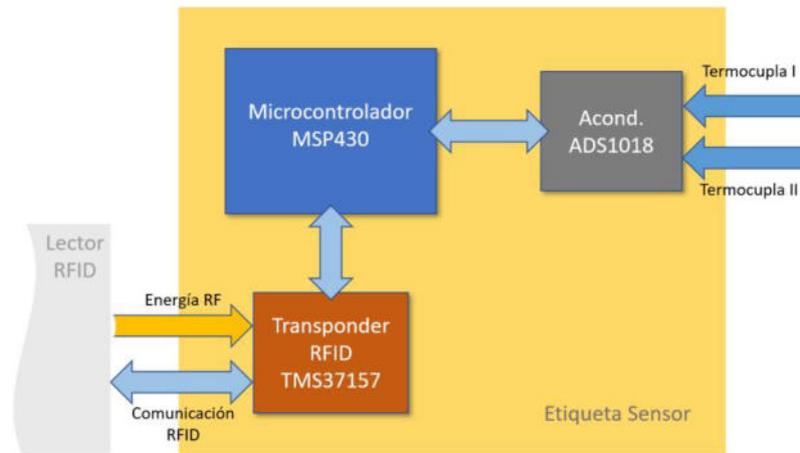


Figura 2: Diagrama de bloques de las etiquetas del sensor.

## 2.1. Análisis de Requerimientos

El proceso de rediseño de la plataforma se inició con la condición de que su nueva arquitectura cumpliera con todos los requerimientos de la aplicación original de medición de temperatura en cojinetes de biela. Por lo tanto, debía adaptarse a espacios reducidos, ser capaz de alimentarse y comunicarse de forma inalámbrica, y minimizar el consumo de energía durante su operación.

Además de cumplir con los requisitos propios de la aplicación original, se estableció que la plataforma debía ser lo suficientemente flexible como para incorporar otro tipo de sensores, incluir diferentes medios de captación de energía y disponer de varios métodos de gestión de energía. También era necesario independizar la transmisión de datos de la transmisión de potencia, ya que en la arquitectura original se realizaba mediante el mismo circuito integrado, como se muestra en la Figura 2. A continuación se detallan los requerimientos necesarios para que el dispositivo se pueda adaptar de manera sencilla a distintas aplicaciones:

- Selección configurable de los módulos de hardware y firmware desde una ubicación centralizada.
- Inicialización y funcionamiento en cuatro modos de operación: apagado, activo, de bajo consumo y de ultra bajo consumo.
- Adquisición de datos sólo en el modo activo de operación.
- Múltiples módulos de comunicaciones con posibilidad de operar en simultáneo, con disponibilidad permanente de una interfaz de comunicación serie.
- Área de memoria no volátil de datos para el almacenamiento de mediciones.

Para cumplir todos estos requerimientos de manera simultánea se subdividió el hardware, el firmware y los mecanismos de comunicación aplicando un criterio de diseño modular.



## 2.2. Modularización del hardware de adquisición de datos

En la Figura 3 se presenta un diagrama de bloques funcionales del nuevo módulo de adquisición de datos que se diseñó. Los rectángulos con línea de puntos indican la separación de los módulos de hardware, que se muestran ordenados horizontalmente como etapas, siguiendo el flujo de energía. Esto significa que cada uno de ellos alimenta directa o indirectamente a los módulos ubicados a su derecha, lo cual está representado por flechas de color rojo. Las flechas de color celeste, por otro lado, indican flujos bidireccionales de datos, que pueden ser buses para múltiples dispositivos como los de Circuito Inter-Integrado (I2C) o la Interfaz de Periféricos Serial (SPI), o hasta conexiones punto a punto como el Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (UART). Además, cada módulo contiene subbloques que en algunos casos son mutuamente excluyentes, como las fuentes de energía (1), y en otros casos son redundantes, como las tecnologías de comunicaciones (5).

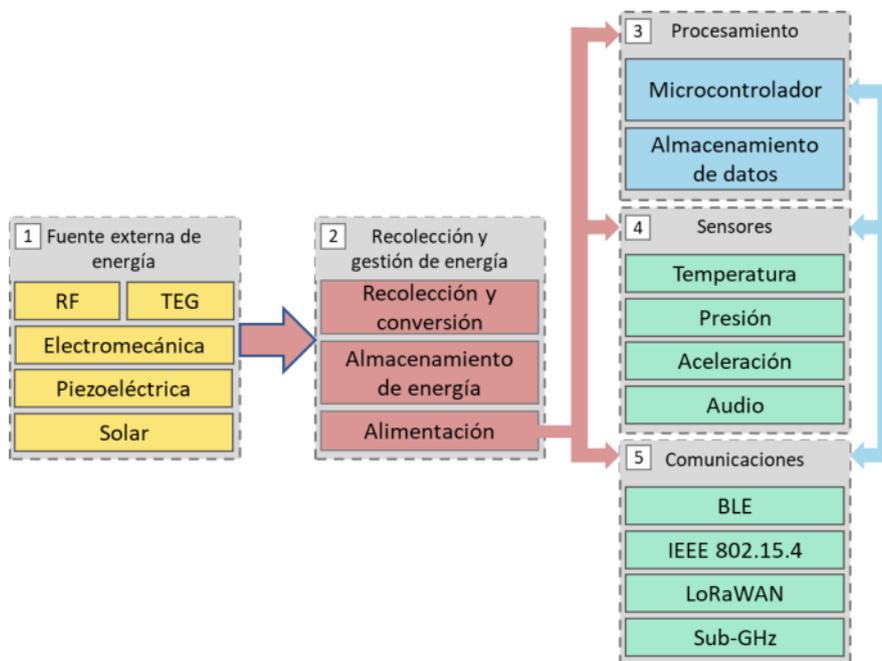


Figura 3: Módulos de hardware con sus vínculos energéticos y de datos.

Entre las posibles **fuentes externas de energía (1)** se mantuvo la funcionalidad original, asociada a la captura de energía RF de baja frecuencia, y al mismo tiempo se habilitó la posibilidad de utilizar de otras fuentes de energía, como generadores termoeléctricos, electromecánicos, piezoeléctricos o paneles solares. Por lo tanto, en el nuevo diseño se mantiene el IC de RFID TMS37157 [4] en el módulo de **recolección de energía (2)**, y además se evaluaron Circuitos Integrados de Gestión de Potencia (PMIC) para la recolección, almacenamiento, y posterior entrega de energía como fuente de alimentación de los circuitos electrónicos de las



siguientes etapas. Finalmente se seleccionó el IC BQ25570 [5] por su ultra bajo consumo de energía y dado que sus características se adaptan a las condiciones requeridas.

La combinación de los circuitos integrados TMS37157 y BQ25570 en el nuevo módulo de captura de energía abre nuevas posibilidades nuevas posibilidades. El módulo original solo permitía alimentar los sensores mediante la energía RF que se transfería desde el lector al sensor, mediante acoplamiento inductivo resonante. Ahora se añadió la capacidad de aprovechar la energía proveniente de fuentes ambientales. De esta manera, la alimentación de los IC ahora puede hacerse mediante transferencia inalámbrica de energía (por acoplamiento inductivo resonante), mediante cosecha de energía (termoeléctrica, electromecánica, piezoeléctrica o solar), o mediante combinaciones de las opciones mencionadas. En síntesis, esto representa una mejora significativa, que amplía las opciones de alimentación disponibles y ofrece un enfoque más versátil y sostenible para mantener los sensores energizados en diversas situaciones y entornos.

Para el módulo de **procesamiento (3)** se evaluaron varios modelos de microcontroladores de las familias MSP430 [6] de Texas Instruments y STM32 [7] de STMicroelectronics, dado que sus arquitecturas están diseñadas para aplicaciones de bajo consumo. Sin embargo, en la evolución no solo se comparó el consumo de energía, sino también la disponibilidad de memoria no volátil y de periféricos internos. También se consideró la disponibilidad de placas de desarrollo comerciales y de librerías soportadas por los fabricantes. Es importante destacar que gracias a la modularización realizada en el firmware, solo con el desarrollo de una capa de implementación de periféricos, se adaptó la aplicación original, utilizada para el microcontrolador MSP430F2274, en dos microcontroladores distintos, el STM32F429 y el MSP430FR5994.

Con el objetivo de que los módulos sean extensibles a aplicaciones no previstas actualmente, los módulos de **sensores (4)** y **comunicaciones (5)** también se diseñaron aprovechando las capas de abstracción provistas por la modularización del firmware. De esta manera, en el módulo de sensores se utilizó el IC ADS1018 para la interfaz con termocuplas, como en el prototipo original, y además se utilizó los mismos conectores para realizar mediciones con otros sensores, como por ejemplo aceleración a través del IC LSM6DSM. Para el módulo de comunicaciones se mantuvo la comunicación RFID original a través del IC TMS37157, como se ve en la Figura 2, pero el nuevo diseño prevé la posibilidad de realizar comunicaciones Bluetooth Low Energy (BLE) en paralelo, a través del procesador BlueNRG-MS.

### 2.3. Modularización del firmware y los mecanismos de comunicaciones

Con el propósito de que la plataforma sea flexible y configurable se aplicó el concepto de diseño modular en cada una de sus dimensiones [8][9]. El firmware en su totalidad está concebido sobre la base de una arquitectura de capas, que dividen su funcionalidad en niveles crecientes de



abstracción. Cada capa provee servicios a las capas superiores a través de una Interfaz de Programación de Aplicación (API), siendo solo la capa inferior la que se ocupa de interactuar con el hardware. En la Figura 4 se presenta el diagrama de capas resultante, donde se incluyeron también los submódulos correspondientes a cada capa.

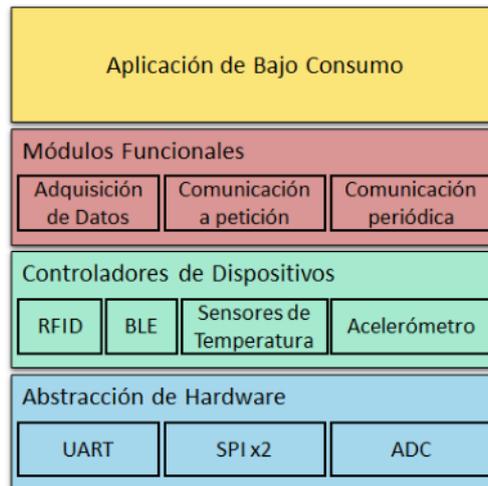


Figura 4: Arquitectura modular de capas.

La capa de **aplicación de bajo consumo** fue destinada a las tareas de alto nivel del firmware. Se utiliza el patrón de arquitectura “Power-Save Super Loop” [9] para la gestión de tareas, y el patrón “Observar y Reaccionar” [8] para cada tarea en particular. Por otro lado, la capa de **módulos funcionales** tiene como finalidad proveer servicios de alto nivel para la adquisición de datos y las comunicaciones. La característica modular de esta capa radica en que, dependiendo de la configuración de comportamiento utilizada, se aplicaron distintas variantes del patrón de arquitectura “Segmentación de Proceso” [8] para seleccionar qué dispositivo debe brindar el servicio solicitado por la capa superior. Un ejemplo es que las funciones de comunicaciones pueden realizarse a través de BLE, RFID, o incluso ambas.

La capa de **controladores de dispositivos** se utiliza para implementar las funciones lógicas de acceso a los ICs y demás dispositivos conectados, por lo que su API se compone de funciones del tipo “medir temperaturas” o “transmitir medición única”. Por último, la **Capa de Abstracción de Hardware (HAL)** [9] contiene la configuración y gestión de acceso a los periféricos del microcontrolador que ejecuta el firmware. Si bien los servicios que provee están orientados a las interfaces del microcontrolador, como la UART, SPI o módulos como un Conversor Analógico-Digital (ADC), estas funciones son independientes del microcontrolador seleccionado. Esto significa que hay secciones de código específicas para cada una de las posibles familias de microcontroladores a utilizar, ya sean MSP430, STM32, u otras que pudieran requerirse en el futuro.



### 3. IMPLEMENTACIÓN Y DISCUSIÓN

Para comprobar que la arquitectura diseñada, junto con sus módulos y submódulos, cumplen con los requerimientos planteados en la sección 2.1, se refactorizó el firmware que corre en el dispositivo original siguiendo el modelo de capas, con especial énfasis en la capa de abstracción de hardware. Esto posibilitó el desacople de la aplicación respecto del microcontrolador utilizado, y permitió la reutilización del código fuente. El objetivo de esta etapa fue validar el funcionamiento de los módulos de manera integral y la facilidad de adaptar el sistema completo a distintas plataformas de microcontroladores. Para ello, se seleccionaron dos placas de desarrollo comerciales, y se fabricaron dos módulos de dispositivos: uno para recolección de energía y comunicaciones por RFID y otro para la adquisición de temperaturas de termocuplas. De esta manera, se pudo comprobar la conexión y el vínculo entre capas, así como también el funcionamiento de una aplicación de prueba en la nueva arquitectura diseñada.

#### 3.1. Implementación con módulos comerciales

Los módulos utilizados para el desarrollo y las pruebas funcionales se muestran en la Figura 4. Se fabricaron dos módulos de dispositivos, uno con el IC TMS37157 para realizar la recolección de energía y comunicaciones por RFID (Figura 4.a), y otro con el IC ADS1018 para realizar mediciones de temperaturas con termocuplas (Figura 4.d). Además, se utilizaron las placas de desarrollo MSP430FR5994-Launchpad de Texas Instruments (Figura 4.b) y la STM32F429-Nucleo de ST Microelectronics (Figura 4.c).

La placa de desarrollo MSP430FR5994-Launchpad se seleccionó debido a que pertenece a la misma familia de microcontroladores que se utilizó en el prototipo original, con la particularidad de que el microcontrolador MSP430FR5994 dispone de memoria no volátil de tipo RAM Ferromagnética (FRAM). Esto elimina la necesidad de guardar los valores de configuración en una memoria externa, y al mismo tiempo disminuye el consumo de energía en estado activo.

Por otro lado, la familia de microcontroladores STM32 posee más de 1.200 modelos de microcontroladores, optimizados para distintas aplicaciones, entre ellas el procesamiento de señales mixtas y también el bajo consumo de energía. Además, presentan la ventaja de que todos los modelos comparten un conjunto de librerías de periféricos que permiten una migración sencilla del código de aplicación. Dentro de todas las alternativas, la placa de desarrollo STM32F429-Nucleo, en su variante de 144 pines, permite experimentar con distintos tipos de sensores, e interfaces de comunicación.

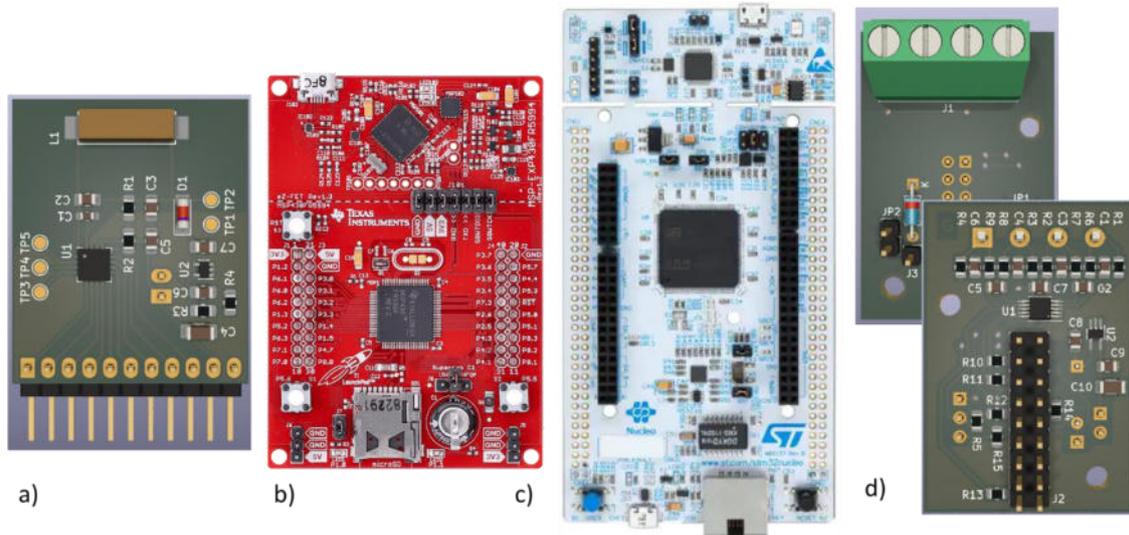


Figura 4: Módulos de hardware: etiqueta RFID (a), kits de desarrollo de microcontroladores (b)(c), acondicionador para termoplas (d).

Otro punto importante para destacar es que ambas placas de desarrollo de microcontroladores también poseen algunas características similares que facilitan su intercambio con rapidez: utilizan la tecnología CMOS de 3,3 V para sus periféricos, disponen de cabeceras de conectores individuales, e integran Depuradores En el Circuito (ICDs) con conectores micro USB. Por ello se realizó el cableado directo de los módulos de RFID y de acondicionamiento de señal, sin requerir circuitos de cambio de nivel.

### 3.2. Discusión

La arquitectura diseñada se validó a través de la aplicación original de monitoreo de temperatura en cojinetes de bielas. Para demostrar que la plataforma cumple con el objetivo de flexibilidad y extensibilidad, se utilizaron dos plataformas microcontroladas diferentes, en las que se implementó con éxito el firmware de dicha aplicación. La facilidad y velocidad con la que se puede migrar de hardware radica en que no es necesario modificar el software embebido que contiene la lógica de la aplicación. Gracias a la arquitectura de capas, en este caso, solo fue necesario reconfigurar firmware de la capa HAL. Además, la plataforma no solo posee un módulo de procesamiento de bajo consumo, sino que todos los módulos de la plataforma poseen ICs con características de bajo consumo. Con todo esto, se abren las puertas a nuevas oportunidades, como la integración de distintos medios de recolección de energía, la transmisión de datos mediante BLE y la conexión con una amplia variedad de sensores. Por último, la arquitectura modular facilita la incorporación de estos dispositivos en redes de sensores inalámbricos dentro del contexto de la IIoT.



#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los últimos avances en el desarrollo de una plataforma modular de monitoreo de condición que utiliza sensores inalámbricos inteligentes. Se partió de la descripción de la arquitectura de un sistema de adquisición y procesamiento de datos, desarrollado en trabajos anteriores, que se basa en un único dispositivo. Luego se fundamentó su transformación en un conjunto de módulos de hardware y software interconectables, que constituyen una plataforma flexible y adaptable a diferentes tipos de aplicaciones. La plataforma desarrollada es una herramienta extensible que sirve para el prototipado rápido de sensores inteligentes, cableados e inalámbricos, y con recolección automática de datos para aplicaciones de monitoreo de condición de máquinas u otro tipo.

#### REFERENCIAS

- [1] Giannelli, C.; Picone, M. *Industrial IoT as IT and OT Convergence: Challenges and Opportunities*. IoT 2022, 3, 259–261. <https://doi.org/10.3390/iot3010014>.
- [2] P. Garrone, M. Baudino, L. Leguizamón, D. Vicente. *Monitoreo Remoto de Condición de Elementos de Máquinas. Parte I: Sistema de monitoreo de temperatura en cojinetes de biela*. VIII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica CAIM2023. Santa Fe, República Argentina, 13 al 15 de septiembre de 2023.
- [3] P. Garrone, M. Baudino, D. Vicente. *Sensor embebido basado en etiqueta RFID pasiva*. Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (CASE2019), ISBN: 978-987-46297-6-0. Universidad Nacional de Rosario.
- [4] *eZ430-TMS37157 Development Tool. User's Guide*. Texas Instruments. 2010.
- [5] *BQ25570 Datasheet. Nano power boost charger and buck converter for energy harvester powered applications*. Texas Instruments. 2019.
- [6] *MSP430FR599x, MSP430FR596x Mixed-Signal Microcontrollers Datasheet*. Texas Instruments. 2021.
- [7] *STM32F437xx STM32F439xx Datasheet*. ST Microelectronics. 2018.
- [8] I. Sommerville. *Software Engineering*. 10<sup>th</sup> Edition. Pearson Education Limited. England. 2016.
- [9] R. Oshana, M. Kraeling. *Software Engineering for Embedded Systems. Methods, Practical Techniques, and Applications*. Newnes. 2013.



## MONITOREO REMOTO DE CONDICIÓN DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS PARTE I: SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA EN COJINETES DE BIELA

Pablo Garrone<sup>1</sup>, Martín Baudino<sup>1</sup>, Lucas Leguizamón<sup>1</sup>, Diego Vicente<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Pampa  
Calle 110 N°390, General Pico, La Pampa, Argentina

[pdgarrone@gmail.com](mailto:pdgarrone@gmail.com), [mbaudino@ing.unlpam.edu.ar](mailto:mbaudino@ing.unlpam.edu.ar), [lucas.leguizamon.ing@gmail.com](mailto:lucas.leguizamon.ing@gmail.com),  
[vicente@ing.unlpam.edu.ar](mailto:vicente@ing.unlpam.edu.ar).

### RESUMEN

El mantenimiento predictivo de máquinas requiere la medición y el análisis de variables físicas como temperatura, presión, aceleración, sonido, etc. La combinación de las tecnologías incluidas en lo que se conoce como Internet de las Cosas (IoT) e Inteligencia Artificial (AI) permite analizar grandes cantidades de datos en forma automática, lo que incrementa la posibilidad de anticipar la falla y evitar una parada imprevista. Sin embargo, la adquisición de datos en tiempo real puede ser sumamente dificultosa en algunos casos. Un ejemplo de esto es la medición de temperatura en cojinetes de biela en máquinas alternativas, donde el espacio reducido y el movimiento de las partes hacen imposible la inserción de sensores cableados.

Este trabajo presenta los principales avances en el desarrollo de la arquitectura electrónica de un sistema inalámbrico para la medición y digitalización de temperatura en cojinetes de biela, para aplicaciones de monitoreo remoto de condición en tiempo real. El sistema se compone de una estación base que se comunica, mediante la técnica de Identificación por Radio Frecuencia (RFID), con sensores de temperatura adosados a cada una de las bielas de la máquina. Cada sensor consiste en una etiqueta RFID inteligente, que adquiere información de termocuplas insertas en los cojinetes de cabeza y pie de biela. La estación base, además de gestionar la comunicación con los sensores, contiene la interfaz que transmite los datos digitalizados hacia el sistema de procesamiento y análisis.

**Palabras Clave:** Monitoreo de temperatura; Sensores RFID; Internet Industrial de las Cosas.



## 1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento predictivo de máquinas se basa en el análisis de datos históricos y en tiempo real, de variables físicas como temperatura, presión, aceleración, corriente eléctrica, etc. Los datos son procesados por algoritmos avanzados que utilizan técnicas de aprendizaje automático y análisis estadístico para identificar patrones y anomalías en el funcionamiento de las máquinas. Estos patrones y anomalías son utilizados para predecir cuándo se requiere el mantenimiento de la máquina y anticiparse a la falla.

El avance del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) ha simplificado notablemente la implementación de sistemas de adquisición y transmisión de los datos de máquina. No obstante, en algunos casos la obtención de datos en tiempo real puede ser un gran desafío. Un ejemplo es la medición de la temperatura en los cojinetes de biela en máquinas alternativas, ya que el espacio reducido y el movimiento de las partes impiden la inserción de sensores con cables.

Una técnica utilizada para la detección de temperatura en cojinetes, consiste en el montaje de un dispositivo que posee una soldadura de aleación eutéctica con una temperatura de fusión predeterminada. Cuando la temperatura local alcanza el punto de fusión de la aleación, se libera un resorte que acciona un mecanismo que produce algún tipo de indicación o detiene la máquina [1,2]. Sin embargo, es claro que la naturaleza de esta técnica no permite la obtención de datos para su posterior análisis.

Una alternativa que permite la adquisición de datos, son los sensores basados en radar. Estos sensores están formados por un dispositivo estacionario, que induce ondas elásticas en un dispositivo móvil, un sustrato piezoeléctrico con nodos reflectores, que está adosado a la biela. Las ondas reflejadas en el dispositivo móvil son recogidas por la antena estacionaria. La velocidad de propagación de las ondas en el sustrato depende de la temperatura, por lo que mediante el procesamiento de la señal recibida se puede determinar la temperatura del cojinete.

En [3] se presentó un prototipo de sensor inalámbrico que consiste en una estación base que se comunica mediante la técnica de Identificación por Radio Frecuencia (RFID) con un sensor de temperatura adosado a una biela de la máquina. El sensor es una etiqueta RFID inteligente, que adquiere información de termocuplas insertas en los cojinetes de cabeza y pie de la biela. Además de recibir la información de temperatura, la estación provee, mediante acoplamiento inductivo, la energía que demanda la etiqueta para su funcionamiento, sin necesidad de baterías.

Este prototipo se puso en funcionamiento y se comprobó su correcto desempeño en condiciones similares a las reales [3], aunque presentaba ciertas limitaciones para implementarse en una máquina real. En primer lugar, la estación base solo era capaz de comunicarse con un único sensor y en consecuencia solo podía adquirir información de una sola biela. En caso de requerir



información de todas las bielas serían necesarias múltiples estaciones base. Además, la gestión de los datos obtenidos se realizaba en una computadora personal conectada a la estación base.

En este trabajo se presenta el desarrollo de la arquitectura electrónica para transformar el prototipo presentado en [3] en un sistema para medición de temperatura en cojinetes de biela en bombas y compresores alternativos de gran tamaño. Sobre la base del prototipo se realizaron una serie de modificaciones que permitirán obtener los datos de temperatura de los cojinetes de cada una de las bielas, mejorar el rango de comunicación con la etiqueta RFID y administrar la información recuperada en un único dispositivo de campo.

En lo que sigue, el presente trabajo está ordenado de la siguiente manera: en primer lugar, se describen las características generales del sistema de medición propuesto. Seguidamente, se describen brevemente las adaptaciones de la etiqueta RFID introducidas en trabajos anteriores. A continuación, se expone el desarrollo realizado sobre la estación base y la secuencia de operación del sistema completo. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2. DESARROLLO DE SISTEMA DE MEDICIÓN

El sistema de medición de temperatura propuesto se diseñó para implementarse en una bomba recíproca de desplazamiento positivo tipo Siam-Arcon Triplex o Quintuplex, generalmente utilizadas en la industria petrolera, aunque es adaptable a otro tipo de máquinas alternativas de gran tamaño. La Figura 1.a presenta el modelo tridimensional de una bomba Triplex y la disposición de los componentes del sistema desarrollado. La estación base se fija a la estructura de la máquina y se conecta a las antenas ubicadas sobre el sector del cigüeñal. A través de estas antenas, se transfiere energía a etiquetas RFID montados en las bielas y se obtiene de ellas información de la temperatura de los cojinetes. En la Figura 1.b se observa el detalle de la ubicación de los elementos en una de las bielas.

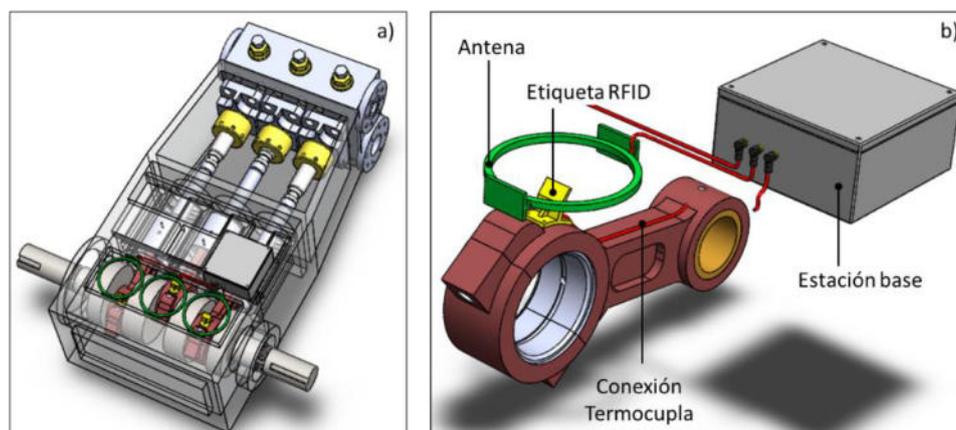


Figura 1: (a) Disposición de componentes del sistema. (b) Detalle del montaje en una biela



La Figura 2 muestra un diagrama de bloques general del sistema de monitoreo de temperatura. Los sensores están basados en etiquetas RFID conectadas a termocuplas para medir la temperatura de los cojinetes de cabeza y pie de biela. Cada etiqueta cuenta con un circuito de adquisición de temperatura de dos canales, un microcontrolador y una interfaz de comunicación y captación de energía. En la estación base, el lector gestiona el envío de energía y la comunicación con las etiquetas, mientras que el circuito multiplexor permite utilizar varias antenas de manera secuencial. El controlador integrado coordina la secuencia de operación, a la vez que recolecta la información para presentarla localmente y/o enviarla a un sistema de información. Finalmente, la fuente de alimentación se encarga de energizar cada uno de los elementos de la estación base a partir de un único suministro de energía eléctrica.

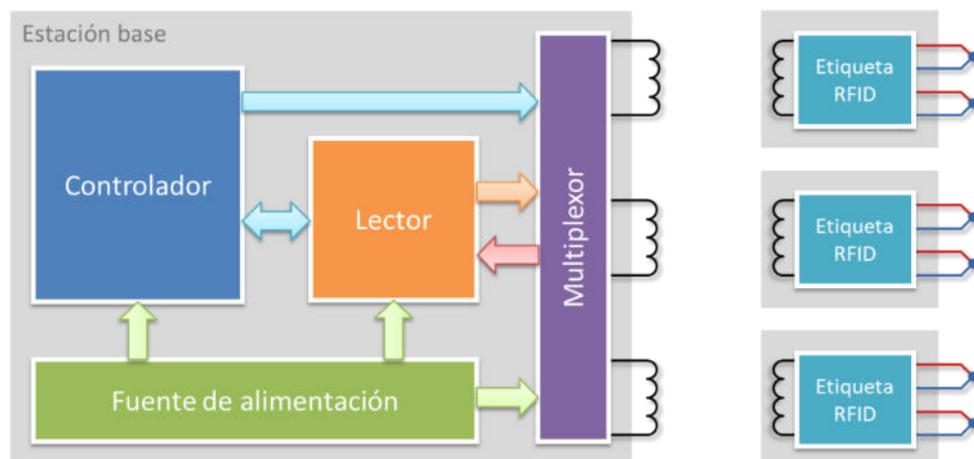


Figura 2: Diagrama de bloques del sistema de monitoreo de temperatura.

## 2.1 Diseño de la etiqueta RFID

El sistema presentado en este trabajo está basado en la herramienta de desarrollo eZ430-TMS37157 de Texas Instruments [4], sobre la que se realizaron modificaciones para adaptarla a las características de la aplicación. La primera etapa del desarrollo del proyecto se centró en la optimización de la transferencia inalámbrica de potencia y datos. Para ello, se rediseñó la antena de la estación base original [3,5] y se readaptó la etiqueta RFID [3,6]. Sobre el hardware original de la etiqueta, se incorporó el Circuito Integrado (IC) ADS1018 [7] para adquirir las señales de las termocuplas insertas en los cojinetes y la temperatura de la punta fría, para realizar la compensación, y se modificó el firmware para adecuarlo a la nueva configuración. Además, se agregó el IC regulador de tensión TPS71433 [8] para mejorar la capacidad de captación de energía desde el lector y garantizar su disponibilidad durante el proceso de adquisición de temperatura. En la Figura 3 se muestra un diagrama de bloques de la etiqueta RFID, con las modificaciones mencionadas.

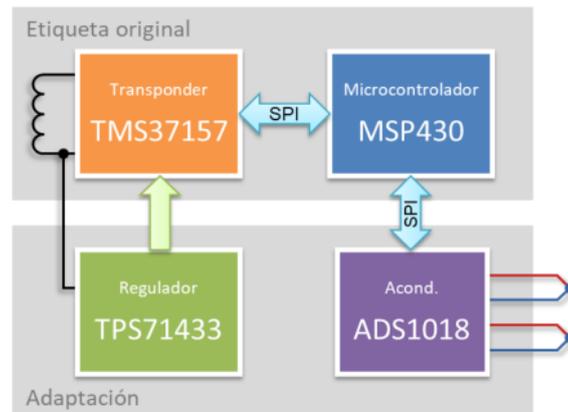


Figura 3: Diagrama de bloques de la etiqueta RFID.

## 2.2 Diseño de la estación base

Como se comentó antes, en la primera etapa del proyecto se trabajó fundamentalmente en la readaptación de la interfaz RFID, para extender el rango de comunicación entre el lector y la etiqueta y mejorar la captación de energía en la etiqueta [3,5,6]. En una segunda etapa se aplicó un enfoque de desarrollo de producto a fin de determinar los componentes necesarios para que el dispositivo sea utilizable en campo. Esto incluyó el diseño y fabricación de recintos y fijaciones para los componentes electrónicos, y el desarrollo de un software de aplicación a medida para la captura y visualización de datos [9]. Por último, la tercera etapa del proyecto, cuyos principales avances se presentan en este trabajo, se enfoca en el desarrollo de una estación base capaz de gestionar la transferencia de energía e información con múltiples etiquetas RFID.

La estación base original, de la herramienta de desarrollo utilizada, se basa en el IC TMS3705 [10], e integra un IC driver de potencia UCC27424 [11], un microcontrolador dedicado y una interfaz USB para comunicarse con un dispositivo externo, generalmente una PC. Este dispositivo está ideado para comunicarse con las etiquetas RFID a corta distancia, mediante una única antena y a través de un software específico provisto por el fabricante. Con el propósito de que mediante un único lector se pueda proveer energía inalámbrica y establecer comunicación con todas etiquetas RFID montadas en las bielas, se diseñó un circuito multiplexor que reemplaza la etapa de potencia y recepción original, que permite el manejo de múltiples antenas.

En la Figura 4 se muestra un diagrama de bloques de la estación base desarrollada. Los drivers de potencia encargados de manejar las antenas se conectan a la salida de la señal modulada del IC TMS3705. Para esta implementación, se seleccionó el IC UCC27524 [12] que brinda mejores prestaciones que el UCC27424 original, ya que admite mayor tensión de alimentación y posee menor resistencia serie equivalente, lo que se traduce en mayor capacidad de entrega de corriente a la antena y, por lo tanto, mayor distancia de comunicación con la etiqueta RFID.

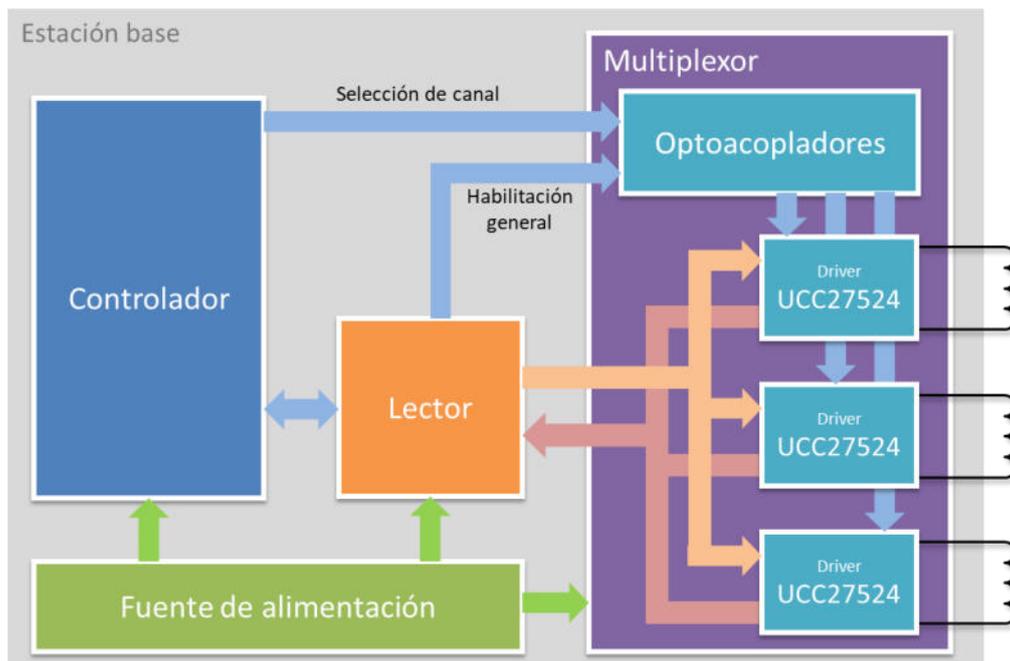


Figura 4: Diagrama de bloques de la estación base desarrollada

El controlador integrado en la estación base selecciona el canal a utilizar durante la transferencia de energía y datos hacia la etiqueta. Además, se comunica con el lector para enviar los comandos y recibir las respuestas correspondientes. Estos comandos enviados a la etiqueta RFID permiten iniciar la transferencia de energía, verificar la cantidad de energía acumulada, leer, escribir y controlar la memoria de la etiqueta, y comunicarse con el microcontrolador integrado. Un conjunto de optoacopladores aísla el controlador de las etapas de potencia, a la vez que comanda las entradas de habilitación de los drivers, al combinar las señales de selección de antena (provenientes del controlador) con la señal de habilitación general (controlada por el lector). Cuando se recibe información desde las etiquetas, se envía la señal captada por las antenas a la etapa de detección y demodulación del lector para que sea procesada.

### 2.3 Secuencia de operación del sistema

Para medir la temperatura de los cojinetes de biela de la máquina, se sigue la secuencia descrita en la Figura 5. En primer lugar, el controlador elige el canal apropiado según la biela en la que se desea medir la temperatura y envía un comando al lector para iniciar la transferencia de energía hacia la etiqueta. La etiqueta se encuentra en un modo de bajo consumo, a la espera de ser activada. Una vez que la etiqueta acumuló suficiente energía, el lector le envía un comando de comunicación con el microcontrolador (comando de interrogación) que activa la secuencia de adquisición de temperatura de cada uno de los cojinetes de la biela correspondiente al canal

seleccionado. Cuando la etiqueta completa la rutina de adquisición de temperatura, devuelve estos datos a la estación base. Finalizado este proceso, el controlador selecciona un nuevo canal y se repite la secuencia hasta obtener los valores de temperatura solicitados, para luego almacenarlos, presentarlos y/o transmitirlos.

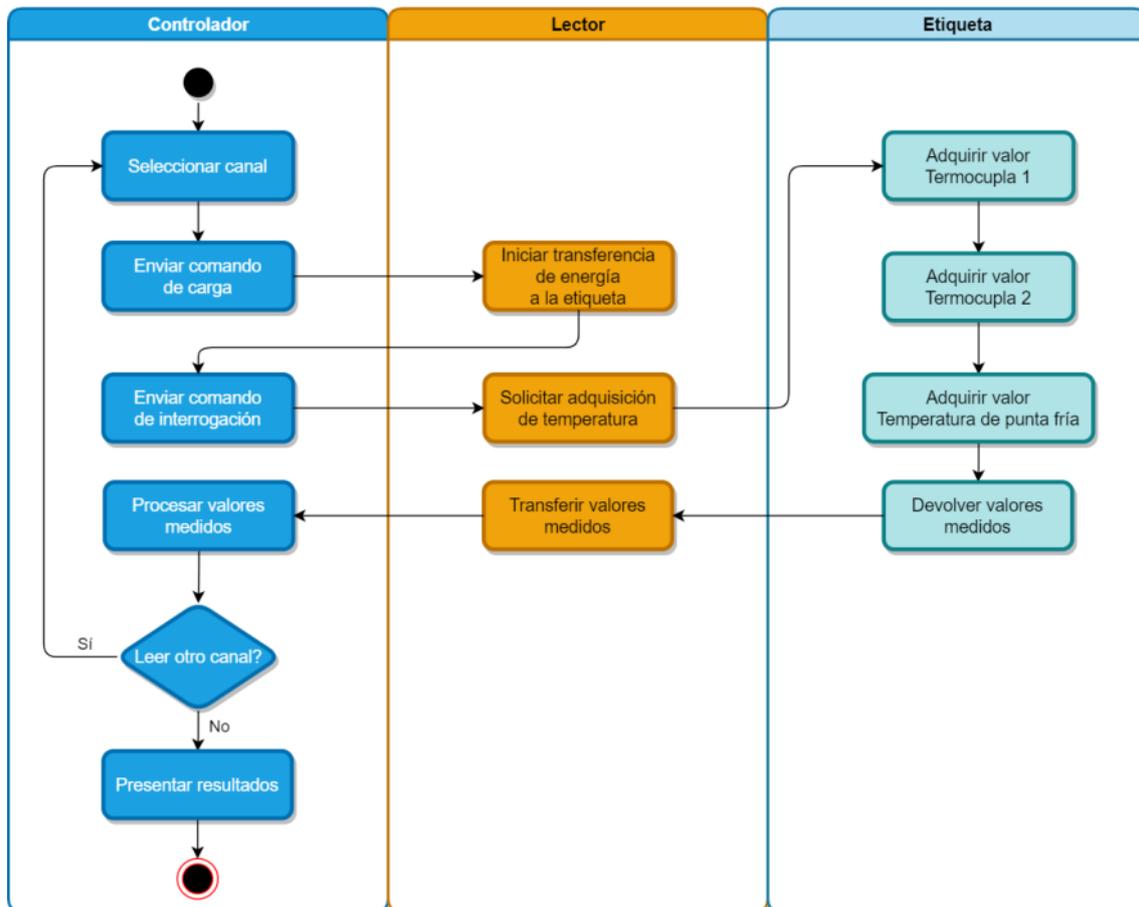


Figura 5: Secuencia de operación del sistema

### 3. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el desarrollo de un sistema para la medición de temperatura de cojinetes de biela en máquinas reciprocantes de gran tamaño. Se describieron las principales características de cada elemento del diseño propuesto y las modificaciones realizadas sobre el hardware original. Aunque la etapa de pruebas y validación aún no se ha completado, es posible afirmar que la incorporación de un circuito multiplexor, en reemplazo de la etapa de potencia de la estación base original, posibilitará el uso de múltiples antenas para comunicarse con varias etiquetas de manera secuencial. Las modificaciones realizadas permitirán, además, aumentar la corriente en las antenas, lo que incrementa el rango de comunicación con las etiquetas y la



potencia transferida hacia las mismas. Finalmente, al incluir un controlador en la estación base, el sistema adquiere la capacidad de funcionar como un dispositivo de campo que ofrece conectividad y presentación de información tanto a nivel local como remoto, adaptándose a las particularidades del entorno de la máquina que se está monitoreando.

## REFERENCIAS

- [1] Brian Howard. *Wireless Connecting Rod Temperature Measurements for Reciprocating Compressor Monitoring*. GE-Energy, General Electric, GER4606 (06/10). 2010.
- [2] Munroe, William O. *Temperature Detecting Actuator For Bearings*. Amot Controls Corporation, assignee. Patent 3.401.666. 1968
- [3] D. Vicente, M. Baudino, F. Mazzaferro y W. Fruccio, *Sensor RFID para monitoreo de temperatura en cojinetes de biela*. VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (VI CAIM2018), ISBN: 978-987-46987-0-4. San Miguel de Tucumán, Argentina, 10 al 12 de Octubre de 2018
- [4] *eZ430-TMS37157 Development Tool. User's Guide*. Texas Instruments. 2010
- [5] D. Vicente, M. Baudino, J. Amigone and E. Berges, *Empirical RFID coil design considering environmental influences*. Argentine Conference on Automatic Control (AADECA), ISBN: 978-1-5386-7003-3. Buenos Aires, Argentina, 7 al 9 de Noviembre de 2018.
- [6] P. Garrone, M. Baudino, D. Vicente. *Sensor embebido basado en etiqueta RFID pasiva*. Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (CASE2019), ISBN: 978-987-46297-6-0. Rosario, Argentina, 17 al 19 de Agosto de 2019.
- [7] Texas Instruments, *ADS1018 Ultrasmall, Low-Power, SPI-Compatible, 12-Bit, Analog-to-Digital Converter With Internal Reference and Temperature Sensor*, SBAS526C, Nov. 2012 [Revised Nov. 2015]
- [8] Texas Instruments, *80mA, 10V, 3.2µA Quiescent Current LOW-DROPOUT LINEAR REGULATOR in SC70 or SON 2x2*, SBVS116C, Dec. 2008 [Revised Mar. 2011]
- [9] D. Vicente, M. Baudino, P. Garrone. *Actual Point: Sistema inalámbrico para monitoreo de condición en máquinas alternativas*. Concurso Nacional de Innovaciones, Innovar 2019, Perfil Investigadores, Catálogo Innovar 2019, Proyecto 2019-1431, C.A.B.A.
- [10] Texas Instruments, *TMS3705 Transponder Base Station IC*, SCBS881E, Jan. 2010 [Revised Oct. 2018]
- [11] Texas Instruments, *UCC2742x Dual 4-A High Speed Low-Side MOSFET Drivers With Enable*, SLUS545E, Nov. 2002 [Revised Dic. 2015]
- [12] Texas Instruments, *UCC2752x Dual 5-A High-Speed, Low-Side Gate Driver*, SLUSAQ3G, Nov. 2011 [Revised Apr. 2015]



## INGENIERÍA, CULTURA DIGITAL y COBOTS

**Damian Rafael Ortega**<sup>1</sup>, **Jorge Camblong**<sup>2</sup>, **Miguel Benegas**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Industria – Universidad Nacional de General Sarmiento  
Juan María Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina-  
dortega@campus.ungs.edu.ar

<sup>2</sup> Instituto de Industria – Universidad Nacional de General Sarmiento  
Juan María Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina-  
jcamblong@campus.ungs.edu.ar

<sup>3</sup> Instituto de Industria – Universidad Nacional de General Sarmiento  
Juan María Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina-  
mbenegas@campus.ungs.edu.ar

### RESUMEN

El desarrollo tecnológico tuvo un impacto importante en los sistemas de manufactura a lo largo del tiempo, especialmente en estos últimos años, con la llamada “Industria 4.0”, debido a su potencial y beneficios relacionados con la integración, la innovación y la autonomía de los procesos.

Este escenario, exige nuevas formas de producción, con estrategias de operaciones, basadas en la gestión del conocimiento y la innovación continua, creando valor a través de la información y el uso intensivo de los avances tecnológicos como por ejemplo la incorporación de cobots (robots colaborativos) en distintas áreas productivas.

Este proceso de cambio tecnológico enfrenta entonces a las empresas a numerosos retos y transformaciones, en la que las tecnologías de fabricación y de la información se han integrado para crear innovadores sistemas de manufactura, gestión y formas de hacer negocios.

El cambio tecnológico actual requiere además de nuevas habilidades y capacidades humanas para la gestión de la tecnología y la información.

Las empresas productivas deben convertirse en empresas ágiles para poder reaccionar en tiempo real a los eventos que ocurren y poder tomar decisiones basadas en datos y de forma rápida. Esta velocidad y flexibilidad le permite producir y entregar productos de alta calidad y poder adaptarse rápidamente a los requerimientos de los clientes.

Pero además de lo tecnológico, es necesario considerar la cultura digital de las organizaciones. Aparecen entonces conceptos como liderazgo digital, trabajo en red y autogestión de entornos digitales. Sin dudas, “ampliar y desarrollar las competencias digitales dentro de las PYMES conlleva a mejorar su competitividad frente a las grandes corporaciones, logrando satisfacer demandas actuales de los clientes.”

El presente trabajo propone indagar qué necesitan los/as profesionales de la ingeniería para estar preparados y poder afrontar este cambio cultural, específicamente en la aplicación de cobots en las empresas.

**Palabras clave:** *Industria 4.0; Cultura Digital; PyMES; Cobots*



## 1- INTRODUCCIÓN

La transformación digital de las empresas ha sido un tema recurrente durante los últimos años donde se ha discutido y valorado ampliamente su necesidad y nivel de prioridad [1],[2]. No obstante, debido a la pandemia de COVID-19, surgió la necesidad de cambiar nuestros hábitos de trabajo. Durante este período, fue cuando más se ha notado la necesidad de cambiar y adaptarse; lo que llevó a directivos de todos los sectores a tomar decisiones prioritarias con relación a la digitalización.

Gran cantidad de empresas tuvieron que transformarse con rapidez y adecuar sus procesos internos, sus modelos organizacionales, su relación con los clientes e incluso el modelo de negocio. Aunque la transformación digital no es un fenómeno nuevo, los datos sobre integración de tecnologías digitales ya indicaban que las empresas se estaban digitalizando cada vez más y que las grandes empresas llevaban ventaja a las pequeñas y medianas empresas (PYMES). [3]

La disrupción digital trae consigo las amenazas y oportunidades más importantes a las que se han enfrentado las empresas en las últimas décadas, y esto es sólo el comienzo, puesto que la “cuarta revolución industrial” o “industria 4.0<sup>1</sup> (I4.0)”, está caracterizada no solamente por la incorporación de las tecnologías digitales, sino también por todo tipo de innovaciones. Para maximizar las oportunidades y minimizar las amenazas será necesaria una auténtica revolución en las habilidades personales y organizacionales, así como una transformación de las organizaciones. [5]

En los últimos años, la integración y explotación de las nuevas tecnologías digitales se ha convertido en uno de los mayores retos a los que se enfrentan las empresas: del éxito de su asimilación dependerá el desempeño futuro de las mismas ya que tienen la capacidad para transformar los productos, servicios, operaciones, e incluso los modelos de negocio de las empresas, así como su entorno competitivo. [6]

La digitalización ha revolucionado los procesos de fabricación de diversas maneras. La capacidad de extraer, transferir y analizar datos en tiempo real ha llevado a procesos de producción más inteligentes y eficientes, lo que da como resultado organizaciones más rentables y sostenibles. [3]

---

<sup>1</sup> Industria 4.0: término acuñado en la Feria de Hannover de 2011 para describir cómo esta revolucionará la organización de las cadenas de valor globales, [4]



La fusión entre la producción física con los sistemas digitales son las bases para el surgimiento de la I4.0, donde las empresas logran automatizar procesos de forma más eficiente utilizando todo el poder que ofrecen las tecnologías como la robótica, la conectividad, la inteligencia artificial, internet de las cosas y el análisis del big data [6].

Para procesos altamente automatizados la I4.0 proporciona niveles difícilmente superables de consistencia y repetitividad en la fabricación de productos iguales o similares; pero, ante consumidores y clientes cada vez más sofisticados, si se desea realizar alguna variación funcional o personalización de algún producto, la I4.0 tiene algunas limitaciones. [7]

Para satisfacer esas demandas de procesos productivos más flexibles requiere la intervención de las personas. Es aquí donde la colaboración entre humanos y máquinas conduce a procesos productivos inteligentes y eficientes cubriendo demandas cada vez más sofisticadas y dedicadas [8].

En el panorama industrial actual, la aplicación de robots colaborativos, también conocidos como cobots, ha generado un cambio significativo en los procesos de producción. Estos cobots, diseñados para trabajar de manera segura y eficiente junto a los seres humanos, ofrecen nuevas oportunidades de automatización y mejoras en la eficiencia de las empresas. Sin embargo, para aprovechar al máximo los beneficios de los cobots, es esencial que los/as profesionales de la ingeniería estén preparados para afrontar el cambio cultural que este avance tecnológico implica. [9]

El presente trabajo tiene como objetivo indagar en las necesidades de los/as profesionales de la ingeniería para estar preparados y afrontar exitosamente este cambio cultural, enfocándose específicamente en la aplicación de cobots en las empresas. La implementación de cobots no solo implica la adquisición de tecnología avanzada, sino también la adaptación de la cultura laboral, los roles y las responsabilidades de los trabajadores.

En primer lugar, es fundamental comprender que la colaboración entre humanos y cobots no se trata simplemente de sustituir a los trabajadores por máquinas, sino de crear un entorno de trabajo colaborativo. Esto exige un cambio en la mentalidad y la cultura laboral, y los profesionales de la ingeniería desempeñan un papel crucial en esta transición. Por lo tanto, se requiere una formación adecuada que les permita comprender los principios y conceptos clave detrás de la colaboración hombre-máquina, así como desarrollar habilidades para diseñar, implementar y supervisar entornos de trabajo colaborativos de manera efectiva.

En segundo lugar, el cambio cultural necesario para una implementación exitosa de los cobots implica una comunicación y colaboración efectivas entre los diversos actores dentro de una empresa. Los profesionales de la ingeniería deben ser capaces de trabajar en estrecha colaboración con los trabajadores, gerentes y otros equipos involucrados para identificar las



necesidades y preocupaciones de cada grupo, y encontrar soluciones que sean aceptadas por todos. Además, deben ser capaces de educar y capacitar a los trabajadores en el uso seguro y eficiente de los cobots, así como en la adaptación a los nuevos roles y responsabilidades.

Otro aspecto clave a considerar es la gestión del cambio. La introducción de los cobots puede generar resistencia y temores entre los trabajadores, como el miedo a perder sus empleos o ser reemplazados por máquinas. En este sentido, los profesionales de la ingeniería tienen un papel fundamental en la gestión de este cambio, proporcionando información clara y transparente, brindando apoyo emocional y promoviendo una cultura de confianza y colaboración. Esto implica el desarrollo de estrategias de comunicación efectivas y el diseño de programas de capacitación y desarrollo profesional que aborden las necesidades individuales de los trabajadores.

La implementación exitosa de cobots en las empresas requiere más que tecnología avanzada. Implica un cambio cultural que involucra a los profesionales de la ingeniería en la preparación y adaptación de los trabajadores, así como en la gestión del cambio y la promoción de una cultura de colaboración hombre-máquina. Para lograrlo, es fundamental considerar los siguientes aspectos:

- Preparación y adaptación de los trabajadores: Los profesionales de la ingeniería deben identificar las habilidades técnicas y no técnicas necesarias para trabajar con cobots, así como evaluar las actitudes y percepciones de los trabajadores hacia estas tecnologías.
- Gestión del cambio: El cambio cultural asociado con la implementación de cobots implica desafíos en términos de comunicación, participación y liderazgo.
- Promoción de una cultura de colaboración: Es esencial fomentar una cultura de colaboración entre los trabajadores y los cobots para establecer protocolos claros de colaboración, brindar capacitación continua y crear espacios de trabajo que faciliten la interacción efectiva entre humanos y máquinas.

## 2- PREGUNTAS A RESPONDER

La implementación exitosa de cobots en las empresas requiere un enfoque integral que vaya más allá de la tecnología en sí. Los profesionales de la ingeniería desempeñan un papel clave en la preparación y adaptación de los trabajadores, la gestión del cambio y la promoción de una cultura de colaboración hombre-máquina. Al abordar estos aspectos, las empresas pueden maximizar los beneficios de los cobots y lograr una integración exitosa de estas tecnologías en sus operaciones.



Es necesario entonces dar respuestas a una serie de preguntas que evidencian la existencia de la problemática mencionada y ponen de manifiesto varias causas que abren puertas sobre las cuales se pueden trabajar. Estas son algunas preguntas que guiarán el rumbo de este trabajo de investigación:

- ¿La inversión económica en la capacitación de competencias digitales de los ingenieros de una PYME se verá reflejada en la competitividad de las mismas?
- ¿Las demandas digitales actuales de los clientes están siendo satisfechas por las PYMES?
- ¿Cómo se enfoca este tema en el sistema educativo para los ingenieros del futuro? ¿El sistema educativo generará valor para la aplicación y desarrollo de tecnología?
- ¿Cómo se desarrollan las PYMES que generan tecnología 4.0?
- ¿De qué forma se tiene en cuenta la incorporación de cobots en los procesos productivos? ¿Serán las empresas capaces de desarrollar este tipo de tecnología? ¿El sistema educativo está aportando valor con relación a este tema?

### 3- NECESIDAD DE RELEVAMIENTO DE DATOS

Es necesario obtener una imagen completa de las habilidades técnicas y no técnicas necesarias, las actitudes y percepciones de los trabajadores, y las necesidades de capacitación y soporte durante la implementación de cobots en las empresas. Esta información servirá como base sólida para diseñar programas de capacitación, implementar cambios organizativos y proporcionar el apoyo necesario para una transición exitosa hacia la colaboración hombre-máquina. [10]

Realizar este relevamiento es fundamental por varias razones:

- Adaptación al cambio cultural: La implementación de cobots implica un cambio cultural significativo, ya que los trabajadores deben adaptarse a nuevas formas de colaboración con máquinas. Es necesario comprender las habilidades y competencias que los/as profesionales de ingeniería deben adquirir para trabajar efectivamente con los cobots y superar las resistencias y temores asociados al cambio. [5]
- Eficiencia y productividad: Los cobots se introducen con el objetivo de aumentar la eficiencia y productividad. Para lograrlo, es crucial identificar las habilidades técnicas y no técnicas requeridas para utilizar y aprovechar al máximo estas tecnologías. Esto permitirá garantizar que los/as profesionales de ingeniería estén preparados y capacitados para utilizar los



cobots de manera eficiente, minimizando tiempos de inactividad y maximizando los beneficios esperados. [9]

- Mejora de la seguridad: Los cobots están diseñados para trabajar en colaboración con los humanos, lo que implica nuevas dinámicas de seguridad en el entorno laboral. Conocer las actitudes y percepciones de los trabajadores hacia los cobots permitirá identificar posibles preocupaciones o riesgos percibidos, lo que a su vez facilitará el diseño de programas de capacitación y medidas de seguridad adecuadas. Esto contribuirá a garantizar un entorno de trabajo seguro y reducir el potencial de accidentes o lesiones. [6]
- Desarrollo profesional y empleabilidad: el cambio cultural asociado trae consigo nuevas oportunidades y desafíos para los/as profesionales de ingeniería. Identificar las habilidades requeridas permitirá a los profesionales desarrollar sus competencias de manera acorde, mejorar su empleabilidad y adaptarse a las nuevas demandas del mercado laboral. [9]
- Toma de decisiones informada: Al comprender las necesidades de capacitación y apoyo durante la implementación de cobots, se pueden tomar decisiones más informadas sobre el diseño de programas de formación y estrategias de cambio organizativo. Esto maximizará las posibilidades de éxito en la implementación y asegurará que los/as profesionales de ingeniería estén equipados para enfrentar los desafíos asociados con los cobots. [10]

En definitiva, realizar un relevamiento adecuado de las necesidades de los/as profesionales de ingeniería en relación con los cobots es esencial para garantizar una transición exitosa hacia la colaboración hombre-máquina. Proporciona información valiosa para adaptar las habilidades y competencias de los/as profesionales, mejorar la seguridad en el lugar de trabajo, aumentar la eficiencia y productividad, y asegurar un desarrollo profesional acorde con las nuevas demandas del mercado.

#### 4- METODOLOGÍA DEL RELEVAMIENTO A REALIZAR

Para determinar las habilidades técnicas y no técnicas necesarias, identificar las actitudes y percepciones de los trabajadores hacia los cobots, y evaluar las necesidades de capacitación y soporte durante el proceso de implementación, se pueden utilizar las siguientes estrategias [11]:

- Cuestionarios y encuestas: Diseñar cuestionarios estructurados que aborden tanto las habilidades técnicas específicas requeridas para interactuar con los cobots como las habilidades no técnicas. Además, incluir preguntas relacionadas con las actitudes y percepciones de los trabajadores hacia los cobots y sus necesidades de capacitación y apoyo percibidas durante el proceso de implementación.



- Entrevistas individuales y en grupos focales: Realizar entrevistas en profundidad tanto con profesionales de ingeniería como con trabajadores de diferentes niveles jerárquicos. Estas entrevistas permitirán obtener perspectivas más detalladas sobre las habilidades requeridas, las actitudes y percepciones hacia los cobots, y las necesidades de capacitación y soporte. Los grupos focales también pueden ser útiles para fomentar la discusión y el intercambio de ideas entre los participantes.
- Observación directa y análisis de tareas: Observar directamente a los profesionales de ingeniería y a los trabajadores mientras interactúan con los cobots en el entorno de trabajo. Esto permitirá identificar las habilidades técnicas y no técnicas utilizadas, así como los desafíos que enfrentan en su desempeño. También se pueden analizar las tareas específicas realizadas y determinar las necesidades de capacitación y soporte que surjan durante estas interacciones.
- Análisis de documentos y datos existentes: Revisar documentos internos de la empresa, manuales de capacitación, informes de desempeño y cualquier otra información relevante que pueda proporcionar indicios sobre las habilidades requeridas, las actitudes de los trabajadores y las necesidades de capacitación y soporte. También se pueden analizar los datos de accidentes o incidentes relacionados con los cobots para identificar áreas problemáticas y necesidades específicas de capacitación.

Esta metodología de relevamiento de datos en empresas permitirá obtener información precisa y valiosa sobre las necesidades de los/as profesionales de ingeniería en relación con los cobots, y servirá como base para la formulación de estrategias y políticas adecuadas para su implementación exitosa.

## 5- ÁMBITO DEL RELEVAMIENTO A REALIZAR

El ámbito del relevamiento abarca las empresas industriales ubicadas en el Municipio de Malvinas Argentinas, ubicado en el noroeste del conurbano bonaerense, específicamente en el Parque Industrial Tortuguitas y el Área de Promoción El Triángulo<sup>2</sup>, aunque algunas también se encuentran en áreas residenciales.

---

<sup>2</sup> El área de Promoción industrial de Malvinas Argentinas, Buenos Aires, denominada Parque el Triángulo o San Eduardo, con 5,56 km<sup>2</sup> de superficie, está delimitado por las Rutas Panamericana Ramal Campana (RN9), Panamericana Ramal Pilar (RN8) y la Avenida Otto Krause, Venezuela y Olivos.

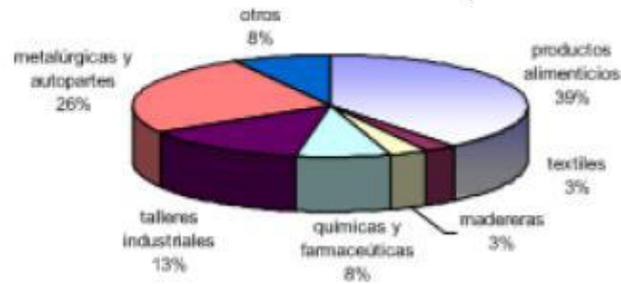


Figura 1 - Distribución de las industrias del partido de Malvinas Argentinas al año 2008

Fuente: Alsina y Borello, 2004 [12]

Según el relevamiento realizado por Alsina y Borello en 2004 [12], la industria metalmeccánica autopartista ocupa la segunda posición en desarrollo, representando el 26% del total de industrias en el partido, después de la industria alimenticia que abarca el 39% de las industrias. Más de una década después, un estudio llevado a cabo en 2018 por Camblong reveló que el panorama industrial se mantenía prácticamente inalterado, con mínimas variaciones sin relevancia estadística [13]. El enfoque del estudio se centra en el Área de Promoción El Triángulo, que se distingue por ser una zona mixta de características urbanas y residenciales, a diferencia de un parque industrial cerrado. Para localizar las industrias en esta área y obtener otros datos relevantes de la zona de influencia, se utilizó una herramienta proporcionada por el Instituto del Conurbano de la UNGS llamada "Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) del Conurbano".

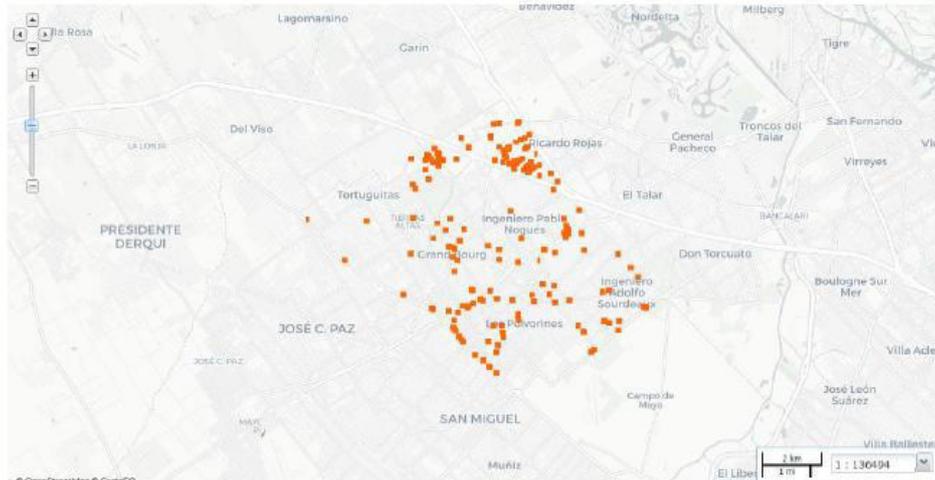


Figura 2 - Distribución geográfica de las industrias localizadas en el Municipio de Malvinas Argentinas (2019)

Fuente: Camblong (2019) [13]

En la Figura 3 del estudio, se puede observar en la zona central superior del mapa la separación de la autopista Ing. Palazzo en las Rutas 8 y 9, formando el "Triángulo de Malvinas Argentinas". Esta área geográfica fue seleccionada para la investigación debido a la alta densidad de industrias y su accesibilidad para el estudio.

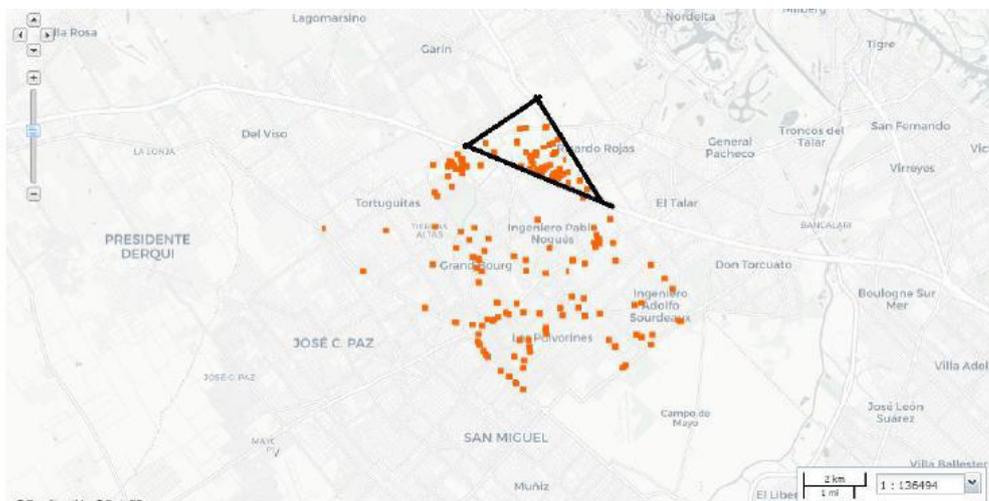


Figura 2 - Distribución geográfica de las industrias localizadas en el Municipio de Malvinas Argentinas (2019)

Fuente: Camblong (2019) [13]



Las principales industrias presentes en el partido de Malvinas Argentinas pertenecen a los rubros de construcción, metalúrgica, alimenticia, plásticos y madereros. Estas industrias no solo emplean a una gran cantidad de trabajadores, sino que también generan altos ingresos fiscales. Dentro del Parque Industrial mencionado, se encuentran 49 empresas industriales, de las cuales 6 son metalmecánicas, representando aproximadamente el 12,24% del total de industrias en el área.

Para llevar a cabo este relevamiento, se estableció una colaboración entre el departamento de investigación de la Universidad Nacional General Sarmiento y el Municipio, lo que permitió el acceso a las industrias y facilitó la realización del estudio.

## 6- CONCLUSIONES

Este trabajo ha abordado la necesidad de investigar los requisitos necesarios para que los profesionales de la ingeniería estén preparados y puedan enfrentar el cambio cultural asociado a la implementación de cobots en las empresas. Para ello se propone enfocar el estudio en el Parque Industrial Tortuguitas y el Área de Promoción El Triángulo del Municipio de Malvinas Argentinas, ubicado en el noroeste del conurbano bonaerense.

A través del análisis realizado, se ha destacado la importancia de comprender las habilidades técnicas y no técnicas requeridas, así como las actitudes y percepciones de los trabajadores hacia los cobots.

Se ha argumentado que la preparación de los/as profesionales de ingeniería es fundamental para garantizar una implementación exitosa de los cobots. Esto implica identificar las habilidades técnicas necesarias para utilizar eficientemente los cobots, así como las habilidades no técnicas relacionadas con la adaptabilidad, la colaboración y la gestión del cambio. Además, se ha enfatizado la importancia de evaluar las necesidades de capacitación y soporte durante el proceso de implementación.

Se ha destacado que este cambio cultural no solo implica aspectos técnicos, sino también desafíos éticos y legales. Los profesionales de la ingeniería deben considerar la seguridad de los trabajadores, la privacidad de los datos y la responsabilidad legal en relación con los cobots.

En última instancia, este trabajo subraya la necesidad de un enfoque multidisciplinario que combine habilidades técnicas y no técnicas para preparar a los/as profesionales de ingeniería en la aplicación de cobots. Esto implica la colaboración entre diferentes disciplinas, como la ingeniería, la psicología y el derecho, para abordar de manera integral los aspectos técnicos, culturales, éticos y legales de la implementación de cobots.



En resumen, este trabajo realiza una propuesta metodológica para indagar y así poder comprender y abordar las necesidades de los/as profesionales de la ingeniería en relación con la implementación de cobots en sus operaciones. Se enfatiza la importancia de la preparación adecuada, la evaluación de habilidades y actitudes, y el reconocimiento de los aspectos éticos y legales. Los resultados de esta indagación propuesta ofrecerán una orientación valiosa para la comunidad de ingeniería y las empresas que buscan adoptar con éxito la aplicación de cobots en sus operaciones.

## 7- REFERENCIAS

- [1] Albrieu, R; Basco, A; Brest López, C; de Azevedo, B; Peirano, F; Rapetti, M; Vienni, G. (2019). Travesía 4.0: hacia la transformación industrial argentina. (Nota técnica del BID; 1672). Banco Interamericano de Desarrollo. Instituto para la Integración de América Latina y el Caribe. IX. Serie. IDB-TN-1672. Buenos Aires, Argentina.
- [2] Basco, A; Beliz, G; Coatz, D; Garnero, P. (2019). Industria 4.0: fabricando el futuro. UIA-BID-INTAL. (Monografía del BID; 647). Banco Interamericano de Desarrollo. Instituto para la Integración de América Latina y el Caribe. VI. Serie. IDB-MG-647. Buenos Aires, Argentina.
- [3] J. A. García-Esteban, L. Piardi, P. Leitão, B. Curto and V. Moreno. (2021). "An Interaction Strategy for Safe Human Co-Working with Industrial Collaborative Robots," 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), Victoria, BC, Canada, 2021, pp. 585-590, doi: 10.1109/ICPS49255.2021.9468160.
- [4] Camblong, J. (2022) Sistemas administrativos. Introducción a la gestión en las organizaciones en los albores de la Industria 4.0. Editores Independientes. Buenos Aires, Argentina.
- [5] Davenport, T. H., & Ronanki, R. (2018). Artificial Intelligence for the Real World. Harvard Business Review (HBR).  
<https://www.bizjournals.com/boston/news/2018/01/09/hbr-artificial-intelligence-for-the-real-world.html>
- [6] S. Russell, P. Norvig. (1995). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice Hall.
- [7] Doyle-Kent, M., Kopacek, P. (2020). Industry 5.0: Is the Manufacturing Industry on the Cusp of a New Revolution? In: Durakbasa, N., Gençyılmaz, M. (eds) Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019. ISPR ISPR 2019 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_38)



- [8] Michaelis, J. E., Siebert-Evenstone, A., Shaffer, D. W., & Mutlu, B. (2020, April). Collaborative or simply uncaged? understanding human-cobot interactions in automation. In Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1-12).
- [9] Simões, A. C., Soares, A. L., & Barros, A. C. (2020). Factors influencing the intention of managers to adopt collaborative robots (cobots) in manufacturing organizations. *Journal of engineering and technology management*, 57, 101574.
- [10] Lambrechts, W., Klaver, J. S., Koudijzer, L., & Semeijn, J. (2021). Human factors influencing the implementation of Cobots in high volume distribution centres. *Logistics*, 5(2), 32.
- [11] Fraboni, F., Brendel, H., & Pietrantoni, L. (2023). Evaluating Organizational Guidelines for Enhancing Psychological Well-Being, Safety, and Performance in Technology Integration. *Sustainability*, 15(10), 8113.
- [12] Alsina, Griselda y Borello José 2004, Diagnóstico ambiental del partido de Malvinas Argentinas, Ediciones UNGS, Los Polvorines – Buenos Aires
- [13] Camblong, J. (2019). Modelo de reducción de contaminación aplicado a la industria metalmeccánica [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Lomas de Zamora].



## NUEVOS RETOS QUE DEBEN AFRONTAR LOS INGENIEROS ELECTROMECAÑICOS CON ORIENTACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SARMIENTO EN EL CONTEXTO DE LA CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Gonzalo Delcauce<sup>1</sup>, Miguel Benegas<sup>2</sup>, Jorge Camblong<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) - Gutiérrez 1150 Los Polvorines, Pcia de Bs.As., Argentina - [jdelcauce@campus.ungs.edu.ar](mailto:jdelcauce@campus.ungs.edu.ar)

<sup>2</sup> Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) - Gutiérrez 1150 Los Polvorines, Pcia de Bs.As., Argentina - [mbenegas@campus.ungs.edu.ar](mailto:mbenegas@campus.ungs.edu.ar)

<sup>3</sup> Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) - Gutiérrez 1150 Los Polvorines, Pcia de Bs.As., Argentina - [jcamblong@campus.ungs.edu.ar](mailto:jcamblong@campus.ungs.edu.ar)

Transitamos una transformación sin precedentes que está redefiniendo los lineamientos del mundo productivo. La evolución en las tecnologías de la información y la comunicación precipitó la digitalización actual dando lugar al desarrollo de otras nuevas tecnologías que están revolucionando los sistemas productivos y, por supuesto, la forma en que las personas se desempeñan laboralmente.

Teniendo en cuenta que la frontera tecnológica actual está marcada por las tecnologías 4.0 vale preguntar cuál es el estado de la industria argentina respecto del nuevo paradigma tecnológico industrial y sus consecuencias para la formación de ingenieros.

Un desafío para la industria argentina es comprender que, con tecnologías maduras o desactualizadas, el estancamiento es inevitable, pues su bajo potencial de rentabilidad deriva en la falta de oportunidades (Pérez, 2001). Por esto, cuanto antes las empresas argentinas dominen e incorporen tecnologías 4.0 mayores serán sus beneficios. Pero la transición no es sencilla, ya que las revoluciones tecnológicas imponen nuevos sistemas de gestión que hacen obsoletos a los anteriores. La adopción del nuevo paradigma implica resignar gran parte del bagaje de conocimiento ya adquirido y, también, tener la voluntad de innovar orientada al nuevo horizonte.

Esta cuarta revolución obliga a repensar las habilidades y competencias necesarias de los futuros ingenieros para llevar adelante las nuevas tecnologías. El avance tecnológico y la automatización modifican las ocupaciones eliminando tareas manuales o de bajo contenido cognitivo, pero no elimina la ocupación; por el contrario, demanda nuevas competencias laborales (Levy Yeyati, 2018).

Surge entonces una primera cuestión, en qué medida la enseñanza de la ingeniería electromecánica de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) está acompañando estos nuevos requerimientos.

El presente trabajo propone mostrar las primeras evidencias, sobre las experiencias de uno de los actores involucrados: el personal jerárquico de empresas que se encuentren en proceso de implementación de las nuevas tecnologías.

**Palabras claves:** Industria 4.0; Ingeniería Electromecánica; PyMES



## 1. INTRODUCCIÓN

Desde la Primera Revolución industrial hasta la actualidad se ha incrementado la incorporación de tecnología en los procesos de manufactura. Los avances tecnológicos son los que han desencadenado el crecimiento de los países que hoy se consideran desarrollados. La tecnología fue y continúa siendo clave para la evolución de la productividad de los sectores industriales y económicos. La historia trae aparejados numerosos ejemplos de innovaciones tecnológicas que han generado situaciones controversiales en los sectores económicos, políticos y sociales.

Ante las innovaciones más radicales y disruptivas el contexto supo encontrar un camino para adaptarse de manera ordenada reconociendo los conflictos y subsanándolos, obteniendo como resultado crecimiento económico y empleo (Montagu, H., Canosa, T., Massi, M. 2020).

Hoy transitamos una transformación que está redefiniendo los lineamientos del mundo productivo vinculada al uso de novedosas tecnologías que sorprenden por su velocidad de propagación y sobre todo por la incertidumbre en las repercusiones que tendrán en su entorno. Se vuelve mucho más complejo predecir las posibles influencias sobre el contexto ya que las revoluciones industriales anteriores son incomparables con este fenómeno, según Montagu, H., Canosa, T., Massi, M. (2020: 10)

“La mayoría de los analistas coinciden en que “esta vez es diferente” y que la sociedad enfrenta una etapa superior del avance tecnológico, en la cual los senderos se multiplican y la capacidad de previsión se vuelve mucho más modesta”.

La increíble y acelerada extensión en el uso de estas novedosas tecnologías aplicadas a la industria se debe a que no solo se trata de la incorporación de la robótica sino de una gama de tecnologías y avances que abarcan e impactan sobre amplios espectros de las etapas productivas.

La evolución en las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) precipitó la digitalización actual dando lugar al desarrollo de otras nuevas tecnologías como la inteligencia artificial (IA), la robótica, el internet de las cosas (IoT), los vehículos autónomos, la impresión 3D, la nanotecnología, la biotecnología, la ciencia de materiales, el almacenamiento de energía y la computación cuántica están revolucionando los sistemas productivos y, por supuesto, la forma en que las personas se desempeñan laboralmente. Estas tecnologías hoy se intercomunican, combinan y convergen proporcionando una nueva gama de herramientas para hacer más eficiente y autónoma la manufactura, abriendo las puertas a una nueva industria. Según Schwab, K. (2016:15)



“Algunos diseñadores y arquitectos ya están combinando el diseño por ordenador, la fabricación aditiva, la ingeniería de materiales y la biología sintética para crear sistemas que involucran la interacción entre microorganismos, nuestro cuerpo, los productos que consumimos e incluso los edificios que habitamos. Al hacerlo, están creando objetos que mutan y se adaptan continuamente (características de los reinos vegetal y animal)”

La cuarta revolución industrial que se inició con el siglo XXI conocida como industria 4.0 en 2010, una década más tarde se reconoce mundialmente como el nuevo futuro tecnológico de la industria. La acelerada extensión en el uso de estas innovaciones en la industria afecta a múltiples etapas de los procesos productivos. Según Carlota Perez (2010:7);

“una revolución tecnológica puede ser vista como una gran transformación del potencial de creación de riqueza de la economía, que abre un vasto espacio de oportunidad proporcionando un nuevo conjunto de tecnologías genéricas interrelacionadas, infraestructuras y principios organizativos, con los cuales se pueden aumentar significativamente la eficiencia y la efectividad de todas las industrias y actividades”

El empleo de estas innovaciones no se circunscribe sólo a la industria manufacturera, sino que también tiene una marcada influencia en los sectores de servicios, tanto los tradicionales, como así también aquellos basados en conocimientos asociados a la producción de bienes manufacturados. Sin embargo, es en los procesos de manufactura donde se plantean los mayores desafíos, pues en este campo es donde las evoluciones tecnológicas generan mayores alteraciones requiriendo nuevas competencias de los trabajadores para ejecutar y mantener los sistemas productivos.

Según lo relevado por el estudio Travesía 4.0: Hacia la transformación industrial argentina (Albrieu, R. Basco, A. Brest López, C. De Azevedo, B. Peirano, F. Rapetti, M. Vienni, G. 2019), trabajo que ha tenido una honda repercusión en el ámbito educativo y político, uno de los mayores inconvenientes que manifiestan las empresas a la hora de incorporar tecnología 4.0 es la falta de recursos humanos adecuados para su correcta implementación y gestión. Además, manifiestan la necesidad de solicitar asistencia de expertos de otras partes del mundo más evolucionados en materia de nuevas tecnologías. Por otro lado, Castells (1996) enfatiza en la importancia del rol del Estado y sus acciones para que la sociedad pueda adoptar las nuevas tecnologías, ejerciendo un rol de precursor en medios de diseminación tecnológica y/o fomentar a la incorporación de la misma en instituciones educativas de todo nivel resulta fundamental.

Albrieu, R (2021), se refiere a la aparición de innovaciones tecnológicas en Estados Unidos - nuevo centro económico global- a principio de siglo XX con la electrificación que dio lugar a otro tipo de interacción entre máquinas y personas. El autor expresa como ejemplo las medidas educativas que tomó en ese entonces Norteamérica, invirtiendo mayormente en capital humano.



“La complementariedad entre las innovaciones tecnológicas y las educativas mejoró las condiciones laborales y salariales, y dejó los miedos sobre la automatización para la ciencia ficción o historias de futuros bien lejanos”

Lawrence Katz y Claudia Goldin (2008:12) afirman que lo que colocó a Estados Unidos como potencia mundial fue su temprana inversión en desarrollo cognitivo social en simultáneo con la evolución en tecnologías.

“la estrategia educativa norteamericana fue crítica para explicar su dinamismo tecnológico, el rápido crecimiento económico y la mejora en la distribución del ingreso, asimilación de grandes masas de inmigración y la transición a una educación secundaria masiva”

Dicho lo anterior, para afrontar y dominar las nuevas tecnologías es necesario que la educación superior esté alineada con las necesidades del contexto para tal fin (Albrieu, R. 2021).

Actualmente hay consenso en que la educación de ingenieros debe planificarse en sintonía con la evolución tecnológica y con el desarrollo económico y social. Es misión de la universidad generar el conocimiento necesario para diseñar una propuesta creativa e inteligente capaz de marcar una dirección en la solución de las dificultades del país (Palamidessi, I, Suasnabar, C, Galarza, D, Comp. 2007). Como en la industria, se observa la necesidad de un cambio de paradigma educativo que acompañe la cuarta revolución industrial, asegurando así, que los futuros profesionales se desenvuelvan de manera óptima y colaboren en la adaptación de la sociedad a las nuevas tecnologías.

## 2. HIPOTESIS

El Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI), con el objetivo de mantenerse a la vanguardia de las innovaciones educativas en ingeniería, a partir 2005 mostró preocupación por definir las competencias necesarias para los futuros ingenieros buscando graduados que sepan hacer y sepan ser, con competencias tecnológicas, políticas, sociales y actitudinales.

“Hay consenso en cuanto que el ingeniero no sólo debe saber, sino también saber hacer. El saber hacer no surge de la mera adquisición de conocimientos, sino que es el resultado de la puesta en funciones de una compleja estructura de conocimientos, habilidades, destrezas, etc. que requiere ser reconocida expresamente en el proceso de aprendizaje para que la propuesta pedagógica incluya las actividades que permitan su desarrollo”.

Es así como en el año 2018 presentó el Libro rojo, documento en el que se definieron las competencias específicas para todas las especialidades de la ingeniería (CONFEDI, 2018). En la actual transición tecnológica resulta de interés revisar las competencias definidas para los futuros profesionales y asegurar que el curriculum universitario esté actualizado para afrontar los



nuevos desafíos que impone la industria 4.0. (Long, L. N., Blanchette, S., Kelley, T. D., y Hohnka, M; 2019).

En estas circunstancias la Universidad Nacional de General Sarmiento(UNGS) tiene el desafío de formar ingenieros electromecánicos con orientación en automatización, profesionales que estén en condiciones de proyectar, dirigir, instalar, operar, controlar y mantener sistemas electromecánicos, a la vez desarrollar nuevas partes para los mismos. Al mismo tiempo, atendiendo a su orientación específica, deben ser capaces de intervenir en relación con los cambios y problemas técnicos asociados a las nuevas tecnologías de automatización, que como se expuso anteriormente, se encuentran en un proceso de transición. En consecuencia, la UNGS enfrenta en la formación de sus ingenieros, como todas las instituciones del área, el problema de conocer cómo es la vinculación entre su proyecto educativo y las demandas del mundo laboral al que se incorporan sus graduados. Este interrogante es el que motiva la presente indagación. En las condiciones de esta investigación el supuesto que se toma como punto de partida es: Los egresados de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la UNGS se han de incorporar a una industria en transformación que requiere competencias profesionales novedosas respecto de las corrientes.

A partir de este supuesto, el interés de este proyecto reside en pretender investigar la relación entre los conocimientos impartidos por la Ingeniería Electromecánica con Orientación en Automatización de la UNGS y los requerimientos de la industria en su zona de influencia puesto que el análisis de esta relación es el núcleo problemático en el que se articula el programa educativo de la carrera con las demandas provenientes de la evolución de las tecnologías 4.0.

Para trabajar en este proyecto acredito más de 15 años de experiencia laboral en la industria automotriz, siempre en el área de automatización de procesos productivos, los últimos 10 años trabajando como ingeniero en la industria y docente de ingeniería en la UNGS en asignaturas relacionadas con la automatización de procesos productivos. Además, participo en proyectos de investigación relacionados con nuevas tecnologías. El nexo de mis actividades con la evolución y cambios tecnológicos me motivan a realizar esta investigación, ya que su resultado puede colaborar a expandir el conocimiento respecto a la eficiencia educativa de la institución, aumentar las probabilidades de un desarrollo exitoso de sus futuros profesionales, ayudar a la evolución tecnológica de la industria con ingenieros que estén a la altura de los nuevos desafíos y, por último, contribuir a la mejora educativa de las ingenierías.



### 3. LAS PREGUNTAS A RESPONDER

Este trabajo de investigación tendrá como meta el poder responder consignas que manifiestan el problema expuesto y permitirá también la expansión de la investigación a nuevas tareas a resolver. Algunas de las preguntas que marcaron el hilo de investigación de este trabajo son:

- ¿Cuáles son las tecnologías 4.0 que se están adoptando en la industria argentina y cuáles son sus implicaciones?
- ¿Cuál es el estado actual de la industria argentina en relación con la adopción de tecnologías 4.0?
- ¿Cuáles son los desafíos y oportunidades que enfrentan las empresas argentinas al implementar tecnologías 4.0?
- ¿Qué cambios en los sistemas de gestión y en las competencias laborales son necesarios para aprovechar al máximo el potencial de las tecnologías 4.0?
- ¿En qué medida la formación de ingenieros en la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) se alinea con los requisitos de la industria en el contexto de las tecnologías 4.0?
- ¿Cuáles son las habilidades y competencias laborales que los ingenieros deben desarrollar para enfrentar los desafíos de las tecnologías 4.0?
- ¿Cuál es el papel de las instituciones educativas en la actualización de los planos de estudio y la incorporación de tecnologías emergentes en la formación de ingenieros?

### 4. OBJETIVOS

#### 4.1. Objetivo general

Ante los inminentes cambios tecnológicos que se avecinan y su relación con la educación superior en ingeniería, la presente investigación aborda aspectos aún poco explorados. En primer lugar, revisar las necesidades de las empresas del área de influencia de la UNGS con respecto a las competencias de los profesionales de ingeniería en el marco de la industria 4.0. En segundo lugar, conocer el punto de vista de los profesionales de la ingeniería y sus experiencias personales frente a los nuevos desafíos. En tercer lugar, abordar la temática curricular ya que, pensando en el desarrollo de nuestro país, las ingenierías necesitan en el corto plazo aportar el knowhow para el salto cualitativo que implica la inserción de tecnologías 4.0. Por último, resulta relevante comprender el grado de entendimiento y compromiso de la UNGS hacia



la necesidad de desarrollar mejoras educativas que acerquen a los estudiantes a las competencias que requiere y requerirá la industria 4.0. A partir de estos supuestos, el objetivo general es comprender la modalidad en que el modelo de educación de ingenieros de la carrera de Ingeniería Electromecánica con orientación en Automatización de la Universidad Nacional de General Sarmiento está acompañando los requerimientos de las industrias que incorporan tecnología 4.0 ubicadas en el área de influencia de la institución.

#### 4.2. Objetivos específicos

- Analizar la compatibilidad de la narrativa sobre industria 4.0 y sus tecnologías con la formación de los ingenieros electromecánicos orientados a la automatización y las demandas de la industria del área de influencia de la UNGS.
- Conocer cuán alineado está el sector empresarial cercano a la UNGS con las prácticas de la industria 4.0.
- Identificar las competencias tecnológicas de la industria 4.0 en los perfiles de búsqueda de profesionales de las empresas aledañas para observar su relación con la formación de ingenieros de la UNGS.
- Identificar en el curriculum y en el perfil profesional planteado en el plan de estudios de la especialidad las competencias para el manejo y desarrollo de las tecnologías 4.0 en los estudiantes avanzados de la UNGS.
- Analizar las experiencias de los actores involucrados en esta indagación a partir de sus vivencias como agentes de transformación en esta etapa de la industria bajo estudio.
- Contribuir a un plan de mejora de la propuesta académica actual como resultado de la presente indagación.

### 5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Los procesos de investigación en ciencias humanas y sociales exigen utilizar herramientas como la fenomenología y la hermenéutica. Ambas son empleadas en el campo de la metódica investigativa de orden cualitativo como perspectiva epistemológica. Desde sus orígenes, el aporte a la comprensión de los fenómenos o hechos de carácter humano y social ha sido incuantificable.

La hermenéutica tiene sus raíces etimológicas en la palabra griega hermeneutikos que, se relaciona con el arte de interpretar. Término que se asocia a la figura de Hermes, hijo de Zeus, y (mejorar redacción: poner; y sacar la Y, o armar otro párrafo) quien tenía la tarea de llevar a



los seres humanos los mensajes de los dioses, su función era interpretarlos y comunicarlos a la comunidad. De ahí que la hermenéutica esté asociada al arte de interpretar o comprender textos escritos o realidades, haciendo del texto algo más que la escritura (Ricoeur, 1990).

Historiadores alemanes plantearon un modelo alternativo enfocado en la interpretación de los acontecimientos sociohistóricos, que aspira al descubrimiento de leyes para explicar y predecir los eventos sociales, a través de la comprensión de sus significados. Así, las ciencias de la cultura no se proponen explicar y predecir los acontecimientos sociales con base en leyes y teoría universales, sino buscan comprender su significado específico por medio de interpretaciones objetivas. Por ello se llama a este modelo comprensivo o “hermenéutico”. (De la Garza, T. y Leyva, G. 2012)

Más que considerar a la comprensión como un modo alternativo de conocimiento científico en el campo de la sociedad y de la historia, la hermenéutica filosófica de raíces fenomenológica concibe a la comprensión como el modo primordial de la existencia humana.

Dilthey (1910), justifica el carácter hermenéutico de la historia y las ciencias sociales considerando a las acciones como expresiones de vida equivalentes a los discursos, ya que tanto los textos como las acciones son expresiones con significado, y por eso, su estudio riguroso ha de buscar su interpretación, a través de la comprensión de la experiencia vital contenido en las expresiones de vida del autor.

Por otro lado, Max Weber, en 1973 expresaba que la definición del objeto de investigación es determinada por las ideas del investigador y su contexto, a partir de las cuales el investigador adjudica significación cultural a lo empírico, que por sí solo carece de sentido. Por esta razón, los objetos y problemas de estudio de las ciencias socio-históricas no son inmutables ya que no es posible que exista una teoría universalmente válida que explique a partir de leyes invariables las acciones sociales y los acontecimientos históricos. El autor también plantea que la objetividad de las ciencias sociales depende de la adecuación a la comprensión que los actores tienen de sus acciones en situaciones específicas; son construcciones teóricas que tienen que adecuarse empíricamente a los motivos y razonamientos que tuvo el actor en la situación original. Se busca exponer la racionalidad de la acción, en función de los conocimientos, intenciones y valores del propio actor y no en función del intérprete.

La comprensión de la acción requiere reconstruir las reglas sociales existentes en el contexto específico del protagonista. Estas reglas deben ser consideradas como un patrón de conducta que el agente ha interiorizado como miembro de la comunidad específica a la que pertenece. Las reglas sociales constituyen el factor fundamental de la comprensión de la acción misma. Desde esta perspectiva hermenéutica, la comprensión de las acciones y la evaluación objetiva



de cuán racional dichas acciones pueden ser, se tienen que realizar desde el punto de vista interno de la comunidad de los protagonistas, y no desde una perspectiva externa.

Debido a que esta investigación se enmarca en el campo de las ciencias sociales se recurrirá a un diseño no experimental que se aplicará de manera transversal. A partir del marco teórico antes expuesto se realizará una investigación descriptiva para conocer la especificidad del objeto de estudio. Por otro lado, teniendo en cuenta que se indagarán aspectos aún poco estudiados en el área de la educación de ingenieros, se considera que la investigación también tendrá un componente exploratorio.

Según Vasilachis, I. (2006) toda investigación que se ocupa de la vida de las personas, de historias, del funcionamiento organizacional y de los movimientos sociales se define como investigación cualitativa. Este tipo de investigación se basa en la comunicación, recolección de historias, narrativa y descripción de experiencias de otros. En el mismo sentido, en el campo de la investigación cualitativa Sampieri (2014) define al tipo de estudio fenomenológico como a aquel que tiene por objetivo describir y entender los fenómenos desde el punto de vista de cada participante y desde la perspectiva construida colectivamente.

Dicho lo anterior, esta investigación cualitativa enmarcada en un tipo estudio fenomenológico, intenta comprender en qué medida la enseñanza de ingeniería electromecánica de la UNGS está acompañando los requerimientos de la industria 4.0 teniendo como referencia central las experiencias de sus egresados y estudiantes avanzados insertos en el mundo del trabajo.

La descripción y comprensión del objeto que aborda esta indagación requiere una trama conceptual que permita pasar de las experiencias de los actores involucrados a la construcción de una narrativa intersubjetiva que complete el propósito de toda investigación social: modificar la realidad. Agregar: para esta narrativa se tiene en cuenta, junto con los aportes teóricos, aún dispersos como cuerpo conceptual, el análisis documental, en particular los lineamientos expuestos por el CONFEDI y los documentos curriculares de la especialidad.

En el estudio de campo se realizará un proceso de búsqueda de información mediante encuestas y entrevistas a egresados entre los años 2018 y 2021 que estén ejerciendo la profesión en la industria, estudiantes que estén atravesando el último año de la carrera que ejecuten actividades laborales en la industria y por último a informantes clave: docentes y autoridades de la UNGS. Por otro lado, se entrevistará a personal jerárquico de empresas del área de influencia de la universidad que se encuentren en proceso de implementación de las nuevas tecnologías. De los egresados y estudiantes avanzados se buscará conocer, en primer lugar, sus experiencias profesionales al aplicar las herramientas adquiridas en la carrera de grado para resolver problemas relacionados con las nuevas tecnologías implementadas en la industria y, en segundo lugar, sus percepciones con respecto a si cuentan con las competencias necesarias para afrontar



los desafíos actuales de la profesión. De los docentes y autoridades se buscará obtener información sobre cuál es su posición frente a los cambios que demanda la nueva industria en las competencias de los futuros profesionales y si están llevando adelante actividades para que los estudiantes puedan adquirirlas. Por último, en las empresas, se indagará sobre el perfil de ingeniero que buscan en la actualidad y las competencias que creen necesarias para la instancia de desarrollo tecnológico en la que se encuentran.

La información preponderantemente cualitativa se buscará con entrevistas semi estructuradas dado que tienen la ventaja de organizar la conversación al contar con un protocolo, preguntas comunes a los entrevistados y un guión para las aclaraciones que requieran. Las encuestas tendrán preguntas abiertas y cerradas, instrumento útil en poblaciones pequeñas y, en este caso, como serán compatibles con el protocolo de las entrevistas, permitirán incrementar la información y favorecer su comparación y la triangulación. ( McMillan, J., Schumacher, S. 2005)

## 5.1 Población y muestra

Según Sampieri (2014) en los estudios cualitativos el tamaño de la muestra no es importante desde una perspectiva probabilística, ya que el interés del investigador no es generalizar los resultados de su estudio a una población más amplia. La indagación cualitativa busca profundidad y, por sus características, requiere muestras flexibles que se evalúan y redefinen permanentemente. El autor recomienda 10 casos como tamaño mínimo de la muestra para estudios de tipo fenomenológico como el propuesto acá.

Como se mencionó anteriormente los datos serán recolectados de cuatro fuentes diferentes (egresados, estudiantes avanzados, docentes y empresas) con el fin de realizar una triangulación de la información proporcionada y así obtener diferentes puntos de vista del mismo fenómeno. Según señala Rodríguez Ruiz (2005) el objetivo principal de la triangulación es incrementar la validez de los resultados de una investigación mediante la depuración de las diferencias intrínsecas de un solo método de recolección de datos.

Definimos una muestra inicial que, como se anticipó, puede sufrir alguna alteración durante el transcurso de la investigación:

- 10 ingenieros egresados de la UNGS en ejercicio profesional
- 20 estudiantes avanzados de la UNGS que estén insertos en el mercado laboral.
- 5 docentes de las asignaturas de mayor relevancia para el desarrollo de competencias profesionales relacionadas con la industria 4.0



- Profesionales de la ingeniería de diez empresas en la zona de influencia a la UNGS
- Las encuestas se enviarán al 75% del padrón de los inscriptos en la carrera

En cuanto al análisis documental las fuentes principales son el plan de estudios de la UNGS y su actualización aprobada por la resolución (CS) N°7015/18 para el ingeniero electromecánico orientación automatización y el Libro Rojo del CONFEDI, documento que define las competencias para el ingeniero electromecánico con el fin de observar la relación entre ambos.

Aunque el tesista cuenta con los medios necesarios para acceder a las fuentes consignadas, evalúa que los obstáculos pueden proceder de la incertidumbre que domina el presente de nuestra sociedad. Espera contar con el apoyo institucional para superarlas.

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo explora la adopción de tecnologías 4.0 en la industria argentina y su implicación en la formación de ingenieros. A través del análisis de las experiencias del personal jerárquico de empresas que están en proceso de implementación de estas tecnologías, se han obtenido pruebas sobre los desafíos y oportunidades que la industria enfrenta en este nuevo paradigma tecno-industrial.

Los hallazgos pretenden poner de manifiesto la importancia de adoptar tecnologías 4.0 para la rentabilidad y el crecimiento de las empresas en Argentina. Además, resaltan la relevancia de dominar e incorporar estas tecnologías para aprovechar sus beneficios, como una mayor eficiencia, productividad y capacidad de adaptación a los cambios del entorno.

Sin embargo, también se busca demostrar que la transición hacia estas nuevas tecnologías podría implicar superar barreras y desafíos significativos. La actualización de sistemas de gestión y competencias laborales se hace necesaria para aprovechar al máximo el potencial de las tecnologías 4.0. En este sentido, la formación de ingenieros podría requerir adaptaciones para desarrollar las habilidades necesarias en este nuevo escenario, donde el avance tecnológico y la automatización transforman las ocupaciones y demandan nuevas competencias.

Este estudio resalta la trascendencia de adoptar tecnologías 4.0 en la industria argentina y busca comprender si la formación de ingenieros debe ser ajustada para hacer frente a este nuevo paradigma tecno-industrial. Los resultados obtenidos contribuirán a comprender los desafíos y oportunidades que surgen en este contexto, y podrán servir como base para futuras investigaciones y acciones destinadas a fortalecer la competitividad y el desarrollo tecnológico en la industria argentina.



## REFERENCIAS

**Albrieu, R.** (2021): A la revolución hay que hacerla. El futuro del trabajo en Argentina frente a la cuarta revolución industrial. Documento de trabajo N° 202. CIPPEC.

**Albrieu, R., Basco, A., Brest López, C., De Azevedo, B., Peirano, F., Rapetti, M., Vienni, G.** (2019): "Travesía 4.0". Hacia la transformación industrial argentina, Dirección editorial: Fabrizio Operti y Pablo Marcelo García.

**Castells, M.** (1996): Prólogo la red y el yo. La era de la información. Economía, sociedad y cultura. Vol. 1 México siglo XXI.

**Cázares Aponte, L.; Cuevas de la Garza, J.** (2007) Planeación y evaluación basadas en competencias, México, Editorial Trillas.

**Consejo Federal de Decanos de Ingeniería** (2018) " Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la república argentina. Libro rojo de CONFEDI" Córdoba, Argentina. Editores: Roberto Giordano Lerena, Sandra Cirimelo.

**Dela Garza T. Leyva, G.** (2012) "Tratado de metodología de las ciencias sociales" México, Perspectivas actuales, Fondo de Cultura Económica.

**Dilthey, W.** (1910) "Der Aufbau der geschichtlichen Welt in den geisteswissenschaften" Alemania, Editorial Hofenberg

**Goldin C. y L. Katz** (2008) "The Race between Education and Technology". Belknap Press.

**Levy Yeyati, E.** (2018): "Después del trabajo". El empleo argentino en la cuarta revolución industrial, Buenos Aires, Editorial PenguinRandom House.

**Long, L., Blanchete, S., Kelley, T., Hohnka, M.** (2019) "The Crucial Need to Modernize Engineering Education" Estados Unidos. Universidad de Pennsylvania. IEEE conferencia aeroespacial.

**McMillan, J., Schumacher, S.** (2005) *Investigación educativa*. Madrid, Pearson- Addison Wesley.

**Montagu, H., Canosa, T., Massi, M.** (2020) "El futuro del trabajo en el mundo de la industria 4.0" Buenos Aires, Argentina. Organización Internacional del Trabajo.

**Nahuel, L; Sheepshanks, V.** (2019) *Educación por competencias: cambio de paradigma del modelo de enseñanza-aprendizaje*. Revista Argentina de Educación Superior



**Palamidessi, M.; Suasnabar, C. y Galarza, D.** (2007), "Presente y futuro del campo de producción de conocimientos sobre educación en Argentina" Argentina, Buenos Aires, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO)/Manantial.

**Pérez, C.** (2001): Cambio tecnológico y oportunidades de desarrollo como blanco móvil. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.

**Pérez, C.** (2010): Revoluciones tecnológicas y paradigmas tecno-económicos, <http://www.carlotaperez.org/pubs?s=tf&l=es&a=techrevolutionstechnoeconomicparadigms>.

**Resolución N°7015(2018)** "Plan de estudios de la carrera de Ingeniería Electromecánica con orientación en Automatización".

**Rodríguez Ruiz**(2005) "La Triangulación como Estrategia de Investigación en Ciencias Sociales" España. Revista de Investigación en Gestión de la Innovación y Tecnología.

**Sampieri, R.**(2014) "Metodología de la investigación" México. Mcgraw-hill / Interamericana

**Vasilachis, I.** (2006) "Estrategias de investigación cualitativa" Barcelona, España. Editorial Gedisa.

**Weber, M.** (1973) "Objetividad en Ciencia y Política Social" en Ensayos sobre Metodologías Sociológica, Buenos Aires, Armorrortu



## Formalización del lenguaje gráfico Sequential Function Chart para definir un submodelo de Asset Administration Shell en la industria de procesos

Johnny Alvarado <sup>1</sup>, Marcela Vegetti <sup>1</sup> Silvio Gonnet <sup>1</sup>

<sup>1</sup>INGAR (CONICET-UTN) {jaalvarado;mvegetti;sgonnet}@santafe-conicet.gov.ar

### RESUMEN

Actualmente, las empresas enfrentan el desafío de la personalización de la producción, caracterizada por lotes pequeños de una variedad de productos. Esto adiciona un problema a la ya compleja planeación y control de la producción (PPC). En la industria de procesos el estándar ISA-88 proporciona modelos para definir los requisitos de control para las plantas de fabricación por lotes. La implementación de Gemelos Digitales o Digital Twin (DT) basados en AAS (Asset Administration Shell) puede soportar la automatización de la toma de decisiones en la PPC. La plataforma I4.0 propone un metamodelo para especificar la información de un AAS mediante submodelos basados en estándares que representen las diversas vistas de un activo. En particular, en la industria de procesos no se encontraron submodelos que permitan la definición de AAS. Con el fin de definir un AAS para la construcción de DT en este tipo de industrias, se está trabajando en la definición de submodelos basados en el estándar ISA-88. En particular, este trabajo presenta la formalización del lenguaje gráfico conocido como SFC (Sequential Function Chart) como base para la definición del submodelo que representa la parte procedimental de una receta ISA-88. La definición del submodelo se realizó utilizando el Lenguaje Unificado de Modelado (UML) y OCL (Object Constraint Lenguaje) para formalizar las restricciones. Contar con la formalización de un lenguaje gráfico permite la verificación de la construcción de modelos válidos, mediante la detección de redes inseguras e inalcanzables. Si bien surge de la necesidad de la representación formal de la parte estructural de una receta y su uso en un DT de la industria de procesos batch, puede ser utilizado en cualquier tipo de industria dado que el mismo es una de las alternativas propuestas por el estándar IEC 61131-3 para la automatización industrial.

**Palabras Clave:** *Sequential Function Chart; Asset Administration Shell; Digital Twin, UML, OCL.*



## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad hay un creciente interés por parte de los clientes para personalizar sus bienes. Los automóviles, zapatillas y ropa en general, son un ejemplo de ello. También, en la industria de productos químicos, debido a regulaciones propias de cada país se están generando cambios en las formulaciones de los productos agroquímicos, causando una disminución en los tamaños de los lotes de cada producto, añadiendo más problemas a la ya compleja tarea de planeación y control de la producción (PPC). La fabricación de lotes pequeños de producción, permite a las pequeñas y medianas empresas, la adquisición y fidelización de nuevos clientes y la disminución del inventario. Sin embargo, la manufactura personalizada requiere que las fábricas soporten una alta flexibilidad. Dentro de los desafíos que las pequeñas y medianas empresas deben abordar, se encuentran: a) Estimación de los tiempos de producción de estos lotes pequeños, b) la comunicación entre los trabajadores de planta y las partes interesadas acerca de las siguientes tareas de procesamiento, y c) Información actual del proceso productivo y las tareas de mantenimiento [1]. La implementación de Digital Twins (DT) o Gemelos Digitales puede soportar la automatización en la digitalización de los procesos y la toma de decisiones en la PPC [2]. Para ello, se requiere poder representar de una forma real y precisa los componentes del proceso productivo. Una representación digital basada en la receta permitiría representar el procedimiento y recursos usados en la fabricación de un producto mediante procesos batch. Un DT puede ser implementado mediante un Asset Administration Shell (AAS), el cual es una representación virtual de cualquier Asset o activo que posea una empresa (máquinas, productos, software, entre otros) [3]. La plataforma I4.0 propone un metamodelo para especificar la información de un AAS mediante submodelos basados en estándares que representen las diversas vistas de un activo. El uso de estándares en un AAS permite la interoperabilidad con otros assets.

En la industria de procesos, el estándar ISA-88 [4] proporciona modelos para definir los requisitos de control para las plantas de fabricación por lotes. La Receta es un concepto fundamental en el estándar ISA-88. La receta provee la información acerca de qué, cuándo y cuánto va a ser fabricado un producto y los equipos que van a ser usados para ello. La información que provee la receta se organiza en cinco partes, una de las cuales es la parte procedimental que define la estrategia para llevar a cabo el proceso productivo. El estándar ISA-88 sugiere el uso del lenguaje gráfico Sequential Function Chart (SFC) para la representación de la parte procedimental de la receta. En las representaciones, los diferentes tipos de actividades de fabricación son identificables solo por personas que conocen el lenguaje gráfico y son capaces de analizar los diagramas. Dichos usuarios competentes serían capaces de detectar qué actividades de fabricación se ejecutan en paralelo, cuál es el antecesor/sucesor de una determinada actividad,



o qué actividades son tareas alternativas. Por lo tanto, la naturaleza implícita de las representaciones gráficas que propone el estándar ISA-88 dificultan su utilización como submodelos de los AAS y la interoperabilidad de los mismos. El estándar IEC 61131-3 define 2 tipos de errores a ser evitados cuando se construyen redes en SFC. En particular, al construir procedimientos con SFC debe ser posible la detección de redes inseguras (activación descoordinada de pasos) y de redes inalcanzables (redes que no se ejecutan). El estándar IEC 61131-3 propone un algoritmo para prevenir estas redes indeseadas, sin embargo, este algoritmo no es infalible y es posible construir este tipo de redes prohibidas [5]. La formalización de este lenguaje permitiría la verificación de la construcción de modelos válidos, mediante la detección de redes inseguras e inalcanzables. Además, la formalización permite la definición inequívoca de los conceptos propios del lenguaje SFC y su reuso en diferentes sistemas.

El objetivo del presente trabajo es introducir una representación formal del lenguaje SFC que será incorporado al submodelo de la receta ISA-88 que se está desarrollando para la implementación de un AAS en la industria de procesos batch. Se utilizarán diagramas de clases UML para mostrar el submodelo propuesto y OCL (Object Constraint Language) para especificar las restricciones [6]. Para validar la propuesta distintas instancias del modelo propuesto se definieron en la herramienta USE (UML-based Specification Environment) [7].

Este trabajo está organizado de la siguiente forma: La sección 2 describe los antecedentes y trabajos previos relacionados a AAS, DT y representación de la parte procedimental de la receta mediante SFC. En la sección 3 se presenta la propuesta de formalización del SFC. La sección 4 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

## 2. Antecedentes

En esta sección se detallan los conceptos más importantes que son tenidos en cuenta a lo largo del trabajo. La sección 2.1 introduce los conceptos de Asset, AAS y DT. La sección 2.2 realiza una breve descripción del estándar ISA-88 y el SFC. La sección 2.3 detalla algunos trabajos que se han realizado a la fecha relacionados al uso de DT y AAS en la industria de procesos.

### 2.1 Digital Twin y Asset Administration Shell

Un Digital Twin es una representación digital, suficiente para cumplir con los requisitos de un conjunto de casos de uso. Un DT puede ser implementado usando el AAS en una forma interoperable [3]. Un AAS es la entidad de software que se encarga de la representación digital de un Asset y permite la interoperabilidad con otros Assets. El AAS almacena toda la información de un Asset durante su ciclo de vida: diseño, fabricación, uso y mantenimiento. En [3] se presenta un metamodelo para la especificación de la información de un AAS, el cual se muestra en la parte superior de la Figura 1. Un AAS representa exactamente a un asset y este asset puede ser un Type (en etapa de desarrollo) o una Instancia (etapa posterior a su fabricación).

Cada asset debe ser identificado individualmente mediante un GlobalAssetId (en procesos batch, cada batch tendrá un único GlobalAssetId). Para representar los diferentes grupos de características de un Asset, el metamodelo propone el concepto de submodelo (Submodel en la Figura 1). La plataforma I.40 sugiere el uso de estándares en la definición de estos submodelos, con el fin de soportar la interoperabilidad entre los AASs. Para implementar un DT en la planeación y programación de la producción, se requiere poder especificar de manera precisa y real los componentes que intervienen en el proceso de producción de plantas batch. Modelos estandarizados, pueden ser usados para crear un AAS que permita la implementación de dicho DT. En particular, el estándar ISA-88 ha sido elegido para la especificación de un submodelo del AAS que se creará. En la parte inferior de la Figura 1, se muestra cómo se vincula el submodelo (*ISA88-basedSubmodel*) que se está construyendo con el metamodelo propuesto en [3].

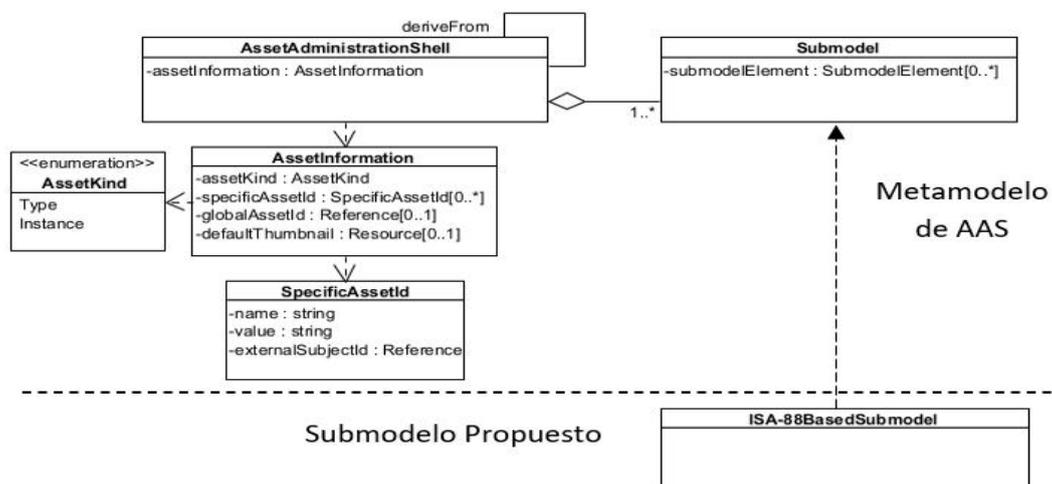


Figura 1: Submodelo de AAS. Adaptado de [3]

## 2.2 Procedimiento de la receta y Sequential Function Chart

Una de las partes de la receta propuesta por ISA-88 es la estructura procedimental de la misma, la cual define una secuencia de pasos, acciones o actividades con un principio y un final definidos requeridos para cumplir una tarea orientada al proceso. Según el estándar ISA-88, el procedimiento puede ser definido a nivel de Unidad de Procedimiento, si la secuencia se lleva a cabo dentro de una unidad de producción, a nivel de operación, si involucra un cambio físico o químico de un material dentro de una unidad de procedimiento, o a nivel de fase, si es ejecutada por un equipo de control. El estándar ISA-88 indica que el lenguaje SFC es una herramienta idónea para representar la lógica condicional frecuentemente requerida en el nivel de operación [4]. Además, el SFC es uno de los 3 lenguajes gráficos sugeridos por la IEC 61131-3 [8] para escribir programas de Controladores Lógicos Programables (PLC). Estos programas de control son descompuestos en elementos llamados POU (Program Organización Units) que pueden ser un programa, Bloques de Funciones (FB) o una Función. Los POU se representan mediante uno o más SFCs. Una estructura SFC consiste de una red, la cual especifica un conjunto de Pasos

(Steps), Transiciones (Transitions) y Enlaces (Links). Un Paso puede estar activo o inactivo. Un Paso determina un conjunto de acciones a realizar mientras se encuentre activo. La Transición establece la activación o desactivación de uno o más Pasos mediante la evaluación de una condición de Transición. Un Paso y una Transición (o viceversa) se vinculan mediante un Enlace. Los Pasos y las Transiciones se deben alternar, es decir, dos Pasos no se pueden conectar directamente (tampoco dos Transiciones). Una Transición puede tener uno o más Pasos predecesores y uno o más Pasos sucesores y un Paso puede tener cero o más Transiciones sucesoras y cero o más Transiciones predecesoras. El Lenguaje SFC puede representar simples combinaciones de Pasos y Transiciones, llamadas Secuencias Simples, pero también puede representar Secuencias Paralelas, Secuencias Divergentes y Loops. Una secuencia paralela ocurre cuando después de evaluar una Transición se deben ejecutar dos o más Pasos simultáneamente. Por su parte, una Secuencia Divergente ocurre cuando después de ejecutar un Paso, se debe escoger una Transición (entre dos o más Transiciones mutuamente excluyentes) y evaluar si su condición de Transición es TRUE o False. Un Loop ocurre cuando luego de evaluar TRUE una Transición, esta se conecta a un paso ejecutado previamente.

De acuerdo al estándar IEC 61131-3 durante la especificación de un modelo SFC hay que evitar la definición de dos tipos de redes: las redes inseguras y las redes inalcanzables. Las primeras permiten una activación de pasos descontrolada y descoordinada (fuera de secuencias simultáneas). Las redes inalcanzables incluyen algunos componentes que nunca pueden activarse. La Figura 2 ejemplifica ambos tipos de redes. En dicha figura, los rectángulos son los pasos, las Transiciones son las líneas pequeñas horizontales etiquetadas con  $t_i$  y los enlaces son las líneas que vinculan pasos y transiciones. La doble líneas horizontales representan tanto el inicio (línea doble anterior a S2 y S3) como el fin (línea doble posterior a S2 y S4) de una secuencia simultánea. La Figura 2a muestra un ejemplo de red insegura.

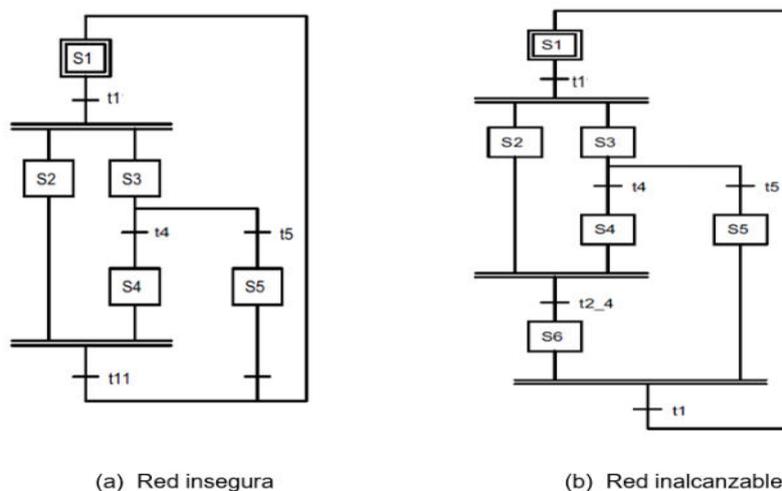


Figura 2: Errores en Redes SFC. Tomado de [5]



En la Figura 2a, cuando  $t_1$  es evaluada True, S2 y S3 son Pasos activados simultáneamente. Si, luego de la ejecución de todas las acciones del Paso S3, la Transición  $t_5$  es evaluada como TRUE ( $t_4$  y  $t_5$  pertenecen a secuencias divergentes), la secuencia puede volver al Paso S1 y posteriormente activar el Paso S2, aun cuando este aun pueda estar activo. En la Figura 2b, se muestra una Red inalcanzable en la que los pasos S2 y S3 son activados (cuando  $t_1$  es evaluada True). Si, luego de la ejecución del Paso S3, la Transición  $t_5$  es evaluada como TRUE ( $t_4$  y  $t_5$  pertenecen a transiciones divergentes), se activa el Paso S5, el cual converge con el Paso S6 en un Fin de Secuencia Simultánea. Sin embargo, dado que la Transición  $t_{2\_4}$  está esperando que los Pasos S2 y S4 sean completados, este fin de secuencia simultanea no se alcanzará nunca desde el paso S6. En la sección 3 del presente trabajo se muestra un mecanismo para detectar este tipo de redes no deseadas.

### 2.3 Trabajos previos relacionados

La tecnología de DT es una herramienta para lograr la digitalización de las fábricas y que permite crear modelos de simulación de los procesos y productos de la compañía, mediante la captura de datos durante el ciclo de vida del producto. En [9] los autores proponen una arquitectura para la integración de AAS que permita el intercambio de datos entre empresas, en el contexto de producción individualizada en masa. Sin embargo, el AAS de la arquitectura propuesta, no está basado en ningún estándar, lo cual impide la interoperabilidad con otros assets. En [10] los autores discuten el uso de DT de procesos de producción en las actividades relacionadas a la PPC en las industrias de fabricación de alimentos. Los autores sugieren que la representación del proceso de producción esté basada en la receta. Sin embargo, no desarrollan ningún método que permita implementar un DT. Otro enfoque conceptual para soportar la toma de decisiones en la PPC es propuesto por [11]. Sin embargo, en este trabajo no se consideran detalles técnicos para su implementación. Con el fin de definir un AAS que permita construir un DT para la industria de procesos batch, se comenzó a trabajar en la definición de submodelos basados en el estándar ISA-88. Una primera propuesta se presenta en [12], donde se realiza una extensión del metamodelo de AAS y se incorpora la definición de submodelos propios de la industria batch, sin embargo en dicho trabajo no se profundizó sobre la parte procedimental de la receta. En el presente trabajo se avanza en la definición del modelo propuesto en [12] para abordar la representación del procedimiento. Puntualmente, se introduce una formalización del lenguaje SFC con el objetivo final de ser usado para representar el procedimiento de fabricación de un producto fabricado mediante procesos batch en un AAS que permita la implementación de un DT que soporte la toma de decisiones en la industria de procesos.

### 3. Propuesta de formalización del SFC

Un POU está compuesto por una o más redes, las cuales están compuesta por Pasos (Steps), Transiciones (Transitions) y Enlaces (Links). Una Red comienza con un Paso inicial (InitialStep).



En el modelo propuesto, los Pasos y las Transiciones son generalizadas en una clase abstracta llamada Nodo (Node), tal como se muestra en la Figura 3.

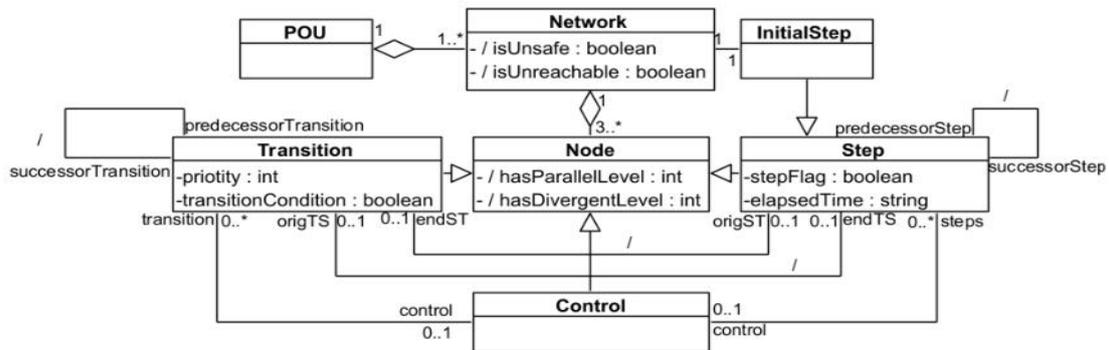


Figura 3: Modelo conceptual de la estructura SFC

Para poder representar los hitos (comienzo y final) de Secuencias Divergentes, Paralelas o Loops, se decidió incorporar al modelo, como subclase de Node, la clase Control que se especializa para representar estos hitos. La Figura 4 muestra la especialización del concepto Control en: InitialSimultaneousSequence, ConvergenceofSimultaneousSequence, InitialDivergenceSequence, ConvergenceofSequence y Loop. Cada uno de estos conceptos se vinculan con las clases Step y Transition. Dependiendo del concepto que se trate tendrán restricciones en la cantidad de pasos (o transiciones) con las que se puedan vincular.

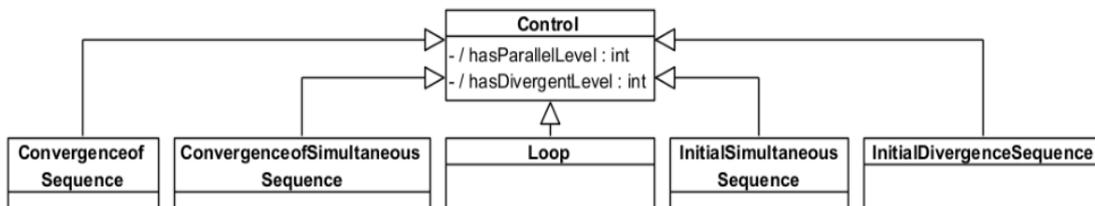


Figura 4: Especialización del concepto Control

A modo de ejemplo en la Figura 5 se muestran los enlaces existentes entre Transición, Paso, Inicio de Secuencia Simultánea y Fin de Secuencia Simultánea. Los extremos de asociación muestran el sentido en el que se representa la relación. Por ejemplo, si consideramos la asociación que vincula las clases InitialSimultaneousSequence y Step, las etiquetas origISSS y endISSS indican el inicio y el fin de la relación, respectivamente. Entonces, para este caso, un Paso puede ser o no sucesor de un inicio de Secuencia Simultánea y un Inicio de Secuencia Simultánea puede preceder o no a dos o más Pasos.

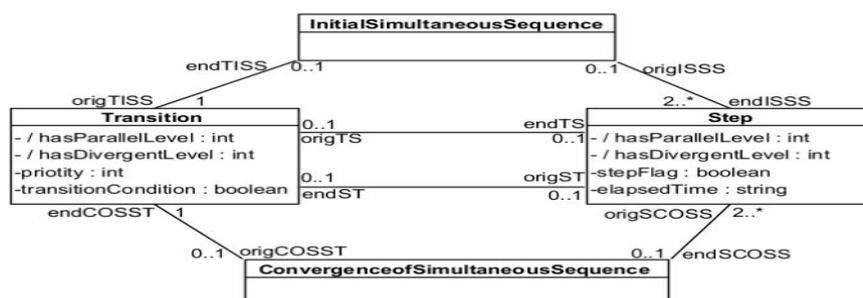




Figura 5: Enlaces entre nodos

Con la intención de desarrollar un mecanismo que evite la creación de redes inseguras e inalcanzables, se establecieron los atributos derivados (un atributo derivado es aquel que puede ser calculado a partir de otros elementos) `hasParallelLevel` y `hasDivergentLevel` en la clase `Node` (ver Figura 3). Estos atributos indicarán la diferencia entre la cantidad de veces que se ha iniciado una Secuencia en Paralelo o Divergente y la cantidad de veces que se han finalizado dichas secuencias. Por ejemplo, un valor de uno (1) en el atributo `hasParallelLevel` de una Transición indica que esta pertenece a una Secuencia en Paralelo. En la Figura 6 se muestra la regla OCL para el cálculo del atributo derivado `hasParallelLevel` en la clase `Paso`.

```
class Step < Node
attributes
    hasParallelLevel: Integer    derive: if self.ocliIsTypeOf(InitialStep) then 0 else
                                if self.origLoopS->notEmpty() then self.origLoopS.hasParallelLevel else
                                if self.origTS->notEmpty() then self.origTS.hasParallelLevel else
                                if self.origCOSS->notEmpty() then self.origCOSS.hasParallelLevel else
                                self.origISSS.hasParallelLevel
                                endif
```

Figura 6: Extracto de regla OCL para el atributo `hasParallelLevel` en la clase `Paso`.

La regla que permite el cálculo del atributo `hasParallelLevel` en la clase `Step` funciona así: Al Inicio de la red, la instancia de Paso inicial (`InitialStep`) tendrá valor de cero (0) para el atributo `hasParallelLevel`. La instancia de Transición que esté relacionada con este Paso inicial, tomará este mismo valor para dicho atributo (0). Esto se mantendrá en las instancias de Pasos y Transiciones siguientes, si la secuencia es simple. Si una Transición se relaciona con un Inicio de Secuencia Simultánea, el valor del atributo `hasParallelLevel` para este Control, se obtiene al sumar uno (1) al valor del atributo `hasParallelLevel` de la transición predecesora (ver regla en Figura 7). El Paso siguiente al Inicio de Secuencia Simultánea tendrá como valor para el atributo `hasParallelLevel`, el mismo que el Control de Inicio de Secuencia Simultánea y este valor se mantendrá hasta que se llegué al Fin de Secuencia Simultánea. El valor del atributo `hasParallelLevel` para el Control Fin de Secuencia Simultánea, se calculará restándole una unidad al valor de este atributo que tenga el Paso predecesor con el cual está relacionada. La Transición sucesora que se relaciona con el Fin de Secuencia Simultánea, mantiene el valor de esta última para su atributo `hasParallelLevel`. La regla para el cálculo del atributo `hasDivergentLevel` fue formulada de una manera similar, pero debido a la restricción de espacio no es presentada en este trabajo. La Figura 8 muestra la regla para el atributo `hasParallelLevel` de la clase `Fin de Secuencia Simultánea`.



```
class InitialSimultaneousSequence < Control
attributes
hasParallelLevel: Integer derive: if self.origTISS->notEmpty() then
    self.origTISS.hasParallelLevel + 1 else self.origTISS.hasParallelLevel
endif
```

Figura 7: Regla para el atributo hasParallelLevel de la clase Inicio de Secuencia Simultánea.

```
class ConvergenceOfSimultaneousSequence < Control
attributes

    hasParallelLevel: Integer derive: if self.origSCOSS->notEmpty()
        then self.origSCOSS.hasParallelLevel -> min()-1 else 0
    endif
```

Figura 8: Regla para el atributo hasParallelLevel de la clase Fin de Secuencia Simultánea.

De igual manera, una regla para calcular el atributo hasParallelLevel (y también para hasDivergentLevel) del concepto Loop fue especificada (Figura 9). En ella se indica que, el valor para el atributo hasParallelLevel de la clase Loop, será el menor valor del mismo atributo entre las Transiciones con las que está relacionado.

```
class Loop < Control
attributes
    hasParallelLevel: Integer derive: self.origTLoop->select(t|not self.successorsTLoop
        ->includes(t)).hasParallelLevel->min()
```

Figura 9: Extracto de Regla OCL para el atributo hasParallelLevel de la clase Loop

A partir de estos valores de atributos calculados se definieron reglas que permiten determinar si una red es insegura o si es inalcanzable. En la clase Network se definieron los atributos *isUnsafe* e *isUnreachable*, los cuales tomarán valores booleanos dependiendo de la evaluación de las reglas OCL definidas en la clase Network para calcularlos. Según la regla que se muestra en la Figura 10, el atributo isUnsafe del concepto Network, evalúe TRUE si las Transiciones que tienen relación con el Loop tienen distintos valores para el atributo hasParallelLevel o hasDivergentLevel. Una diferencia en estos valores indicaría que el Loop se está realizando en niveles distintos de paralelismo o divergencia.

```
class Network
attributes
    isUnsafe: Boolean derive: self.control->select(c| c.oclIsTypeOf(Loop))->collect(c|c.oclAsType(Loop))->
        exists(1| 1.origTLoop->exists(t1, t2| t1.hasParallelLevel <> t2.hasParallelLevel)) or
        self.control->select(c| c.oclIsTypeOf(Loop))->collect(c|c.oclAsType(Loop))->
        exists(1| 1.origTLoop->exists(t1, t2| t1.hasDivergentLevel <> t2.hasDivergentLevel))
    end
```

Figura 10: Regla OCL para el atributo isUnsafe de la clase Network

Para probar estas reglas, se instanció el modelo propuesto para representar las redes inseguras e inalcanzables que se introdujeron en la Figura 2. Esta tarea se llevó adelante con la herramienta USE [7]. Para ello, se realizó una descripción textual del modelo propuesto en la Figura 3.



Adicional a la definición de clases y relaciones, se añadieron expresiones OCL para el cálculo de los atributos derivados hasParallelLevel y hasDivergentLevel para las instancias de las clases Node y para el atributo derivado isUnsafe de la clase Network. Luego, se crearon sendos diagramas de objetos para representar las redes de la Figura 2.a y 2.b. En la Figura 11 se muestra el diagrama de objetos correspondiente a la red insegura mostrada en la Figura 2a.

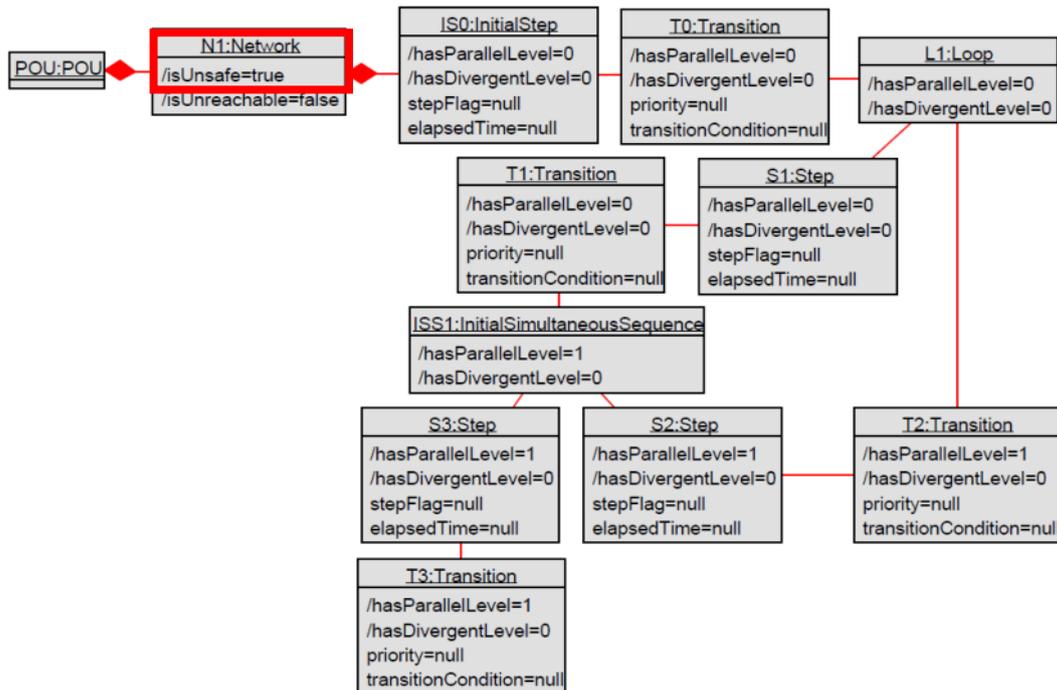


Figura 11: Implementación de Red insegura en USE

En la Figura 11 se puede apreciar como en la instancia N1 de la clase Network el atributo isUnsafe es evaluado True mediante las reglas creadas, dado que las instancias de la clase Transición T0 y T2 con las cuales está relacionada la instancia de Loop L1 tienen valores distintos para el atributo hasParallelLevel (0 para T0 y 1 para T2), lo cual indica que una transición que pertenece a una secuencia paralela, está haciendo un Loop por fuera de su secuencia. De igual forma se especificó el atributo isUnreachable para la clase Network, la cual evalúa TRUE si un Loop contiene un valor negativo para el atributo hasParallelLevel o para el atributo hasDivergentLevel (Figura 12). En la Figura 13 se muestra un ejemplo de este caso, en el cual el valor del atributo hasParallelLevel para la instancia L1 de la clase Loop es negativo. Un valor negativo en estos atributos indicaría que Pasos o Transiciones con distintos niveles de paralelismo o divergencia están convergiendo en un mismo punto, es decir, alguno de estos Pasos o Transiciones debió converger previamente y no lo hizo. A diferencia de la red insegura, la red inalcanzable nunca ejecuta el Loop.



```
class Network
attributes
    isUnreachable: Boolean    derive: self.control->select(c|c.ocIsTypeOf(Loop))->collect(c|c.ocIsType(Loop))->
                             exists(1| 1.hasParallelLevel <0 or 1.hasDivergentLevel<0)
end
```

Figura 12: Regla OCL para el atributo isUnreachable del concepto Network

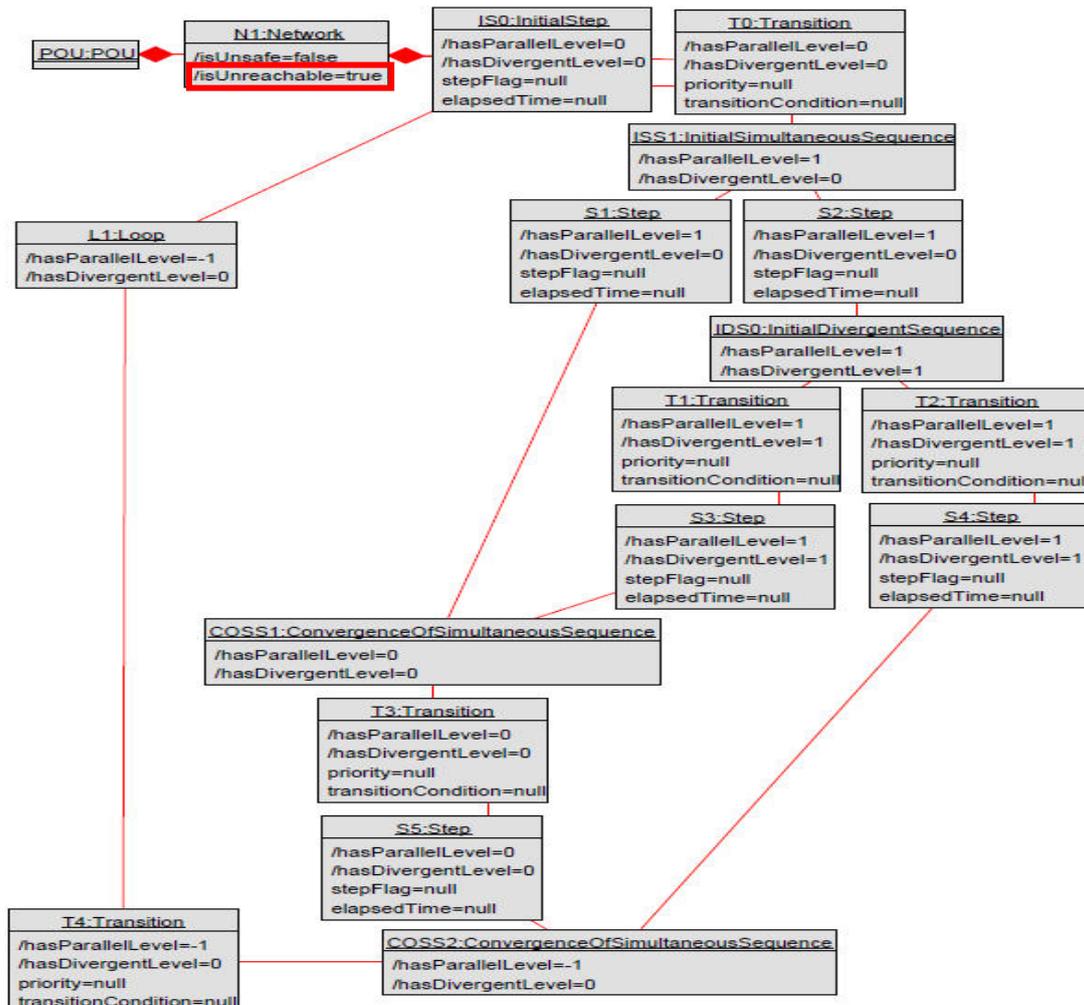


Figura 13: Implementación de Red Inalcanzable en USE

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se realizó un modelado conceptual en UML del lenguaje Sequential Function Chart y se analizaron las relaciones entre sus conceptos principales. La principal contribución de este trabajo es la formalización del lenguaje Sequential Function Chart mediante el establecimiento de reglas OCL que impidan la formulación de redes inseguras e inalcanzables y permitan su uso en la propuesta de un submodelo de AAS para la industria de procesos batch basado en el estándar ISA-88 y más específicamente, un submodelo que permita describir el procedimiento del proceso a nivel de fase. Como trabajo futuro, se espera poder implementar la



formalización del lenguaje Sequential Function Chart realizada en este trabajo como submodelo de un Asset Administration Shell usando alguna de las herramientas disponibles para tal fin.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento brindado por UTN (PID 8599).

## Referencias

- [1] D. Gollner, T. Pawlik, and T. Schulte, "Utilization of the Asset Administration Shell for the Generation of Dynamic Simulation Models," *2021 IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag. IEEM 2021*, pp. 808–812, 2021, doi: 10.1109/IEEM50564.2021.9673089.
- [2] A. Koulouris, N. Misailidis, and D. Petrides, "Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products," *Food Bioprod. Process.*, vol. 126, pp. 317–333, 2021, doi: 10.1016/j.fbp.2021.01.016.
- [3] S. Bader, E. Barnstedt, H. Bedenbender, M. Billman, B. Boss, and A. Braunmandl, "Details of the Asset Administration Shell Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of," vol. 0, p. 473, 2018.
- [4] ISA, *Batch Control, Part 1: Models and Terminology, ISA-88.01-1995 (R2006)*. 2006.
- [5] K. H. John and M. Tiegelkamp, *IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [6] G. Rumbaugh, J. Jacobson, I., & Booch, *The Unified Modeling Language Reference Manual*, vol. 53, no. 9. 201AD.
- [7] M. Gogolla, F. Büttner, and M. Richters, "USE: A UML-based specification environment for validating UML and OCL," *Sci. Comput. Program.*, vol. 69, no. 1–3, pp. 27–34, 2007, doi: 10.1016/j.scico.2007.01.013.
- [8] International Electrotechnical Commission (IEC) and (IEC), *Programming languages*, Document I. 2013.
- [9] J. H. Hang, W. P. Lee, and Y. M. Lim, "Towards Mass Individualized Production: RAMI 4.0 Asset Data Channelling for Manufacturing Value Chain Connectivity," *2021 3rd Int. Conf. Comput. Commun. Internet, ICCCI 2021*, vol. 0, pp. 225–231, 2021, doi: 10.1109/ICCCI51764.2021.9486787.
- [10] A. Koulouris, N. Misailidis, and D. Petrides, "Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products," *Food Bioprod. Process.*, vol. 126, pp. 317–333, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.fbp.2021.01.016.
- [11] P. Sapel *et al.*, "Towards digital shadows for production planning and control in injection

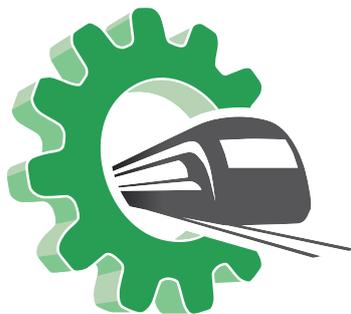


molding,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 38, no. August, pp. 243–251, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cirpj.2022.05.003.

- [12] R. Pairol-Fuentes, J. Alvarado-Domínguez, M. Vegetti, L. Roldán, and S. Gonnet, “Modelo para la digitalización de activos de la industria batch basado en el estándar ISA 88,” *Memorias Las JAIIO*, vol. 8, no. 13, pp. 33–46, 2022, [Online]. Available: <https://publicaciones.sadio.org.ar/index.php/JAIIO/article/view/316/263>.

Área Temática

# Mecatrónica y Automatización





## CONTROL POR MODOS DESLIZANTES CON COMPENSACIÓN DE LA HISTÉRESIS DE UN SISTEMA PARA POSICIONAMIENTOS DE ULTRA PRECISIÓN

**Alejandro Masante<sup>1,2</sup>, Rogelio Hecker<sup>1,2</sup>, Miguel Peña<sup>3</sup> y Marcelo Flores<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Pampa-CONICET

Calle 110 N° 390, General Pico, La Pampa, Argentina- [alejandromasante@gmail.com](mailto:alejandromasante@gmail.com).

<sup>2</sup>Grupo de Mecatrónica Aplicada, Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Pampa

Calle 110 N° 390, General Pico, La Pampa, Argentina- [hecker@ing.unlpam.edu.ar](mailto:hecker@ing.unlpam.edu.ar);

[gmflores@ing.unlpam.edu.ar](mailto:gmflores@ing.unlpam.edu.ar).

<sup>3</sup>Instituto de Automática - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan

Av. Libertador Gral. San Martín N°1102, Ciudad de San Juan, San Juan, Argentina-

[mpena@inaut.unsj.edu.ar](mailto:mpena@inaut.unsj.edu.ar).

### RESUMEN

Los dispositivos de posicionamientos de ultra precisión son una parte principal de los sistemas de fabricación y/o manipulación en áreas tales como nanotecnología, biotecnología, microfabricación, entre otras. Una manera efectiva de lograr desplazamientos con resoluciones submicrométricas se consigue mediante la utilización de sistemas flexibles accionados por piezoeléctricos. Si bien a partir de este mecanismo de actuación se consiguen elevadas resoluciones en el posicionado, estos sistemas presentan fenómenos vibratorios y no lineales que pueden llegar a degradar significativamente el desempeño del sistema controlado.

En este trabajo se presenta una ley de control por modos deslizantes diseñada para comandar un sistema de ultra precisión de estructura flexible accionado por piezoeléctrico. El algoritmo de control se establece a partir de un modelo de segundo orden tendiente a caracterizar la dinámica de alta frecuencia del sistema, en el cual se contempla el fenómeno no lineal de la histéresis por medio del modelo Bouc-Wen. A los efectos de suplir el *chattering*, se considera un observador de las perturbaciones cuasiestáticas y se utiliza una función de tipo saturación en el término robusto de la ley de control. El desempeño del sistema controlado se evaluó experimentalmente, obteniéndose un error menor al 3% al considerar como entrada de referencia una señal multifrecuencial de amplitud máxima de 42  $\mu\text{m}$ .

**Palabras Clave:** *Ultra Precisión; Control por Modo Deslizante; Histéresis; Piezoeléctrico*



## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas áreas de la ciencia y la tecnología requieren de sistemas de posicionamiento capaces de efectuar recorridos de algunos micrómetros con resoluciones nanométricas, tales como la microfabricación, microscopía, nanotecnología, entre otras. Una manera efectiva de lograr pequeños desplazamientos se logra mediante la deformación elástica de un mecanismo flexible de rigidez conocida, accionado por piezoeléctricos [1]. Estos dispositivos permiten eliminar los problemas de la fricción y del juego mecánico, garantizando una mayor precisión en el guiado.

A pesar de las ventajas mencionadas, los sistemas de ultra precisión accionados por piezoeléctricos presentan fenómenos que degradan los lazos de control, tales como la resonancia mecánica, notoria en aplicaciones que involucran desarrollar elevadas velocidades de accionamiento, y no linealidades, tales como la histéresis y el *creep* [2]. La histéresis en estos sistemas resulta ser un fenómeno que se encuentra presente en todo el rango de actuación del sistema, capaz de generar errores de posición de hasta el 15% del desplazamiento máximo del actuador. Por su parte, el fenómeno del *creep* se evidencia como la variación lenta de la posición luego de aplicar en bornes del piezoeléctrico un valor de tensión eléctrica constante. Atendiendo a esto, resulta indispensable el correcto diseño de una etapa de control sobre estos sistemas para garantizar un correcto desempeño de los mismos.

En la literatura, pueden encontrarse distintas estrategias de control a ser aplicadas sobre este tipo de sistemas. Un algoritmo de control que ha llamado la atención de los investigadores en estos últimos años resulta ser el control por modos deslizantes (*Sliding Mode Control* - SMC, por sus siglas en inglés-) [3]. Resumidamente, en los algoritmos de control por modos deslizantes se diseña una superficie de deslizamiento a partir de la dinámica del error de la variable a ser controlada, y por medio de la ley de control se busca generar acciones de control tales que garanticen alcanzar la superficie de deslizamiento desde cualquier estado inicial del sistema, y luego deslizarse sobre la misma puesto que dicha superficie garantiza un desempeño deseado para el sistema controlado. Si bien a partir de los algoritmos SMC es posible dotar a los sistemas controlados de suficiente robustez para poder lidiar con incertidumbres estructurales o paramétricas y eventuales perturbaciones que puedan incidir sobre ellos, estas estrategias de control generan fenómenos vibratorios de alta frecuencia, denominado efecto *chattering*, en aplicaciones prácticas [4]. El *chattering* surge de la imposibilidad del actuador en efectuar conmutaciones de muy alta frecuencia (en teoría infinitas), solicitado por el término robusto de la ley SMC. Este fenómeno indeseado se hace más notorio al especificar una ganancia de conmutación elevada en el término robusto, la cual debe ajustarse en función de una cota superior de las perturbaciones incidentes sobre el sistema a los efectos de garantizar la estabilidad del sistema controlado.



Atendiendo a los mencionado anteriormente, comúnmente se utiliza alguna compensación de la histéresis en los sistemas accionados por piezoeléctrico a través de algoritmos SMC. Para modelar y lograr suplir este fenómeno no lineal, en la literatura pueden encontrarse distintos modelos de histéresis, tales como el Maxwell-slip, Preisach, Bouc-Wen, entre otros [5]. Adicionalmente, en los algoritmos SMC usualmente se incorporan términos adaptivos a los efectos de aminorar las incertidumbres derivadas de dinámicas mal contempladas o no modeladas.

En este trabajo se presenta una estrategia de control por modo deslizante para ser aplicada en un sistema de ultra precisión experimental, tipo *flexure-stage*, accionado por piezoeléctrico. En la descripción del controlador se considera un término tendiente a contrarrestar el fenómeno de la histéresis diseñado a partir del modelo Bouc-Wen. Además, a los efectos de suplir el *chattering*, se incorpora un término destinado a compensar las perturbaciones cuasiestáticas que puedan incidir sobre el sistema y se utiliza una función tipo saturación en el término robusto de la ley de control. El trabajo se continúa de la siguiente manera: En una primera instancia se presenta el sistema experimental sobre el cual se aplica el algoritmo de control aquí desarrollado; Luego se presenta un modelo dinámico de estos sistemas; Seguidamente se expone el algoritmo SMC basado en modelo; Posteriormente se exhibe la identificación de los parámetros del modelo del sistema y se presentan los resultados experimentales al considerar la estrategia de control desarrollada. Finalmente se exponen las conclusiones.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPAMIENTO

El posicionador experimental de un grado de libertad considerado en esta publicación, se compone de un sistema flexible de tipo brazo palanca capaz de amplificar los desplazamientos del actuador piezoeléctrico, el cual este último se halla montado sobre el mismo sistema flexible, como se observa en la Figura 1. El actuador, de la marca Thorlabs modelo PK4FYC2 es alimentado por medio de un amplificador de tensión PI 617.001 con entrada de 0 V a 10 V y salida de 0 V a 100 V. Para medir los desplazamientos se dispone de un sensor capacitivo y de su correspondiente módulo acondicionador de señal modelo E-852.10 PI con un nivel de ruido de 5 nm (rms) y un ancho de banda de 10 kHz. Para la implementación de algoritmos de control y registro de señales se cuenta con un módulo adquisidor de datos Ueisim 600-1G Cube, el cual puede ejecutar modelos de Matlab-Simulink de lectura/escritura de las entradas/salidas físicas que dispone, capaz de operar en tiempo real con una frecuencia de muestreo de 5 kHz. Cabe señalar que, el sistema posee un desplazamiento de 0-48  $\mu\text{m}$  para el rango de tensión de entrada de 0-10 V.

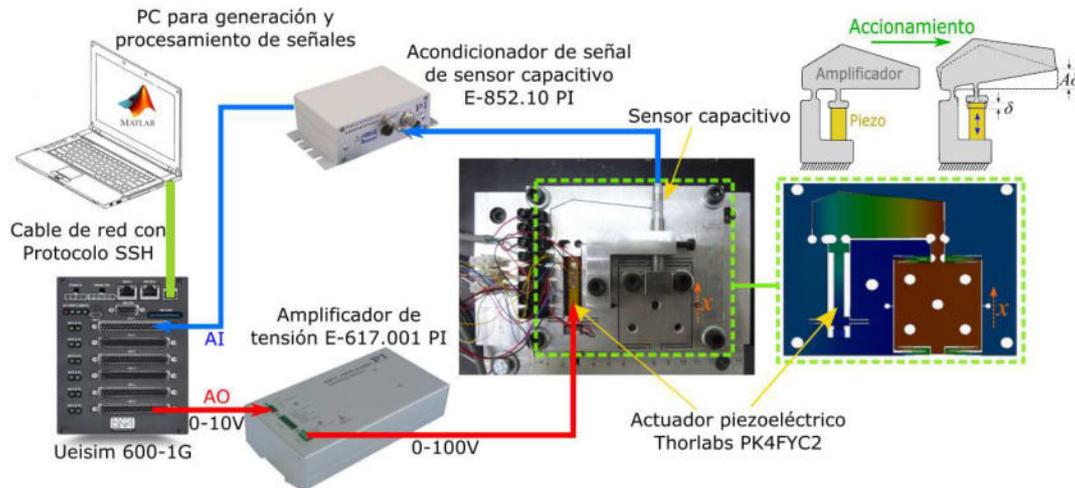


Figura 1: Equipamiento del sistema experimental accionado por piezoeléctrico de un grado de libertad considerado en esta publicación.

### 3. MODELO DE SISTEMA

Generalmente, la dinámica de estos dispositivos se describe a partir de un sistema masa-resorte en el cual se incorpora el fenómeno no lineal de la histéresis [6]. Atendiendo a esto, en la Figura 2 se muestra el modelo representativo para el sistema de ultra precisión considerado en esta publicación. En el modelo de la Figura 2,  $m_e$  es la masa equivalente a ser desplazada,  $k_f$  y  $c_f$  la rigidez y el coeficiente de fricción viscosa, respectivamente, del sistema de guiado de la estructura flexible en la dirección de actuación del sistema;  $k_a$  y  $c_a$  la rigidez y el coeficiente de fricción viscosa, respectivamente, del actuador; y  $F_a(t)$  la fuerza de accionamiento ejercida por el actuador, proporcional a la tensión eléctrica de entrada  $u(t)$ , por medio de la cual se consiguen los desplazamientos en el sistema.

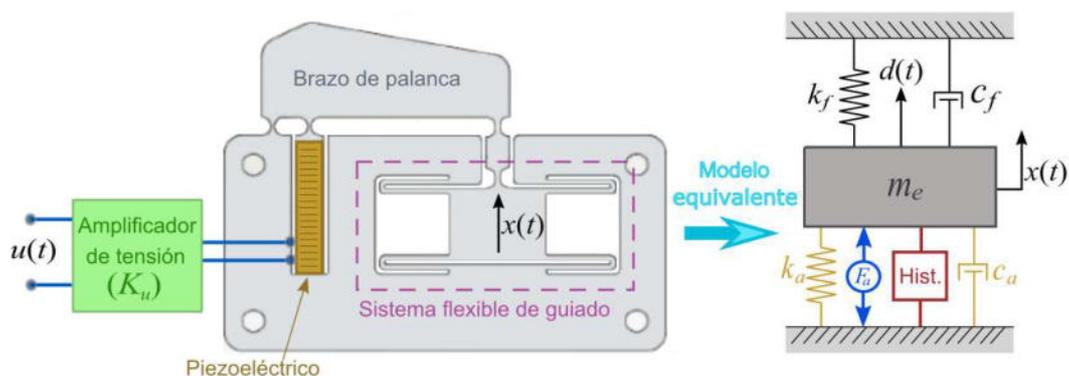


Figura 2: Modelo masa-resorte del sistema mecánico.



En este trabajo, la descripción del fenómeno de histéresis se establece a partir del Modelo Bouc-Wen con la consideración del valor  $n = 1$  para el parámetro referido a las transiciones entre la respuesta elástica y plástica de dicho modelo [6]. Luego, atendiendo al modelo dinámico del sistema representado en la Figura 2 y al tratamiento de la histéresis a partir del modelo Bouc-Wen, la descripción dinámica del sistema puede expresarse como

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = (K_u\omega_n^2)u(t) - (\zeta\omega_n^2)h(t) + d(t) \quad (1)$$

$$\dot{h}(t) = \alpha\dot{x}(t) - \beta|\dot{x}(t)|h(t) - \gamma\dot{x}(t)|h(t)| \quad (2)$$

donde la variable  $x(t)$  representa la posición (variable a ser controlada),  $u(t)$  la acción de control (tensión eléctrica de entrada),  $h(t)$  la variable asociada al fenómeno de histéresis y  $d(t)$  el término referido a las perturbaciones y dinámicas no contempladas, tales como dinámicas de mayor orden y el efecto *creep*. El parámetro  $\omega_n = \sqrt{(k_f + k_a)/m_e}$  está asociado a la frecuencia de resonancia del primer modo de vibración en la dirección de accionamiento del sistema,  $\zeta = (c_f + c_a)/2\sqrt{m_e(k_f + k_a)}$  es el factor de amortiguamiento del sistema,  $\zeta$  una constante asociada con el fenómeno de histéresis y  $K_u$  la ganancia de conversión que multiplica a la señal de entrada  $u(t)$  y que interviene en el acoplamiento electromecánico del sistema. Los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  de la Ecuación (2) del modelo Bouc-Wen definen la forma y orientación de los ciclos de histéresis, donde se debe verificar que  $\alpha > 0$ ,  $|\gamma| < \beta$ , con  $\beta > 0$ , para garantizar que el modelo del sistema sea estable para cualquier condición inicial  $h(0) \in \mathbb{R}$  y disipativo (para detalles de la demostración, se puede consultar [7]).

#### 4. DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL SMC

En esta sección se presenta el diseño de una estrategia SMC basada en el modelo del sistema que se pretende controlar. Para el desarrollo de la ley de control, se considera la descripción dinámica del sistema dada por las Ecuaciones (1) y (2), en el cual se ha contemplado un término de perturbaciones  $d(t)$  el cual deberá ser compensado por el algoritmo de control propuesto. Para el diseño del algoritmo de control, se asumirá que el término de perturbaciones permanece acotado en el tiempo. Sin pérdida de generalidad, se considera al término de perturbaciones como  $d(t) = d_s + d_d(t)$ , es decir como suma de un término estático y otro dinámico (variante en



el tiempo), asumiendo que  $d_{s-} \leq d_s \leq d_{s+}$  y  $|d_d(t)| \leq \bar{D} \quad \forall t \in [0, \infty)$ . A partir de esta consideración sobre el tratamiento de las perturbaciones, empleando el algoritmo propuesto en [8] se diseña un compensador para las perturbaciones de baja frecuencia (perturbaciones cuasiestáticas). Cabe señalar que este compensador tiene como objetivo reducir la ganancia de conmutación del término robusto de la ley de control, necesaria para garantizar la estabilidad del sistema controlado. Luego, una ganancia menor en el término robusto previene el efecto del *chattering*. Para eliminar completamente este fenómeno vibratorio indeseado, comúnmente se reemplaza la función signo del término robusto del algoritmo SMC por una función que garantice conmutaciones suaves en la señal de control.

En lo que sigue de este trabajo, se considerará el error de posición como  $e(t) = x(t) - x_r(t)$ , siendo  $x_r(t)$  la señal de referencia referida a posición. Para la definición del algoritmo SMC, se define la superficie de deslizamiento como  $s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t)$ , donde  $\lambda > 0$  es un parámetro de diseño. Se hace notar que, en la condición "ideal" de deslizamiento, garantizar estar sobre la superficie  $s(t) = 0 \quad \forall t \in [t_s, \infty)$ , siendo  $t_s$  un valor de tiempo (finito), asegura una dinámica del error tal que  $e(t) = e(t_s) \exp(-\lambda(t-t_s)) \quad \forall t \in [t_s, \infty)$ , es decir, el error tenderá a cero exponencialmente a partir del instante de tiempo  $t_s$  en el que se alcance la superficie. Luego, se define la acción de control como

$$u(t) = \frac{1}{K_u \omega_n^2} \left[ 2\zeta \omega_n \dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) - \lambda \dot{e}(t) + \zeta \omega_n^2 h(t) + \ddot{x}_r(t) - k_p s(t) - \hat{d}_s(t) - \Gamma \cdot \text{sat}(s(t)) \right] \quad (3)$$

$$\hat{d}_s(t) = \int_0^t \eta \kappa s(\tau) d\tau, \quad \text{con } \kappa = \begin{cases} 0, & \text{si } \hat{d}_s \leq d_{s-} \text{ y } s(t) \leq 0 \\ 0, & \text{si } \hat{d}_s \geq d_{s+} \text{ y } s(t) \geq 0 \\ 1, & \text{otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{sat}(s(t)) = \begin{cases} \text{sgn}(s(t)), & \text{si } |s(t)| \geq \phi \\ \frac{s(t)}{\phi}, & \text{si } |s(t)| < \phi \end{cases} \quad (5)$$

donde  $k_p, \eta > 0$  son parámetros de diseño referidos a la velocidad de convergencia hacia la superficie de deslizamiento y a la velocidad de adaptabilidad del término estimado de las perturbaciones, respectivamente. El parámetro  $\phi > 0$  en la definición de la función saturación sirve para suplir el fenómeno del *chattering*, debiéndose ajustar lo más pequeño posible a los efectos de aminorar el error de la variable que se está controlando. En la Ecuación (4), el parámetro  $\kappa$  tiene como objetivo mantener acotada en el tiempo la variable estimada. Esto se

debe a que la Ecuación (4) incluye la integración de la variable  $s(t)$ , la cual no puede asegurarse que sea nula a partir de un instante de tiempo finito debido a la presencia de una función de conmutación continua en el término robusto. Para garantizar la estabilidad del sistema, se debe seleccionar la ganancia del término robusto tal que  $\Gamma > \bar{D}$ . El análisis de estabilidad de este tipo de algoritmo SMC con función de conmutación  $\text{sat}(\bullet)$  puede consultarse en [8,9]. En la Figura 3 se muestra un esquema representativo en diagrama de bloques del controlador propuesto.

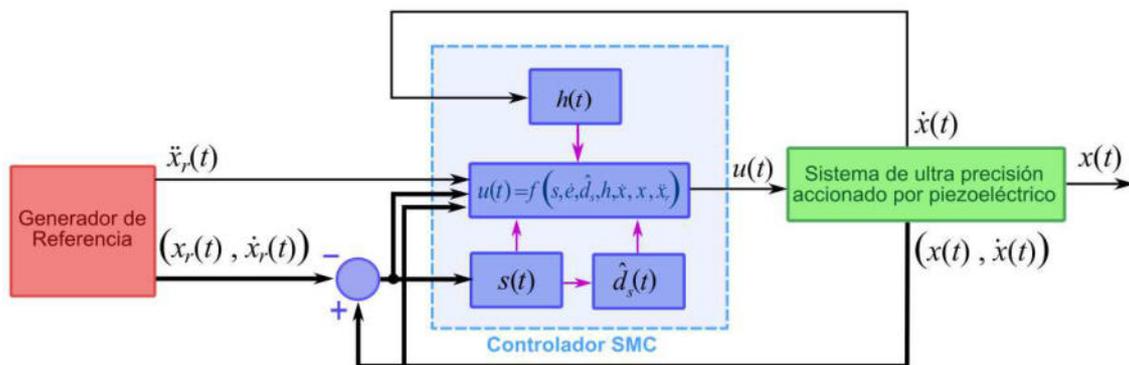


Figura 3: Esquema representativo en diagrama de bloques del algoritmo SMC propuesto.

Cabe señalar que, los parámetros del controlador aquí presentado deben ajustarse mediante prueba y error hasta conseguir un desempeño del sistema controlado acorde a lo deseado, surgiendo así una relación de compromiso entre precisión y robustez en el sistema controlado.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se muestran los resultados de identificación de los parámetros del modelo descrito en la Sección 2 para el sistema experimental señalado en este trabajo, como así también los resultados experimentales al considerar la ley SMC establecida en la Sección 4.

### 5.1.1. Identificación de los parámetros del modelo de histéresis

Atendiendo a que la descripción dinámica del sistema, dada por la Ecuación (1) y (2), se ha especificado como una dinámica lineal de segundo orden con el agregado de un término no lineal asociado al fenómeno de la histéresis, se procedió a identificar ambas partes del modelo, lineal y no lineal, de manera separada siguiendo la metodología propuesta en [10]. En más detalle, la metodología de identificación adoptada propone estimar los parámetros del modelo de histéresis

mediante pruebas a baja frecuencia, donde la incidencia de la dinámica de alta frecuencia resulta insignificante, e identificar la dinámica vibracional a partir de ensayos que permitan despreciar el fenómeno de histéresis. Luego, asumiendo que no existen perturbaciones en el sistema, de la Ecuación (1) y (2) se deduce que  $x(t) \approx K_u u(t) - \zeta h(t)$ . Con lo cual, utilizando una señal de entrada  $u(t)$  de baja frecuencia, a través de los datos experimentales  $(u(t), x(t))$  pueden hallarse los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $K_u$  y  $\zeta$  del modelo.

Para la identificación, se consideró una señal de voltaje oscilatoria con frecuencia de 1 Hz y amplitud decreciente en el tiempo, a partir de la cual se logren realizar exploraciones en todo el rango de actuación del sistema. Para el relevamiento de los datos se estableció una frecuencia de muestreo de 1 kHz. Luego, en *Matlab-Simulink*<sup>®</sup> se construyó el diagrama en bloques del modelo Bouc-Wen y se procedió a identificar los parámetros mediante la herramienta de optimización dispuesta en el mismo entorno de simulación. Para la identificación, se especificó como objetivo la minimización del funcional definido como la suma de los errores cuadráticos, calculados como la diferencia entre la salida del sistema experimental y del modelo, realizando la búsqueda de los valores óptimos mediante el algoritmo *Trust Region Reflective* ofrecido en *Simulink*. Del proceso de identificación se obtuvo  $\alpha = 0,376$ ,  $\beta = 0,453$ ,  $\gamma = -0,281$ ,  $\zeta = 1$  y  $K_u = 4,908$  [ $\mu\text{m}/\text{V}$ ]. En la Figura 4 se muestra el ajuste logrado con los parámetros hallados, en donde el error resultó de 0,51  $\mu\text{m}$  (rms) con valor máximo absoluto de 1,24  $\mu\text{m}$ .

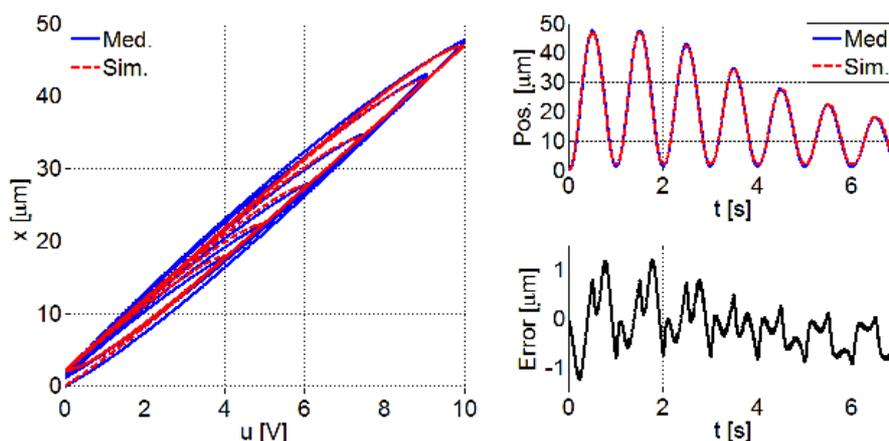


Figura 4: Ciclo de histéresis del sistema relevado y del modelo Bouc-Wen identificado.

### 5.1.2. Identificación de los parámetros de la dinámica vibracional

Para la identificación de la parte lineal del modelo, asociada con la respuesta en frecuencia (dinámica vibracional) del sistema, se especificó una señal de tensión eléctrica con frecuencia

variante en el tiempo de muy baja amplitud a los efectos de poder desprejciar el fenómeno de la histéresis, según la metodología de identificación señalada previamente en la sección anterior. Atendiendo a esto, la señal de entrada se estableció de tipo Chirp con una amplitud de  $0,2 V_{pp}$  y valor medio de  $2 V$ , estableciendo un incremento lineal en la frecuencia desde  $1 \text{ Hz}$  hasta  $1000 \text{ Hz}$ . Para este proceso de identificación, se estableció una frecuencia de muestreo de  $5 \text{ kHz}$  para un correcto relevamiento de las señales. Las señales obtenidas tanto de entrada como de salida fueron ingresadas como datos dentro del *Toolbox* de Identificación de Sistemas ofrecido en Matlab®, estableciendo el ajuste atendiendo a la respuesta en frecuencia de un modelo lineal de segundo orden, obteniéndose los parámetros  $\zeta = 0.0082$  y  $\omega_n = 2\pi f_n$ , con  $f_n = 497 \text{ Hz}$  involucrados en el modelo de sistema dado por la Ecuación (1). En la Figura 6 se compara la respuesta en frecuencia estimada del sistema empleando un análisis espectral de la señal obtenida con la del modelo hallado, en donde se puede observar que el modelo dinámico de segundo orden logra capturar adecuadamente la dinámica vibracional del sistema hasta el primer modo de vibración.

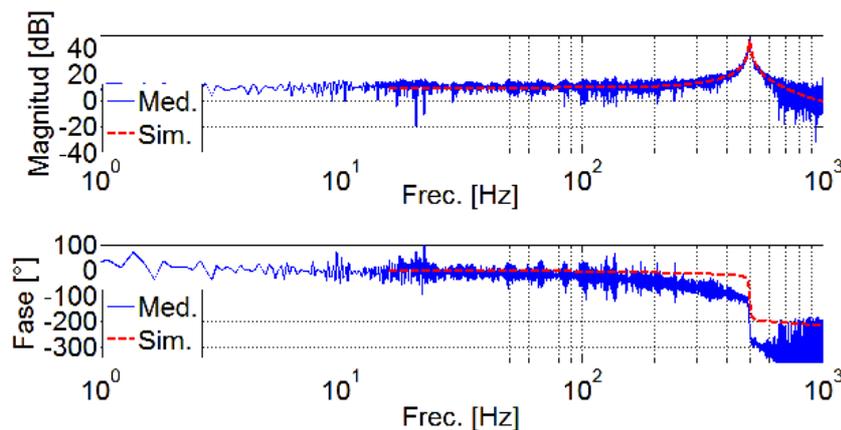


Figura 6: Comparación entre la respuesta en frecuencia del modelo lineal de segundo orden y la estimada a partir del análisis espectral de la señal obtenida.

### 5.1.3. Validación del modelo de sistema hallado

Con el objetivo de validar el modelo del sistema, se procedió a comparar la salida del sistema experimental con la salida del modelo empleando los parámetros hallados, considerando una señal de entrada diferente a las utilizadas en el proceso de identificación. En la Figura 7 se muestra el ajuste de la salida del modelo con los datos experimentales al considerar una entrada de tensión multifrecuencial, en donde se obtuvo un error de posición de  $0,61 \mu\text{m}$  (rms) y un error máximo absoluto de  $1,53 \mu\text{m}$ .

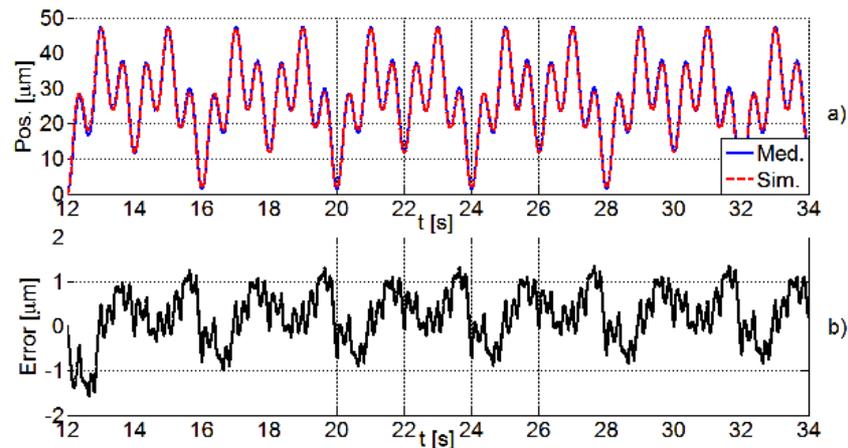


Figura 7: Validación del modelo de sistema hallado. a) Señal temporal referida a posición. b) Señal error entre la posición del sistema experimental y la del modelo.

Los errores observados en la Figura 7 se atribuyen a simplificaciones que se han adoptado en lo que respecta al modelado del sistema, tales como la omisión de la dinámica eléctrica del sistema y del fenómeno *creep*, además del hecho de considerar al fenómeno de histéresis a partir de un modelo simétrico, como es el Bouc-Wen, en donde es sabido que los ciclos de histéresis en estos sistemas presentan cierta asimetría entre la curva de ascenso y descenso; entre otras cuestiones que puedan incidir en el comportamiento dinámico del sistema en consideración. Luego, estos errores deberán ser compensados por el controlador robusto aquí diseñado para lograr el objetivo de control deseado.

## 5.2. Resultados del sistema controlado

Para evaluar las bondades del algoritmo de control propuesto, se procedió a realizar pruebas experimentales de regulación como de seguimiento de trayectorias. Para todas las pruebas efectuadas, se ajustaron los parámetros de la ley SMC establecida a partir de las Ecuaciones (3)-(5) con los valores  $\eta = 2 \cdot w_n^2$ ,  $k_p = 10^{-5} \cdot w_n^2$ ,  $\Gamma = 3 \cdot w_n^2$ ,  $d_{s+} = 10 \cdot w_n^2$ ,  $d_{s-} = -10 \cdot w_n^2$ ,  $\lambda = 226$  y  $\phi = 1500$ . Puesto que, en la ley de control de la Ecuación (3) se requiere de la velocidad del sistema, la misma se estima por medio del filtro de velocidad discreto propuesto en [8], estableciendo una frecuencia de muestreo para la adquisición de datos de 5 kHz.

En una primera instancia se consideró el problema de regulación, proponiendo una señal tal que solicitara llevar al sistema desde la posición inicial cero hasta la posición final de  $x_r = 3 \mu\text{m}$  con

perfil de trayectoria tipo “S” de baja velocidad, para luego mantener la posición del sistema en este último valor de referencia. En la Figura 8.a) se muestra el desempeño logrado para la señal de referencia anteriormente mencionada, en donde el error de posición resultó de 0,005  $\mu\text{m}$  (rms) con un error máximo absoluto de 0,03  $\mu\text{m}$ . Para evaluar el desempeño del sistema controlado al considerar el seguimiento de trayectorias que impliquen una elevada velocidad de accionamiento y grandes exploraciones, se propuso una señal de referencia multifrecuencial definida como

$$x_r(t) = 8\sin(2\pi \cdot 1 \cdot t) + 3\sin(2\pi \cdot 2,5 \cdot t) + 4\sin(2\pi \cdot 11 \cdot t) + 1\sin(2\pi \cdot 15,5 \cdot t) + 19 \mu\text{m}, \quad (6)$$

consiguiéndose los resultados mostrados en la Figura 8.b), en donde el error fue de 0,25  $\mu\text{m}$  (rms) con un valor máximo absoluto de 0,98  $\mu\text{m}$ .

Cabe señalar que la variable estimada  $\hat{d}_s(t)$  utilizada para la compensación de las perturbaciones cuasiestáticas, permaneció acotada sin llegar a la saturación, como puede apreciarse en las gráficas de la última fila de la Figura 8. Por su parte, en la prueba de regulación se observa que la misma continua modificándose a pesar de que la posición final del sistema se encuentra en torno a un valor constante, lo cual se asocia con la presencia del efecto *creep* considerado como parte de las perturbaciones incidentes en el sistema.

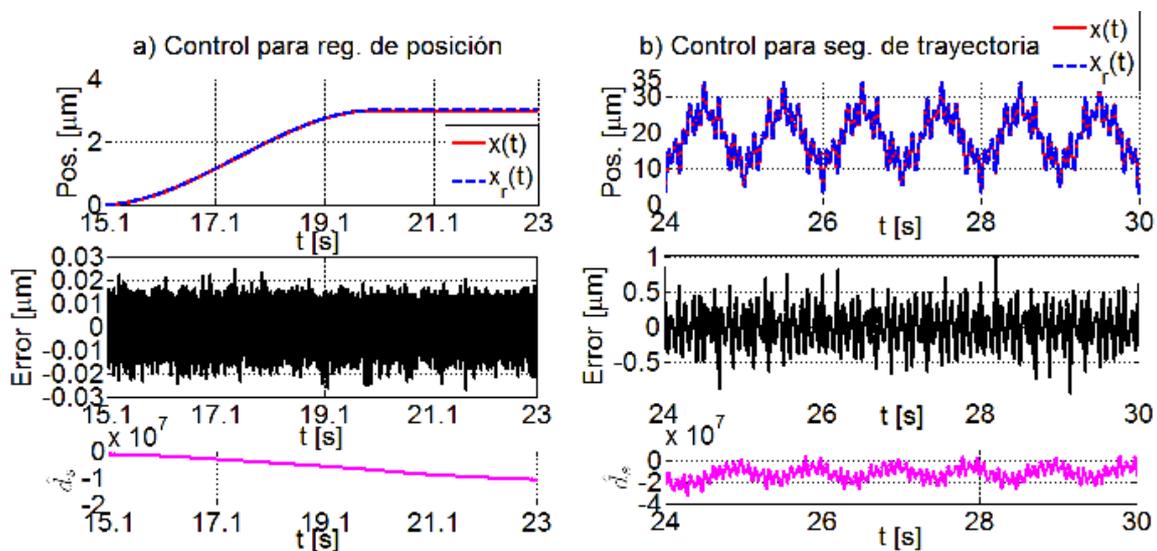


Figura 8: Resultados experimentales del algoritmo SMC presentado. a) Columna referida al ensayo de regulación. b) Columna referida al ensayo de seguimiento de trayectoria.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un control por modo deslizante para ser aplicado en un sistema de ultra precisión de estructura flexible accionado por piezoeléctrico. El algoritmo de control se



estableció a partir de un modelo dinámico de segundo orden con la consideración del fenómeno de la histéresis a partir del modelo Bouc-Wen, con el agregado de una compensación de las perturbaciones cuasiestáticas. De las pruebas realizadas, se pudo constatar que el sistema experimental controlado consigue alcanzar posicionamientos con errores máximos de  $0,03 \mu\text{m}$  al considerar problema de regulación del sistema con movimientos de muy baja velocidad. En lo que respecta al control de seguimiento de trayectoria, se han evidenciado errores menores al 3% del recorrido máximo solicitado al considerar como entrada de referencia una señal multifrecuencial con amplitud máxima de  $42 \mu\text{m}$  y frecuencia de hasta 15,5 Hz.

Cabe señalar que los resultados experimentales obtenidos, tanto en lo referido al problema de regulación como de seguimiento de trayectoria, resultan significativos respecto a la precisión comúnmente requerida en sistemas de microfabricación y manipulación biológica, entre otras aplicaciones prácticas. Como trabajos futuros se pretende evaluar este tipo de algoritmos en el control de sistemas duales de actuación para macro / micro posicionamientos de ultra precisión.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Ru C., Liu X. and Sun Y. *Nanopositioning Technologies – Fundamentals and Applications*. Springer, Switzerland, 2016.
- [2] Moheimani S. *Invited review article: Accurate and fast nanopositioning with piezoelectric tube scanners: Emerging trends and future challenges*. AIP, Review of Scientific Instruments: Accurate and fast nanopositioning, Vol. 79, 2008.
- [3] Xu Q. and Tan K. *Advanced Control of Piezoelectric micro-/Nano-Positioning Systems*. Springer, Switzerland, 2016.
- [4] Lee H. and Vadim U. *Chattering suppression methods in sliding mode control systems*. Annual reviews in control, Vol. 31, Pág. 179-188, 2007.
- [5] Gan J. and Zhang X. *A review of nonlinear hysteresis modeling and control of piezoelectric actuators*. AIP Advances, Vol. 9, 2019.
- [6] Bellmunt O., Ikhouane F. and Miracle D. *Control of a piezoelectric actuator considering hysteresis*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 326, Pág. 383-399, 2009.
- [7] Ikhouane F., Mañosa V. and Rodellar J. *Dynamic properties of the hysteretic Bouc-Wen model*. Systems & control letters, Vol. 56, Pág. 197-205, 2007.
- [8] Altintas Y, Erkorkmaz K. and Zhu W. *Sliding mode controller design for high speed feed drives*. CIRP Annals, 49(1): 265–270, 2000.
- [9] Tayouri S., Alem S., Izadi I., Ghaisari J. and Sheikholeslam F. *Chattering-free PD sliding mode control of piezoelectric actuators with hysteresis*. 27<sup>th</sup> Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), IEEE, Pág. 1064-1069, 2019, Iranian.
- [10] Gu G., Li C., Zhu L. and Su C. *Modeling and identification of piezoelectric-actuated stages cascading hysteresis nonlinearity with linear dynamics*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, Pág. 1792-1797, 2015.



## REACONDICIONAMIENTO DE UN EQUIPO DE ENSAYOS DE MATERIALES

Maximiliano Paiva <sup>1</sup>, Miguel Céspedes <sup>1</sup>, Juan Ríos <sup>1</sup>, Eduardo Asta <sup>1</sup>, Juan Balderrama<sup>1</sup> y Francisco Cambiasso<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación Mecánica de la Fractura – UTN Facultad Regional Haedo  
París 532, Haedo, Buenos Aires, Argentina- paiva.maximiliano@gmail.com;  
mcespedes97@gmail.com; jcrios@frh.utn.edu.ar; asta.eduardo@gmail.com;  
balderra@cnea.gov.ar; ingcamb@yahoo.com.ar

### RESUMEN

La utilización de máquinas universales de ensayos son herramientas fundamentales de un laboratorio de ensayo de materiales, tanto para tareas de I+D+i como para la actividad académica de grado y posgrado. En consecuencia, en este trabajo se presenta el reacondicionamiento completo de una antigua máquina de ensayos a tornillo Zwick Type 114W, en el cual han participado de manera activa becarios de la Facultad. Se ha implementado y calibrado un sistema de medición de las variables carga-desplazamiento, así como la incorporación de un control electrónico de velocidad del tornillo. Por su parte, se ha desarrollado e implementado un sistema, dispositivos y programa de adquisición de datos (DAQ), con registro en tiempo real de las variables de ensayo, utilizando un software específico. Se han diseñado y fabricado mordazas específicas que permite realizar los ensayos mecánicos y de tenacidad a la fractura con probetas de pequeño tamaño y secciones delgadas, tanto para materiales metálicos como no metálicos y ajustando dichos ensayos a las diferentes normas aplicables. El trabajo no solo ha posibilitado poner en valor un equipo obsoleto, sino materializar una herramienta de caracterización de materiales y uso didáctico, particularmente orientada a materiales utilizados en impresión 3D.

**Palabras Clave:** *Materiales; Ensayos; Tratamiento de datos; Fractura; Tracción.*



## 1. INTRODUCCIÓN

En el estudio de la ingeniería mecánica y en particular en el diseño de estructuras, componentes y maquinarias es de suma importancia conocer cómo responden los materiales frente a las acciones o cargas aplicadas, con la finalidad de establecer los límites estructurales para la vida de diseño o vida útil prevista. También, dicho conocimiento permite llevar a cabo una selección óptima para los requerimientos de servicio del diseño. Para tal fin se hace necesario conocer las propiedades mecánicas de cada material, las cuales se determinan realizando ensayos bajo condiciones estandarizadas, en laboratorios de ensayos de materiales.

En consecuencia, un ensayo básico muy utilizado es el ensayo de tracción que consiste en someter una probeta a una tensión de tracción generalmente hasta la rotura con la finalidad de definir las propiedades mecánicas tales como la resistencia a la tracción ( $R_m$ ), el límite elástico convencional ( $R_p$ ), el límite de fluencia ( $R_e$ ), el alargamiento porcentual de rotura ( $A$ ), entre otros, que caracterizan a un determinado material. La metodología de ensayos consiste en aplicar una fuerza, que se denomina carga, donde básicamente se obtiene un registro carga-desplazamiento o tensión-deformación se mide la resistencia del material a esta carga mediante esfuerzos [1-3].

Por su parte, la aplicación del diseño avanzado de estructuras, así como el análisis de integridad estructural o de aptitud para el servicio, requiere del conocimiento de otras propiedades de los materiales. En tal sentido la tenacidad del material y de manera más específica la tenacidad a la fractura constituye una propiedad mecánica básica y fundamental para poder realizar tal diseño o metodología de análisis [4-5]. La caracterización de la tenacidad a la fractura de un material se realiza por medio de técnicas de ensayo normalizadas con el propósito de determinar los parámetros característicos de esa propiedad mecánica, tales como  $K_{Ic}$ , Integral J, CTOD, curva J-R [6]. Estos ensayos normalizados [7] requieren también de un registro básico carga-desplazamiento de la aplicación de la carga, a partir del cual se calculan los parámetros de tenacidad a la fractura.

En consecuencia, en este trabajo se presenta el reacondicionamiento completo de una antigua máquina de ensayos a tornillo Zwick Type 114W que permite realizar los ensayos mecánicos y de tenacidad a la fractura con probetas de pequeño tamaño y secciones delgadas, tanto para materiales metálicos como no metálicos y ajustando dichos ensayos a las diferentes normas aplicables.

## 2. METODOLOGÍA DE REACONDICIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS

La máquina de ensayos a tornillo Zwick Type 114W para tracción -compresión, con una capacidad máxima de carga de 10 kN, trabaja con un motor trifásico y produce el desplazamiento



del cabezal a través de un tornillo. A esta máquina se le implementaron una celda de carga y un LVDT para reemplazar obsoletos sistemas mecánicos de determinación la carga y desplazamiento que originalmente poseía la máquina. Para controlar con precisión el motor trifásico que mueve el tornillo se colocó un variador de velocidad que realiza el control por frecuencia. Para la obtención o adquisición de los datos de ensayo se instaló un adquisidor analógico-digital (DAQ) y se ha desarrollado un programa específico, por medio software LabView, para del registro carga-desplazamiento en tiempo real y a la vez de tener guardados los datos de los ensayos en archivo para su posterior procesamiento y cálculo de los parámetros de ensayo específicos. El reacondicionamiento del equipo tanto para ensayos de tracción-compresión como de tenacidad a la fractura ha requerido el diseño y fabricación de mordazas que pudieran de manera simple utilizar probetas estándar de ensayo, básicamente para espesores delgados. Este último aspecto permite que en el equipo se puedan ensayar distintos materiales, tanto metálicos como no metálicos, con secciones efectivas de probetas que no excedan la capacidad de carga máxima de la máquina.

## 2.1. Celda de carga

El primer paso de la adaptación fue la implementación de una celda de carga para sustituir el sistema mecánico del equipo. La celda de carga utilizada es del tipo S (Flexar, modelo CZI-1000) para tracción- compresión con una capacidad de 10 kN, la cual se montó junto a un indicador Flexar modelo LR-22 con el objetivo de visualizar la magnitud de la carga a la cual está sometida la probeta durante el desarrollo del ensayo. El indicador trabaja tanto en kg como en libras con una precisión de 0,01 a fondo de escala. Por su parte, el indicador LR-22 tiene una salida que se conecta con un acondicionador de señal adicional, provisto por el fabricante de la celda de carga, que permite estandarizar la señal de la celda en  $\pm 10$  VCC para la entrada analógica en el sistema de adquisición analógico-digital (I/O DAC). La celda de carga se encuentra montada a las mordazas de la máquina mediante dos varillas roscadas de 10 mm. En las Figuras 1 y 2 se puede observar la celda instalada, así como el montaje en la máquina de ensayos, mientras que la Figura 3 muestra el indicador de carga y su montaje en el equipo.

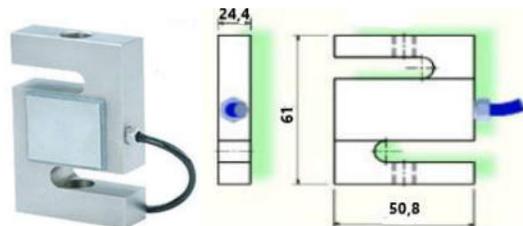


Figura 1: Celda de carga con capacidad de 10 kN [8]



Figura 2: Montaje de la celda de carga en la máquina.



Figura 3. Indicador de carga montado en la máquina de ensayos.

## 2.2. Medición del desplazamiento

El sistema mecánico de medición del desplazamiento, tanto en tracción como en compresión, ha sido sustituido por un transductor de desplazamiento del tipo transformador diferencial de variación lineal (LVDT según sus siglas en inglés), para medir desplazamientos lineales. Para la aplicación se ha utilizado un LVDT Lucas modelo 250 HCA, con un rango máximo de desplazamiento de 6,35 mm (0,25 pulgadas) y adicionalmente se puede intercambiar con un segundo LVDT Lucas modelo 1000 HCA, con un rango máximo de 25,40 mm (1 pulgada). El transformador posee tres bobinas dispuestas extremo con extremo alrededor de un tubo. La bobina central es el devanado primario y las externas son los secundarios. Un centro ferromagnético de forma cilíndrica, sujeto al objeto cuyo desplazamiento debe ser medido, se desliza con respecto al eje del tubo.

A medida que el núcleo se mueve, la inductancia mutua cambia, provocando que el voltaje inducido en el secundario se modifique de forma proporcional al desplazamiento lineal de la probeta. Las bobinas están conectadas en serie, pero invertidas, de tal forma que el voltaje de salida es la diferencia entre los dos voltajes secundarios. Cuando el núcleo está en su posición central, se encuentra equidistante a los dos secundarios, los voltajes inducidos son iguales, pero de signo opuesto, así que el voltaje de salida es cero.



Cuando el núcleo es desplazado en una dirección, el voltaje en una bobina aumenta mientras que en la otra disminuye, causando que el voltaje de salida también aumente desde cero hasta su máximo. El dispositivo LVDT se conecta a un acondicionador de señal que permite la alimentación con CA y obtener una salida analógica de  $\pm 10$  VCC. Para acoplar el LVDT a la máquina, se diseñaron y fabricaron soportes de aluminio específicos, los cuales van montados mediante tornillos. La Figura 4 ilustra un típico esquema eléctrico del LVDT, mientras que las Figuras 5 y 6 muestran el dispositivo de montaje y la ubicación del LVDT en la máquina de ensayos respectivamente.

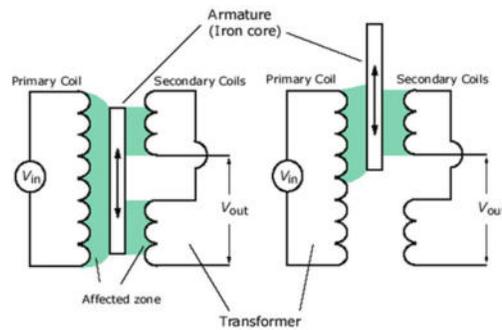


Figura 4: Típico esquema eléctrico de un transductor del tipo LVDT [9]



Figura 5: Dispositivo de montaje del LVDT.



Figura 6: Transductor LVDT montado en la máquina de ensayos.

### 2.3. Control de la velocidad de desplazamiento

El movimiento del tornillo que permite el desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos es realizado por un motor de CA trifásico de inducción. En este caso se ha sustituido el sistema de control de velocidad del motor por reóstato con un variador electrónico de velocidad que utiliza la técnica de control escalar con V/f constante, siendo V el voltaje y f la frecuencia [10-11]. En la Figura 7 se muestra un diagrama de bloques típico correspondiente al control V/f y en la Figura 8 se puede apreciar la instalación del variador de velocidad en la máquina de ensayos por el control del motor. De esta forma el control de velocidad se realiza por variación de frecuencia y el variador instalado permite variar frecuencias desde 5 hz hasta 50 hz para poder mover el cabezal tanto en requerimientos de posicionado de las probetas como para obtener las velocidades de deformación requeridas por las normas para ensayos estáticos.

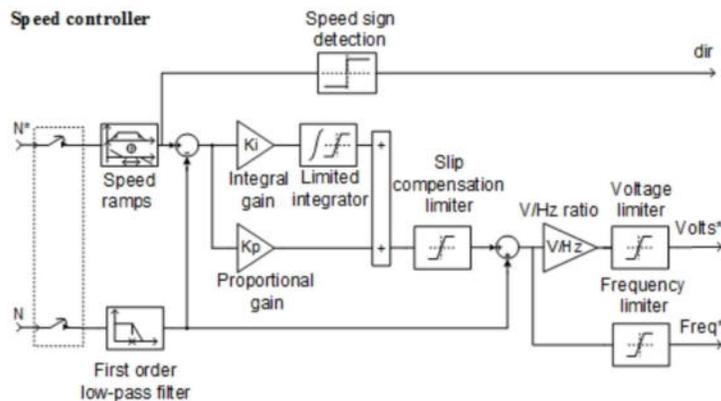


Figura 7: Diagrama de bloques para un control de velocidad V/f constante [11]



Figura 8: Montaje del variador de velocidad en la máquina de ensayos.

En tal sentido, el control de velocidad instalado permite obtener una velocidad de deformación ( $\dot{\epsilon}_{L,e}$ ) en ensayos de tracción de  $0,00007 \text{ s}^{-1}$  para la determinación de  $R_p$  y de  $0,00025 \text{ s}^{-1}$  para la obtención de  $R_m$  con una tolerancia relativa de  $\pm 20\%$  para ambas velocidades, tomando como referencia lo indicado en la norma IRAM/IAS U500-102 y en la norma ASTM E8 [1-2].

## 2.4. Sistema de adquisición y procesamiento de datos

### 2.4.1 Adquisidor analógico -digital

Para registrar los datos de los ensayos, básicamente en términos de carga- desplazamiento, se implementó la utilización de un adquisidor de datos [12], PMD 1608FS de Measurement Computing, analógico-digital (I/O DAQ) de 16 bit con conexión a puerto USB 2.0 de la computadora. El dispositivo permite alcanzar una resolución de la señal de 1 parte en 32000 del rango de la señal del transductor (1/32000), en tanto que la velocidad máxima de muestreo es de 100000 muestras por segundo para el total de los 8 canales analógicos y una velocidad máxima de muestreo por canal de 50000 muestras por segundo. Las tensiones de las entradas analógicas, seleccionables a través del programa del adquisidor. son:  $\pm 10$  V,  $\pm 5$  V,  $\pm 2$  V y  $\pm 1$  V respectivamente. Estas características del adquisidor posibilitan no solo cumplir con los requerimientos de las normas para ensayos de tracción sino también la resolución y la precisión mínimas requeridas para los ensayos de tenacidad a la fractura, particularmente, en la medición indirecta del crecimiento de fisura por el método de descargas parciales [7].

Por su parte el adquisidor cuenta con un programa (software) TracerDAQ, específico, que permite medir en tiempo real las variables analógicas o muestras procedentes de los transductores en presentaciones de pantalla tensión-tiempo (V-s). El programa cuenta con una librería universal, y otra librería para el programa LabVIEW, que permite compilar el conjunto de mediciones muestreadas y transferirlas a una planilla de cálculo para la elaboración de los resultados de ensayos y las gráficas correspondientes. En la Figura 9 se ilustra el adquisidor utilizado y la Figura 10 el diagrama de bloques correspondiente.

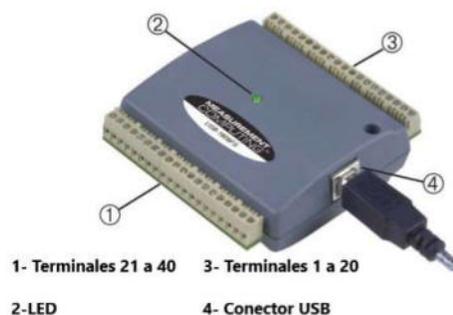


Figura 9: Adquisidor analógico-digital (I/O DAQ) [13]

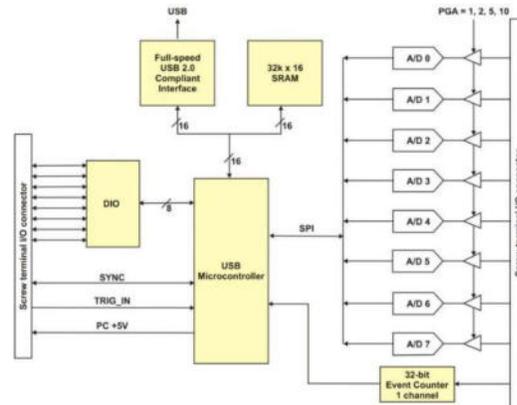


Figura 10: Diagrama de bloques del adquirente [13]

### 2.4.2 Procesamiento de los datos de ensayo

Para el procesamiento de los datos y la representación gráfica de pantalla en tiempo real, carga-desplazamiento o carga deformación según sea la determinación de ensayo, se ha utilizado el conocido programa LabVIEW. Tal como se ha indicado el adquirente de datos tiene librerías compatibles con este programa y permite una eficiente comunicación y transferencia de los datos al programa a través de la computadora. Este programa se maneja a través de módulos, que simbolizan acciones que realizará el programa, al desarrollar la programación ésta queda formada por cadenas de módulos. La programación realizada permite obtener la imagen de pantalla principal donde se eligen los canales para la adquisición de los datos, estos pueden ser en la forma de dos canales, por ejemplo: carga-alargamiento, carga- desplazamiento del punto de aplicación de la carga, carga- deformación. La Figura 11 muestra tres gráficos, dos de ellos graficaran cada dato que pasa por el canal en función del tiempo y el más grande mostrará la curva de carga – desplazamiento. En tanto la Figura 12 muestra la programación en módulos para una salida estandarizada carga-desplazamiento, tanto para aplicar en un ensayo de tracción como en ensayos de tenacidad a la fractura.

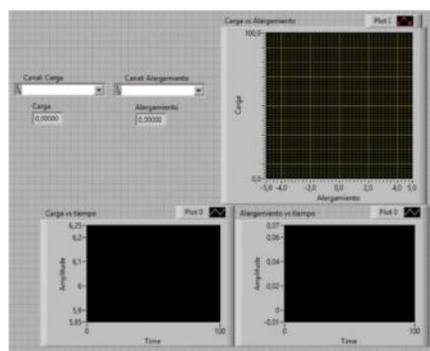


Figura 11: Gráficos que se visualizan en pantalla con la programación en LabVIEW.

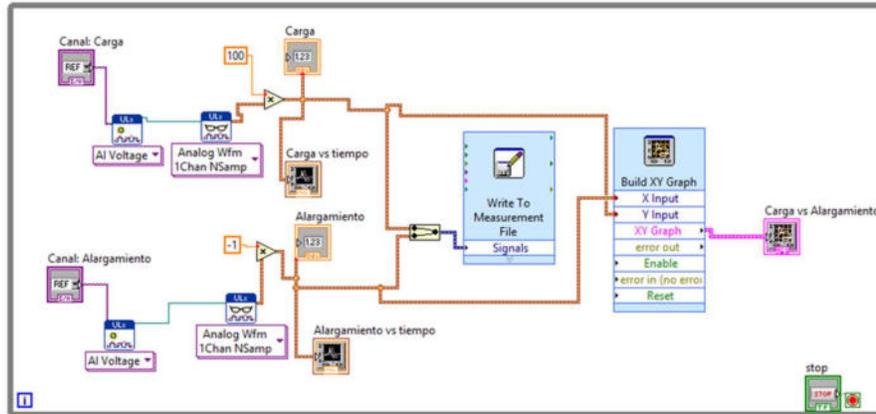


Figura 12: Programación en LabVIEW para un ensayo carga-desplazamiento

### 3. RESULTADOS DE ENSAYOS

A continuación, se muestra, a modo de ejemplo, resultados de ensayos de tracción de materiales muy diferentes como un acero con revestimiento de zinc y un polímero utilizado en impresión 3D.

En ambos casos las probetas responden a norma, sin embargo, para materiales metálicos han sido modificados los extremos de las probetas donde éstas son fijadas a las mordazas de la máquina de ensayos, manteniendo las dimensiones requeridas por la norma en la zona calibrada o zona de ensayo. El modelo de probeta estándar utilizado es el de probeta rectangular “pin loaded” de ASTM E8 [2] para muestras de espesor delgado. La modificación consistió en aumentar el área efectiva del cabezal (grip) de la probeta e incorporar dos orificios adicionales en cada cabezal, de manera tal que se pueden ensayar probetas de distintos materiales, con resistencia a la tracción elevadas, pero utilizando espesores lo suficientemente delgados que permiten obtener las secciones necesarias para no exceder el límite máximo de carga de la máquina (10kN). Las tres fijaciones a través de los orificios en cada cabezal de la probeta de tracción distribuyen la carga de manera tal de evitar concentración y consecuentemente deformaciones excesivas de los cabezales o roturas en los mismos que invalidan el ensayo. En la Figura 13 se puede observar el esquema de la probeta de tracción modificada y la Figura 14 muestra la probeta montada y ensayada.

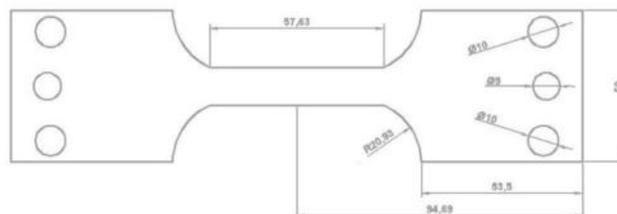


Figura 13: Probeta de tracción modificada



Figura 14: Probeta y mordazas modificadas luego de un ensayo de tracción.

Finalmente se puede observar en la Figuras 15, gráficos de pantalla en tiempo real y en la Figura 16, datos procesados, resultados de ensayos en chapa de acero con recubrimiento de zinc y nylon 12 respectivamente. En este último caso la probeta de nylon 12 ha sido realizada con impresión 3D utilizando la técnica FDM y de acuerdo con la geometría indicada en la norma ASTM D638 [14] modificando los cabezales de éstas e incorporando un orificio para el adecuado agarre en el equipo de ensayo (pin loaded).

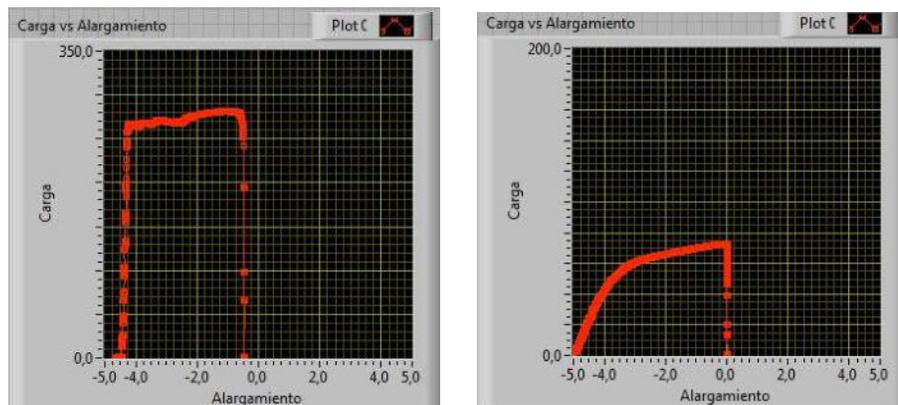


Figura 15. Izquierda, acero con revestimiento de Zn; derecha, Nylon 12.



Figura 16: Procesamiento posterior de los datos para la determinación de los resultados de ensayo.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha efectuado de manera satisfactoria un completo reacondicionamiento y puesta en valor de un equipo de ensayos universales con un sistema de control de la velocidad de cabezal y sistemas de medición de carga y desplazamiento anticuados con procesamiento completamente analógico. Además de la modernización del equipo se han realizado modificaciones en los cabezales de probetas normalizadas y el diseño de las mordazas adecuadas para éstas, que permiten ensayar diferentes materiales, tanto metálicos como no metálicos, particularmente con resistencias elevadas. Esto permite utilizar probetas rectangulares planas, de espesores delgados y secciones pequeñas, sin exceder la capacidad de carga máxima del equipo.

La máquina de ensayos reacondicionada es ampliamente utilizada tanto para la actividad de investigación como para la implementación de prácticas de ensayos de materiales con los alumnos de grado. En este último caso y por ser un equipo cuyo reacondicionamiento es explícito y desarrollado íntegramente en FRH, le permite a los docentes y alumnos no solo realizar la práctica de un ensayo de materiales sino además analizar un sistema de control de velocidad por frecuencia, así como un sistema y programa de adquisición analógico-digital, siendo ambos esenciales para el desarrollo de habilidades y competencias en el control automático de sistemas y el procesamiento de datos.



## REFERENCIAS

- [1] IRAM/IAS U 500-102. Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Método de ensayo a temperatura ambiente. IRAM. 2016
- [2] ASTM E8/E8M-16a. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International. 2016.
- [3] ISO 6892-1. Metallic materials- Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature. ISO. 2009.
- [4] BS 7910. Guide to methods for assessing of acceptability of flaws in metallics structures. British Standard. 2005.
- [5] API 579/ASME FFS-1. Fitness for service. API/ASME. 2021.
- [6] Zhu X., Joyce J. *Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization*. Engineering Fracture Mechanics, 85, 1-46, May 2012.
- [7] ASTM 1820-17. Standard Test Methods for Measurement of Fracture Toughness. ASTM International. 2017.
- [8] Flexar Industria y Tecnología. Especificación técnica celda de carga modelo CZI-1000.
- [9] Lucas/Schaevitz. Functional Advantages and Operation Principles
- [10] Andrade Cedeno R., Pérez Rodriguez J. *Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable*. Dominio de la Ciencia, 7, 6, 38-62, 2021.
- [11] Chapman S. *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill/interamericana, México DF, 2012.
- [12] Eren H., Potter D. *Instrumentation Engineers Handbook: Process Software and Digital Networks Vol. 3*, Chapter 19. CRC Press, New York, 2012.
- [13] Measurement Computing. User's Guide USB-1608 FS Analog Input and Digital I/O. 2014
- [14] ASTM D638-14. Standard Test Methods for Tension Testing of Plastics. ASTM International. 2014.



## DISEÑO DE UNA PLATAFORMA MECÁNICA MODULAR PARA ROBOTS MÓVILES CON SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN INTERCAMBIABLES

Ignacio Aberasturi<sup>1</sup>, Juan Tomás Beltrán<sup>1</sup>, Bruno Furlan<sup>1</sup>, Pablo Gallucci<sup>1</sup>, Guillermo Rolle<sup>2,3</sup>, Matías Nacusse<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Mecánica

<sup>2</sup> LAC, Laboratorio de Automatización y Control, Escuela de Ingeniería Electrónica

<sup>1,2</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura; Universidad Nacional de Rosario  
Ríobamba 245 Bis, Rosario, Argentina

<sup>3</sup> CONICET,

correo-e: [nacho.a.18@hotmail.com](mailto:nacho.a.18@hotmail.com), [jb.juantobeltran@gmail.com](mailto:jb.juantobeltran@gmail.com), [bruno15furlan@hotmail.com](mailto:bruno15furlan@hotmail.com),  
[gallucci@fceia.unr.edu.ar](mailto:gallucci@fceia.unr.edu.ar), [grolle@fceia.unr.edu.ar](mailto:grolle@fceia.unr.edu.ar), [nacusse@fceia.unr.edu.ar](mailto:nacusse@fceia.unr.edu.ar)

### RESUMEN

En el Laboratorio de Automatización y Control (LAC), Escuela de Ingeniería Electrónica, FCEIA, UNR, se está diseñando y construyendo un robot móvil reconfigurable, de tipo modular y escalable, que permitirá el agregado de diferentes componentes y Estructuras de Operación (EO) que le darán carácter multifuncional al mismo. Este robot servirá como plataforma experimental para la implementación y validación de técnicas de navegación autónoma, así como también algoritmos de control de interacción física entre humano y robot.

En el diseño de la plataforma mecánica se trató de considerar desde un primer momento la posterior automatización necesaria para la navegación autónoma con los diferentes tipos de locomoción. Esto, sumado al hecho de que todas las etapas de desarrollo han sido asistidas mediante el modelado matemático y el empleo de herramientas de software de diseño y simulación, permite categorizar a los proyectos como de diseño mecatrónico.

En este trabajo se presenta la primera etapa del desarrollo descrito anteriormente que consiste en el diseño de la plataforma electromecánica de locomoción con ruedas en ambientes interiores con pisos lisos y estructurados. Para lograr diferentes tipos de locomoción y dotar a la plataforma con característica reconfigurable, se define una Unidad de Tracción y Dirección Modular (UTDM). Esta se compone por dos módulos desacoplables, uno de tracción y otro de dirección. El módulo de tracción está compuesto por un motor sincrónico de imán permanente PMSM de tipo "in-wheel", mientras que el módulo de dirección está compuesto por un motor paso a paso. Los diferentes tipos de locomoción configurables son: accionamiento de dirección acoplado; de tracción diferencial; tipo Ackermann; tipo triciclo compuesto de una UTDM y dos ruedas fijas sin tracción entre otras. Además de la UTDM se diseñó la estructura mecánica que hace las veces de chasis, interconectando las ruedas y sirviendo de soporte a las diferentes estructuras de operación.

**Palabras Clave:** Robots Móviles, Diseño Mecatrónico, Robot Móvil, Locomoción de Accionamiento de Dirección Acoplado, Locomoción Diferencial.



## 1 INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo pasado y con la creciente complejidad de productos, procesos de fabricación y de operación en diversas áreas de la industria (automotriz, aeroespacial, robótica, procesos de construcción y/o montajes mecánicos, electrónico, industria farmacéutica, etc.) ha surgido una gran integración, tanto a nivel de hardware como de software, entre subsistemas y componentes de los dominios mecánico, eléctrico, electrónico y procesamiento de la información. Esto resulta en sistemas integrados conocidos como sistemas mecatrónicos [1] cuyo diseño requiere principalmente el concurso de las siguientes áreas de la Mecánica, Electrónica y las TICs: elementos mecánicos, mecanismos y máquinas; microelectrónica, electrónica de potencia, y tecnologías de sensores y actuadores; y teoría de sistemas, control y automatización, ingeniería de software e inteligencia artificial [2]. Con el fin de diferenciar a los sistemas multidominio físico con los sistemas mecatrónicos, queremos destacar que, los sistemas mecatrónicos se diseñan con un enfoque de diseño distinto al secuencial, tradicional en los sistemas multidominio, llamado co-diseño, caracterizado por la consideración simultánea de todos los aspectos de la ingeniería desde el mismo inicio del proceso de diseño, lo que permite obtener diseños novedosos, más eficientes y de alta calidad, con menos costos y tiempos de puesta en mercado. Este enfoque integral conlleva una complejidad intrínseca en el proceso de diseño del sistema [3] [4] [5].

Entendiéndose aquí a la robótica como sub-área de la mecatrónica, este trabajo aborda el diseño de robot móviles con ruedas para ambientes de interiores. En particular, se presenta el diseño de una plataforma mecánica modular para robots móviles con sistemas de locomoción intercambiables que puede funcionar como plataforma de base de Robots de Servicio [6] como de Vehículos de Guiado Automático, también conocidos como *Automated Guided Vehicles* (AGV) [7]. Estos, son sistemas mecatrónicos complejos y multivariables compuestos por varios subsistemas que presentan una dinámica fuertemente acoplada entre los mismos. Un ejemplo de esto es, por ejemplo, que el almacenamiento de energía, esto es, el estado y capacidad de carga de las baterías, afecta al rendimiento del control y al movimiento del robot móvil. Más aun, el control y el planeamiento de las trayectorias a seguir influye en el consumo de energía y, por tanto, en el almacenamiento de energía. Adicionalmente, la estructura de movilidad, esto es, la disposición y tipología de las ruedas en el chasis del robot móvil, es fuertemente dependiente de la aplicación y no hay una estructura definida para todas las aplicaciones. En [8] se analizan diferentes configuraciones de robots móviles de servicio que dan lugar a diferentes tipos de modelos para luego ser utilizados en el desarrollo de leyes de control. En [9] se desarrolla un AGV de tipo omnidireccional utilizando ruedas de tipo MY3. En [10] se realiza el diseño mecánico de un AGV con omnidireccional, con ruedas omnidireccionales. En [11] se presenta el diseño mecánico de una plataforma robótica móvil omnidireccional con cuatro ruedas independientes. Cada una de estas ruedas tiene la capacidad de traccionar y de direccionarse



independientemente de las otras. En [12] se propone un mecanismo de direccionamiento y tracción para el diseño de un robot móvil omnidireccional. En [13] presentan un robot móvil con dos ruedas motrices con la configuración de dirección de Doble Ackermann Invertido logrando una mejora en las especificaciones de maniobras frente a la configuración Ackermann simple. En [14] presentan el diseño mecatrónico de un robot móvil con de cuatro ruedas con dirección diferencial. Este robot tiene la particularidad de que se puede intercambiar entre ruedas convencionales y ruedas omnidireccionales otorgando al robot móvil la capacidad de moverse por diferentes terrenos. En [15] presentan un robot de asistencia a la movilidad de personas de tipo triciclo llamado “*Robicle*”. En [16] presentan el modelado mecatrónico de un robot móvil de tipo triciclo con la rueda delantera capaz de traccionar y direccionar de manera simultánea. En [17] presenta el desarrollo de un robot móvil de tracción diferencial utilizando el enfoque de diseño de ingeniería basado en modelos [4]. En este trabajo se presenta el diseño de la plataforma mecánica de locomoción de un robot móvil con ruedas para ambientes interiores con pisos lisos y estructurados. Con el fin de lograr diferentes tipos de locomoción y dotar a la plataforma con característica reconfigurable, se define una Unidad de Tracción y Dirección Modular (UTDM). Esta se compone por dos módulos independientes y desacoplables, uno que oficia de accionamiento de tracción, mientras que el otro de accionamiento de dirección. Además de la UTDM, se diseñó la estructura mecánica que hace las veces de chasis, interconectando las ruedas y sirviendo de soporte a las diferentes estructuras de operación (EO).

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 presenta la metodología de diseño y los requerimientos funcionales de la plataforma a diseñar. La Sección 3 presenta el diseño de UTDM y del chasis de la plataforma electromecánica, así como también una preselección de los motores de los módulos de tracción y dirección. La Sección 4 presenta algunas simulaciones de tipo estática de esfuerzo y deformación de la plataforma diseñada. Finalmente, la Sección 5 presenta algunas conclusiones del trabajo.

## 2 METODOLOGÍA DE DISEÑO Y MODELO CONCEPTUAL

### 2.1 Diseño Mecatrónico

Un sistema mecatrónico se caracteriza por una funcionalidad mecánica (entendida “*in lato sensu*”) alcanzada vía el control de accionamientos (eléctricos, hidráulicos, etc.) mediante la acción de sistemas electrónico-informáticos, cuyo desarrollo emplea técnicas concurrentes en todas las etapas de diseño con el fin de optimizar tanto el proceso de desarrollo como el resultado final merced a los efectos sinérgicos de un enfoque multidisciplinario [18]. La mecatrónica como concepto nuevo, consolidado y en expansión, demanda la necesidad de integración e interacción de los métodos de diferentes áreas de la ingeniería. Un ejemplo de esto es la decisión de no usar



frenos mecánicos sino utilizar a los motores de las ruedas como frenos para mantener a la plataforma en posiciones fijas cuando deben compensarse fuerzas externas al robot. Esto requiere obtener en el dimensionamiento y elección de los motores no sólo los valores relacionados con los escenarios de circulación del robot, sino también los valores de par máximo a rotor bloqueado (stall torque) y par máximo permanente, así como los correspondientes valores de corriente. No considerar esto desde un principio puede obligar a poner frenos mecánicos una vez terminada la construcción del robot para no superar los límites térmicos de los arrollamientos, con los consiguientes inconvenientes causados por las modificaciones estructurales que haya que hacer. Los múltiples modos de locomoción planteados para el robot y la extensión de sus funcionalidades mediante la adición de diferentes EO plantean requisitos superiores a los que cualquiera de esa funcionalidad por separado hubiera requerido. Por ejemplo, a los sistemas de microcómputo (MCU) encargados del procesamiento de información, comunicación y ejecución de los algoritmos necesarios para todas las acciones de control, en términos de memoria y velocidad. También, en el plano puramente mecánico, el futuro montaje de una EO que permita la interacción física directa con un ser humano impone necesidad de co-diseño y dimensionamiento. Un ejemplo de ello es el efecto de cargas asimétricas sobre las ruedas generado por la interacción con el usuario. Esto obliga a buscar alternativas para el sistema de transmisión que minimicen los momentos flectores sobre los ejes de las ruedas. Estas alternativas deben ser compatibles con el criterio de lograr un buen despeje de la base del suelo para que el robot pueda moverse en terrenos con (ligeras) irregularidades. También en la elección de las herramientas de ingeniería a utilizar la elección del enfoque mecatrónico obliga a tomar decisiones. Como ejemplo, debido a la característica de diseño basado en modelos de este enfoque, es decir, su fuerte apoyo en el modelado matemático y la simulación, se eligió un software de diseño mecánico (SolidWorks, CAD para modelado mecánico 2D y 3D; [19]) cuyos modelos pueden ser exportados fácilmente a entornos de simulación dinámica del robot que permiten la integración con algoritmos de control, particularmente ROS y Gazebo-ROS [20] [21]. Todo el procedimiento y desarrollo que se describe a continuación, que puede parecer secuencial en la descripción, contiene numerosos bucles en todos los puntos de decisión del diseño, muchos de los cuales no han podido ser desarrollados en detalle aquí por cuestiones de espacio.

## 2.2 Modelo funcional y conceptual

La plataforma robótica de locomoción con ruedas a diseñar debe moverse en ambientes interiores, pisos lisos con mínimos desniveles tipo rampa, ambientes estructurados y perfectamente conocidos. El requerimiento de ambientes interiores de alguna manera limita las dimensiones de la plataforma ya que esta debe ser capaz de atravesar una puerta, cuyo ancho es típicamente menor o igual a los  $0.6m$ . El requerimiento de pisos lisos permite diseñar, en esta etapa, una plataforma móvil sin un sistema de suspensión. Por otra parte, como se mencionó



anteriormente, se tomó la decisión de no contar con frenos mecánicos y utilizar a los motores de las ruedas como frenos. En esta etapa inicial del diseño se busca llegar a obtener un prototipo que pueda ser completamente funcional en condiciones de laboratorio, lo que equivaldría a un nivel de madurez tecnológica 4 [22]. Por esto, no se tienen en cuenta posibles agregados que otorguen seguridad física a los posibles usuarios como, por ejemplo, el agregado de frenos mecánicos de emergencia independientes del sistema de control. Además de lo anterior la plataforma debe ser reconfigurable y permitir diferentes tipos de locomoción, entre los que se encuentran, configuración tipo *triciclo*, de *tracción diferencial* y tipo *Ackermann* entre otras posibles no detalladas aquí por una cuestión de espacio pero que pueden observarse en la Figura 1. Entre los tipos de ruedas que se consideran en este trabajo se encuentran: las ruedas de tracción; las ruedas convencionales fijas, y las ruedas tipo *caster*. En todo lo que sigue, se analiza un mínimo de tres ruedas para garantizar estabilidad frente al volcado y no tener que utilizar algún mecanismo, como por ejemplo el agregado de un volante de inercia prevenga el volcado de la plataforma. La plataforma a diseñar debe ser capaz de cargar un peso de  $100\text{kg}$ , para lo cual el proceso de diseño se inicia con un peso total, esto es peso de la plataforma electromecánica más la carga de  $150\text{Kg}$ . Esta plataforma debe ser capaz de moverse a una velocidad en línea recta de  $1\text{m/s}$  y de poder acelerar a  $1\text{m/s}^2$ .

### 3 DISEÑO DE LA PLATAFORMA

Para lograr los diferentes tipos de locomoción y dotar a la plataforma con característica reconfigurable, se define una UTM. Esta se compone por dos accionamientos o módulos desacoplables, uno de tracción y otro de dirección. Estos, permiten una multiplicidad de configuraciones posibles de la plataforma como se muestra en la Figura 1. De acuerdo a la cantidad de ruedas y el tipo de estas se definen dos índices llamados *grado de movilidad*  $\delta_m$ , definido como el número de grados de libertad que pueden manipularse directamente a partir de las entradas; y *grado de direccionalidad*  $\delta_s$  que es definido como el número de ruedas que pueden orientarse independientemente para dirigir el robot. Estos índices determinan cinco tipos de configuraciones posibles, correspondientes a cinco pares de valores de  $(\delta_m, \delta_s)$ , de robots móviles con ruedas, ver [23], [24].

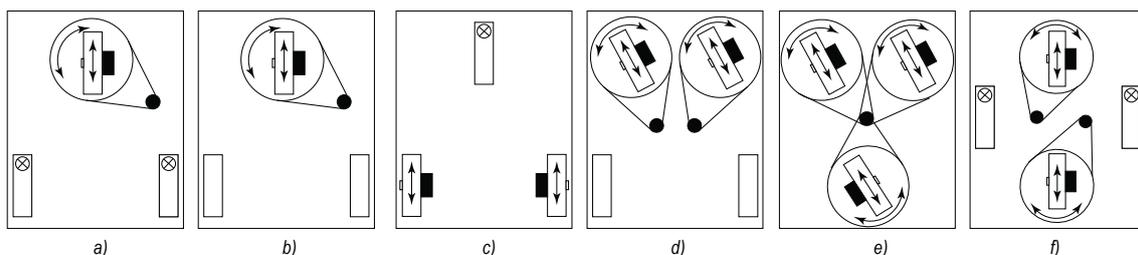


Figura 1: a) OmniSteer b) Triciclo, c) Tracción diferencial, d) Ackermann, e) Accionamiento de dirección acoplado, f) twoSteer.



La Figura 1a muestra la configuración *OmniSteer*, que es una configuración de robot móvil tipo (2,1), compuesta por dos ruedas caster y una UTDM. La Figura 1b muestra la aquí llamada configuración tipo Triciclo, configuración tipo (1,1). Esta necesita de una UTDM y el centro instantáneo de rotación (ICR) se ubica en el eje que conecta las ruedas fijas. La Figura 1c muestra la configuración de *Tracción diferencial*, configuración tipo (2,0). Esta necesita de dos módulos de tracción que produzcan diferente torque/velocidad para la dirección del mismo. El ICR se ubica en el eje que conecta las ruedas de tracción. La Figura 1d, muestra la configuración *Ackermann*, configuración tipo (1,1). Esta necesita de dos UTDM que permitan la emulación vía acción de control de la geometría de dirección de *Ackermann*. El ICR se ubica sobre eje que conecta las ruedas fijas traseras por fuera de la plataforma. La Figura 1e muestra la configuración de *accionamiento de dirección acoplado* que es una configuración del tipo (1,1). Esta configuración, utiliza tres módulos de tracción y uno de dirección que acciona sincrónicamente sobre el resto. Finalmente, la Figura 1f, muestra la configuración *twoSteer* que es del tipo (1,2) y presenta dos UTDM.

### 3.1 Unidad de Tracción y Dirección Modular

#### 3.1.1 Módulo de Tracción

Para el cálculo inicial del dimensionamiento del motor de tracción, se partió de la fuerza necesaria de fricción,  $F_{Nf}$ , para mover una masa total de  $150Kg$ , esto es la carga  $M_C = 100Kg$  sumada a la masa del chasis  $M_{Ch} = 50Kg$ , con una aceleración de lineal  $1m/s^2$  da como resultado  $F_{Nf} = 150N$ . Con lo cual la potencia,  $P_N$ , necesaria para mover la plataforma a una velocidad lineal de  $1m/s$  es  $P_N = 150W$ . Asumiendo rodadura perfecta y un radio de la rueda  $r = 100mm$ , nos da un requerimiento de torque del motor de  $T_N = 15Nm$ .

En base a lo anterior se realizó una preselección de un motor sincrónico de imán permanente (PMSM) de tipo *in-wheel* de  $250W$  con quince pares de polos, con un radio de  $0.09m$ , cubierta de goma y capacidades nominales de: torque  $13Nm$ ; velocidad  $20rad/s$ , tensión  $36V$  y corriente  $15A$ . El mismo cuenta con tres sensores de efecto hall que permiten la medición del ángulo de rotación. Este motor cuenta con el eje de rotación ubicado en un lado de la rueda. Se prevé un esquema de control por campo orientado de torque para el control del mismo en operación.

El esquema de diseño del módulo de tracción se muestra en la Figura 2. Además de la sujeción de la rueda de tracción se diseñó un mecanismo de acople del módulo de tracción al chasis que permite soportar los esfuerzos radiales y axiales generados por el movimiento de la plataforma y por las fuerzas externas a la misma. Este mecanismo de acople, mostrado en la Figura 2b, está compuesto por dos rodamientos de bola de contacto angular ubicados de manera opuesta y clavados en el eje de rotación de dirección. Estos rodamientos se ubican dentro de una de jaula



de rodamientos con tope superior que sirve de contenedor. Para retener desde el inferior se coloca anillo seeger. Estos tres sistemas de acople se vinculan a la plataforma a través de tornillos en la parte superior, dejando girar al eje direccional libremente.

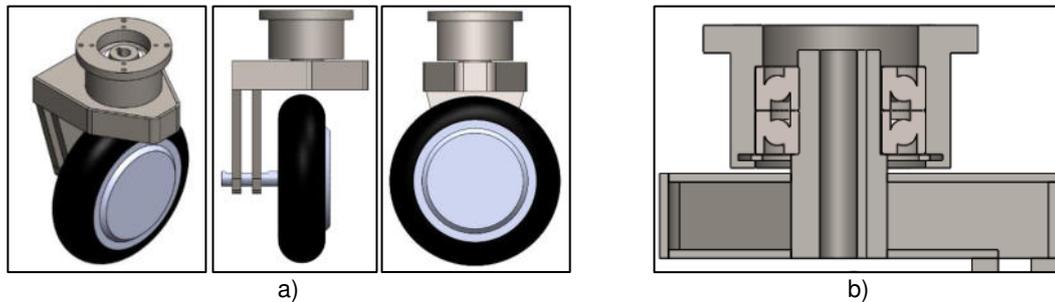


Figura 2: Esquema de diseño del módulo de tracción. a) Vistas isométrica, frontal y lateral, del sistema de sujeción de rueda de tracción. b) Vista de corte del módulo de acople.

### 3.1.2 Módulo Dirección

Para el cálculo del módulo de dirección se tiene en cuenta la configuración tipo triciclo que es la que menos ruedas tiene en su configuración y, asumiendo una distribución equitativa de pesos, sobre la rueda de tracción y dirección, resulta una fuerza normal aplicada en el parche de contacto de la rueda o huella de  $F_N = 500N$ . Considerando un coeficiente de rozamiento entre la rueda de goma y el piso (cemento) igual a uno y que la huella de la rueda es un cuadrado de  $30mm$  de lado, el torque necesario para direccionar el giro de la rueda, considerando que la fuerza normal está concentrada en los lados del cuadrado, en condiciones de reposo es de  $T_N = 15Nm$ . Es conveniente notar que en condiciones de movimiento el motor de dirección debe ser capaz de sostener picos de torque de variada intensidad debido a las cargas dinámicas que ocurren cuando la plataforma intenta girar a una determinada velocidad.

En base a lo anterior se realizó una preselección de un motor paso a paso bipolar NEMA 23 [24] con una caja reductora de tipo planetaria de relación 47:1 que soporta un torque de  $25Nm$  a  $5rpm$ . Su peso, incluyendo la caja de engranajes, es de  $1.7Kg$ . A este motor se le realizará una modificación que permita agregar un encoder de tipo absoluto para el control preciso y sin pérdida de pasos de la posición angular de la dirección.

### 3.1.3 Acople del Módulo de dirección y Tracción

Se evaluaron dos alternativas para el acople del módulo de tracción con el de dirección las cuales se observan en la Figura 3. La Figura 3a muestra la primera alternativa que consiste en enclavar el eje del motor de dirección con el eje de dirección del módulo de tracción. La segunda alternativa, mostrada en la Figura 3b, consiste en realizar el acople de estos ejes mediante un sistema de correa y p Polea dentada.

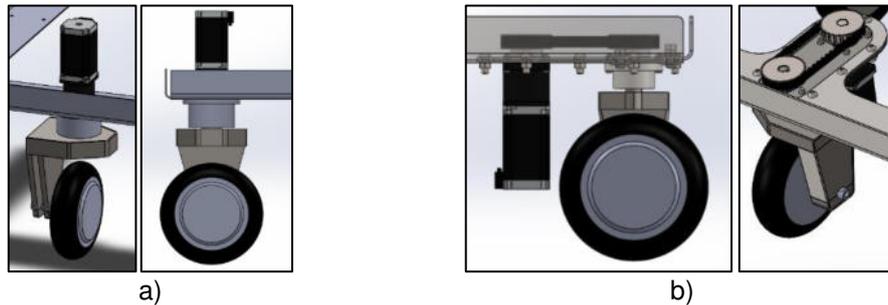


Figura 3: Alternativas de acople del UTMD. a) Acople por el eje. b) Utilizando polea y correa dentada.

### 3.2 Diseño de chasis y de Estructuras de Operación

La Figura 4 presenta un esquema inicial de diseño del chasis que presenta una estructura simple de base rectangular que, respeta las dimensiones requeridas y, permite dimensionar inicialmente al modelo y visualizar de manera sencilla el armado de la estructura y los módulos. La misma está conformada mediante caños estructurales de soporte y chapa fina troquelada para la superficie, ya que la idea del robot es que sea modular, y de esta manera se pueden ubicar los módulos y las EO sobre la base según la conveniencia de uso de manera rápida y sencilla. La vinculación de la chapa y los caños se realizaría a través de soldadura, por lo que los materiales en cuestión deberían de ser aceros al carbono. Este primer modelo garantiza la rigidez necesaria, es decir, ante choque o impacto, de magnitud razonable, la superficie no sufriría ninguna alteración, aunque tiene como principal desventaja el peso de la misma. Por lo cual a continuación se plantean algunas mejoras.

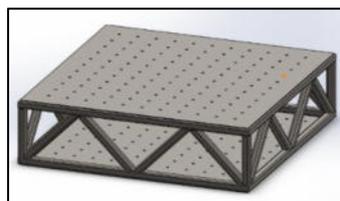


Figura 4: Primer esquema de diseño del chasis

Con el fin de reducir el peso y optimizar el espacio necesario para la ubicación de los componentes electrónicos, la batería, etc., se realizó el diseño del chasis utilizando chapa cortada para luego plegarla. Esto resulta en una disminución de los costos y además resulta conveniente en nuestro caso debido a disponibilidad y acuerdos comerciales que mantiene la Universidad Nacional de Rosario y el LAC con algunas empresas del cordón industrial de Rosario. Las dimensiones de chapa de 1/8" de espesor para realizar los cortes son:

- 600mm largo por 200mm de ancho, a las cuales se le agregan ocho agujeros para su posterior ensamblaje a través de bulones.
- 600mm largo por 150mm de ancho, a las cuales también se les agregan los ocho agujeros. En esta pieza se realiza además un corte para el acople del módulo de tracción y el de



dirección, de tipo redondo de  $80\text{mm}$  de diámetro para el acople del vertical, y de tipo oblongo de medidas  $80\text{mm}$  por  $210\text{mm}$  para el acople mediante polea y correa dentada.

Las chapas, luego de ser cortadas son plegadas en un ángulo de  $90^\circ$  utilizando un punzón de radio  $80\text{mm}$ . La Figura 5a-c muestra las diferentes piezas que compondrán el chasis para el esquema de acople por el eje de los módulos de tracción y dirección. Mientras que, la Figura 5d-f muestra el diseño de las piezas del chasis con la alternativa de acople del módulo de tracción y dirección utilizando el sistema de correa y polea dentada. Por cuestiones de espacio, sólo se muestran las piezas del chasis que se corresponden con la configuración *twoSteer*. El chasis se complementa con el diseño de una tapa, también realizada en chapa plegada, que tiene como principal función cubrir los componentes electrónicos y de servir de base de apoyo para trasladar objetos. La alternativa seleccionada para las simulaciones que se muestran en la sección siguiente es la de la Figura 5d-f.

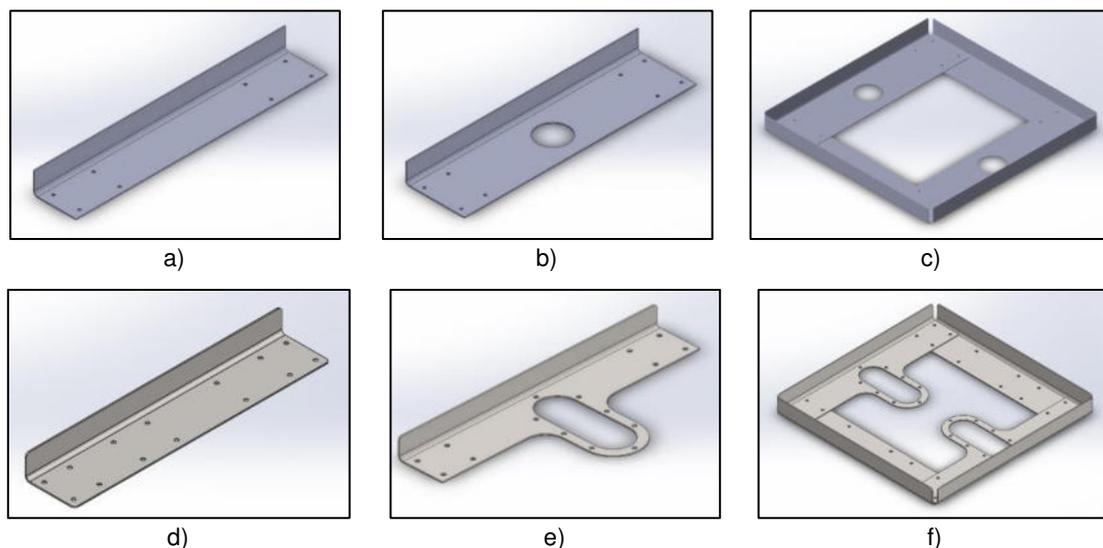


Figura 5: Piezas que conforman el chasis. a) y d) Pieza lateral. b) y e) Pieza de acople UTDM. c) y f) Esquema de chasis armado configuración *TwoSteer*

#### 4 SIMULACIONES

En esta sección se muestran los ensayos estáticos de tensiones y desplazamientos para el chasis, el módulo de tracción y una configuración tipo triciclo con una EO de asistencia a la movilidad de personas. El material elegido para la constitución de todos los componentes es acero *SAE 1010* laminado en caliente con un límite elástico de  $220\text{MPa}$ . La Figura 6 muestra los ensayos para el chasis cuando se aplica una fuerza de carga de  $500\text{N}$  con sujeciones en los puntos de anclaje de las ruedas para una configuración de tipo *triciclo*. Para la Figura 6a, la carga se encuentra distribuida de manera uniforme, mientras que para las Figura 6b-d la carga se encuentra concentrada en un área cuadrada de  $25\text{mm}$  de lado. Para todos los casos puede observarse que los ensayos se encuentran dentro de las tolerancias del material y de la

aplicación. Los ensayos de tensiones y desplazamientos del módulo de tracción se muestran en la Figura 7. Las condiciones de este ensayo son: la aplicación de una fuerza de carga normal de  $500\text{ N}$  y un torque de  $0.14\text{ Nm}$  aplicado en el eje de dirección del módulo. La sujeción, indicada en la Figura 7a en color verde, es realizada de manera fija sobre el eje de giro de la rueda. Nuevamente, puede observarse que la tensión máxima es considerablemente menor que el límite elástico del material. En cuanto al desplazamiento, se obtiene un máximo de  $0,004\text{ mm}$  en la zona más comprometida lo cual se encuentra dentro de lo aceptable

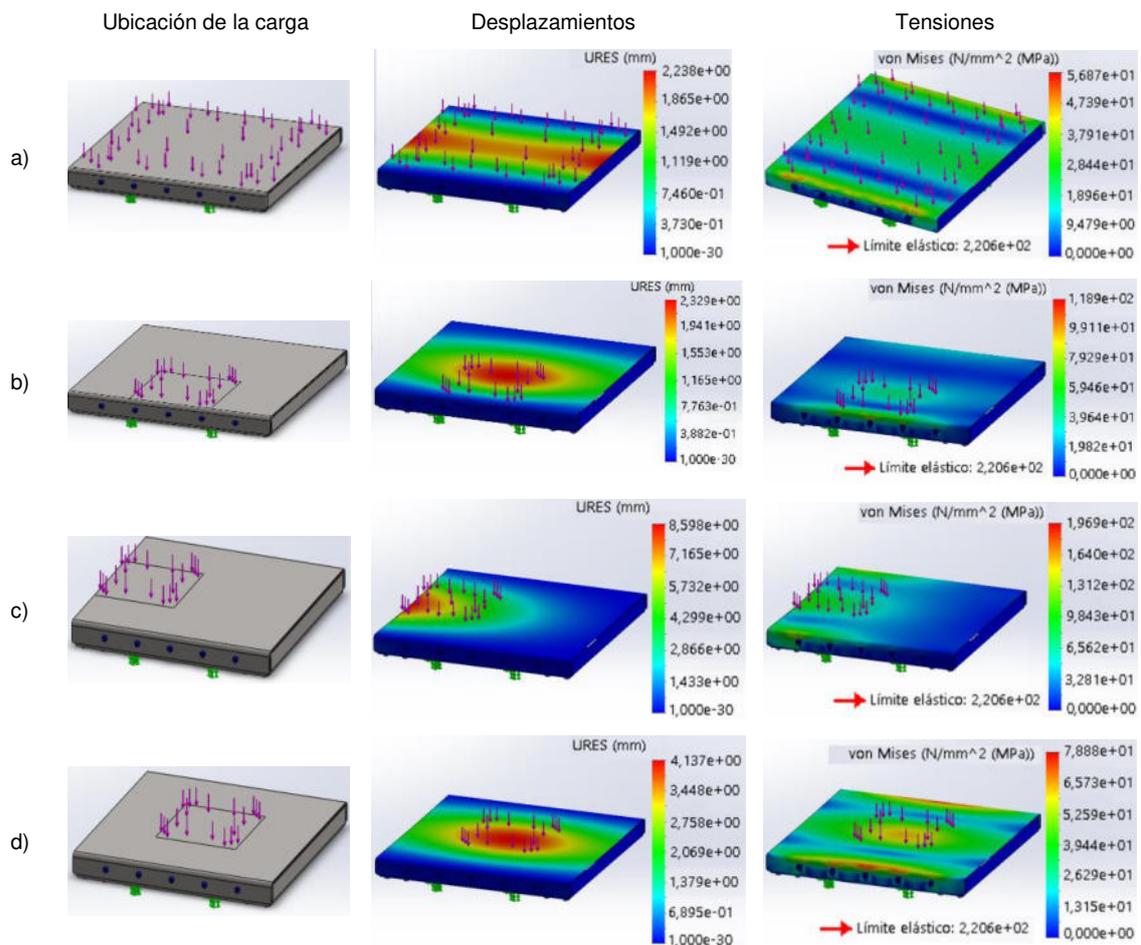


Figura 6: Distribuciones de carga en chasis. a) Distribuida uniformemente. b) Lateral. c) Frontal. d) Centro

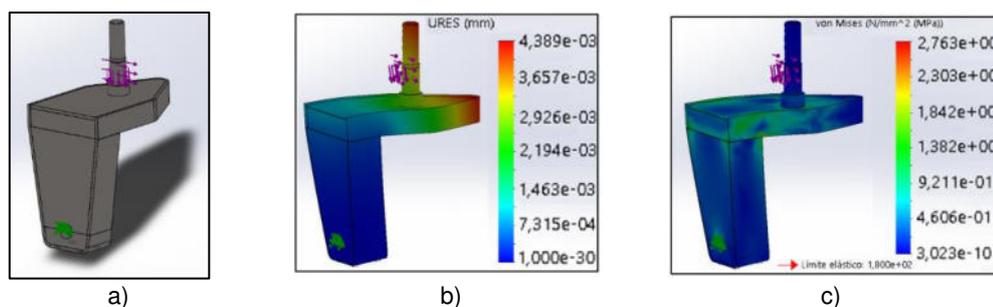


Figura 7: a) Fijación y fuerzas aplicadas. a) Desplazamientos. c) Tensiones

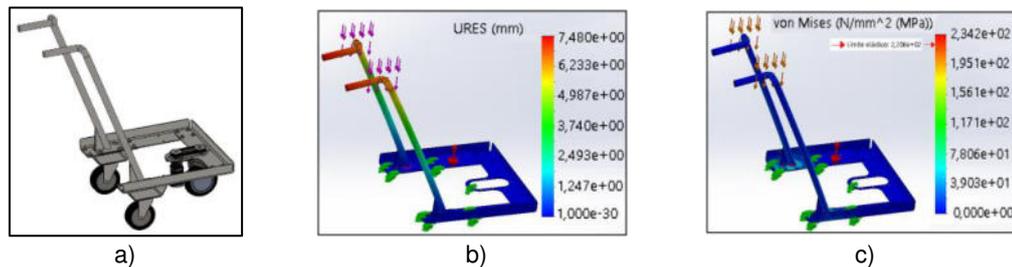


Figura 8: a) Esquema de plataforma con EO. b) Deformaciones. c) Tensiones.

Por último, la Figura 8a muestra la configuración de triciclo con una EO de asistencia a la movilidad de personas. Para la simulación de tensiones y desplazamientos se aplica una fuerza de  $300\text{ N}$  en el manillar del andador, ver Figura 8b, el cual es un estimativo de la fuerza/peso que puede aplicarle una persona promedio, en condiciones normales de operación, esto teniendo en cuenta que solo se apoya los brazos en el prototipo. Se consideran sujeciones del modelo fijas en la ubicación de las ruedas laterales. En cuanto a los desplazamientos se da un máximo de  $7,4\text{ mm}$  en la zona de agarre que está dentro de los límites admisibles, ver Figura 8c. En cuanto a las tensiones, en la Figura 8c, se observa que las máximas se dan a un valor aproximado de  $6,05 \times 10^7\text{ N/mm}^2$  estando las mismas por debajo del límite elástico.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la primera etapa del desarrollo de una plataforma mecánica móvil de tipo modular con sistema de locomoción por rueda intercambiables. Para lograr diferentes tipos de locomoción y dotar a la plataforma con característica reconfigurable, se definió una UTDM compuesta por dos módulos desacoplables, uno de tracción y otro de dirección. El módulo de tracción está compuesto por un motor síncrono de imán permanente PMSM de tipo "in-wheel", mientras que el módulo de dirección está compuesto por un motor paso a paso. Además de la UTDM se diseñó la estructura mecánica del chasis, que interconecta las ruedas y sirve de soporte a las diferentes EO. Se mostraron ensayos de tensiones y desplazamientos de los componentes diseñados y de una configuración con una EO de tipo andador.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Nacional de Rosario, Argentina, por financiar los proyectos de investigación PID-UNR 80020190300098UR y el proyecto 8° Convocatoria "Vinculación Inclusiva" 2021 R.C.S. N° 478/2021, respectivamente.

## REFERENCIAS

- [1] 2005 Mechatronics. IFAC TC. Int. Fed. of Automatic Control. [Online]. <http://tc.ifac-control.org/4/2/scope>
- [2] R. Isermann, "Mechatronic Systems – A Short Introduction," in *Springer Handbook of Automation*. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.



- [3] Barbieri, G. and Fantuzzi, C. and , Borsari, R., "A model-based design methodology for the development of mechatronic systems," *Mechatronics*, vol. 24, pp. 833-843, 2014.
- [4] J. Estefan, Survey of Candidate Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies rev. B, February 2008, Seattle, WA, USA.
- [5] T. Huld and I. Stenius, "State-of-practice survey of model-based systems engineering," *Systems Engineering*, vol. 22, pp. 134-145, 2019.
- [6] In Lee, "Service Robots: A Systematic Literature Review," *Electronics*, vol. 10, 2021.
- [7] F. Espinosa, C. Santos, and J. E. Sierra-García, "Transporte multi-AGV de una carga: estado del arte y propuesta centralizada," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 18, pp. 82–91, 2020.
- [8] A. Moshayedi, R. Shuvam, S. Sambo, Y. Zhong, and L. Liao, "Review On: The Service Robot Mathematical Model," *EAI End. Trans. AI and Robotics*, vol. 1, Feb. 2022.
- [9] Yu, S. and Ye, Ch and Liu, H. and Chen, J., "Dev. of an omnidirectional Automated Guided Vehicle with MY3 wheels," *Perspectives in Science*, vol. 7, pp. 364-368, 2016.
- [10] M. Lamy, "Mechanical development of an automated guided vehicle," KTH, Machine Design (Dept.), Master's thesis 2016.
- [11] Hua, F and Li, G. and Liu, F. and Liu, Y., "Mech. design of a four-wheel independent drive and steering mobile robot platform," in *IEEE 11th Conf. on Ind. Elect. and App. (ICIEA)*, 2016.
- [12] Ryoo, Y. and Park, S and Lee, Y. and Byun, K., "Active Steerable Driving Mechanism Using Two In-Wheel Motors for Omnidirectional Motion of Robotic Mobile Platform," in *8th Int. Conf. on Soft Comp. and Int. Sys. (SCIS) and 17th Int. Symp. on Adv. Int. Sys. (ISIS)*, 2016.
- [13] A. M. Karim, B. Setiawan, and I. Siradjuddin, "Design locomotion for automatic guided vehicles using double ackerman inverted method (2WD-4WS-1A)," *IOP Conf. Series: Materials Science and Eng.*, vol. 1073, February 2021.
- [14] Crenganis, M. and Biris, C. and Girjob, C., "Mechatronic Design of a Four-Wheel drive mobile robot and differential steering," *MATEC Web Conf.*, vol. 343, p. 08003, 2021.
- [15] Jo, G. and Ryoo, Y. and Im, D. and Cha, H., "Electric driven three-wheeled robotic vehicle (Robicle) for personal mobility system," in *7th Int. Conf. on Soft Comp. and Int. Sys. (SCIS) and 15th Int. Symp. on Adv. Int. Sys. (ISIS)*, 2014.
- [16] Sierra-García, Enrique. and Santos, Matilde, "Mechatronic Modelling of Industrial AGVs: A Complex System Architecture," *indawi Complexity*, p. 21, 2020.
- [17] Y. Dzezhyts, Next generation low-cost automated guided vehicle, 2020.
- [18] G. Paulineli and G. Loureiro, "Model-Based System Concurrent Engineering," in *Concurrent Eng. App. for Sust. Product Dev. in a Multi-Disc. Env.*, London, 2013.
- [19] Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, SolidWorks, 2016.
- [20] Open Source Rob. Found. (2023) ROS. [Online]. <http://wiki.ros.org/>
- [21] Open Source Rob. Found. (2023) <http://gazebosim.org/>. [Online]. <http://gazebosim.org/>
- [22] Nasa. (2023, Apr.) [Online]. [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology\\_readiness\\_level](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level)
- [23] Canudas de Wit, C. and Siciliano, B. and Bastin, G., *Theory of Robot Control.*: Springer London, 1996.
- [24] S. G. Tzafestas, *Introduction to mobile robot control.*: Elsevier, 2014.
- [25] OMC-StepperOnline. StepperOnline. [Online]. <https://www.omc-stepperonline.com/nema-23-stepper-motor-bipolar-l56mm-w-gear-raio-471-planetary-gearbox-23hs22-2804s-pg47.html>



## DESARROLLO DE UNA LEY DE CONTROL PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE UN DISPOSITIVO ROBÓTICO INDUSTRIAL

Alejandro Armando Hossian <sup>1</sup>, Roberto Carabajal <sup>2</sup>, Emanuel Maximiliano Alveal <sup>3</sup> y

Francisco Barboza <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento Académico de Electrónica – UTN Facultad Regional Neuquén  
Av. Pedro Rotter S/N, Plaza Huinca, Argentina – [alejandrohossian@yahoo.com.ar](mailto:alejandrohossian@yahoo.com.ar).

<sup>2</sup> Departamento Académico de Electrónica – UTN Facultad Regional Neuquén  
[rcarabaj@gmail.com](mailto:rcarabaj@gmail.com)

<sup>3</sup> Departamento Académico de Electrónica – UTN Facultad Regional Neuquén  
[maximilianoalveal@hotmail.com](mailto:maximilianoalveal@hotmail.com)

Departamento Académico de Electrónica – UTN Facultad Regional Neuquén  
[rcarabaj@gmail.com](mailto:rcarabaj@gmail.com)

### RESUMEN

El problema del control de posición del manipulador robótico industrial constituye un tópico fundamental en los distintos ambientes en los cuales operan estos sistemas; tales como ensamblado, soldadura, etc. El citado problema se estudia en función del movimiento del extremo del manipulador desde una cierta posición inicial hacia una posición deseada. Lo expuesto anteriormente referencia a que la  $i$  – ésima articulación del manipulador debe moverse hacia la  $i$  – ésima posición deseada. En este sentido, el control automático de robots manipuladores requiere el uso de herramientas matemáticas para el análisis de sistemas dinámicos, la dinámica no lineal que tiene como consecuencia que los algoritmos de control clásico no son aplicables a los robots manipuladores. En el presente artículo se propone un método de análisis sustentado en tres fases. En la primera se construye la correspondiente ecuación en lazo cerrado en términos de las variables de estado que definen el problema del control de posición, combinando la ley de control con la ecuación del modelo dinámico del manipulador. En la segunda se realiza el estudio de estabilidad en el sentido de Lyapunov, así como la unicidad del equilibrio en el sistema dinámico y las condiciones para las matrices de ganancia del controlador, que verifiquen el objetivo del control de posición pura. En la tercera fase se muestra una primera simulación de un robot prototipo y se presentan las principales respuestas del sistema (posición, error de posición, velocidad, y par de control). También se presenta una discusión de los resultados obtenidos, en representación de diagramas de plano-fase y para distintas condiciones iniciales del sistema. El comportamiento cualitativo de estas trayectorias en estos diagramas, permiten inferir las características dinámicas del sistema robótico; verificándose de esta manera que las trayectorias del sistema convergen asintóticamente hacia el punto de equilibrio con independencia de las condiciones iniciales.

**Palabras Claves:** Variables de estado; Algoritmo de control; Modelo dinámico, Formulación lagrangiana.



## 1. INTRODUCCIÓN

El control de movimiento o “control de trayectoria” consiste en la determinación de los pares  $\tau$  suministrados a los servos actuadores que conforman las articulaciones del dispositivo robótico. El objetivo central se basa en que las posiciones vinculadas a las coordenadas articulares del robot  $q(t)$  sigan en forma precisa a la posición articular deseada  $q_d(t)$ . Consecuentemente, el extremo terminal del robot debe seguir la trayectoria deseada en su espacio. Un caso especial de control de movimiento es el de “control de posición”; en el cual no existe una referencia variable en el tiempo que el robot deba seguir, como sí sucede en el control de trayectoria [1]. De esta forma, la trayectoria deseada en el marco de trabajo del robot es un punto en dicho espacio [2]; por lo que en el espacio articular, la posición deseada  $q_d$  es constante en el tiempo (set point). El problema de control de posición se centra en encontrar una ley de control  $\tau$  (función vectorial) que proporcione los pares que se deben aplicar en los servomotores que forman las articulaciones, a los efectos de que la posición actual  $q(t)$  del robot se aproxime de manera asintótica hacia la posición deseada  $q_d$ , y la velocidad articular tienda a cero ( $\dot{q}(t) \rightarrow 0$ ), sin tener en consideración las condiciones iniciales [3]. Si se plantea el problema de control en términos del vector de errores de posicionamiento  $\tilde{q} = q_d - q(t)$ , el objetivo del control de posición se verifica si el vector de error de posicionamiento y el de velocidad articular tienden a cero. La Ecuación  $\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \tilde{q}(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$  refleja estos conceptos en términos del vector de estados  $\tilde{q}(t)$  y  $\dot{q}(t)$ .

Un algoritmo de control de posición se focaliza en generar una zona de atracción en la ecuación de lazo cerrado conformada por el modelo dinámico del robot y la estructura matemática de dicho algoritmo de control; lo que significa que el punto de equilibrio sea asintóticamente estable. El manipulador robótico es un sistema dinámico cuyo esquema de control se centra en la estabilidad asintótica global; lo que explicita la existencia y unicidad del punto de equilibrio.

Es importante la convergencia asintótica de la solución  $x(t)$  del sistema al punto de equilibrio conforme el tiempo tiende a infinito. El análisis de la función candidata de Lyapunov [7], teorema de LaSalle [8] y las nociones de zona de atracción, punto de equilibrio y estabilidad asintótica, se desarrollan en la siguiente sección y en el caso de análisis. En esta primera fase del proceso de investigación, el grupo de investigación lleva a cabo una propuesta de estrategia de control con compensación de gravedad que verifique el objetivo de control que refleja la ecuación anterior.

## 2. MARCO TEÓRICO

Los modelos dinámicos de los manipuladores robóticos se caracterizan por ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales y no autónomas; por lo que las técnicas de diseño y procedimientos de sintonía que se emplean en sistemas lineales, son de aplicación limitada en la síntesis de



controladores con alto desempeño para estos dispositivos. Por tal razón, es que se utilizan técnicas de control más elaboradas a los efectos de obtener controladores con mayor nivel de prestaciones. El diseño de algoritmos de control para un robot manipulador de “n” grados de libertad requiere conocer su modelo dinámico; en especial, cuando la técnica de diseño del controlador se sustenta en la estructura de dicho modelo, tal como es el caso de la teoría de estabilidad de Lyapunov [4]. Por lo tanto, los conceptos de control clásico como Bode, root locus y Nyquist entre otros son específicos de sistemas lineales [5]; y, en consecuencia, no son aplicables a robots manipuladores, dado que su estructura es la de un sistema dinámico no lineal.

### 2.1. Modelo dinámico de robots manipuladores

Este modelo exhibe los fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica del sistema – robot; tales como, fuerzas centrífugas y de Coriolis, efectos inerciales, par gravitacional y fenómenos de fricción (viscosa, Coulomb y estática). La descripción matemática del modelo dinámico de un manipulador de n grados de libertad, está dada por la Ecuación diferencial no lineal (1):

$$\tau(t) = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_f(\dot{q}, f_e) \quad (1)$$

Donde  $\tau(t)$  es el vector de fuerzas o pares que se aplica a cada articulación,  $q(t) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de posiciones articulares,  $\dot{q}(t) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de velocidades articulares,  $\ddot{q}(t) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de aceleraciones articulares,  $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia que representa el cambio de estado de movimiento del robot,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de fuerzas centrípetas (fuerzas radiales en movimientos curvilíneos hacia adentro del centro de curvatura) y de Coriolis (esta fuerza representa la desviación del movimiento de traslación a raíz de su componente de rotación),  $G(q) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de pares gravitacionales (vector gradiente de la energía potencial) y  $F_f(\dot{q}, f_e) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de pares de fricción (viscosa, Coulomb y estática) de cada articulación del robot. La expresión (1) es una ecuación diferencial compleja, multivariable con dinámica fuertemente acoplada y “no lineal” en el vector de estados  $[q^T, \dot{q}^T]^T$ ; siendo válida cuando el robot tiene una estructura en cadena cinemática abierta [6]. La descripción de la dinámica del robot en base a un balance de energía de sus eslabones (potencial y cinética), se realiza en base a las ecuaciones de movimiento de Lagrange [6]. La formulación Lagrangiana dada por la Ecuación (2), se lleva a cabo por medio de cuatro procedimientos de cálculo: 1) cálculo de la energía cinética ( $K(q(t), \dot{q}(t))$ ), 2) cálculo de la energía potencial ( $U(q(t))$ ), 3) cálculo del Lagrangiano ( $L = K(q(t), \dot{q}(t)) - U(q(t))$ ) y 4) formulación de las ecuaciones escalares dinámicas de movimiento de Lagrange para un robot de n grados de libertad (gdl); las cuales se desarrollan para cada uno de ellos. Siendo  $\tau - F_f(\dot{q}, f_e)$  las fuerzas o pares no conservativos en cada articulación.



$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau - F_f(\dot{q}, f_e) \quad (2)$$

## 2.2. Sistemas dinámicos

Los sistemas dinámicos son modelos matemáticos con ecuaciones diferenciales que describen los fenómenos físicos presentes en el manipulador. Dentro del campo de la robótica se transforma el modelo dinámico a una ecuación diferencial de primer orden (ode), por medio de la representación en variables de estado. La Ecuación diferencial ordinaria de primer orden (3), representa un sistema mecánico con dinámica lineal y no lineal.

$$\dot{x} = f(x) \quad (3)$$

Donde  $x \in \mathbb{R}^n$  es la variable de estado fase que suministra información interna acerca de la dinámica del sistema,  $x = x(t)$  es función continua del tiempo y  $n \in \mathbb{N}$ . La derivada temporal de la variable de estado existe y es continua en el tiempo:  $\dot{x} \in \mathbb{R}^n$  y  $\dot{x} = \dot{x}(t)$ . La función  $f(x)$  es un mapeo vectorial  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  en la variable de estado  $x(t)$ . La ecuación (3) corresponde con un sistema dinámico autónomo, donde la variable  $t$  está implícita en (3), es decir  $x = x(t)$ . En el marco de análisis de los sistemas dinámicos, se define un punto de equilibrio como un vector constante  $x_e \in \mathbb{R}^n$  del sistema (3) si  $f(x_e) = 0 \forall t \geq 0$ . Si la condición inicial  $x(0) \in \mathbb{R}^n$  es un equilibrio ( $x(0) = x_e \in \mathbb{R}^n$ ), entonces se satisface  $x(t) = x, \forall t \geq 0$  y  $\dot{x}(t) = 0 \forall t \geq 0$ . Generalmente se asume que el origen  $x = 0 \in \mathbb{R}^n$  es un equilibrio de un sistema dinámico representado por la ecuación (3). Cabe señalar que el vector  $x_e$  constituye un ente dinámico en el cual todas las fuerzas del sistema hallan su equilibrio; siendo fundamental en control de robots analizar la estabilidad del vector  $x_e$ .

### 2.2.1. Estabilidad en el sentido de Lyapunov y zona de atracción

En la zona de atracción, cada solución de la trayectoria  $x(t)$  que comienza suficientemente cercana a 0, a partir de  $t_0$  se aproxima al origen 0 a medida que  $t \rightarrow \infty$ . El origen  $x = 0 \in \mathbb{R}^n$  es un punto de equilibrio asintóticamente estable en forma global si: 1) el origen es estable; esta condición se cumple si para cada número  $\varepsilon > 0 \exists$  un número  $\delta / \|x(0)\| < \delta \rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon \forall t \geq 0$  y 2) el origen es atractivo en forma global; condición que se cumple si  $\|x(t)\| \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty \forall x(0) \in \mathbb{R}^n$ . La estabilidad asintótica global en sistemas dinámicos autónomos indica que el punto de equilibrio  $x_e = 0 \in \mathbb{R}^n$  es único y no depende de la condición inicial  $x(0) \in \mathbb{R}^n$ . La estabilidad asintótica local significa varios puntos de equilibrio y la convergencia de la trayectoria  $x(t)$  es con respecto a uno de esos puntos (origen de estados  $x = 0 \in \mathbb{R}^n$ ) y, por lo tanto, sí depende de las condiciones iniciales dentro de la zona de atracción del origen de estados. En otros términos, la existencia de un único  $x_e$  es una condición necesaria para establecer sobre éste estabilidad asintótica en forma global [9]. Estos conceptos de estabilidad son propiedades intrínsecas deseables



del punto de equilibrio  $x_e$  de un sistema dinámico caracterizado por la ecuación (3)  $\dot{x} = f(x)$ . Por su parte, la estabilidad en el sentido de Lyapunov permite analizar el comportamiento de sistemas dinámicos lineales y no lineales en base a la ecuación (3). La teoría de estabilidad de Lyapunov asume que el punto de equilibrio de un sistema dinámico autónomo como el caracterizado por la ecuación (3), es estable si su energía total es una función definida positiva continuamente decreciente hasta alcanzar un estado de equilibrio, el cual está asociado con el mínimo global de la energía total. De esta manera, la derivada temporal de esta función de energía (potencia del sistema) es definida negativa hasta alcanzar el equilibrio. Una función  $V(x)$  para el equilibrio  $x = 0 \in \mathbb{R}^n$  es una función candidata de Lyapunov de la ecuación (3) si  $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$  si:  $V(x)$  es una función definida positiva y  $\partial V(x)/\partial x$  y  $dV(x)/dt$  son funciones continuas respecto a  $x$ . Se tienen dos teoremas fundamentales para el análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov. El primero establece que el origen  $x = 0 \in \mathbb{R}^n$  es un estado de equilibrio estable de la ecuación (3) si existe una función candidata de Lyapunov  $V(x)$  con derivadas parciales continuas respecto a  $x$  y tal que su derivada temporal satisfaga  $dV(x)/dt = \dot{V}(x) \leq 0 \forall t \geq 0 \forall x \in \mathbb{R}^n$ . Si esto se cumple, entonces  $V(x)$  es un función decreciente y las soluciones  $x(t)$  de un sistema dado por la ecuación (3) están acotadas para toda condición inicial  $x(0) = x_0 \in \mathbb{R}^n$ . El segundo dice que el origen  $x = 0 \in \mathbb{R}^n$  es un estado de equilibrio estable en forma global de la ecuación (3) si existe una función candidata de Lyapunov  $V(x)$  tal que su derivada temporal satisfaga  $\dot{V}(0) = 0 \forall t \geq 0$  y  $\dot{V}(0) < 0 \forall t \geq 0, \forall x \neq 0 \in \mathbb{R}^n$ . Se cumple para la variable de estado  $x(t)$  que  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ .

### 2.2.2. Teorema de Lasalle

Para un sistema dado por la ecuación (3) cuyo origen  $x = 0 \in \mathbb{R}^n$ , y aun cuando la función candidata de Lyapunov  $V(x)$  tiene derivada temporal semidefinida negativa, en ciertos casos se puede demostrar estabilidad asintótica global. Se define a un conjunto invariante  $\Omega$  para un sistema dinámico, como aquel en el cual cada trayectoria que comienza en  $\Omega$  permanece en  $\Omega \forall t \geq 0$ . En este sentido, cualquier punto de equilibrio estable es un conjunto invariante, dado que ninguna trayectoria puede permanecer en forma indefinida en un punto distinto al de equilibrio estable. De esta forma, es posible construir una función Lyapunov ( $V(x)$ ), tal que sus derivadas a lo largo de las trayectorias del sistema son semidefinidas negativas, y no existe otra trayectoria del sistema que permanezca indefinidamente en puntos donde las derivadas se disipan; por consiguiente, el punto de equilibrio es asintóticamente estable en forma global. Definiendo el conjunto  $\Omega$  en base a la Ecuación (4), si  $x(0) = 0$  es la única condición inicial en  $\Omega$  para la cual se cumple que  $x(t) \in \Omega \forall t \geq 0$ , entonces el origen  $x = 0 \in \mathbb{R}^n$  es un equilibrio asintóticamente estable.

$$\Omega = \{x \in \mathbb{R}^n: \dot{V}(x) = 0\} \quad (4)$$

### 2.3. Control PD en robots manipuladores



La ecuación en lazo cerrado conformada por el modelo dinámico del robot y la estructura matemática del control proporcional derivativo (PD) con compensación de gravedad, posee un origen asintóticamente estable en forma global en términos del vector de estados  $[\tilde{q}^T, \dot{q}^T]^T$ . A tal efecto, se elige una función de Lyapunov conformada por la energía cinética del manipulador más una función cuadrática del error de posición, de manera tal que la derivada temporal sea semidefinida negativa. Con el teorema de Lasalle, se demuestra estabilidad asintótica global del punto de equilibrio. El modelo dinámico de un robot manipulador de  $n$  gdl sin término de fricción, está dada por la Ecuación (5); y la ley de control PD con compensación de gravedad por la Ecuación (6):

$$\tau(t) = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (5)$$

$$\tau(t) = K_p \tilde{q} - K_v \dot{q} + G(q) \quad (6)$$

En la (6)  $K_p$  y  $K_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$  son las ganancias proporcional y derivativa, y deben ser matrices definidas positivas para garantizar la estabilidad asintótica global del origen de la (6). Y  $g(q)$  es el vector de pares gravitacionales, dado por  $g(q) = \partial U(q)/\partial q$ , siendo  $U(q)$  la energía potencial gravitatoria del robot. El término  $g(q)$  en la ecuación (6) del algoritmo de control, indica que el controlador usa en forma parcial el modelo dinámico del robot. El término de compensación de gravedad  $g(q)$ , junto con las condiciones establecidas para las matrices  $K_p$  y  $K_v$ , es fundamental para garantizar la unicidad del punto de equilibrio. Combinando la (5) y (6) se obtiene la ecuación en lazo cerrado (7) en variables de estado que precisan el problema de control de posición; y en Figura 1 se ilustra el diagrama de bloques para un control PD con compensación de gravedad [10]. La posición articular  $q(t)$  se retroalimenta formando la señal de error  $\tilde{q}(t) = q_d - q(t)$ . La velocidad articular  $\dot{q}(t)$  actúa como inyección de amortiguamiento, de forma de dosificar la energía del término de control proporcional  $K_p \tilde{q}$  mejorando de esta forma el funcionamiento.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} [K_p \tilde{q} - K_v \dot{q} - C(q, \dot{q}) \dot{q}] \end{bmatrix} \quad (7)$$

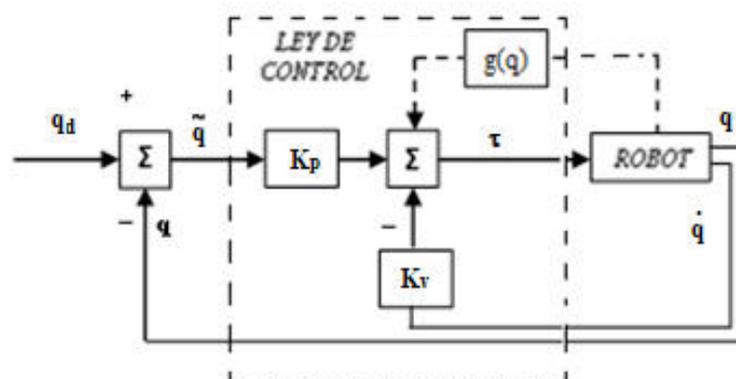


Figura 1. Diagrama de bloques de control PD con compensación de gravedad



### 3. CASO DE ANÁLISIS

Se analiza el caso de un robot de 1 gdl en 2 fases: en la 1ra se obtiene la ecuación en lazo cerrado empleando un algoritmo de control PD con compensación de gravedad; y en la 2da, se lleva a cabo el análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov y la unicidad del punto de equilibrio. La Figura 2 muestra los parámetros físicos del robot: la masa  $m$ , el centro de masa  $l_c$ , el momento de inercia  $I_P = ml_c^2 + I$  y la posición articular variable en el tiempo  $q(t)$ .

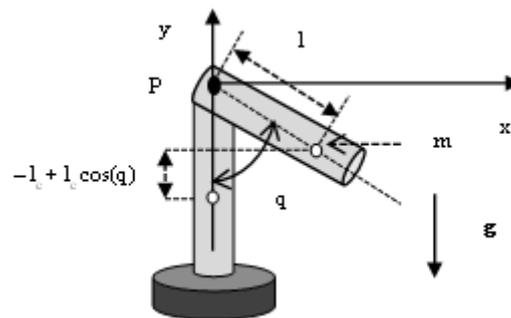


Figura 2. Movimiento del centro de masa  $l_c$  del robot manipulador

1<sup>RA</sup> Fase: la formulación Lagrangiana brinda el modelo dinámico del robot, cuya cinemática directa está dada por la Ecuación (8); luego se obtiene la energía cinética  $K$  por la Ecuación (9) y la energía potencial  $U$  por la Ecuación (10):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_c \sin(q) \\ l_c \cos(q) \end{bmatrix}; v = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_c \cos(q) \dot{q} \\ -l_c \sin(q) \dot{q} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$K(q(t), \dot{q}(t)) = \frac{1}{2} [v^T v + I \dot{q}^2] = \frac{1}{2} [ml_c^2 + I] \dot{q}^2 \quad (9)$$

$$U(q) = mgl_c(1 - \cos(q)) \quad (10)$$

El Lagrangiano lo da la Ecuación (11), la cual adquiere el formato de una Ecuación escalar (12):

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q) = \frac{1}{2} [ml_c^2 + I] \dot{q}^2 - mgl_c(1 - \cos(q)) \quad (11)$$

$$\tau = \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} + b \dot{q} \quad (12)$$

Se llega al modelo dinámico representado por la Ecuación (13) combinando (11) y (12), siendo la fricción representada por el coeficiente  $b$ .

$$\tau = [ml_c^2 + I] \ddot{q} + b \dot{q} + mgl_c \sin(q) \quad (13)$$

El problema se centra en posicionar el brazo en un punto deseado  $q_d$ , desde una condición inicial como  $q=0$ . El modelo de control PD más compensación gravitatoria lo da la Ecuación (14).

$$\tau = K_p \tilde{q} - K_v \dot{\tilde{q}} + mgl_c \sin(q) \quad (14)$$



El problema de posición del robot se define en las variables de estado  $\tilde{q}$  y  $\dot{q}$ ; se obtiene la Ecuación en lazo cerrado (15) que vincula el modelo dinámico (13) con la estrategia de control (14).

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \\ q \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \\ q \end{bmatrix}}_{\hat{f}(x)} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{k_p}{(ml_c^2+I)} & -\frac{(k_v+b)}{(ml_c^2+I)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ q \end{bmatrix} \quad (15)$$

2<sup>DA</sup> Fase: del análisis de la (15) se infiere que la 1<sup>ra</sup> componente de (15) indica que  $-\dot{q} = -1 \dot{q} = 0 \Leftrightarrow \dot{q} = 0$ . Empleando  $\dot{q} = 0$  en la 2<sup>da</sup> componente de (15), se tiene que  $[k_v + b]\dot{q} = 0 \Leftrightarrow \dot{q} = 0$  y  $k_p \in \mathbb{R}_+$ ;  $b \in \mathbb{R}_+$ . Siendo que también se tiene que  $k_p \tilde{q} = 0 \Leftrightarrow \tilde{q} = 0$  y  $k_p \in \mathbb{R}_+$ . Se demuestra que el origen del espacio de estados es el punto de equilibrio y es único; a saber:  $[\tilde{q}, \dot{q}]^T = [0,0]^T$ . Para el análisis de la estabilidad del punto de equilibrio (origen de estados) se propone como función candidata de Lyapunov la Ecuación (16), teniendo en cuenta que  $I_p = ml_c^2 + I$ :

$$V(\tilde{q}, \dot{q}) = \frac{1}{2} I_p \dot{q}^2 + \frac{1}{2} K_p \tilde{q}^2 \quad (16)$$

El primer término de la ecuación (16) hace referencia a la energía cinética, mientras que el segundo refiere a la energía potencial que es una función cuadrática del error de posición y por diseño  $k_p$  es definida positiva. En virtud de esto, se infiere que  $V$  es una función definida positiva.

Dado que  $q_d = \text{constante}$  y de la 2<sup>da</sup> componente de la (15), se tienen las Ecuaciones (17) y (18):

$$\tilde{q}(t) = q_d - q(t) \rightarrow \dot{\tilde{q}}(t) = \dot{q}_d - \dot{q}(t) \rightarrow \dot{\tilde{q}}(t) = -\dot{q}(t) \quad (17)$$

$$I_p \ddot{\tilde{q}} = K_p \tilde{q} - K_v \dot{\tilde{q}} - b \dot{\tilde{q}} \rightarrow I_p \ddot{\tilde{q}} = K_p \tilde{q} - [K_v + b] \dot{\tilde{q}} \quad (18)$$

Se deriva (16) respecto al tiempo y por las ecuaciones (17) y (18), se obtiene la Ecuación (19):

$$\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}) = I_p \dot{q} \ddot{q} + K_p \tilde{q} \dot{\tilde{q}} = I_p \dot{q} \ddot{q} - K_p \tilde{q} \dot{q} = K_p \tilde{q} \dot{q} - [K_v + b] \dot{q}^2 - K_p \tilde{q} \dot{q} \rightarrow \dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}) = -[K_v + b] \dot{q}^2 \leq 0 \quad (19)$$

Esta derivada temporal de la función de Lyapunov es semidefinida negativa; habida cuenta de que depende solo de la variable  $\dot{q}$ , y dado que no se identifica en la (19) la otra variable de estado correspondiente al error  $\tilde{q}$ . Se concluye que  $\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}) = 0$  si  $\dot{q} = 0$  y el error  $\tilde{q}$  adopta un valor cualquiera. De esta forma, la función candidata de Lyapunov (16) permite demostrar la estabilidad del punto de equilibrio. Pero la derivada temporal de la función candidata dada por la expresión (19), indica que no se satisfacen las condiciones necesarias de estabilidad asintótica en forma global (es decir para toda condición inicial) para la ecuación autónoma de lazo cerrado (15). Como la ecuación (15) es autónoma, es posible usar el teorema de LaSalle para demostrar la estabilidad asintótica global del punto de equilibrio [13], complementando así la función candidata de Lyapunov. El conjunto  $\Omega$  para este caso de estudio está dado por la Ecuación (20):

$$\Omega = \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2 : \dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}) = 0 \Leftrightarrow \dot{q} = 0 \in \mathbb{R}, \tilde{q} \in \mathbb{R} \right\} \quad (20)$$



Se observa que el único punto de equilibrio es  $[\tilde{q} \quad \dot{q}] = [0 \quad 0]$ . Por otro lado, notar que  $V=0$  para  $\dot{q} = 0$  y  $\tilde{q}$  cualquier real. Luego, el mayor conjunto invariante se obtiene observando la dinámica del sistema en  $\Omega$  tal que  $\dot{q} = 0$  (cte). Si  $\dot{q} = 0$  (cte) y  $\tilde{q}$  no es cero, entonces la aceleración resulta distinta de cero (ver segunda coordenada de Ecuación (16)), lo que implica que aparecerá una velocidad y por consiguiente las trayectorias salen fuera del conjunto  $\Omega$  (absurdo, puesto que se considera  $\dot{q} = 0$  (cte)). Por lo tanto, el único conjunto invariante es  $\dot{q} = 0$  y  $\tilde{q} = 0$ . Luego, por el Teorema de Lasalle se consigue concluir que el punto de equilibrio es asintóticamente estable ( $\dot{q} \rightarrow 0$  y  $\tilde{q} \rightarrow 0$  para  $t \rightarrow \infty$ ). O sea, se cumple asintóticamente el objetivo de control de posicionamiento, con error final ( $t \rightarrow \infty$ ) nulo. La aplicación del teorema de Lasalle, se demuestra estabilidad asintótica global del origen (punto de equilibrio) de la ecuación en lazo cerrado (15). Cabe señalar, que la forma de las trayectorias depende de la selección de las ganancias de control  $K_p > 0$  y  $K_v > 0$ .

#### 4. RESULTADOS

Se muestra una primera simulación de un robot prototipo de 1 gdl cuyo extremo se desea posicionar en  $120^\circ$  con condiciones iniciales igual a cero en el vector de estados (posición y velocidad inicial nulas). Una masa  $m = 6$  Kg, fricción viscosa  $b = 0.21$  Nms/rad, centro de masa  $l_c = 0.05$  m, longitud  $l = 0.4$ m, momento de inercia del rotor  $I_r = 0.18$  Nms<sup>2</sup>/rad (siendo el momento de inercia total del robot  $I = 0.18 + 6 \cdot 0.05^2 = 0,195$ ). La ganancia proporcional es de  $k_p = 4$ , con una ganancia derivativa de un 50% de  $k_p$  ( $k_v = 0.5 \times 4 = 2$ ). En Figura 3 (izquierda) se ve que la posición articular  $q(t)$  del brazo robótico converge hacia los  $120^\circ$ , y la señal del error converge a  $0^\circ$ . La fase transitoria para  $q(t)$  posee un comportamiento suave, estabilizándose en los  $120^\circ$  entre 2 y 2,5seg. Por su parte, la variación del error de posición  $q$  tilde de Figura 3 (derecha), converge a 0 entre 2 y 2,5seg. Esta peculiaridad se debe a la energía que suministra el término de control proporcional  $k_p \tilde{q}$ ; la cual se ve dosificada por la inyección de amortiguamiento que proporciona la acción de control derivativo  $-k_v \dot{q}$ , donde el signo menos en la ley de control es el que gradúa la energía entregada por el término de control proporcional  $k_p \tilde{q}$ . Una vez que el brazo llega a la posición deseada  $q_d = 120^\circ$ , la Figura 4 (izquierda) refiere a que la velocidad articular se aproxima a 0 entre 2 y 2,5seg. De esta forma, el brazo permanece estático en el estado estacionario, lo cual indica que el mismo ingresa en la zona del atractor del punto de equilibrio. Es interesante observar el incremento de la velocidad articular en el estado transitorio hasta alcanzar un pico de casi 170 grados/s a los 0,2 seg; para luego ir descendiendo por la influencia del efecto de amortiguamiento. En otras palabras, el efecto de amortiguamiento originado por la acción de control derivativa se manifiesta, principalmente, en el estado transitorio. En estado estacionario la posición tiende a ser una constante y la velocidad es 0, con lo que se diluye el efecto de amortiguamiento. En Figura 4 (derecha) se observa la evolución temporal del par aplicado de la

ley de control; en la que se ve una ligera similitud con el perfil del error, con un alto par inicial de casi 8 Nm para procurar disminuir el error inicial de  $120^\circ$ ; así como también, comenzar a movilizar el mecanismo desde el reposo ( $q_p = 0$  grados/s en  $t = 0$ seg). Se observa que el par de control se estabiliza en unos 2,5 Nm en 1 seg; detectándose un pequeño pico por debajo del valor estable de 2,5 Nm en concordancia con el pico de velocidad de 170 grados/s que alcanza el dispositivo a los 0,2 seg. Este pico de la señal del par de control no influye en la curva del error de posición  $q$  tildé que continua su decaimiento suave hasta alcanzar la nulidad a los 2 seg.

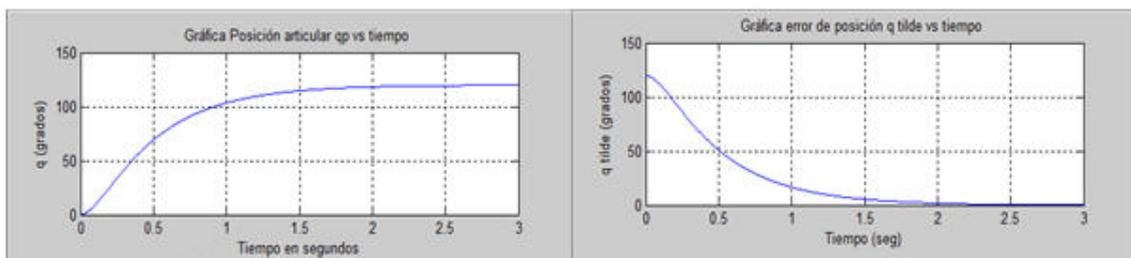


Figura 3. Respuesta del robot de un grado de libertad para posición articular (izquierda) y señal de error con condiciones iniciales nulas en el vector de estados (derecha).

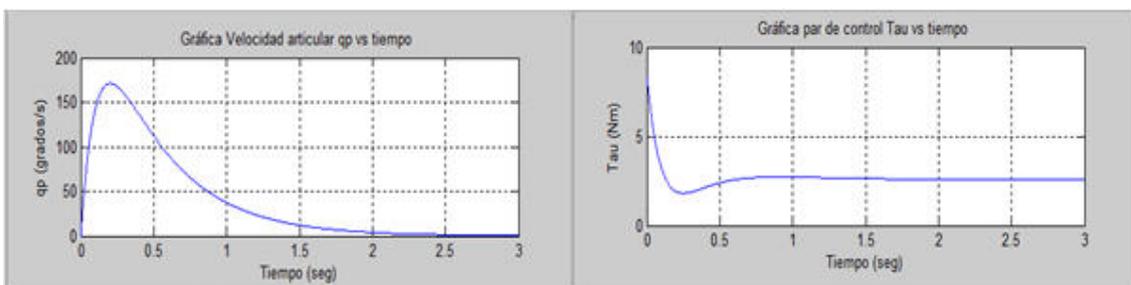


Figura 4. Respuesta del robot de un grado de libertad para velocidad articular (izquierda) y par de control con condiciones iniciales nulas en el vector de estados (derecha).

A modo ilustrativo, se muestran las respuestas del robot para condición iniciales de  $30^\circ$  de posición articular y velocidad articular nula; manteniendo la misma ley de control, los mismos parámetros dimensionales y la misma sintonía de ganancias. En la Figura 5 (izquierda y derecha), se ve que los perfiles presentan similitud con el obtenido para condiciones iniciales nulas, dado que los valores estacionarios se alcanzan en instantes muy parecidos. En la Figura 6 (izquierda), se ve que la velocidad articular alcanza el pico también a los 0,2 seg, adquiriendo un valor de 125 grados/s, en lugar de los 170 grados/s registrados con condiciones iniciales nulas. En la Figura 6 (derecha) se observa la evolución temporal del par aplicado de la ley de control; en la que se ve una ligera similitud con el obtenido para condiciones iniciales nulas.

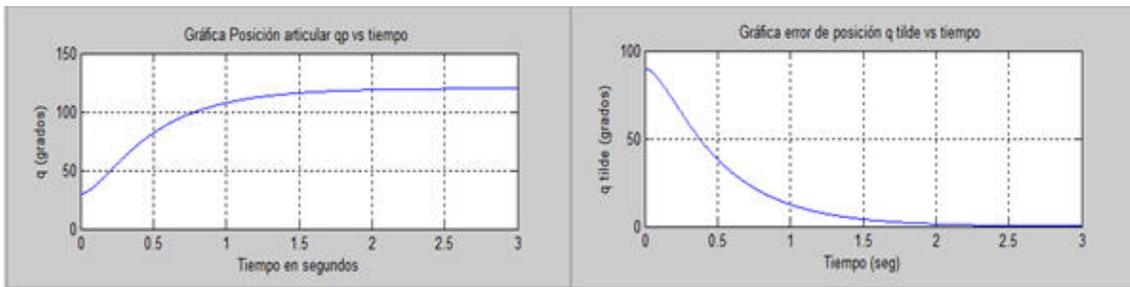


Figura 5. Respuesta del robot de un grado de libertad para posición articular (izquierda) y señal de error con posición articular inicial de  $30^\circ$  y velocidad articular nula (derecha).

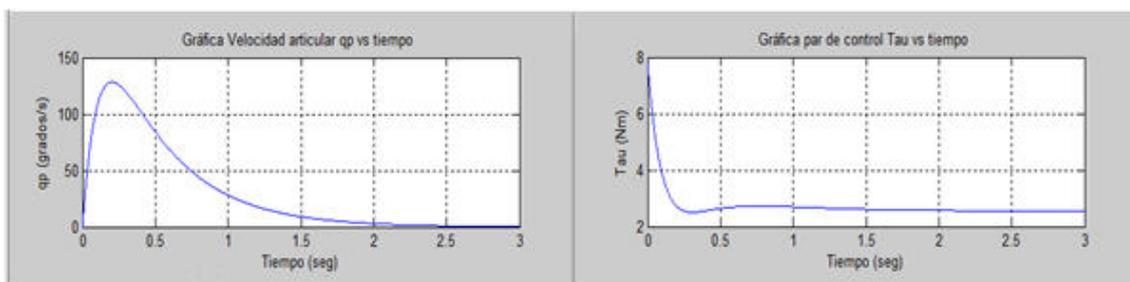


Figura 6. Respuesta del robot de un grado de libertad para velocidad articular (izquierda) y par de control con posición articular inicial de  $30^\circ$  y velocidad articular nula (derecha).

En Figura 7 se ve el diagrama de plano fase que permite inferir información acerca de la estabilidad del sistema. La idea central es generar un conjunto de trayectorias o curvas de contorno para distintas condiciones iniciales en el espacio de estados (velocidad articular en ordenadas y posición articular en abscisas). También puede ser la señal de error en el eje horizontal, lo que no hace variar la interpretación. De esta forma, se observan las distintas trayectorias del sistema para las condiciones iniciales propuestas. El comportamiento cualitativo de estas trayectorias permite inferir características dinámicas del sistema. Por ejemplo, para condiciones iniciales nulas, se ve que para la posición articular de  $25^\circ$ , la velocidad articular alcanza su valor máximo de 170 grados/s (lo que se puede verificar por simple observación de la primera figura 3 y primera figura 4). A la misma conclusión se arriba para condiciones iniciales de  $(30^\circ, 0$  grados/s), donde se ve que para una posición articular de unos  $45^\circ$ , la velocidad articular es máxima para 125 grados/s (lo que se verifica por simple observación de la figura 5 izquierda y figura 7 izquierda). A conclusiones similares se arriban para las demás condiciones iniciales.

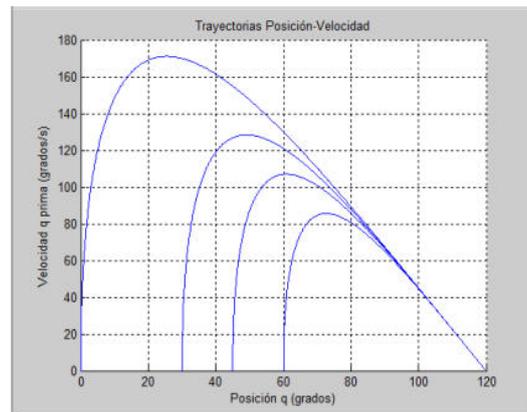


Figura 7. Diagrama del plano fase del robot de un grado de libertad para distintas condiciones iniciales y para velocidad articular vs posición articular.

Un concepto de suma importancia dentro del contexto de esta discusión de resultados se refleja del análisis de la figura 7. El punto de equilibrio (ya sea  $(120^\circ, 0 \text{ grados/s})$ ) formada por el modelo dinámico del robot y la ley de control PD con compensación de gravedad, posee la propiedad de ser asintóticamente estable. La figura 7 muestra que el entorno del punto de equilibrio ejerce una fuerza de atracción sobre las señales de velocidad articular y posición articular hacia el origen del espacio de estados  $(120^\circ, 0 \text{ grados/s})$ . El atractor conduce necesariamente al error de posición y velocidad articular al origen del espacio de estados sin considerar las condiciones iniciales.

## 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

A nivel de conclusiones se tiene lo siguiente: 1) Se obtiene la ecuación en lazo cerrado combinando la ley de control PD con compensación de gravedad con la ecuación del modelo dinámico. 2) Se lleva a cabo el análisis de estabilidad del punto de equilibrio (origen del espacio de estados) mediante la función de Lyapunov. 3) Se demuestra que el origen del espacio de estados es el único punto de equilibrio, y se aplica el teorema de LaSalle para demostrar estabilidad asintótica en forma global del origen de la ecuación en lazo cerrado (16). 4) Se observa que una vez que el robot se detiene en el estado estacionario, el término de la compensación de gravedad tiende a una constante ( $g(q_d) = mgl_c \sin(q_d)$ ) para mantener al robot en la posición deseada  $q_d$ . 5) En estado estacionario la única energía que entrega el algoritmo de control es la del par gravitacional ( $g(q_d) = mgl_c \sin(q_d)$ ); de lo que se infiere la importancia de incluir esta componente en la ley de control, y así compensar parcialmente la dinámica del brazo. 6) En sintonía con el punto anterior, si no fuese así, dicho brazo se desplazaría hacia abajo aumentando el error de posición  $\tilde{q}(t)$ , por lo que el controlador envía energía para volverlo a la posición deseada  $q_d$  ( $120^\circ$  para el caso de estudio). 7) Se realizó un estudio complementario para otra condición inicial. 8) Se complementó este análisis con la construcción de los diagramas de plano fase en las variables de estado



$(\tilde{q}(t), \dot{q}(t))$  y  $(q(t), \dot{q}(t))$ , y se verificó que las trayectorias del sistema convergen asintóticamente hacia el punto de equilibrio con independencia de las condiciones iniciales.

A nivel de futuras líneas de investigación: (1) El grupo de investigación se encuentra analizando el control de posición para robot de 2 gdl. (2) El grupo de investigación se encuentra analizando una ley de control adaptable que permita un análisis detallado de la sintonización de las ganancias. (3) En este sentido, está en estudio el algoritmo de control PID con ciertas condiciones de sintonía. (4) En próxima fase de investigación, se analiza el control de trayectoria donde la posición deseada  $q_d$  es variable en el tiempo.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Barrientos, Antonio; Peñín, Luis Felipe; Balaguer Carlos y Aracil Rafael. “Fundamentos de Robótica”. Editorial McGraw – Hill. Madrid – España, 2007.
- [2] Reyes Cortés, F., “Robótica. Control de Robots Manipuladores”. Ed. Alfaomega, México, 2011
- [3] Reyes Cortés, F., “Mecatrónica, Control y Automatización”. Ed. Alfaomega, México, 2013.
- [4] Poliak, B., “Lyapunov Functions: An Optimization Theory Perspective”. IFAC 2017
- [5] A Review of Fundamentals of Lyapunov Theory. Chutipphon Pukdeboon. The Journal of Applied Science, [2011] Vol. 10 No. 2.
- [6] Saltaren, R., “Robótica Aplicada. Analisis y Diseño de Robots Paralelos y Seriales con Matlab”. Ed. Dextra, 2014.
- [7] Strict Lyapunov functions for control of robot manipulators. Victor Santibáñez, Rafael Kelly. Automatica Volume 33, Issue 4, April 1997, Pages 675-682.
- [8] Spong, M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M., “Robot Modeling and Control”, Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2020. ISBN: 9781119523994.
- [9] Salgado, E. M., “Analisis de sistemas lineales”. Ed. Pearson Education, 2005.
- [10] Kelly, R., “Control de Robots Manipuladores”. Ed. Pearson Prentice Hall, España, 2003.



## IMPACTO DE SIMPLIFICACIONES DE MODELADO EN LA PREDICCIÓN DEL DESEMPEÑO DE POSICIONADORES NANOMÉTRICOS

Gustavo M. Flores<sup>1</sup>, Lucas I. Lamas<sup>1</sup>, Alejandro Masante<sup>1</sup>,  
Juan E. Isasti<sup>1</sup>, Rogelio L. Hecker<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecánica – Universidad Nacional de La Pampa  
Calle 110 Nro 390, General Pico, La Pampa, Argentina, [gmflores@ing.unlpam.edu.ar](mailto:gmflores@ing.unlpam.edu.ar)

<sup>2</sup> CONICET, [hecker@ing.unlpam.edu.ar](mailto:hecker@ing.unlpam.edu.ar)

### RESUMEN

Un sistema de posicionamiento nanométrico generalmente utiliza un actuador piezoeléctrico para generar el desplazamiento de una plataforma o área de trabajo. Para conducir el movimiento se emplean estructuras elásticas o “flexure stage”. La expansión de estos actuadores permite recorridos de algunos micrómetros con resolución de nanómetros. Para un mayor desplazamiento se utilizan mecanismos de amplificación como brazos de palanca o sistemas tipo puente. El diseño mecánico del conjunto, para cumplir objetivos de desempeño como desplazamientos, frecuencias naturales, etc., es una tarea compleja. Al ser los desplazamientos tan pequeños resulta difícil predecir con exactitud la respuesta real del conjunto. Esto se debe a la influencia de tolerancias de fabricación, incertidumbres del actuador y del material, simplificaciones en el modelado, etc. Este trabajo presenta el efecto de las simplificaciones adoptadas en la etapa de diseño, sobre la predicción del desplazamiento de posicionadores nanométricos. Primero se estudia la influencia del método de montaje y precarga del actuador, en un sistema de actuación directa. A continuación, se analiza el efecto de las deformaciones de vínculos rotacionales y brazo de palanca, para un posicionador con amplificación de recorrido. También se analiza la influencia del valor real de la rigidez del sistema de guiado, obtenido experimentalmente, respecto del teórico de diseño. Se comparan los resultados analíticos con los obtenidos por simulación, utilizando el método de elementos finitos, y con resultados experimentales. La expansión del piezoeléctrico se mide con un comparador de 100 nm de resolución y se utiliza un sensor capacitivo de 5 nm de resolución para medir el desplazamiento del área de trabajo. Se concluye que las expresiones analíticas permiten determinar los desplazamientos máximos alcanzables pero no son una buena aproximación del comportamiento real del sistema (errores superiores al 30% con valores experimentales). Sin embargo son muy útiles para relacionar las principales variables de diseño.

**Palabras Clave:** *Sistemas de Posicionamiento; Actuador Piezoeléctrico; Estructuras Elásticas; Resolución Nanométrica.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Los posicionadores nanométricos permiten realizar desplazamientos de algunos micrones con resolución de nanómetros. Son utilizados en aplicaciones de alta precisión como microscopía, metrología, fabricación de MEMS, entre otras. Generalmente se utiliza un actuador piezoeléctrico para efectuar el desplazamiento y una estructura elástica (también conocida como “flexure stage”) para guiar su movimiento. Los piezoeléctricos se caracterizan por generar altos esfuerzos con bajas deformaciones (0,1 % de su longitud) y resolución de posicionamiento teórica, ilimitada [1]. En la práctica, el límite está impuesto por la electrónica del sistema de actuación y control [2,3]. El guiado del movimiento se logra a partir de la deformación elástica de una estructura de rigidez conocida, evitando uniones o acoples deslizantes, eliminando la fricción, el desgaste y los problemas de juego mecánico. Esto garantiza una alta precisión de posicionamiento [10]. Para aumentar la expansión del actuador, se utilizan mecanismos de amplificación como brazos de palanca [3-5] o estructuras más complejas como la de Scott-Russell, romboidal o puente y sus variantes [6,7].

El diseño de estos sistemas, para cumplir objetivos de desempeño (desplazamientos, frecuencias naturales, etc.), es una tarea compleja. En particular el desplazamiento alcanzable, es difícil predecir con exactitud a partir del modelo matemático del conjunto. Esto se debe, en principio, a que los desplazamientos son muy pequeños, por lo tanto las simplificaciones que se adopten en la etapa de diseño tienen un impacto negativo importante en la predicción del desplazamiento real. Este disminuye considerablemente respecto del calculado a partir del modelo matemático. Esto sugiere por un lado, que los modelos matemáticos simplificados permiten hallar valores de desplazamientos máximos o que representan valores límites alcanzables. Y por otro lado, que es necesario utilizar modelos más complejos o herramientas de diseño que utilicen el método de elementos finitos, para obtener resultados más aproximados. Hay otros factores que también tienen efecto en la predicción del desplazamiento real, como son las tolerancias de fabricación, incertidumbres del actuador y del material, etc.

Particularmente en este trabajo se presenta el efecto de las simplificaciones de modelado en la predicción del desplazamiento de dos posicionadores nanométricos. En uno de ellos, el piezoeléctrico actúa en forma directa sobre la plataforma de trabajo. Mientras que en el otro, se utiliza un brazo de palanca para amplificar el recorrido del actuador. En la primera parte del trabajo se presentan características particulares y constructivas de los actuadores. Estas son utilizadas para modelar el sistema de posicionamiento y también para imponer restricciones de montaje como precarga, alineación, etc. Luego se presentan los casos de estudio, indicando brevemente en cada uno de ellos el proceso de diseño y las ecuaciones obtenidas. El trabajo continúa con la presentación de los resultados experimentales y los obtenidos por simulación



utilizando el método de elementos finitos. Finalmente se analizan los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2. ACTUADORES PIEZOELECTRICOS.

Un piezoeléctrico es utilizado como actuador en sistemas de posicionamiento haciendo uso de la expansión que experimenta cuando se le aplica una tensión eléctrica. Idealmente se modelan como un resorte de rigidez  $k_p$ , que genera una fuerza proporcional a la tensión aplicada. La fuerza máxima,  $F_{max}$ , se da en condición de bloqueo y el desplazamiento nominal,  $\Delta L_0$ , se da en vacío. La relación entre estas variables está dada por  $F_{max} = k_p \Delta L_0$ . Cuando el piezoeléctrico actúa contra una estructura de rigidez finita, el desplazamiento disminuye y se calcula con la Ecuación (1). Esta expresión surge de considerar que se encuentra rígidamente empotrado en un extremo y sobre el otro actúa contra el sistema flexible de guiado, Figura 1:a).

$$\Delta L = \Delta L_0 \cdot \left( \frac{k_p}{k_p + k_f} \right) \quad (1)$$

La característica constructiva de los piezoeléctricos hace que no toleren esfuerzos de tracción, flexión ni al corte [1]. En aplicaciones dinámicas, o donde los esfuerzos de tracción pueden ser importantes, se debe aplicar una precarga externa por ejemplo con un resorte o partir del propio mecanismo elástico de guiado. Además, para evitar flexiones destructivas, producto de desalineaciones de montaje, el fabricante recomienda la implementación de vínculos flexibles rotacionales o superficies de contacto esféricas. Por otro lado, cuando se requieren desplazamientos mayores, se recurre a mecanismos de amplificación como brazos de palanca o sistemas tipo puente. Estos utilizan vínculos flexibles, tipo muesca circular, para implementar articulaciones rotacionales.

En todos estos casos, la rigidez finita de la solución práctica que se adopte, degrada la respuesta del sistema calculada a partir de la Ecuación (1). Para una mejor aproximación del desplazamiento se debe recurrir a modelos más complejos o simulaciones por el método de elementos finitos. A continuación se presentan dos casos donde se aprecia el efecto de las soluciones adoptadas en la predicción del desplazamiento del posicionador.

## 3. POSICIONADOR DE ACTUACIÓN DIRECTA

En este caso el sistema de posicionamiento sigue el esquema de la Figura 1: a). La Ecuación (1) representa el desplazamiento del área de trabajo en función de los valores de rigidez del actuador y sistema de guiado. Las especificaciones de diseño indican que se debe lograr un desplazamiento mayor a 20  $\mu\text{m}$  [8]. Para cumplir con esta especificación se selecciona un

actuador piezoeléctrico PI P-888.91 con un desplazamiento nominal de  $\Delta L_0=32 \mu m$  y rigidez  $K_p$  de  $100 N/\mu m$ . Se diseña el sistema de guiado para una rigidez  $K_f$ , del 10% al 20 % de la del actuador. Fijando la rigidez  $K_f=5 N/\mu m$ , el desplazamiento nominal del actuador se reduce a  $27,8 \mu m$ , Ecuación (1). Este representa el desplazamiento del área de trabajo.

### 3.1 Efecto del sistema de montaje

Para la implementación del primer prototipo se adoptó el método de montaje y precarga sugerido por el fabricante del piezoeléctrico. Esto es, un vínculo a través de un tornillo y bolilla para un extremo del actuador y un vínculo flexible, del tipo muesca circular, para el otro. El tornillo es utilizado para aplicar la precarga, mientras que la bolilla y el vínculo flexible, permite la auto alineación del ensamble, evitando posibles flexiones del actuador por la falta de linealidad durante el montaje.

Bajo estas condiciones se estudió la rigidez del acople bolilla-piezoeléctrico haciendo uso del estudio de Hertz, para el contacto entre una bolilla y una superficie plana, [10]. Además, se cotejaron estos resultados analíticos con los obtenidos por simulación aplicando el método de elementos finitos. El estudio condujo a que la rigidez del empotramiento tenía un valor finito de  $\frac{1}{4}$  de la del actuador, muy lejos de la condición ideal que conduce a la Ecuación (1). Luego el sistema se puede modelar como uno de dos grados de libertad como en Figura 1: b). Este modelo corresponde a la de dos osciladores, de rigidez  $k_b$  y  $k_f$ , acoplados a través de un elemento de rigidez  $k_p$ . En este caso  $k_b$  es la rigidez en la base (incluyendo al sistema de precarga),  $k_f$ , la del "flexure" o sistema de guiado, y  $k_p$  la del actuador. Utilizando este modelo y aplicando la fuerza máxima del actuador o fuerza de bloqueo,  $F=3200N$ , el desplazamiento en la base resulta ser de  $y_1=-9,4\mu m$  mientras que en el sistema de guiado es de  $y_2=20,6\mu m$ . Siendo la expansión total del actuador de  $30 \mu m$ .

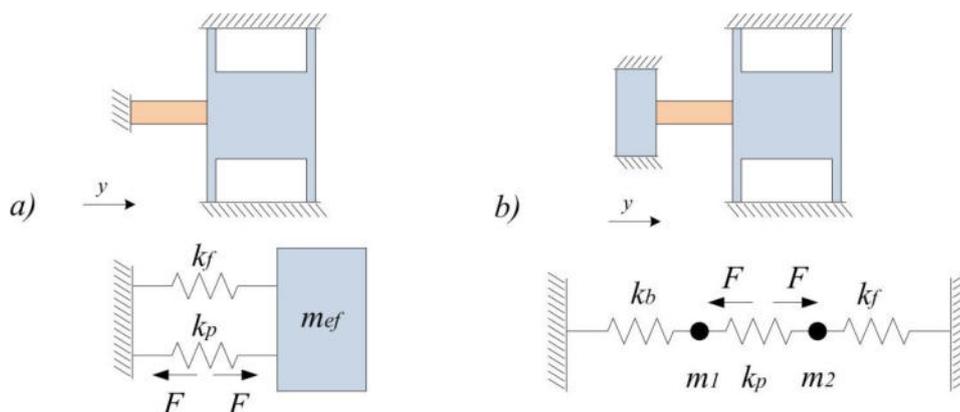


Figura 1: Esquema y modelo de masa y resortes para: a) piezoeléctrico rígidamente empotrado; b) rigidez finita del empotramiento.

Para estudiar el desempeño real del sistema se aplicó una señal triangular de 0 a 100 V pico a pico, a lazo abierto y frecuencia variable [8]. Se utilizó un comparador de 100 nm de resolución, marca Mitutoyo modelo LGF-0125L, para medir el desplazamiento del área de trabajo, Figura 2:a), registrando un desplazamiento máximo de  $18 \mu\text{m}$ , Figura 2: b). Este resultado representa una disminución del desplazamiento de 35% respecto del obtenido con modelo rígido de un grado de libertad. Mientras que esta disminución es de 12% respecto del modelo más complejo de dos grados de libertad.

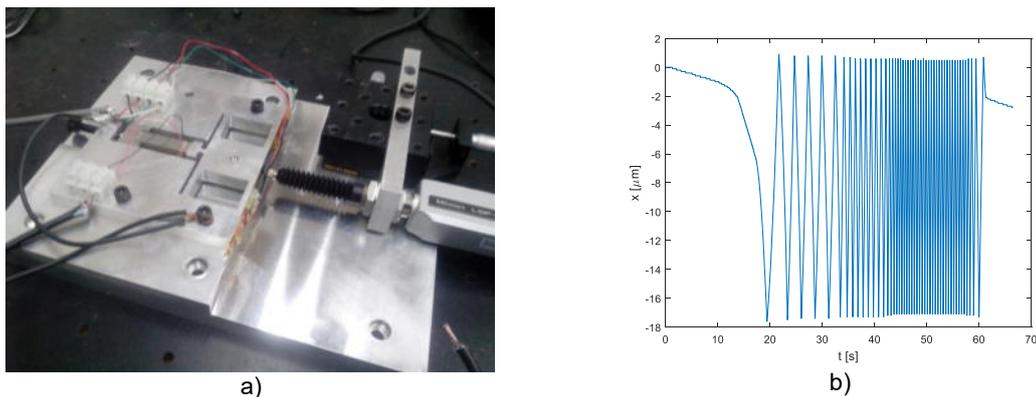


Figura 2: a) Montaje sistema de posicionamiento, b) Señal de salida de posición del área de trabajo medida con el comparador nanométrico.

#### 4. POSICIONADOR CON AMPLIFICACIÓN DE RECORRIDO

Como el desplazamiento nominal del piezoeléctrico es muy pequeño, de solo algunos micrómetros, se han propuesto sistemas de amplificación mecánica siendo el brazo de palanca el más sencillo, Figura 3: a). En esta configuración el actuador se encuentra ubicado a la distancia  $a$  del centro de rotación y el sistema de guiado en el extremo del brazo de palanca de longitud  $a+b$  Figura 3: b).

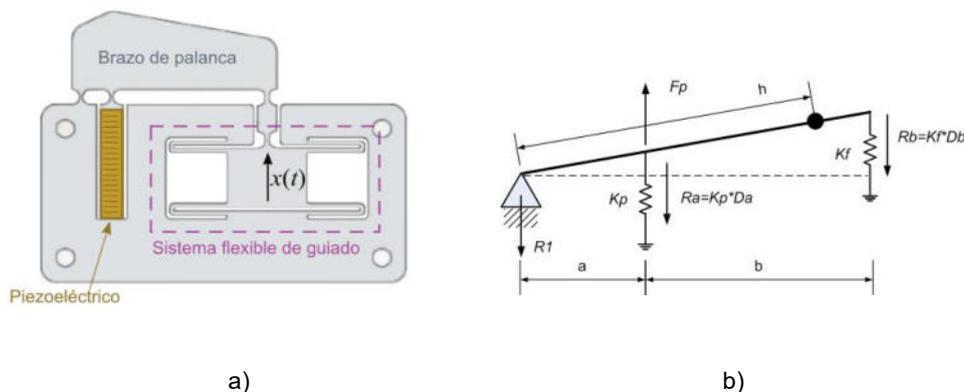


Figura 3: a) Esquema de un sistema mecánico de amplificación de recorrido; b) Modelo rígido del sistema.



Planteando ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos [4], se obtiene que el máximo desplazamiento del piezoeléctrico,  $\Delta a$ , es:

$$\Delta a = \Delta L_0 \left( \frac{K_p}{K_p + K_f \cdot r^2} \right) \quad (2)$$

De esta expresión se ve que el desplazamiento nominal del piezoeléctrico,  $\Delta L_0$ , se reduce con el cuadrado de la relación geométrica de amplificación,  $r=(a+b)/a$ . Luego considerando al brazo de palanca como un cuerpo de rigidez infinita, el desplazamiento del sistema de guiado será,  $\Delta b$ :

$$\Delta b = \Delta a \cdot r = \Delta L_0 \left( \frac{K_p}{K_p + K_f \cdot r^2} \right) \cdot r = \Delta L_0 \cdot R \quad (3)$$

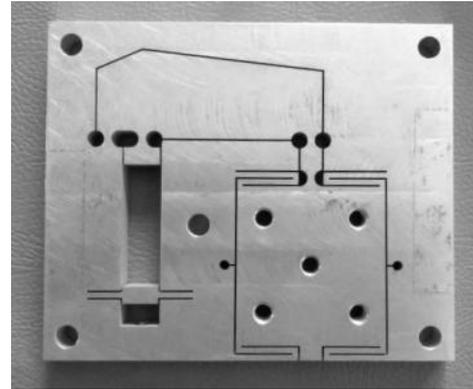
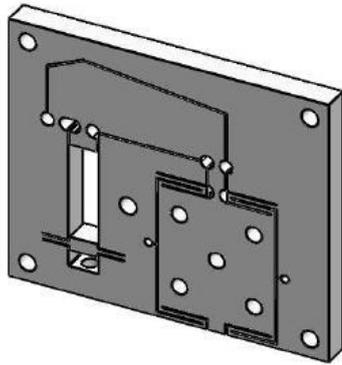
$$R = \left( \frac{K_p \cdot r}{K_p + K_f \cdot r^2} \right) \quad (4)$$

Donde  $R$  se define como la relación real de amplificación del desplazamiento nominal,  $\Delta L_0$ , del piezoeléctrico. El valor de  $R$  alcanza un máximo en función de  $r$  y se da cuando [4]:

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{K_p}{K_f}} \quad (5)$$

Partiendo de las ecuaciones del modelo rígido, en [4] se plantea del diseño de un sistema de posicionamiento con brazo de palanca que permita una amplificación real de  $R=3$ . El piezoeléctrico utilizado es de THORLAB modelo PK4FYC2, de rigidez  $K_p=25,9 \text{ N}/\mu\text{m}$ , que a 100 V aplica una fuerza máxima de  $F=666 \text{ N}$  y su desplazamiento nominal (en vacío) es de  $\Delta L_0=25,7\mu\text{m}$ . Para cumplir con el valor de amplificación real,  $R$ , impuesto, la relación geométrica de amplificación debe ser de  $r=6$  y la rigidez del sistema de guiado resulta de la Ecuación (5),  $K_f=0,72\text{N}/\mu\text{m}$ . Estos valores son los utilizados para modelar Figura 4: a) y construir el sistema de posicionamiento, Figura 4: b). Con estos valores iniciales el desplazamiento del actuador  $\Delta a$ , es de  $12,85\mu\text{m}$  y el del área de trabajo  $\Delta b$  es de  $77,1\mu\text{m}$ . Estos corresponden a los valores obtenidos a partir del modelo rígido Ecuaciones (2) y (3).

Con el valor de rigidez que debe cumplir el sistema de guiado se calcula la longitud y espesor de sus brazos (del tipo viga plegada). Luego a partir de la relación geométrica de amplificación se determina la longitud del brazo de palanca. El prototipo final se construyó a partir de una placa de aluminio AL7075 de 10 mm de espesor. Se utilizó el método de tornillo para la aplicación de la precarga y adicionalmente se colocó un piezoeléctrico de 2mm de espesor para posterior implementación de medición de fuerza. Luego de montaje del actuador, se le aplicó una precarga de  $10,5 \text{ MPa}$ .



a)

b)

Figura 4: a) Modelo del sistema de posicionamiento, b) Sistema construido a partir de una placa de aluminio AL7075 de 10 mm de espesor.

Por otro lado se controlaron dimensiones y se midió experimentalmente la rigidez del sistema de guiado,  $K_f$ . Para ello se aplicaron pesos calibrados y se registró el desplazamiento de la plataforma objetivo. En la Figura 5 se aprecia la gráfica de la fuerza aplicada versus el desplazamiento, cuya pendiente representa la rigidez del sistema.

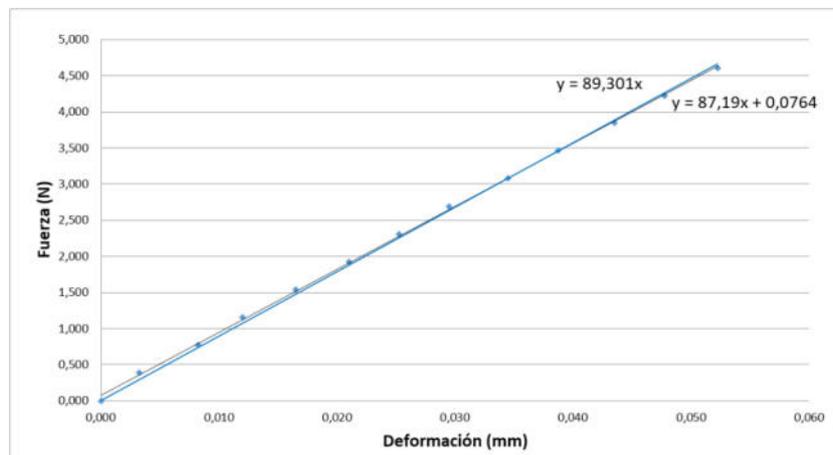


Figura 5: Gráfico de fuerza vs desplazamiento, representa la rigidez del sistema de guiado.

El valor medido experimentalmente resultó ser de  $K_f=0,87N/\mu m$ , un poco superior al de diseño. Esto se debe, en parte; a que este incluye a la rigidez torsional de los vínculos flexibles del brazo de palanca, por la configuración experimental empleada. Para cotejar este resultado, se aplicó el método de elementos finitos. Par ello se modeló el sistema y se malló utilizando un método automático, reduciendo el tamaño de los elementos en zonas particulares. Se utilizaron las características mecánicas del material usado para su fabricación. Luego se aplicó una

carga sobre el área móvil de trabajo de  $45,2 N$  y se obtuvo un desplazamiento de  $53 \mu m$ . Esto representa una rigidez de  $K_f=0,85N/\mu m$ , muy aproximado al obtenido experimentalmente.

#### 4.1 Resultados experimentales

Una vez realizado el montaje del conjunto, se aplicaron escalones de  $25V$  de tensión, desde  $0$  a  $100 V$  y se registró el desplazamiento del área de trabajo con un sensor capacitivo. Este, permite medir desplazamientos máximos de  $50\mu m$  con una resolución de  $5nm$ . Además se midió la expansión del actuador tanto en la base como en el brazo de palanca. Para ello se utilizó el comparador de  $100$  nanómetros de resolución, mencionado anteriormente. La Figura 6 muestra el montaje del instrumental y del sistema de posicionamiento.

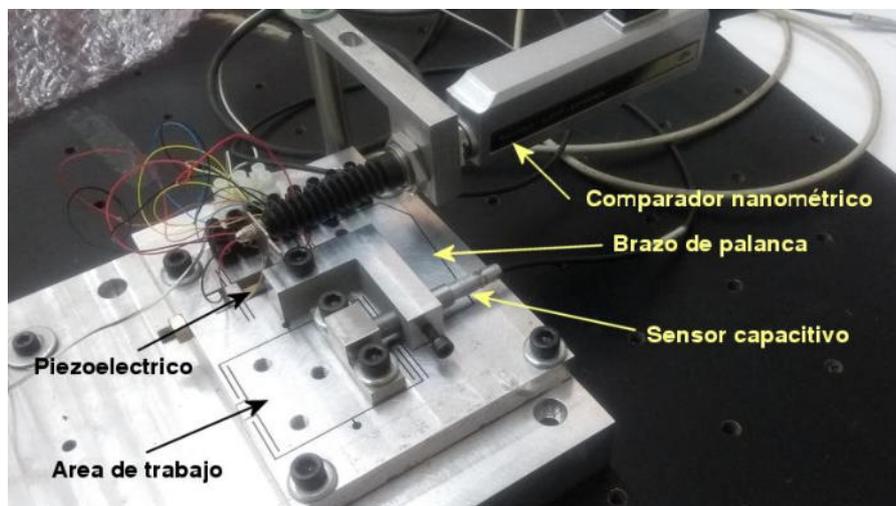


Figura 6: Montaje experimental para medición desplazamiento del área de trabajo y expansión del actuador.

Para la máxima tensión aplicada ( $100V$ ) se registró un desplazamiento del área de trabajo,  $\Delta b$ , de  $47,85 \mu m$ , Figura 7. Mientras que la expansión del actuador, en la dirección del movimiento sobre el brazo de palanca,  $\Delta a$ , fue de  $10,8\mu m$ , Figura 8, y de  $5,2 \mu m$  en la dirección contraria a la de actuación. Estos valores indican que la expansión total del piezoeléctrico fue de  $16 \mu m$ .

#### 4.2. Resultados de simulaciones

Se estudió el comportamiento del sistema utilizando el método de elementos finitos. El actuador piezoeléctrico se modeló como un paralelepípedo rectangular con las dimensiones indicadas por el fabricante. Se utilizó un material isotrópico con módulo de elasticidad calculado a partir de la rigidez del actuador,  $K_p$ , dada en las especificaciones. En ambos extremos del piezoeléctrico y en direcciones contraria, se aplica la fuerza de bloqueo,  $F_{max}=666 N$  y se

obtienen los valores de desplazamientos en las zonas de interés. Los resultados en las zonas de medición son muy similares con los obtenidos experimentalmente, Figura 9.

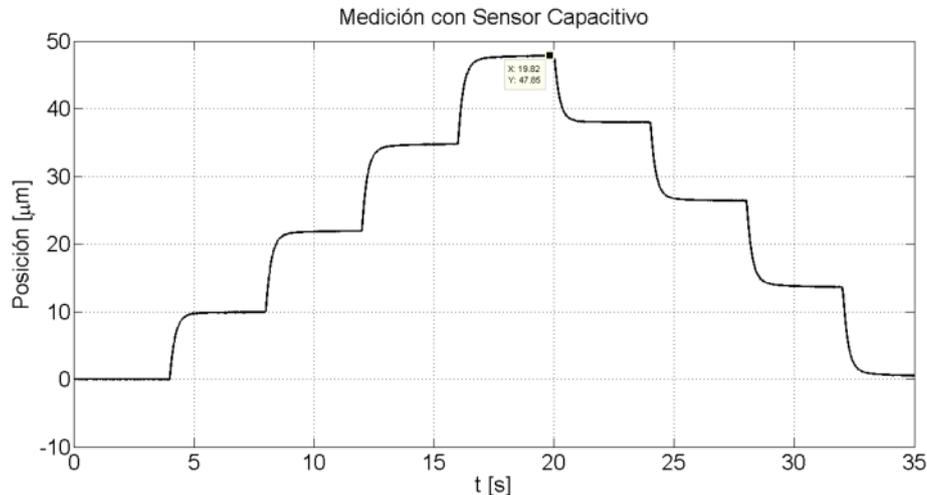


Figura 7: Desplazamiento del área de trabajo,  $\Delta b$ .

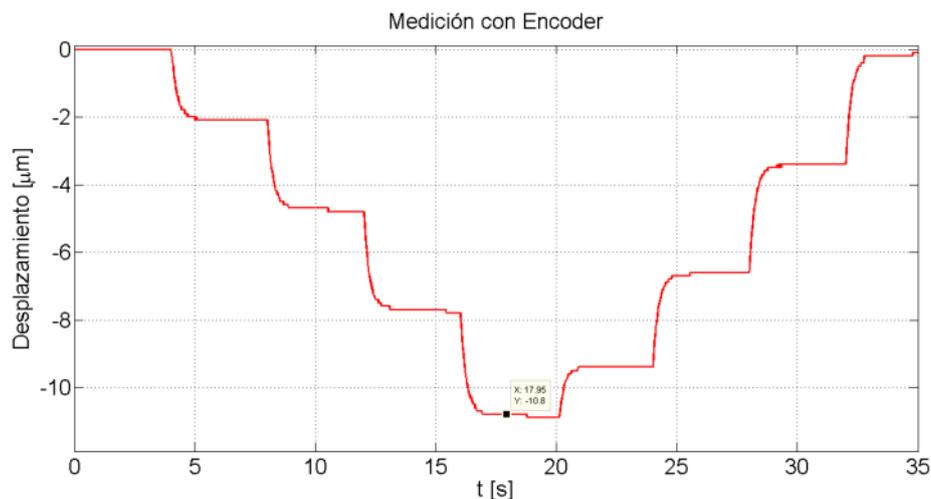


Figura 8: Expansión del piezoelectrico en la dirección del movimiento,  $\Delta a$ .

### 4.3. Análisis de los resultados

Para este sistema, el desplazamiento calculado a partir del modelo matemático se redujo de  $77,1\mu\text{m}$  a los  $47,85\mu\text{m}$  obtenido experimentalmente, siendo un error del 38 %. En este caso son varias las fuentes de error o simplificaciones que afectan al desplazamiento efectivo del área de trabajo. En primer lugar se puede destacar la diferencia en la rigidez real del sistema de guiado  $K_r$ , con la de diseño. En este caso la diferencia puede estar en que el valor medido incluye la rigidez de los vínculos rotacionales del sistema de amplificación y a tolerancias de fabricación, incertidumbre en el módulo elástico del material, etc. Si, se utiliza el valor de rigidez

medido experimental el desplazamiento efectivo del área de trabajo, Ecuación(3), pasan a ser  $\Delta b = 69,7 \mu m$ . Tomando este valor como el de diseño, el error ahora es del 31%.

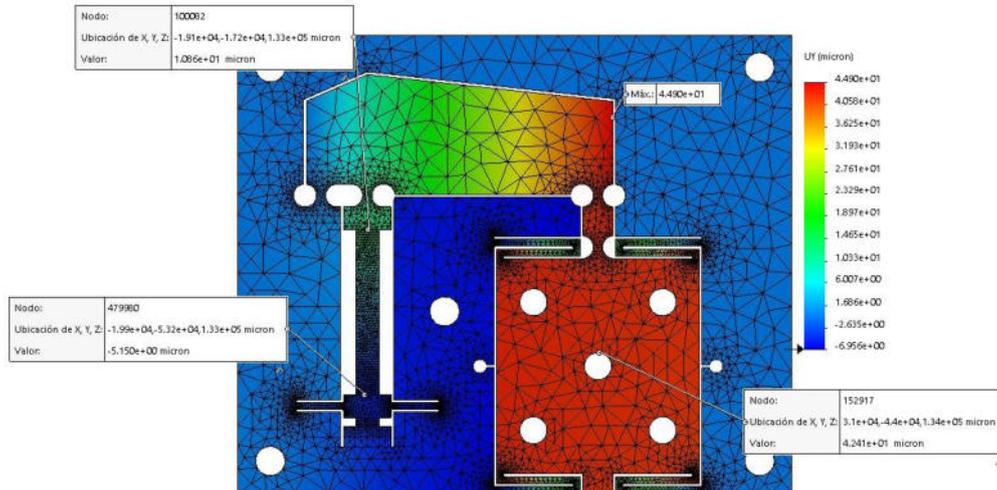


Figura 9: Simulación aplicando el método de elementos finitos,  $F_{max} = 666N$ .

Por otro lado, la rigidez finita del empotramiento del actuador en la base, hace que parte de la expansión sea hacia atrás, ( $5 \mu m$ ), disminuyendo el desplazamiento del área objetivo. Esta rigidez finita se debe al sistema de precarga con tornillo y al piezoeléctrico que será utilizado para medición de fuerza. Otra fuente de error, o efecto no contemplada en el modelo rígido, es la deformación de los vínculos rotacionales y del propio brazo de palanca. En [9] se obtiene que esta reducción, solo por la rigidez a tracción, compresión y torsión de los vínculos, es de aproximadamente el 8 %. A este efecto se le debe sumar también la deformación del brazo de palanca, no cuantificada en este trabajo. Finalmente, a las simplificaciones realizadas, se le suma la incertidumbre en el desplazamiento nominal del actuador indicada por el fabricante, que en este es de  $\pm 15\%$ . Todas estas situaciones se combinan y disminuyen el desplazamiento efectivo del área de trabajo.

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el impacto que tienen las simplificaciones adoptadas en la etapa de diseño, en la predicción del desplazamiento efectivo de posicionadores nanométricos accionados con piezoeléctricos. Se estudiaron dos casos particulares: uno de accionamiento directo de la plataforma de trabajo y el otro utilizando un brazo de palanca para amplificar el recorrido del actuador. En ambos casos se modela al sistema considerando al actuador rígidamente empotrado en su base y vínculos rotacionales ideales. Además para el caso con



amplificación de recorrido se considera al brazo de palanca como un cuerpo de rigidez infinita. Estas consideraciones conducen a modelos simplificados de masas y resortes que solo contemplan los valores de rigidez del actuador y del sistema de guiado. Estos permiten arribar a ecuaciones que conducen a valores del desplazamiento del área de trabajo máximos o límites. Al utilizar modelos más complejos o simulación por el método de elementos finitos y por supuesto en el sistema real, el desplazamiento del área de trabajo disminuye. En los casos estudiados esta reducción fue del 35 % en el primer sistema y de 38% en el segundo. Si bien la predicción de estos modelos no son buenas, las expresiones analíticas que se obtienen son muy útiles para obtener relaciones entre las principales variables de diseño. Además son adecuadas para el diseño preliminar y para obtener valores límites alcanzables. Luego si se requiere mayor precisión es necesario recurrir a modelos más complejos o incluso a métodos computacionales como el de elementos finitos.

## REFERENCIAS

- [1] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. Piezoelectrics in Positioning. Tutorial on Piezotechnology in Nanopositioning Applications. [www.pi.ws](http://www.pi.ws), 2008.
- [2] Changhai Ru, Xinyu Liu, Yu Sun, Nanopositioning Technologies: Fundamentals and Applications, ISBN 978-3-319-23853-1, DOI 10.1007/978-3-319-23853-1, Springer International Publishing, 2016.
- [3] Y. K. Yong, S. O. R. Moheimani, B. J. Kenton, and K. K. Leang. Invited Review Article: High-speed flexure-guided nanopositioning. American Institute of Physics. Review of scientific instruments, 83, 121101, 2012.
- [4] Flores, Gustavo; Ramirez, Pablo; Lamas, Lucas y Hecker, Rogelio, Diseño de un posicionador nanométrico con amplificación de recorrido. VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, VI CAIM 2018, Tucumán, Argentina, Oct. 2018.
- [5] Zeyi Wu and Qingsong Xu, Survey on Recent Designs of Compliant Micro-/Nano-Positioning Stages. Journal Actuators, ISSN 2076-0825, Vol. 7, Nro. 1, (2018).
- [6] Yanling Tian, Bijan Shirinzadeh, Dawei Zhang, Gursel Alici, Development and dynamic modeling of a flexure-based ScottRussell mechanism for nanomanipulation. Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, 23 (2009) 957–978.
- [7] Shubao Shao, Ming long Xu, Shuwen Zhang, Shilin Xie, Stroke maximizing and high efficient hysteresis hybrid modeling for a rhombic piezoelectric actuator. Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, 75 (2016) 631–647.
- [8] Gustavo M. Flores, Luis P. Ramirez, Rogelio L. Hecker, Fernando J. Villegas., “Diseño y Resultados Experimentales de un Posicionador Nanométrico”. Mecánica Computacional Vol XXXV, págs. 135-145, 2017.
- [9] Gustavo M. Flores, Luis P. Ramirez, Lucas I. Lamas, Rogelio L. Hecker, Estudio Preliminar de un Posicionador Nanométrico con Brazo de Palanca. XII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, MECOM 2018, Tucuman, Argentina, Nov. 2018.
- [10] Smith, S.T. and Chetwynd, D.G., Foundations of Ultraprecision Mechanism Design, Taylor and Francis, ISBN2884490019, 9782884490016, 1994.



## MODELADO DE ESLABÓN FLEXIBLE ESBELTO CON ACTUACIÓN PIEZOELÉCTRICA

Fernando J. Villegas<sup>1</sup>, Marcelo T. Piovan<sup>2</sup> y Rogelio L. Hecker<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería – UNLPam; CONICET  
110 N° 390, General Pico - [fvillegas@ing.unlpam.edu.ar](mailto:fvillegas@ing.unlpam.edu.ar)

<sup>2</sup> UTN – FRBB; CONICET - [mtpforever@gmail.com](mailto:mtpforever@gmail.com)

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería – UNLPam; CONICET - [hecker@ing.unlpam.edu.ar](mailto:hecker@ing.unlpam.edu.ar)

### RESUMEN

La necesidad de reducción de costos y consumo de energía, así como el requerimiento de mayores velocidades ha llevado a la consideración de manipuladores con estructuras más livianas, aunque menos rígidas. Esto lleva a que la elasticidad de los eslabones en tales manipuladores ya no sea despreciable. Por otro lado los actuadores piezoeléctricos han mostrado su utilidad en un gran número de aplicaciones, incluyendo el control activo de vibraciones.

El problema del control activo de vibraciones en estructuras esbeltas puede ser relevante al considerar manipuladores con eslabones flexibles, y en particular el planteo de un modelo simplificado de tales eslabones podría ser útil al diseñar un control de vibraciones en este tipo de sistemas.

En ese sentido, en este trabajo se utiliza el principio de Hamilton para desarrollar las ecuaciones diferenciales que permiten representar un eslabón rotante flexible con capas piezoeléctricas mediante un modelo unidimensional, lo que constituye la contribución de este trabajo. A partir de estas ecuaciones, con propósitos meramente ilustrativos, se obtendrán las deformaciones del eslabón para un caso particular. El caso considerado corresponde a las deformaciones del eslabón en estado estacionario para una rotación a velocidad constante mientras se aplican tensiones en las capas piezoeléctricas destinadas a la flexión del eslabón.

**Palabras clave:** Modelado; Robótica; Eslabones flexibles; Actuación piezoeléctrica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el objeto de evitar vibraciones e inexactitudes en el posicionamiento, los manipuladores típicamente se construyen buscando una buena rigidez estructural. Esto resulta en un mayor peso de la estructura, lo que lleva a velocidades limitadas, actuadores más grandes y mayor consumo de energía [1]. Por otro lado, estructuras más livianas resultan en mayores velocidades y menores consumos de energía [2], aunque esto puede venir acompañado de un deterioro en la exactitud debido a la deflexión de la estructura asociada a la flexibilidad de los eslabones [3], incluyendo la posibilidad de vibraciones [4].

Una forma de amortiguar vibraciones así como de producir pequeñas deflexiones estáticas es mediante el uso de actuadores piezoeléctricos. Este tipo de actuadores se caracteriza por una alta resolución, gran capacidad de generación de fuerza y alta velocidad de respuesta [5]. Es por esto que este tipo de actuadores se ha utilizado previamente para el control activo de vibraciones en placas, vigas y estructuras más complejas [6]. Por ello, una posible solución estaría dada por eslabones flexibles con capas de actuación piezoeléctrica.

Así, en este trabajo se utiliza el principio de Hamilton para desarrollar las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que permiten representar la dinámica de un eslabón rotante flexible con capas piezoeléctricas. A modo ilustrativo, se utilizará este modelo para calcular las deformaciones del eslabón para condiciones particulares.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para este problema se considera un eslabón rotante con la configuración mostrada en Figura 1.

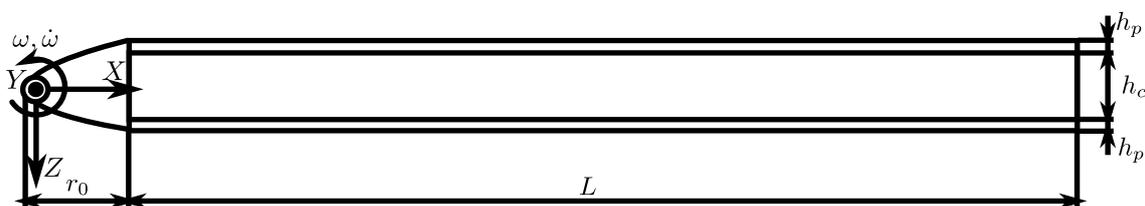


Figura 1: Geometría del problema

La estructura consiste en una capa elástica de espesor  $h_c$  rodeada de dos capas piezoeléctricas con el mismo espesor  $h_p$  y con la dirección de polarización dada por el eje  $Z$ . Se asume que el ancho  $w$  de todas las capas es igual. Siendo los parámetros del material piezoeléctrico iguales, los parámetros de cada capa se identificarán por el subíndice  $c$  para la capa elástica y el subíndice  $p$  para la capa piezoeléctrica. Aún mas, para el caso del coeficiente  $s_{11}$  de la matriz de



elasticidad, se usará  $s_p$  o  $s_c$ . De todos modos, cuando resulte más conveniente para aplicar la notación de sumatoria, se identificará los parámetros o variables asociados a cada capa mediante un subíndice  $i$ , siendo  $i = 1$  o  $i = 3$  para las capas piezoeléctricas, e  $i = 2$  para la capa elástica.

Al igual que en otros trabajos sobre manipuladores con eslabones flexibles, tal como en [7], se va a considerar el eslabón como una estructura flexible con extremos rígidos (en Figura 1 solo se muestra el extremo que transmite la rotación). Para el modelado se va a utilizar un conjunto de ejes  $XYZ$  solidario al eslabón, con lo cual actuarán sobre el mismo las pseudofuerzas asociadas al marco de referencia no inercial. De esta manera el problema se puede considerar como se muestra en Figura 2, donde se aprecia que además de las solicitaciones asociadas a las pseudofuerzas, se considera solicitaciones puntuales en el extremo libre de la barra. Para simplificar la expresión de las integrales, se utilizará el sistema  $xyz$  ubicado al final del extremo rígido para describir las cantidades involucradas.



Figura 2: Solicitaciones sobre el eslabón

El desarrollo de la dinámica sigue el trabajo de [8], por lo que, si bien se planteará en alguna medida partes de la integral de acción, el trabajo se centrará más bien en el desarrollo de los términos adicionales a los de la referencia propiamente dicha. Al utilizar el sistema  $xyz$  para describir las cantidades involucradas, se podrá reutilizar gran parte de lo desarrollado en dicha referencia sin mayores modificaciones.

Las hipótesis serán mayormente las utilizadas en la referencia, y sería

1. Las secciones transversales permanecen planas y perpendiculares a las fibras longitudinales (hipótesis de Bernoulli para flexión).
2. Pequeñas deformaciones.
3. Única componente no nula del vector de campo eléctrico será aquella en dirección del eje  $z$  ( $E_3$ ).
4. Única componente no nula del tensor de tensiones será  $T_1 \triangleq T_{11}$ .
5. Conexión en paralelo de las capas piezoeléctricas (misma magnitud de tensión).

y se agrega la siguiente hipótesis al considerar las pseudofuerzas:



6. La relación  $\frac{h_c+2h_p}{r_0}$  es lo suficientemente pequeña como para considerar que las pseudofuerzas son aproximadamente uniformes en cada plano transversal.

Cabe notar que, a diferencia de [8], el eslabón analizado ya no se encuentra en condiciones de flexión pura, sino que también se encuentra sometido a esfuerzos longitudinales. Aun así, los cambios asociados a estas solicitaciones se encuentran contemplados en los términos adicionales considerados. De todos modos, para evitar confusiones, el eje neutro para flexión pura que se tomaba como referencia para la coordenada  $z$  en [8], aquí también se denominará eje de referencia y se usará con el mismo propósito.

La notación usada será mayormente la de la referencia, con lo cual la deflexión en cada punto estará representada por  $\xi$ , el ángulo del plano tras la deformación será  $\alpha = \frac{\partial \xi}{\partial x}$ , los desplazamientos en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  serán  $u$ ,  $v$  y  $w$  respectivamente, y se denotará por  $u_0$  el desplazamiento del eje de referencia en la dirección  $x$ . La mayor diferencia con la referencia es que ahora se tendrá en cuenta solicitaciones adicionales dadas por las pseudofuerzas asociadas a la rotación y también la posibilidad de tener una fuerza puntual con componente horizontal en el extremo libre de la viga. Como consecuencia ahora también se considerará que  $u_0$  no será necesariamente nulo. Esto lleva a que el desplazamiento en la dirección  $x$  esté dado por:

$$u = u_0 - z \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (1)$$

mientras que en las direcciones  $y$  y  $z$  se mantengan igual que en la referencia, es decir  $v = 0$  y  $w = \xi$  respectivamente. De esta manera la deformación normal en dirección  $x$  resulta

$$S_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2)$$

Dado que se usará parte de las ecuaciones obtenidas por [8], se calculará la posición del eje neutro para flexión pura ( $z_n$ ), que es una cantidad que se utiliza en dichas ecuaciones. De Ecuación 4.23 en [8] se tiene  $z_n = \frac{h_c+2h_p}{2}$ , es decir que el eje de referencia pasa por el centro de la viga, lo que es de esperar debido a la simetría del problema.

Finalmente, se debe tener en cuenta la importancia del amortiguamiento viscoso en transductores piezoeléctricos, y que este depende del tamaño y forma que el cuerpo en movimiento presenta en contacto con el medio fluido que lo rodea [9]. Por ello se considerará, al igual que en [8], que la disipación de energía estará asociada mayormente a la velocidad de deflexión, despreciando el efecto que puedan tener los desplazamientos longitudinales. Esto resulta en que no se harán modificaciones al término asociado a la disipación desarrollado en [8].



### 3. PRINCIPIO DE HAMILTON

En esta sección se obtendrán las ecuaciones del sistema a partir de la expresión del principio de Hamilton

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T - \delta V + \delta W dt = 0 \quad (3)$$

Para esto, en lo que sigue se procede a obtener las expresiones para cada término dentro de la integral.

#### 3.1. Energía cinética

En [8], al calcular la energía cinética se desprecia el efecto del término  $\frac{\partial}{\partial t} \left( z \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)$  (asociado a la rotación del plano transversal) respecto del de  $\dot{\xi}$ . En el presente caso se procede de la misma manera, pero considerando la posibilidad de que  $\dot{u}_0$  no sea despreciable, ya que ahora existen sollicitaciones longitudinales. Entonces, la energía cinética para un diferencial de volumen en la capa  $i$  viene dada por

$$dT_i = dm_i \frac{|v|^2}{2} = \frac{1}{2} \rho_i (\dot{u}_0^2 + \dot{\xi}^2) dV \quad (4)$$

donde el punto denota  $\frac{\partial}{\partial t}$ . Entonces

$$T = \sum_{i=1}^3 \iiint_{V_i} \frac{1}{2} \rho_i (\dot{u}_0^2 + \dot{\xi}^2) dV \quad (5)$$

Entonces

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T dt = \int_{t_1}^{t_2} \delta \sum_{i=1}^3 \iiint_{V_i} \frac{1}{2} \rho_i \dot{u}_0^2 dV dt + \underbrace{\int_{t_1}^{t_2} \delta \sum_{i=1}^3 \iiint_{V_i} \frac{1}{2} \rho_i \dot{\xi}^2 dV dt}_{(*)} \quad (6)$$

Donde  $_{*1}$  ya fue desarrollado en la referencia mencionada, y los términos correspondientes se pueden obtener de ese planteo. Por lo tanto, solo se va a desarrollar aquí los términos asociados a la primera integral.

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta \sum_{i=1}^3 \iiint_{V_i} \frac{1}{2} \rho_i \dot{u}_0^2 dV dt &= \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^3 \iiint_{V_i} \rho_i \dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 dV dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \sum_{i=1}^3 \rho_i A_i \dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 dx dt \end{aligned}$$



$$= \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \mu \dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 dx dt \quad (7)$$

Donde usando la definición de Ecuación 5.92 en [8] se emplea la constante  $\mu = \sum_{i=1}^3 \rho_i A_i$ . Aplicando integración por partes, queda

$$\int_0^L \int_{t_1}^{t_2} \mu \dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 dt dx = \int_0^L \left( \mu \dot{u}_0 \delta u_0 \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \mu \ddot{u}_0 \delta u_0 dt \right) dx = - \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \mu \ddot{u}_0 \delta u_0 dx dt \quad (8)$$

### 3.2. Energía potencial

Para el planteo del principio de Hamilton en piezoeléctricos, tal como se muestra en [8], el término  $V$  corresponde a la entalpía eléctrica  $H_e$ , es decir

$$V = \sum_{i=1}^3 \int \int \int_{V_i} H_{e,i} dV$$

Las hipótesis consideradas al comienzo del trabajo, se traducen en las Ecuaciones 5.78 a 5.80 de dicha referencia, con lo cual la entalpía eléctrica en el sistema considerado toma la forma de Ecuación 5.85 de la referencia, con lo que para la capa  $i$  resulta

$$\begin{aligned} H_{e,i} &= \frac{1}{2} c_{11,i}^E S_1^2 - e_{31,i} E_{3,i} S_1 - \frac{1}{2} \epsilon_{33,i}^S E_{3,i}^2 \\ &= \frac{1}{2} c_{11,i}^E (u_0'^2 - 2u_0' z \xi'' + z^2 \xi''^2) - e_{31,i} E_{3,i} (u_0' - z \xi'') - \frac{1}{2} \epsilon_{33,i}^S E_{3,i}^2 \\ &= \frac{1}{2} c_{11,i}^E (u_0'^2 - 2u_0' z \xi'') - e_{31,i} E_{3,i} u_0' + \underbrace{\frac{1}{2} c_{11,i}^E z^2 \xi''^2 + e_{31,i} E_{3,i} z \xi'' - \frac{1}{2} \epsilon_{33,i}^S E_{3,i}^2}_{*2} \end{aligned} \quad (9)$$

donde la prima denota  $\frac{\partial}{\partial x}$ . Los términos en  $*_2$  son términos ya desarrollados en la referencia, por lo que se va a trabajar sobre los nuevos términos. En más detalle, si  $V = V_0 + V_e$ , siendo  $V_0$  la parte de  $V$  correspondiente a  $*_2$ , entonces

$$\begin{aligned} V_e &= \sum_{i=1}^3 \int \int \int_{V_i} \frac{1}{2} c_{11,i}^E u_0'^2 - c_{11,i}^E u_0' z \xi'' - e_{31,i} E_{3,i} u_0' dV \\ &= \sum_{i=1}^3 c_{11,i}^E A_i \int_0^L \frac{1}{2} u_0'^2 dx - \sum_{i=1}^3 \frac{w c_{11,i}^E}{2} (h_{i,o}^2 - h_{i,u}^2) \int_0^L u_0' \xi'' dx - \sum_{i=1}^3 w e_{31,i} \int_{h_{i,u}}^{h_{i,o}} \int_0^L E_{3,i} u_0' dx dz \quad (10) \end{aligned}$$

De esta manera la variación de  $V_e$  resulta



$$\begin{aligned} \delta V_e = & \sum_{i=1}^3 c_{11,i}^E A_i \int_0^L u'_0 \delta u'_0 dx - \sum_{i=1}^3 \frac{w c_{11,i}^E}{2} (h_{i,o}^2 - h_{i,u}^2) \left[ \int_0^L \xi'' \delta u'_0 dx + \int_0^L u'_0 \delta \xi'' dx \right] \\ & - \sum_{i=1}^3 w e_{31,i} \left[ \int_{h_{i,u}}^{h_{i,o}} \int_0^L E_{3,i} \delta u'_0 dx dz + \int_{h_{i,u}}^{h_{i,o}} \int_0^L u'_0 \delta E_{3,i} dx dz \right] \end{aligned} \quad (11)$$

En primer lugar, cabe notar que por la simetría del problema, las distancias entre los extremos de cada capa se encuentran reflejadas alrededor del eje neutro, y siendo ambas capas piezoeléctricas del mismo material, se tiene que

$$\sum_{i=1}^3 \frac{w c_{11,i}^E}{2} (h_{i,o}^2 - h_{i,u}^2) = 0 \quad (12)$$

con lo cual se anula el segundo término. Entonces solo queda trabajar con el resto de las integrales.

Aplicando integración por partes en la integral del primer término se tiene

$$\int_0^L u'_0 \delta u'_0 dx = u'_0 \delta u_0 \Big|_0^L - \int_0^L u''_0 \delta u_0 dx \quad (13)$$

En cuanto a las integrales del último término, teniendo en cuenta las hipótesis sobre el campo eléctrico  $E$ , el potencial  $U$  solo será función de  $z$  y el campo eléctrico no variará a lo largo de la longitud. De esta manera

$$\sum_{i=1}^3 w e_{31,i} \int_{h_{i,u}}^{h_{i,o}} \int_0^L E_{3,i} \delta u'_0 dx dz = \sum_{i=1}^3 w h_i e_{31,i} E_{3,i} \int_0^L \delta u'_0 dx = \sum_{i=1}^3 e_{31,i} A_i E_{3,i} \delta u_0 \Big|_0^L \quad (14)$$

Por otro lado, el caso de la otra integral es conveniente verlo en el contexto de la obtención de la variación de la función de Lagrange en [8]. En particular en la ecuación G.7 de la referencia, donde se trabaja con una serie de integrales considerando que  $S_1 = -z\xi''$ . En el presente caso, al considerar solicitaciones longitudinales, se tiene el caso más general donde  $S_1 = u'_0 - z\xi''$ . Entonces, el término

$$\sum_{i=1}^3 w e_{31,i} \int_{h_{i,u}}^{h_{i,o}} \int_0^L u'_0 \delta E_{3,i} dx dz \quad (15)$$

aporta el término faltante a G.7 para llegar al mismo resultado considerando el caso más general donde  $S_1 = u'_0 - z\xi''$ . De esta manera, este término queda contemplado dentro del desarrollo de la referencia bajo el término asociado al vector desplazamiento eléctrico  $D$ .



### 3.3. Trabajo de las solicitaciones externas

La referencia ya incluye diferentes solicitaciones, tal como una fuerza puntual en la dirección del eje  $z$ . Así, a continuación se agregará el trabajo asociado a las solicitaciones no contempladas en la referencia.

#### 3.3.1 Fuerza puntual longitudinal

Se considera la aplicación de una fuerza puntual en la dirección longitudinal aplicada en el extremo de la barra. En tal caso, para una fuerza  $H$ , el trabajo viene dado por  $W_H = Hu_0(L)$ , con lo cual

$$\delta W_H = H\delta u_0(L) \quad (16)$$

#### 3.3.2 Fuerza centrífuga

Dado que el marco de referencia elegido no es inercial, van a aparecer una serie de pseudofuerzas. Considerando la hipótesis 6, se puede considerar que la fuerza centrífuga tiene dirección longitudinal, y para un volumen  $dV$  está dada por  $\omega^2(r_0 + x)dm e_x = \rho\omega^2(r_0 + x)dV e_x$ . En tal caso, el trabajo está dado por

$$W_c = \sum_{i=1}^3 \int \int \int_{V_i} \rho_i(u_0 - z\xi')\omega^2(r_0 + x)dV \quad (17)$$

con lo cual

$$\begin{aligned} \delta W_c &= \sum_{i=1}^3 \int \int \int_{V_i} \rho_i(\delta u_0 - z\delta\xi')\omega^2(r_0 + x)dV \\ &= \sum_{i=1}^3 \rho_i A_i \int_0^L \omega^2(r_0 + x)\delta u_0 dx - \sum_{i=1}^3 \rho_i w \frac{h_{i,o}^2 - h_{i,u}^2}{2} \int_0^L \omega^2(r_0 + x)\delta\xi' dx \end{aligned} \quad (18)$$

Por la simetría del problema, al igual que ocurría en Ecuación (12), el segundo término se anula, quedando entonces

$$\delta W_c = \mu \int_0^L \omega^2(r_0 + x)\delta u_0 dx \quad (19)$$

#### 3.3.3 Fuerza de Euler

En el caso que la aceleración angular  $\dot{\omega}$  no sea nula, aparece esta pseudofuerza. Así, para cada  $dV$  se tiene una fuerza  $\rho\dot{\omega}(r_0 + x) e_z$ , con lo cual resulta un trabajo



$$\begin{aligned}
 W_\alpha &= \sum_{i=1}^3 \int \int \int_{V_i} \rho_i \dot{\omega} (r_0 + x) \xi dV \\
 &= \sum_{i=1}^3 \rho_i A_i \int_0^L \dot{\omega} (r_0 + x) \xi dx \\
 &= \mu \int_0^L \dot{\omega} (r_0 + x) \xi dx
 \end{aligned} \tag{20}$$

De manera que la variación será

$$\delta W_\alpha = \mu \int_0^L \dot{\omega} (r_0 + x) \delta \xi dx \tag{21}$$

Finalmente, cabe notar que no aparecerá un término asociado a la fuerza de Coriolis ya que dicha pseudofuerza no produce trabajo.

### 3.4. Forma completa

Teniendo en cuenta todos los términos anteriores, así como los términos relevantes desarrollados en [8], el planteo del principio de Hamilton lleva a la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \int_{t_1}^{t_2} \delta T - \delta V + \delta W dt &= \int_{t_1}^{t_2} \left[ - \int_0^L (\mu \ddot{\xi} + C \xi^{(4)} + r_\alpha \dot{\xi} - \mu \dot{\omega} (r_0 + x)) \delta \xi dx \right] dt \\
 &+ \int_{t_1}^{t_2} \left[ \int_0^L (-\mu \ddot{u}_0 + K_{e1} u_0'' + \mu \omega^2 (r_0 + x)) \delta u_0 dx \right] dt \\
 &+ \int_{t_1}^{t_2} [C \xi^{(3)} + F] \delta \xi|_0^L dt - \int_{t_1}^{t_2} [C \xi'' + M_{piezo} + M] \delta \xi'|_0^L dt \\
 &+ \int_{t_1}^{t_2} [K_{e1} u_0' + F_{piezo}] \delta u_0|_0^L + H \delta u_0|_0^L dt \\
 &+ \int_{t_1}^{t_2} \left[ \sum_{i=1}^3 w \int_{h_{i,u}}^{h_{i,o}} \int_0^L \frac{dD_{3,i}}{dz} \delta U dx dz \right] dt \\
 &- \int_{t_1}^{t_2} \left[ \sum_{i=1}^3 w \int_0^L (D_{3,i} + \sigma_A) \delta U|_{h_{i,u}}^{h_{i,o}} dx \right] dt = 0
 \end{aligned} \tag{22}$$

Donde por simplicidad se escribe  $\xi^{(n)}$  para representar  $\frac{\partial^n \xi}{\partial x^n}$ . Además, se define

$$F_{piezo} = \sum_{i=1}^3 e_{31,i} A_i E_{3,i} \tag{23}$$



una cantidad con unidades de fuerza calculada a partir del campo eléctrico en cada capa, así como también la constante

$$K_{e1} = \sum_{i=1}^3 c_{11,i}^E A_i \quad (24)$$

mientras que las otras constantes como  $C$  y  $M_{piezo}$  son las definidas en la referencia.

#### 4. ECUACIONES DIFERENCIALES

A partir de la expresión obtenida aplicando el principio de Hamilton, y considerando que en el problema considerado el extremo izquierdo se considera empotrado, las ecuaciones diferenciales para la parte mecánica de este problema resultan:

$$\mu \ddot{\xi} + C \xi^{(4)} + r_a \dot{\xi} = \mu \dot{\omega}(r_0 + x) \quad (25)$$

$$\mu \ddot{u}_0 = K_{e1} u_0'' + \mu \omega^2 (r_0 + x) \quad (26)$$

con condiciones de borde

$$C \xi^{(3)}(L) + F = 0 \quad (27)$$

$$C \xi''(L) + M_{piezo} + M = 0 \quad (28)$$

$$K_{e1} u_0'(L) + F_{piezo} + H = 0 \quad (29)$$

y para las variables eléctricas:

$$\frac{dD_{3,i}}{dz} = 0 \quad (30)$$

con la condición de borde

$$D_{3,i} + \sigma_A = 0 \quad (31)$$

en los extremos de cada capa.

#### 5. SIMULACIÓN

A modo de ilustrar el comportamiento representado por el modelo propuesto, se utilizó el software MATLAB para implementar la solución de las ecuaciones diferenciales para el caso de una barra con Aluminio 1100 como material de la capa elástica, con  $h_c=5\text{mm}$ ,  $w=5\text{mm}$ , material PZT SensorTech BM500 para las capas piezoeléctricas, con  $h_p=300\mu\text{m}$ . También se consideró  $r_0=6\text{mm}$ . Se simuló el comportamiento estático cuando dicha barra se encuentra rotando a una velocidad de 60rpm aplicándose a las capas piezoeléctricas diferencias de potencial de 30V, desarrollando un campo eléctrico coincidente con la dirección de polarización en la capa superior

y opuesto en la inferior. Cabe resaltar que al considerar el caso estático para una velocidad de rotación determinada, se obtendrá el comportamiento de estado estacionario al que tendería el eslabón durante una sección de velocidad constante de la trayectoria. El resultado se observa en las Figuras 3a y 3b para  $\xi$  y  $u_0$  respectivamente.

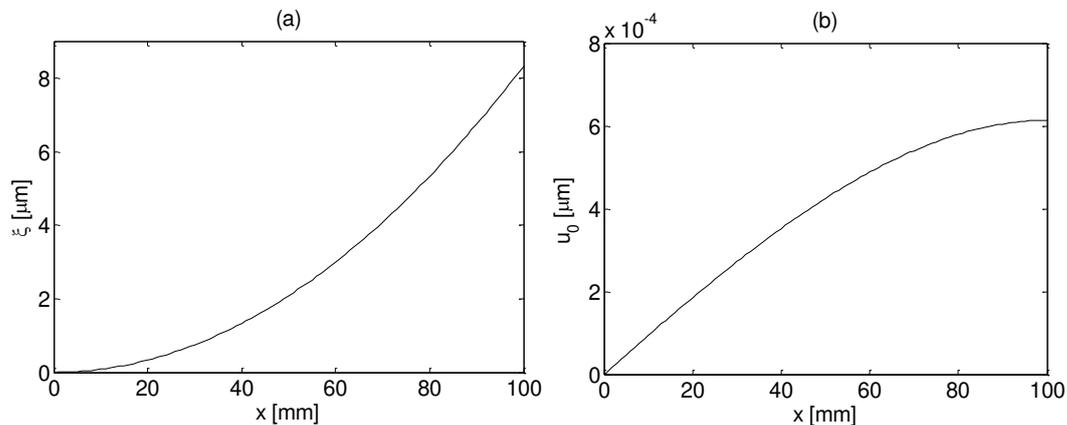


Figura 3: (a) Deflexión de la viga - (b) Desplazamiento del eje de referencia

Se observa en la Figura 3a que la tensión aplicada en las capas piezoeléctricas para este caso produce una deflexión del eslabón típica de los actuadores de flexión piezoeléctricos. De hecho esta deformación proviene exclusivamente de la tensión aplicada ya que, considerando la Ecuación (25) y las Ecuaciones (27) - (28), si la velocidad de rotación es constante la misma no debería tener efecto sobre la deflexión. Esto es consecuencia también de las hipótesis simplificadoras consideradas.

Por otro lado, en la Figura 3b se puede observar que el eje de referencia sufre deformación longitudinal. Considerando las ecuaciones para  $u_0$ , Ecuación (26) y Ecuación (29), se observa que este desplazamiento se debe en este caso exclusivamente a la velocidad de rotación  $\omega$ .

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrollaron las ecuaciones diferenciales que permiten modelar la dinámica de un eslabón flexible rotante con actuación piezoeléctrica. Así, este modelo propuesto permitirá abordar la simulación y finalmente el diseño de control para manipuladores con este tipo de eslabones. Esto permitiría, por ejemplo, el desarrollo e implementación de un control activo de vibraciones en robots manipuladores flexibles mediante actuación piezoeléctrica, así como también considerar en el diseño de control la compensación de pequeñas deflexiones estáticas asociadas a la flexibilidad del manipulador bajo efecto de la carga.



Además, para ilustrar el comportamiento del modelo, se simuló un caso particular de un eslabón en rotación constante con tensión aplicada en las capas piezoeléctricas. Este caso particular permite conocer el estado estacionario al que tenderá el eslabón durante etapas de velocidad constante, y el efecto de tensiones aplicadas para producir una flexión del actuador piezoeléctrico, mostrando la deformación del eslabón obtenida en tales condiciones.

## REFERENCIAS

- [1] Geniele H., Patel R., Khorasani K. *End-Point Control of a Flexible-Link Manipulator: Theory and Experiments*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 5, No. 6, 556-570, 1997.
- [2] Boscariol P., Scalera L., Gasparetto A. *Nonlinear Control of Multibody Flexible Mechanisms: A Model-Free Approach*. Applied Sciences, Vol. 11, No. 3, 1-14, 2021.
- [3] Sarkar P., Yamamoto M., Mohri A. *A Numerical Method to Minimize Tracking Error of Multi-Link Elastic Robot*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Octubre 1998 Victoria, B.C., Canada.
- [4] Khairudin M., Mohamed Z., Husain A. *Dynamic Model and Robust Control of Flexible Link Robot Manipulator*. Telkomnika, Vol. 9, No. 2, 279-286, 2011.
- [5] Gomis-Bellmunt O., Campanile L. *Design Rules for Actuators in Active Mechanical Systems*. Springer-Verlag, Londres, 2010.
- [6] Lim Y.-H., Gopinathan S., Varadan V., Varadan V. *Finite element simulation of smart structures using an optimal output feedback controller for vibration and noise control*. Smart Materials and Structures, Vol. 8, 324-337, 1999.
- [7] de Bonfim Gripp J., Santos F., Rodrigues Bernardo C., Sandoval Góes L. *Modeling and Identification of a Two-Link Flexible Manipulator*. ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol. 5, 1092-1101, 2012.
- [8] Ballas R. *Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators*. Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [9] Nader G., Nelli Silva E., Adamowski J. *Effective Damping Value of Piezoelectric Transducer Determined by Experimental Techniques and Numerical Analysis*. ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol. 1, 271-279, 2004.



## SISTEMAS MECATRÓNICOS PARA INTERFACES TÁCTILES BRAILLE: REVISIÓN Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Martín Pucheta<sup>1,2</sup>, Matías Bertorello<sup>1</sup>, David Gaydou<sup>1</sup>, Fredy Restrepo Blandón<sup>1</sup>,  
Alejandro Gallardo<sup>1</sup>, Rodrigo González<sup>1</sup>, Tomás Sosa<sup>1</sup> y Facundo Olmedo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Informática para la Ingeniería (CIII) – Facultad Regional Córdoba,  
Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRC), Maestro López esq. Cruz Roja Argentina,  
X5016ZAA Córdoba, Argentina, [mpucheta@frc.utn.edu.ar](mailto:mpucheta@frc.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

### RESUMEN

La accesibilidad de personas disminuidas visuales y ciegas a la educación universitaria y su posterior inserción laboral es una preocupación mundial. Para dicha población, los desafíos de este siglo se encuentran en la enseñanza y aprendizaje de las STEM (siglas de Science, Technology, Engineering and Mathematics), principalmente en la ciencia de base que son las matemáticas. Para ello, se requieren de interfaces humano máquina que consisten de sistemas táctiles, arreglos de pines para graficación y arreglos Braille, en donde el alumno pueda ir captando con sus dedos las expresiones y gráficas matemáticas. En este trabajo se presenta una revisión de la mecatrónica existente para dispositivos mecatrónicos Braille y arreglos táctiles para disminuidos visuales. Este estudio comprende el relevamiento de normas relacionadas y los principios de funcionamiento de los dispositivos táctiles comerciales y disponibles en la literatura para líneas Braille y tablets con arreglos de puntos. En el aspecto mecatrónico los principales desafíos son: (i) miniaturizar el tamaño de las actuaciones y el mecanismo biestable de cada pin, (ii) minimizar el consumo energético de los arreglos de pines, y (iii) reducir el número de piezas logrando un diseño modular de fácil ensamble. Como resultado, se presentan y enumeran los diseños existentes y las áreas de vacancia y potencial desarrollo, desde los cuales se extraerán los requerimientos de diseño con el fin de desarrollar un nuevo producto que debe ser de bajo costo y logrado con recursos nacionales o importados de fácil disponibilidad.

**Palabras Clave:** *Disminuidos visuales, Interfaces táctiles, Sistema Braille, Mecatrónica.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La accesibilidad de personas disminuidas visuales y ciegas a la educación universitaria y su posterior inserción laboral es una preocupación mundial. La accesibilidad que se puede resolver mediante modernos sistemas de software (del tipo narrador o *voice over*), como NVDA y JAWS [1], que interpretan texto y le hablan al individuo ciego, está vigente para las ciencias blandas (por ejemplo, en carreras de derecho, lenguas, psicología) y ha tenido éxito por su bajo costo en comparación con las interfaces táctiles.

Para la población de las personas disminuidas visuales, ciegas, sordociegas y sus docentes, los desafíos de este siglo se encuentran en la enseñanza/aprendizaje de las STEM (por las siglas de Science, Technology, Engineering and Mathematics), principalmente en la ciencia de base que son las matemáticas [2]. Para ello, se requiere indefectiblemente de interfaces humano máquina que consisten de sistemas táctiles, arreglos de pines para graficación y arreglos Braille



de 6 u 8 pines por celda, en donde el alumno pueda ir captando con sus dedos las gráficas y expresiones matemáticas [3].

El requerimiento más demandante para la ingeniería de estos sistemas táctiles es la miniaturización. La distancia entre pines es de 2,5 mm (algunos países utilizan 1 décimo de pulgada) y la actuación (mecánica o basada en multifísica) es individual para cada pin, el tiempo de refresco es de una décima de segundo. Los avances tecnológicos han logrado que las interfaces de líneas Braille con entrada y salida de datos tengan un costo que ronda, al día de la fecha, entre 1500 y 5000 dólares; una década atrás había menos oferta y costaban más del doble. Estos costos aún son altos para la situación económica de una familia tipo en Argentina. Este trabajo se enfocará en el aspecto tecnológico de las interfaces táctiles haciendo una revisión de los principales productos del mercado y de la literatura para luego definir los requerimientos de un nuevo producto [4]–[7]. Con ello se pretende iniciar una reducción de brechas tecnológicas en el conocimiento de estos productos, eliminar barreras económicas, sociales y pedagógicas, de suma importancia para promover en la población de destino su acceso a una educación de calidad en todos los niveles, no restringidos al nivel universitario, y lograr también la equidad de oportunidades.

## 2. GENERALIDADES SOBRE EL SISTEMA BRAILLE PARA MATEMÁTICAS

El sistema de puntos en relieve Braille es una cecografía para lectoescritura creada por Luis Braille en París, Francia, mostrado a sus pares en 1824 a sus 16 años y publicado en 1827 [8], [9]. Estuvo motivado por las dificultades que presentaba el sistema Haüy que se utilizaba en esa época y que consistía en marcar en relieve un papel resistente con letras estándar y notas musicales que se interpretaban con la yema de los dedos. Principalmente, fue una modificación y optimización del sistema de puntos en relieve inventado por Charles Barbier para la sonografía o escritura nocturna de uso militar.

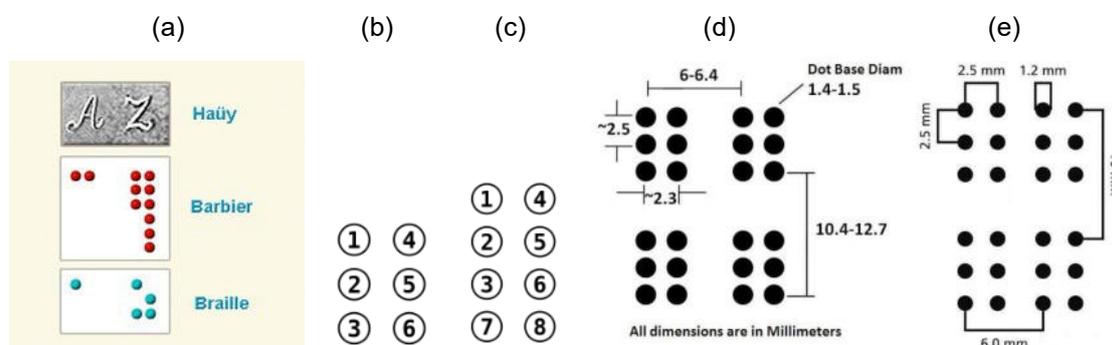


Figura 1: Letras A y Z (a). Numeración de los puntos en la celda de 6 puntos de Luis Braille (b) y de 8 puntos (c). Geometrías de celdas y puntos estándar (d) y en el sistema métrico (e).



En la Figura 1 (a) se muestra una comparación de los sistemas Haüy, Barbier y Braille [9]; todos se interpretan con las yemas de los dedos pero los dos últimos facilitan la escritura con un punzón sin filo y una plantilla sobre el reverso de papel resistente. Braille logró maximizar la discriminación y reconocimiento táctil con respecto al sistema Haüy que no facilitaba la escritura y al Barbier, de 12 puntos, que era muy grande y expresaba sonidos, pero tenía como ventaja su posibilidad de escritura y esto eficientizaba la comunicación. Braille también inventó la musicografía que actualmente se utiliza para traducir las partituras musicales.

El Braille consta de un arreglo de celdas con 6 puntos mostrado en la Figura 1 (b), dispuestos en dos columnas de 3 puntos. Hay varias normativas y geometrías adoptadas para las celdas [10,11] que, en promedio, se separan 6 mm horizontalmente y 10 mm verticalmente, los puntos se separan 2,5 mm, horizontal y verticalmente, y se elevan del plano táctil entre 0,3 y 0,7 mm; ver Figuras 1(d) y (e). En una celda Braille las combinaciones posibles son  $2^6=64$ , por lo que cada combinación mapea a 63 símbolos definidos por puntos marcados en un papel o por pines que se elevan; la ausencia de todos (pines hundidos u ocultos) define un espacio en blanco separador de palabras y números. Este alfabeto óptimo para su discriminación táctil en su lectura y útil para la escritura se compone en su forma más básica de:

- 26 letras minúsculas (la "a" es  $\bullet$ )
- signos diacríticos (acentos, diéresis, etc.) para varias variantes de idiomas. Por ej., la "ñ" es  $\bullet\bullet$ ,
- símbolos de puntuación y expresión como . , ; : " - .. ¿ . ? . ¡ : " " " ( ) ... ,
- un símbolo  $\bullet$  que se antepone para indicar que la letra que sigue es *mayúscula* . Por ejemplo, el texto "Alas" se escribe como:  $\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet$
- un símbolo  $\bullet\bullet$  para indicar que sigue un *número* para los números del 0 al 9. Por ej.: 31.720 se escribe como  $\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet$ , -7 se escribe como  $\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet$ ; y el número decimal 3,2 como  $\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet$ .

La codificación Braille para matemáticas impone el empleo de un mayor número de símbolos, además de complejas reglas para expresar/interpretar ecuaciones. Recientemente, se actualizó la convención [3] para celdas de 6 puntos que agrega combinaciones mediante el uso de prefijos. Existen diversas representaciones computacionales de archivos en Braille y sus símbolos. La celda braille de 8 puntos mostrada en la Figura 1(c) amplía a 256 los patrones posibles, por lo que incluyen el rango completo de celdas de 6 puntos y dos puntos por debajo, el 7mo a izquierda y el 8vo a la derecha. La celda de 8 puntos elimina en gran parte el uso de prefijos y admite una representación computacional en Unicode [12], el rango Unicode para Braille va de 2800 (celda vacía) hasta 28FF  $\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet$ ; cada símbolo se puede usar para múltiples idiomas. Por ejemplo, el Unicode Estándar 3.0 define a  $\bullet\bullet$  mediante "U+2817" pero no indica que signifique una "R". Unicode se usa para códigos computacionales y programación siguiendo la convención de Gardner-Salinas Code (GS6 o GS8) o el Computer Braille Code. Se conoce además [2], que las



consignas de control para actuar una línea Braille o arreglo de pines para graficación pueden generarse desde la interpretación de código en JAVA, Python, XHTML, MathML, Latex y MathJAX hacia representaciones imprimibles en Unicode (8 puntos) o Braille ASCII (6 puntos, hexadecimal de 20 a 5F).

## 2.1. Sistemas informáticos para enseñanza de matemáticas: auditivo vs. táctil

En primer lugar, se puede recurrir a la codificación manual para traducir ecuaciones a Braille, mediante papel grabado o mediante bloques de símbolos; respectivamente, esto insume un gasto de recursos no reutilizables o de un limitado número de símbolos. De otro modo, se requiere de un software que desde la codificación de ecuaciones actúen a las líneas táctiles, para lo cual existen varias convenciones en su simbología, sintaxis y semántica. La pedagogía para enseñar matemáticas a disminuidos visuales es compleja, porque tanto el docente como el alumno deben conocer la codificación y convención adoptada, y si se emplea un software y un hardware táctil, deben conocer también la lógica del uso y las capacidades de ambos.

Para las ecuaciones matemáticas en Braille, la principal dificultad para interpretarlas y enunciarlas es que son lineales: en general se escriben en una única línea aunque también hay estructuras multilinea, por ejemplo, para sistemas de ecuaciones y el cálculo matricial [3]. “Leer” una ecuación lineal con un dedo sobre Braille e ir armando mentalmente una ecuación es más fácil que escucharla. Si se la recorre con un dedo y el lector “se pierde” se puede volver un par de celdas atrás y retomar la ecuación y rearmar su interpretación. Si se la está escuchando y éste “se pierde”, se le debe indicar a un software narrador que la repita por completo y esta iteración requiere de más tiempo que de la manera táctil.

En Norteamérica para las expresiones matemáticas se emplea la convención y reglas del Nemeth Code desarrollado por el Dr. Abraham Nemeth en 1952 [13]. Basados en este código y otros existentes en países de habla inglesa, los miembros del *International Council on English Braille* (ICEB) acordaron, en 2004, en crear el Unified English Braille (UEB) [14], adoptado luego en la mayoría de los países del mundo. En la Argentina y Latinoamérica se emplea el Código Matemático Unificado [3] del Consejo Iberoamericano del Braille (CIB) e incluido en el programa EDICO [15] divulgado en Argentina por el profesor de matemáticas, no vidente, Juan José Della Barca. En Argentina se utiliza también la convención de Mazzei [16] y Della Barca [17]. Cabe mencionar la existencia de programas similares como WIMATS y Euler [2].

## 2.2. Sistemas táctiles

Los sistemas táctiles admiten muchas clasificaciones:

- Se diferencia entre arreglos de grilla regular para graficación y los que consisten sólo de líneas Braille. Algunos combinan ambas posibilidades.

- Se clasifican por el sistema táctil en sí, entre los que tienen pines móviles y los que tienen una superficie deformable (a los píxeles táctiles llamados “*taxels*”; los podemos traducir como *tácxeles* pero le llamaremos puntos Braille).
- Los botones de ingreso Braille tienen su propia clasificación. En general, tienen la disposición de las máquinas Perkins y pueden ser traslacionales rígidos o flexibles.
- El formato de presentación en cuanto a su volumen, permite clasificarlos en sistemas con forma de prisma rectangular del tipo anexo a un teclado de PC, celular, o tablet.

En este trabajo, se pondrá foco en los sistemas mecatrónicos con énfasis en la actuación de los pines o de las sobreelevaciones deformables, que son de formas variadas: porciones de casquetes esféricos, domos, cilindros redondeados, etc.

### 3. REVISIÓN DE SISTEMAS DEL MERCADO Y DE LA LITERATURA

Los desarrollos de sistemas táctiles son abundantes tanto en el mercado como en la literatura científica.



Figura 2: Clasificación de dispositivos Braille por su funcionalidad.

Entre los productos destacados en el mercado se encuentran 3 grupos, un representativo de cada uno se muestra en la Figura 2:

- a) Línea Braille de lectura/escritura y otras interacciones: Focus Blue [18], B-book 32 [19], Brailant BI [20].
- b) Arreglo de pines graficadora y líneas Braille múltiples: HyperBraille [21].



- c) Tablet con lectura táctil y escritura en pantalla touch o a teclado: Blitab [22], BrailleNote Touch [23].

#### 4. CLASIFICACIÓN DE PRODUCTOS MECATRÓNICOS

En este trabajo los productos mecatrónicos se clasificarán según los principios de actuación. En algunos casos, para ahorrar la energía requerida para mantener el pin en un cierto estado, elevado u oculto, se procede a realizar un enclavamiento (latching). Otra forma, en que no se requiere el enclavamiento, es el diseño del pin con comportamiento biestable, en que se requiere energía para cambiarlo de estado pero no para mantenerlo en el estado. Los avances en microactuadores utilizados para músculos artificiales, dispositivos de prótesis, parlantes planos y microrrobótica se están investigando para ser empleados en actuación de pines Brailles. Según el principio de funcionamiento, los productos mecatrónicos se pueden clasificar en:

- **Electromagnético:** El diseño más primitivo para actuar los pines Braille fue el solenoide con núcleo ferromagnético. Recientemente, Kim et al. [24] diseñaron un sistema de solenoide con enclavamiento magnético biestable mediante imán de Samarium Cobalto insertado en una leva rotativa que gira 180° y eleva/baja al pin; es muy compacto y de bajo consumo cambiando de estado en 5 ms empleando una potencia de 1 W. Recientemente, Loconsole et al. [25] desarrollaron un sistema de cabezal móvil con electroimanes que en una pasada sobre la línea mueve los pines ferromagnéticos cambiándolos entre dos posiciones. Tiene gran simplicidad mecánica pero el concepto del cabezal requiere una interacción con el usuario muy diferente al de otras líneas Braille.
- **Piezoeléctrico:** Estos actuadores son los más investigados para las líneas Braille, los inventos datan de 1960. Entre los primeros diseños se encuentra el actuador piezoeléctrico bimórfico tiene forma de viga cantiléver de dos posiciones que eleva o hace descender al pin Braille, a pesar de ser los de mayor volumen son muy utilizados por su robustez, resolución y rapidez [26]. Más recientemente, Metec AG de Alemania [27] construyó arreglos de construcción vertical modular 2 x 5 pines Braille, que evolucionó luego al mostrado en la Figura 2 (b). Los voltajes requeridos son bajos y seguros, de 5 a 12 V. También se han aplicado actuadores piezoeléctricos para desplazar un gas o un fluido que actúa de amplificador mediante una membrana flexible al pin Braille. Los diseños en que se desplaza glicerina incompresible lectura [28] son más compactos que los que utilizan aire [29], tienen la desventaja de tener que mantener energizado el pin deformado durante la operación.
- **Aleación de memoria de forma:** El pin está adosado a un resorte (o viga cantiléver) de aleación de memoria de forma (SMA), por las siglas de *Shape Memory Alloy*. El resorte se deforma mediante un calentamiento por el flujo de una corriente eléctrica; en general, tienen respuesta de deformación lenta, histéresis, baja resistencia a la fatiga y requieren de energía para mantener la temperatura y el estado activo. Para evitar esto último, Haga et al. [30] proponen un SMA enclavado mediante un sistema magnético.



- **Polímeros electroactivos y elastómeros dieléctricos:** Un polímero electroactivo es rígido a temperatura ambiente y se convierte en una goma elastomérica a temperaturas elevadas por encima de la temperatura de transición a vidrio del polímero. Niu et al. [31] desarrollaron un polímero electroactivo biestable (BSEP) aplicado a puntos Braille. El transductor consiste de un film delgado BSEP revestido de una capa ultradelgada de electrodo flexible sobre cada superficie. Al aplicar un voltaje entre electrodos las cargas electrostáticas producen fuerzas de atracción/repulsión y por lo tanto una transducción de energía eléctrica a energía de deformación mecánica. El film reduce su espesor y aumenta su área deformándose, en estado rígido es plano y actuado, en estado de goma, sale del plano formando el punto Braille deseado; su resolución y repetibilidad no es buena. Los actuadores de elastómero dieléctrico se inspiran en los que comenzaron a usarse para músculos artificiales [32] en vez de polímeros electroactivos, son siliconas y elastómeros acrílicos, y tienen deformaciones superiores al 100% y 200% respectivamente. El alto voltaje requerido, del orden de 1 a 4 kV, constituye un riesgo para el usuario.
- **Ferrofluidos:** Los ferrofluidos son líquidos magnetoreológicos cuyas propiedades cambian bajo un campo magnético externo. Pueden obtenerse con suspensiones de aceite o agua con partículas magnéticas a tamaño de nanoescala. Tamilarasan et al. [33] utilizaron ferrofluidos para obtener una celda Braille con puntos deformables actuados por pares de espiras concéntricas de Helmholtz (en lugar de electroimanes) y minimizando las interacciones entre puntos vecinos; sólo llega a obtener simulaciones viables para separaciones de 15 mm entre pines.
- **Microfluidica:** Recientemente, mediante microbombas y microválvulas que controlan fluidos conducidos por una red de canales elastoméricos se han logrado deformar membranas flexibles táctiles Braille con cultivos celulares [34]. El sistema requiere de fabricaciones con litografía blanda, fotolitografía de luz difusa, curados precisos, etc. Además, requiere de siembra y cultivo de células que duran un tiempo determinado. Con redes de construcción similar con litografía blanda pero en multicapas sistemas compuestos de dispositivos microneumáticos con válvulas elastoméricas actuadas individualmente por piezoeléctricos han permitido controlar aire confinado y actuar arreglos deformables Braille [35]. La desventaja principal es el volumen del sistema de presurización y el complejo control para obtener deformaciones regulares.
- **Electrotérmicos:** El Khoury et al. [36] proponen un sistema biestable fabricado con técnicas para sistemas microelectromecánicos para mover el pin mediante dos vigas cantiléver actuadas térmicamente en donde una mueve el pin y la otra enclava a la anterior.
- **Termoneumáticos:** son sistemas muy voluminosos, de actuación lenta y consumen mucha energía para mantener el estado activo [5].

Como áreas de vacancia y potencial desarrollo, se identifican a los sistemas electromecánicos biestables con y sin enclavamiento. Éstos deberán satisfacer requerimientos que compitan con los existentes en las revisiones bibliográficas y sistemas mecatrónicos existentes.



## 5. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Entre los requerimientos que se identifican, un diseño innovador deberá: (i) miniaturizar el tamaño de las actuaciones y del mecanismo de cada pin de modo de ser factible de ser utilizado tanto para graficación como para una página Braille, (ii) minimizar el consumo energético necesario para mover los pines recurriendo a enclavamiento o biestabilidad, (iii) reducir el número de piezas logrando un diseño modular de fácil ensamble, (iv) resistir una fuerza en oposición al usuario de al menos 0,2 N, (v) ser seguro y confiable; se descartarían actuaciones de alto voltaje y altas temperaturas que pongan en riesgo al usuario, (vi) multiplexar el control de las entradas, (vii) tener buena resolución y repetibilidad, y (viii) ser de bajo costo y fácil fabricación mediante impresión 3D, que por las dimensiones y tolerancias (de primeros prototipos construidos no mostrados en este trabajo) debe ser, al menos, tecnología de estereolitografía de resina fotopolimérica.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la problemática de diseñar un sistema táctil de arreglo de puntos Braille para la enseñanza de matemáticas a disminuidos visuales. Se realizó una revisión de sistemas mecatrónicos mediante la explicación global de los principios de funcionamiento, sus ventajas y desventajas. De esta revisión se extrajeron los requerimientos para diseñar un nuevo producto adaptados a recursos disponibles como impresión 3D. A futuro se diseñarán prototipos de sistemas con actuación electromecánica con pines basados en mecanismos flexibles biestables y con enclavamiento mecánico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento del proyecto PID AMTCCO0008723TC.

## REFERENCIAS

- [1] «JAWS® – Freedom Scientific». <https://www.freedomscientific.com/products/software/jaws/> (accedido 5 de junio de 2023).
- [2] M. A. Pucheta, «PID UTN 8723 - Desarrollo mecatrónico de interfaces braille para la enseñanza universitaria de matemáticas y cálculo a disminuidos visuales», Córdoba, febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://ciiii.frc.utn.edu.ar/ciiiii/proyectos/>
- [3] J. Muñoz Carenas (Coordinador) *et al.*, *Código Matemático Unificado para Iberoamérica*. en Publicaciones técnicas del Consejo Iberoamericano del Braille. Madrid, España: Grupo Editorial Once, 2023. Accedido: 5 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.once.es/servicios-sociales/braille/consejo-iberoamericano/codigo-matematico-unificado-para-iberoamerica/download>



- [4] F. Vidal-Verdu y M. Hafez, «Graphical Tactile Displays for Visually-Impaired People», *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 15, n.º 1, pp. 119-130, mar. 2007, doi: 10.1109/TNSRE.2007.891375.
- [5] D. Leonardis, L. Claudio, y A. Frisoli, «A Survey on Innovative Refreshable Braille Display Technologies», en *Advances in Design for Inclusion*, G. Di Bucchianico y P. F. Kercher, Eds., en *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 488-498. doi: 10.1007/978-3-319-60597-5\_46.
- [6] D. Kavitha y V. Radha, «Survey on Various Actuator Technologies for Refreshable Braille E-book Reader», en *International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics*, J. S. Raj, Ed., en *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 273-280. doi: 10.1007/978-3-030-49795-8\_27.
- [7] W. Yang, J. Huang, R. Wang, W. Zhang, H. Liu, y J. Xiao, «A Survey on Tactile Displays For Visually Impaired People», *IEEE Trans. Haptics*, vol. 14, n.º 4, pp. 712-721, oct. 2021, doi: 10.1109/TOH.2021.3085915.
- [8] C. Roig, *Luis y Brailinda te cuentan cómo es el Braille*, 1.ª ed. Madrid, España: Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE), 2002. [En línea]. Disponible en: <https://www.once.es/servicios-sociales/braille>
- [9] «Louis Braille», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 11 de diciembre de 2022. Accedido: 5 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Louis\\_Braille&oldid=147854179](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Louis_Braille&oldid=147854179)
- [10] «Marburg Medium Braille Font Standard – PharmaBraille». <https://www.pharmabraille.com/pharmaceutical-braille/marburg-medium-font-standard/> (accedido 5 de junio de 2023).
- [11] ISO, «ISO 17049:2013», *Accessible design — Application of braille on signage, equipment and appliances*, 25 de julio de 2019. <https://www.iso.org/standard/58086.html> (accedido 5 de junio de 2023).
- [12] «Braille Patterns». [https://unicode.org/charts/nameslist/c\\_2800.html](https://unicode.org/charts/nameslist/c_2800.html) (accedido 5 de junio de 2023).
- [13] «Nemeth Tutorial». <https://nemeth.aphtech.org/> (accedido 5 de junio de 2023).
- [14] «UEB Math Tutorial». <https://uebmth.aphtech.org/> (accedido 5 de junio de 2023).
- [15] A. M. Alonso Sendín, P. Estivill Masip, J. Muñoz Carenas, y J. M. Villar Pérez, *Manual de Usuario de EDICO Matemáticas*. en *Especialistas de Matemáticas*. Madrid, España: ONCE-Dirección de Educación, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://educacion.once.es/documentacion-1/edico/manualedico-matematicas/download>
- [16] S. Mazzei, *Notación Matemática Braille*, Transcripción a caracteres visuales del libro coeditado en sistema braille por Editora Nacional Braille y Libro Parlante y la Biblioteca Argentina para Ciegos. Buenos Aires, Argentina, 1998.
- [17] J. J. Della Barca, *Notación Matemática Braille*. Editora Nacional Braille y Libro Parlante. Accedido: 22 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: [http://mate.dm.uba.ar/~spuddu/della\\_barca/](http://mate.dm.uba.ar/~spuddu/della_barca/)
- [18] «Focus Blue Family – Freedom Scientific». <https://www.freedomscientific.com/products/blindness/focus-blue-family/> (accedido 5 de junio de 2023).
- [19] «New note-taker/computer b.book, successor of eystime evolution», *Eurobraille*. <https://www.eurobraille.com/produit/note-taker-computer-b-book-32-cells/> (accedido 9 de junio de 2023).
- [20] «Humanware - Brailiant BI 40X braille display - Low vision and blindness solutions: Magnifiers, Braille devices, Audio assistants, Orientation and mobility, and Embossers», *United States*. <https://store.humanware.com/hus/brailiant-bi-40x-braille-display.html> (accedido 9 de junio de 2023).
- [21] «Two-dimensional, touch-sensitive graphic displays - metec AG». <https://metec-ag.de/en/produkte-graphik-display.php?p=t2d> (accedido 5 de junio de 2023).
- [22] «BLITAB – Feelings get visible». <http://blitab.com/> (accedido 5 de junio de 2023).



- [23] «BrailleNote Touch Plus 32 braille notetaker / tablet - Blindness - Humanware», *United States*. <https://store.humanware.com/hus/blindness-brailnotenote-touch-plus-32.html> (accedido 9 de junio de 2023).
- [24] J. Kim, B.-K. Han, D. Pyo, S. Ryu, H. Kim, y D.-S. Kwon, «Braille Display for Portable Device Using Flip-Latch Structured Electromagnetic Actuator», *IEEE Trans. Haptics*, vol. 13, n.º 1, pp. 59-65, ene. 2020, doi: 10.1109/TOH.2019.2963858.
- [25] C. Loconsole, D. Leonardis, M. Gabardi, y A. Frisoli, «BrailleCursor: an Innovative Refreshable Braille Display Based on a Single Sliding Actuator and Simple Passive Pins», en *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, jul. 2019, pp. 139-144. doi: 10.1109/WHC.2019.8816128.
- [26] «Interfaces Braille – HOERBIGER Motion Control GmbH». <https://www.piezoproducts.com/es/applications/braille-interfaces/> (accedido 11 de junio de 2023).
- [27] T. Völkel, G. Weber, y U. Baumann, «Tactile Graphics Revised: The Novel BrailleDis 9000 Pin-Matrix Device with Multitouch Input», en *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, y A. Karshmer, Eds., en *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, pp. 835-842. doi: 10.1007/978-3-540-70540-6\_124.
- [28] T. Ninomiya, K. Osawa, Y. Okayama, Y. Matsumoto, y N. Miki, «MEMS Tactile Display with Hydraulic Displacement Amplification Mechanism», en *2009 IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, ene. 2009, pp. 467-470. doi: 10.1109/MEMSYS.2009.4805420.
- [29] X. Liu, T. Wang, J. Liu, Y. Sun, H. Wang, y X. Tian, «Design and experimental study of piezoelectric driven flexible Braille contacts», *AIP Adv.*, vol. 12, n.º 12, p. 125206, dic. 2022, doi: 10.1063/5.0123499.
- [30] Y. Haga, W. Makishi, K. Iwami, K. Totsu, K. Nakamura, y M. Esashi, «Dynamic Braille display using SMA coil actuator and magnetic latch», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 119, n.º 2, pp. 316-322, abr. 2005, doi: 10.1016/j.sna.2004.10.001.
- [31] X. Niu, P. Brochu, B. Salazar, y Q. Pei, «Refreshable tactile displays based on bistable electroactive polymer», en *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2011*, SPIE, mar. 2011, pp. 299-304. doi: 10.1117/12.880185.
- [32] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, y J. Joseph, «High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%», *Science*, vol. 287, n.º 5454, pp. 836-839, feb. 2000, doi: 10.1126/science.287.5454.836.
- [33] N. Tamilarasan, S. Thirumalini, K. Nirmal, K. Ganapathy, K. Murali, y H. Srinath, «Design and simulation of ferrofluid tactile screen for braille interface», en *2016 International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications (RAHA)*, dic. 2016, pp. 1-7. doi: 10.1109/RAHA.2016.7931890.
- [34] W. Gu, X. Zhu, N. Futai, B. S. Cho, y S. Takayama, «Computerized Microfluidic Cell Culture Using Elastomeric Channels and Braille Displays», *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 101, n.º 45, pp. 15861-15866, 2004.
- [35] «Control of soft machines using actuators operated by a Braille display - Lab on a Chip (RSC Publishing)». <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/LC/C3LC51083B> (accedido 14 de junio de 2023).
- [36] M. El Khoury, C. Nakic, T. Winterstein, y H. F. Schlaak, «Electrothermal out-of-plane-drive with novel bistable mechanism for portable Braille displays», en *2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, ene. 2016, pp. 1137-1140. doi: 10.1109/MEMSYS.2016.7421836.



## DESARROLLO DE UN GENERADOR DE VIBRACIONES MECÁNICAS A PARTIR DE UN PARLANTE DE AUDIO

**Renzo Garcia, Federico Masch, Rogelio Hecker y Ernesto Berges**

Facultad de Ingeniería, UNLPam, General Pico, La Pampa. [maschfederico@ing.unlpam.edu.ar](mailto:maschfederico@ing.unlpam.edu.ar)

### RESUMEN

El estudio experimental de las vibraciones mecánicas en cuerpos flexibles requiere de equipos de laboratorio capaces de producirlas con determinadas características de composición espectral e intensidad. Existe una amplia gama de equipamientos comerciales con rangos específicos de frecuencias y potencias, pero su adquisición puede resultar costosa. Este trabajo, desarrollado como trabajo final de un alumno de Ingeniería Electromecánica, presenta el ensamble y caracterización de un sistema electromecánico para la generación vibraciones controladas donde el transductor es un altavoz comercial. El sistema en cuestión consta de un amplificador de potencia de audio, una caja acústica y un altavoz subwoofer. El sistema se diseñó teniendo como objetivo brindar vibraciones mecánicas controladas con una frecuencia comprendida entre los 20 Hz y 200 Hz. La respuesta dinámica del sistema fue relevada experimentalmente y a partir de principios físicos se obtuvo el orden de un modelo dinámico simplificado. Con el orden del modelo y los datos experimentales se pudo ajustar una función transferencia capaz de describir la dinámica de manera satisfactoria.

**Palabras Clave:** *Vibraciones controladas, Altavoz.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio experimental de vibraciones mecánicas en cuerpos flexibles requiere de un sistema de vibraciones controladas capaz de inducir vibraciones mecánicas con una determinada potencia y contenido espectral. Estudios de fatiga de componentes mecánicos, evaluaciones de integridad mecánica de placas electrónicas, evaluación de dispositivos de recolección de energía vibratoria y evaluación de acelerómetros son algunos ejemplos de aplicación directa de este tipo de instrumental. Los sistemas comerciales de vibración, a menudo llamados shakers o mesas vibratorias, utilizan típicamente un conjunto de bobinas electromagnéticas para mover el dispositivo de prueba [1]. Las bobinas de voz también se encuentran en altavoces de audio comunes. La construcción de subwoofers de automóviles es particularmente resistente y se puede crear un sistema de vibraciones controladas muy útil mediante la modificación de un subwoofer que disponga de un área útil en la que se puedan montar un acelerómetro de referencia y el componente bajo prueba [2].

Este trabajo, desarrollado como trabajo final de un alumno de Ingeniería Electromecánica, presenta el ensamble y caracterización de un sistema electromecánico para la generación vibraciones controladas donde el transductor es un altavoz comercial. El rango de interés del estudio es entre 20 y 200 Hz, para el posterior análisis de estructuras de cosecha de energía con materiales piezoeléctricos. En las siguientes secciones se realiza una descripción del sistema desarrollado, la presentación de un modelo dinámico simplificado para describir su dinámica y la evaluación experimental correspondiente. Finalmente se presenta la discusión de resultados y las conclusiones pertinentes.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Montaje del sistema de vibraciones

El sistema de vibraciones controladas propuesto tiene como dispositivo central un transductor electromecánico comúnmente denominado altavoz. Este altavoz en un modelo Subwoofer TS-





A300D4 de la marca Pioneer [3], como se observa en la Figura 1 y cuyos detalles técnicos se especifican en la Tabla 1.

Figura 1. Altavoz Subwoofer TS-A300D4 [3]

Tabla 1. Datos técnicos del altavoz Subwoofer TS-A300D4

Potencia nominal (RMS)	500 [W]
Potencia máxima	1500 [W]
Impedancia nominal (dual)	4 [Ω]
Respuesta de frecuencia (-20 dB)	20 [Hz] a 2300 [Hz]
$R$ : Resistencia de la bobina	4.3 [Ω]
$L$ : Inductancia de la bobina	7.73 [mH] (8 [Ω]) / 1.93 [mH] (2 [Ω])
$f_r$ : Frecuencia de resonancia	25 [Hz]
$c$ : Pérdidas mecánicas	4.95 N.s/m [Ns/m]
$m$ : Masa mecánica	0.181 [kg]
$k$ : Constante elástica	$(23.3 \times 10^{-5})^{-1}$ [N/m]
Diámetro D	256 [mm]
$T$ : Factor de fuerza	17.7 [N/A] (8 [Ω]) / 8.9 [N/A] (2 [Ω])
$X_{max}$ : Excursión máxima del cono	10.1 [mm]

Para la generación de la señal de excitación del altavoz se adoptó un amplificador de audio comercial modelo B52, cuyos datos técnicos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos técnicos del amplificador de audio.

Marca	B52
Modelo	RC-802
Potencia continua @ 2Ω	175 W x 2
Máxima Potencia @ 2Ω	400 W x 2
Máxima Potencia Puentes @ 4Ω	800 W x 1
Impedancia mínima del altavoz	2Ω
Distorsión THD	0.01%
Respuesta de frecuencia	20 Hz ~ 20 kHz
Sensibilidad de entrada	0.2 V ~ + 6 V
Impedancia de entrada	10 kΩ
Relación Señal - Ruido	98 dB
Separación de canal	50 dB
Red Crossover	
Filtro pasa bajos	50 Hz ~ 250 Hz
Aumento de bajos (Bass Boost)	0 dB / +6 dB / +12 dB
Filtro pasa altos	100 Hz ~ 2.2 kHz

El altavoz se instaló en una caja acústica con la finalidad de modificar su respuesta dinámica y así proteger su integridad mecánica del fenómeno de resonancia. El tipo de caja acústica



seleccionado ha sido el Bass-Reflex y sus dimensiones fueron determinadas en base al software de diseño WinISD 0.7.0.950 [4]. El criterio de diseño adoptado ha sido establecer una frecuencia de resonancia del sistema caja-altavoz menor a la frecuencia de resonancia libre del altavoz. En la Figura 2 se puede visualizar la implementación de la caja acústica que posee una altura de 300 mm, base de 500 mm por 400 mm constituida en material fenólico de 18 mm con la adición de una lámina de 5 mm de corcho prensado. Además, esta caja posee un tubo respiradero que fue establecido en 58 mm de diámetro y una longitud de 170 mm.



Figura 2. Implementación de caja acústica y altavoz. En esta imagen puede observarse el soporte genérico, la sujeción de un disco piezoeléctrico y el acelerómetro ADXL203.

Como también se muestra en la Figura 2, se desarrolló por impresión 3D una base que se pegó al centro del cono del altavoz para poder sujetar piezas a estudiar. Complementariamente, se desarrolló un soporte vertical, de color rojo, para poder sujetar un acelerómetro, donde en este caso se montó el modelo ADXL203 [5].

## 2.2. Modelo dinámico del sistema de vibraciones

La segunda etapa de este trabajo consiste en la obtención de un modelo matemático simplificado con el cual describir la dinámica del sistema. Específicamente, se decidió obtener un modelo matemático lineal que describa la dinámica del sistema en el rango de frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y 200 Hz. El modelo debe describir la aceleración transversal del altavoz en base a la señal de excitación del amplificador.



En este modelo se considera despreciable la interacción mecánica de la caja acústica con el altavoz en el rango de frecuencias de interés. Se asume que la dinámica del acelerómetro se describe como un filtro pasa-bajo y por último, se asume que el amplificador dispone de una dinámica lineal plana. En la Figura 3, se presenta un diagrama del modelo electromecánico del altavoz [6].

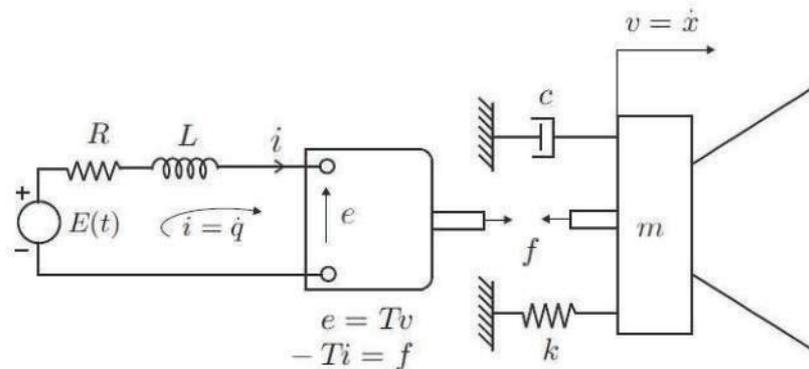


Figura 3. Esquema de la dinámica del altavoz [6].

En este diagrama se presentan la dinámica eléctrica, la dinámica mecánica y el acoplamiento entre estas. La variable temporal  $E(t)$  es la diferencia de potencial en la salida del amplificador y resulta proporcional a la señal de excitación de este  $e_x(t)$ , es decir  $E(t) = k_a e_x(t)$ , ya que se asume que la dinámica del amplificador es plana. La constante  $k_a$  es la ganancia del amplificador. La variable temporal  $i(t)$  es la corriente eléctrica que circula en el conductor de la bobina. El parámetro  $R$  es la resistencia eléctrica de la bobina del altavoz. El parámetro  $L$  es la inductancia de la bobina. La variable  $e(t)$  es la fuerza electromotriz inducida de la bobina y  $f(t)$  es la fuerza que se origina en la interacción del campo magnético de la bobina con el campo magnético del imán permanente. El parámetro  $m$  es la masa equivalente del altavoz,  $c$  es el parámetro de disipación viscosa del altavoz y  $k$  es la constante elástica del altavoz. Por otro lado,  $T$  es el parámetro denominado factor de fuerza de la bobina y  $x(t)$  es el desplazamiento longitudinal de la bobina. Las ecuaciones diferenciales que describen estas dinámicas son:

$$E(t) = k_a e_x(t) \quad (1)$$

$$Ri(t) + L \frac{\partial i}{\partial t}(t) + e(t) = E(t) \quad (2)$$

$$e(t) = T\dot{x}(t) \quad (3)$$

$$f(t) = -Ti(t) \quad (4)$$

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t). \quad (5)$$



En tanto a la dinámica del acelerómetro se modeló de la siguiente manera:

$$\dot{q}(t) + 2\pi f_c q(t) = 2\pi f_c \ddot{x}(t) \quad (6)$$

$$\ddot{x}_m(t) = q(t), \quad (7)$$

donde  $\ddot{x}(t)$  es la aceleración longitudinal de la bobina,  $q(t)$  es la variable de estado de la dinámica,  $f_c$  es la frecuencia de corte del acelerómetro y  $\ddot{x}_m(t)$  es la señal de salida del acelerómetro.

A partir de las ecuaciones diferenciales presentadas en las Ecuaciones (1) a (7), se obtiene usando la transformada del Laplace y condiciones iniciales nulas, la siguiente función transferencia:

$$G(s) = \frac{\ddot{x}_m(s)}{e_x(s)} = \frac{k_a T s^2}{mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR} \frac{2\pi f_c}{s + 2\pi f_c} \quad (8)$$

que relaciona la señal de excitación del amplificador con la aceleración longitudinal de la bobina medida por acelerómetro.

## 4. DESARROLLO

### 4.1. Evaluación experimental

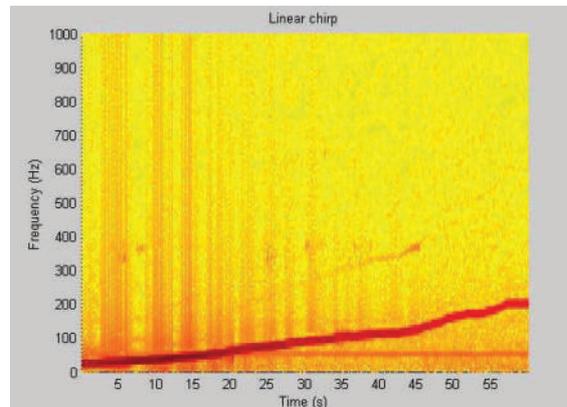
La evaluación experimental del sistema de vibraciones controladas constó de dos etapas. La primera etapa fue una evaluación general del comportamiento dinámico del sistema y estudio de la amplitud máxima de excitación para la cual el sistema presenta un comportamiento lineal. La segunda etapa consistió en el registro de la señal de excitación y la señal del acelerómetro en el rango de frecuencias comprendido entre los 20 y 200 Hz para la estimación de parámetros de la función de transferencia.

#### 4.1.1. Análisis del rango de frecuencia y amplitud de la señal a comandar

Para la primera etapa se procedió a excitar al sistema con un conjunto de señales de entrada,  $e_x(t)$ , comprendidas por una onda senoidal pura con un barrido lineal de frecuencia y amplitud máxima de: 50 mV, 100 mV, 200 mV, 300 mV y 400 mV (señal chirp). El barrido de frecuencia cubrió el rango comprendido entre 20 Hz y los 200 Hz para cada una de las amplitudes anunciadas. A su vez, estas evaluaciones se realizaron para 4 ganancias del amplificador identificadas como: mínima, 25%, 50% y 100%. Para cada experimento se registró la señal de excitación  $e_x(t)$  y la señal de salida del acelerómetro  $\ddot{x}_m(t)$  por medio de una placa adquisidora



de datos LabJack U6 [7] a una tasa de muestreo de 2 kHz. A los pares de señales ( $e_x(t)$ ,  $\ddot{x}_m(t)$ ) se les aplicó la transformada rápida de Fourier (FFT) [8] y se analizó sus respectivos espectros en búsqueda de presencias de armónicos. A modos de ejemplo, en la Figura 4 se visualiza la



evolución temporal del espectro de la señal del acelerómetro  $\ddot{x}_m(t, f)$  para una excitación de 50 mV y ganancia mínima.

Figura 4. Evolución temporal del espectro de la señal de acelerómetro  $\ddot{x}_m(t)$  ante una excitación  $e_x(t)$  del tipo chirp con una amplitud máxima de 50 mV y mínima ganancia del amplificador.

Como se puede observar en la Figura 4, hay una evolución preponderante (línea roja principal) que pone de manifiesto que el sistema responde con la frecuencia comandada para cada valor de tiempo de la señal chirp.

La Figura 5 muestra otro ejemplo donde se visualiza la evolución temporal del espectro de la señal del acelerómetro  $\ddot{x}_m(t, f)$  ahora para una excitación de 300 mV y ganancia mínima. En esta última puede observarse la presencia de armónicos, los cuales pueden provenir de no linealidades en la dinámica del sistema.

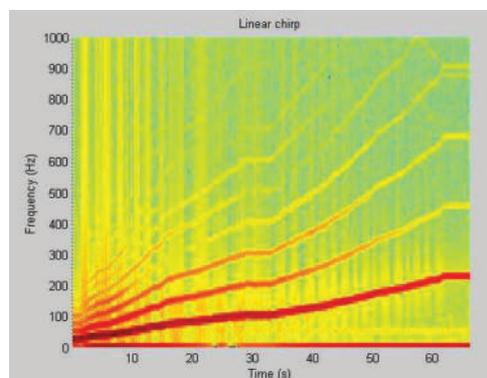


Figura 5. Evolución temporal del espectro de la señal de acelerómetro  $\ddot{x}_m(t)$  ante una excitación  $e_x(t)$  del tipo chirp con una amplitud máxima de 300 mV y mínima ganancia del amplificador.

Por otro lado, si la ganancia era aumentada mas allá del valor mínimo, se observaba también la presencia de armónicos para todos los valores de la amplitud de la chirp. Por lo tanto, para el resto de los experimentos se decidió mantener la ganancia del amplificador en su valor mínimo. También se estableció para el resto de los experimentos una amplitud de la chirp de 50 mV por presentar también una reducida influencia de armónico, como se observa en la Figura 4.

#### 4.1.2. Estimación de parámetros

Para la identificación de parámetros se excitó al sistema con la chirp de 50 mV con un incremento lineal desde 20 Hz hasta los 200 Hz, en un intervalo total de 60 segundos. Se recolectaron los pares de señales  $e_x(t)$  y  $\ddot{x}_m(t)$ , con la ya mencionada placa adquisidora LabJack U6 a una tasa de muestro de 2 kHz.

En base a la función transferencia obtenida a partir de principios físicos presentada en la Ec. (8), se determinó la cantidad de ceros y polos a considerar en la identificación mediante la rutina tfest() del Toolbox Identification de Matlab [9]. La función transferencia experimental que se obtuvo es:

$$G_{exp}(s) = \frac{-1242000s^2 + 72600000s - 7144000000}{s^4 + 1603 \cdot s^3 + 366500 \cdot s^2 + 84240000 \cdot s + 593400000} \quad (9)$$

Mientras que la función transferencia teórica determinada a partir de los datos técnicos del altavoz, ver Tabla 1, y considerando una frecuencia de corte de 50 Hz para el acelerómetro [4], ha quedado determinada de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{8,9s^2}{3,4933 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 0,3987035 \cdot s^2 + 98,135761 \cdot s + 9227,46781} \cdot \frac{312,5}{(s + 312,5)} \quad (10)$$

En la Figura 6 se presenta la magnitud de la respuesta en frecuencia de la función transferencia experimental presentada en la Ec. (9) y la magnitud de la respuesta en frecuencia teórica presentada en la Ec. (10), junto con los datos experimentales.

#### 4.2. Análisis y discusión de resultados

Los datos experimentales de la Figura 6 muestran la respuesta real del sistema con un pico de resonancia aproximadamente a los 35 Hz. Se puede observar que los datos son consistentes entre los 20 y los 200 Hz ya que ese rango de frecuencia corresponde al rango de la chirp de excitación.

Luego se puede observar que la función de transferencia teórica determinada a partir de los datos técnicos, ver Ec. (10), predice la forma general de los datos experimentales, pero se

pueden observar diferencias. Por un lado, el pico de resonancia se ubica en 41 Hz, lo que resulta levemente mayor que los 35 Hz experimentales. Por otro lado, la mayor diferencia está en la ganancia de la predicción en la ubicación de la resonancia, o más específicamente entre los 20 y los 100 Hz. Finalmente, la curva ajusta bien entre el rango de los 100 a los 200 Hz. El análisis de las discrepancias observadas a baja frecuencia entre los datos experimentales y teóricas es una de las acciones a realizar en trabajos futuros. Sin embargo, se esbozaron algunas hipótesis para explicar las observaciones. Una de estas hipótesis es que a baja frecuencia la caja acústica interacciona con el altavoz. Esto hace necesario modelar dicha interacción e introducirla en el modelo propuesto. Una segunda hipótesis es que posiblemente se haya subestimado la masa equivalente del altavoz y/o sobrestimado el coeficiente de amortiguamiento. Esta situación promueve el aumento de la frecuencia de resonancia y la reducción drástica de su magnitud.

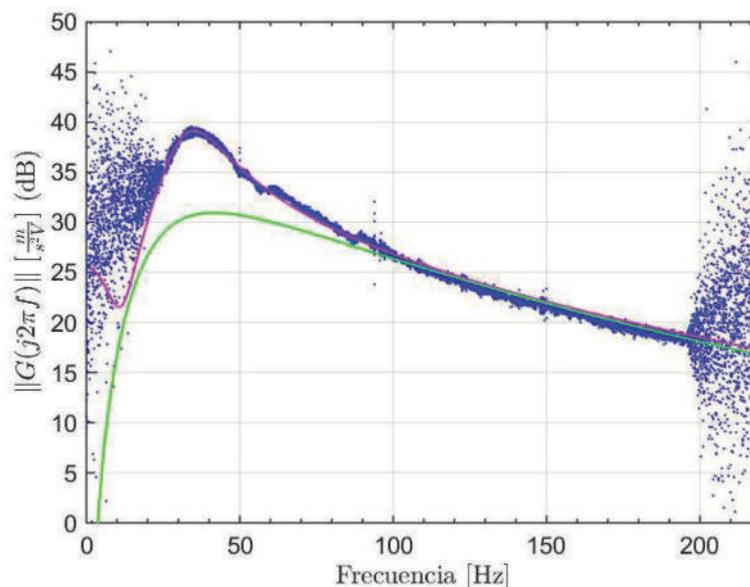


Figura 6. Magnitud de la respuesta en frecuencia entre la señal de excitación  $e_x(t)$  y la señal de salida del acelerómetro  $\dot{x}_m(t)$ . (x) Respuesta experimental. (---) Función transferencia teórica, Ec.(10). (---) Función transferencia estimada, Ec.(9).

Finalmente, la estimación de la función de transferencia a partir de la rutina `tfest()` de Matlab resultó muy satisfactoria, tal como se puede observar la línea de color magenta en la Figura 6. Es importante destacar que la cantidad de ceros y polos predichos por el modelo teórico, Ec. (8), ha sido una predicción satisfactoria, en tanto que dichas cantidades han sido utilizadas en la rutina `tfest()`.



## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha diseñado, implementado y evaluado un sistema de vibraciones controladas a partir de un altavoz comercial. El desarrollo del modelo analítico sirvió para establecer el orden del modelo a estimar experimentalmente. El modelo ajustado experimentalmente representa adecuadamente a los datos experimentales, al menos para una entrada de 50 mV de la señal de entrada y para una ganancia mínima del amplificador. Por lo tanto, se ha podido caracterizar la respuesta en frecuencia del sistema en el rango entre 20 y 200 Hz, para el posterior uso en el estudio de sistemas de cosecha de energía con piezoeléctricos.

## REFERENCIAS

- [1] LabWorks.Inc <https://la.mathworks.com/help/ident/ref/tfest.html>
- [2] Dale H. Litwhiler. *A Custom Vibration Test Fixture Using a Subwoofer*. Proceedings of The 2011 IAJC-ASEE International Conference ISBN 978-1-60643-379-9.  
[https://ijme.us/cd\\_11/PDF/Paper%2068%20ENT%20205.pdf](https://ijme.us/cd_11/PDF/Paper%2068%20ENT%20205.pdf)
- [3]. TS-A300D4. [https://www.labworks-inc.com/modal\\_test\\_systems/index.htm](https://www.labworks-inc.com/modal_test_systems/index.htm)
- [4]. WinISD. <http://www.linearteam.org/>
- [5]. ADXL203. <https://www.analog.com/en/products/adxl203.html>
- [6] A. Preumont. *Mechatronics. Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems*. Springer. 2006.
- [7]. LabJack U6. <https://labjack.com/products/u6>
- [8]. Transformada rápida de Fourier  
[https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html?searchHighlight=fft&s\\_tid=srchtitle\\_fft\\_1](https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html?searchHighlight=fft&s_tid=srchtitle_fft_1)
- [9]. Estimate transfer function. <https://la.mathworks.com/help/ident/ref/tfest.html>



## ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DEL EFECTOR FINAL DE UN ROBOT PARA APLICACIÓN EN SOLDADURA

Héctor Molina<sup>1</sup>, Manuel Galdeano<sup>2</sup>, Pedro Bocca<sup>3</sup>, German Barraza<sup>4</sup>, Rodolfo Godoy<sup>5</sup>, Alberto Sanchez<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería – UNSJ Av. Lib. San Martín (Oeste) 1109 San Juan [hmolina@unsj.edu.ar](mailto:hmolina@unsj.edu.ar)

<sup>2</sup> Instituto de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería – UNSJ Av. Lib. San Martín (Oeste) 1109 San Juan [mgaldeano@unsj.edu.ar](mailto:mgaldeano@unsj.edu.ar)

<sup>3</sup> Instituto de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería – UNSJ Av. Lib. San Martín (Oeste) 1109 San Juan [pbocca@inaut.unsj.edu.ar](mailto:pbocca@inaut.unsj.edu.ar)

<sup>4</sup> Instituto de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería – UNSJ Av. Lib. San Martín (Oeste) 1109 San Juan [gbarraza@unsj.edu.ar](mailto:gbarraza@unsj.edu.ar)

<sup>5</sup> Instituto de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería – UNSJ Av. Lib. San Martín (Oeste) 1109 San Juan [rgodoy@unsj-cuim.edu.ar](mailto:rgodoy@unsj-cuim.edu.ar)

<sup>6</sup> Departamento Electromecánica – Facultad de Ingeniería – UNSJ Av. Lib. San Martín (Oeste) 1109 San Juan [albertosanchezsalas13@gmail.com](mailto:albertosanchezsalas13@gmail.com)

### RESUMEN

El robot industrial motivo del trabajo consta de una estructura de tipo antropomórfica, tiene articulaciones de cintura, hombro y codo, posee cuerpo, brazo y antebrazo, sus movimientos son accionados por tres servomotores de CC con sus mecanismos reductores.

Sobre este robot existente, se trabaja para dotarlo de mecanismos de muñeca y giro de efector final, con sus correspondientes motores de accionamiento, con el objetivo de tener seis grados de libertad, necesarios para controlar posición y orientación en el extremo operativo, permitiendo su aplicación en tareas de soldadura.

Se presentan los resultados de las simulaciones en SOLIDWORKS de las trayectorias y ángulos de inclinación posibles del efector final, estas simulaciones permiten conocer los requerimientos de velocidades y aceleraciones de las articulaciones que producen el movimiento deseado. A su vez, permite conocer el área de trabajo efectiva del robot soldador. Con esto se obtienen los criterios necesarios para el diseño y construcción de los componentes de los mecanismos de muñeca y efector final.

El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación denominado “Diseño e implementación de mecanismo de muñeca, para robot industrial aplicado al corte y soldadura de metales” que se lleva a cabo en el Instituto de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan.

**Palabras Clave:** Robot, Seguimiento de trayectoria, Soldadura



## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo, se plantea la incorporación de mecanismos adicionales, a los que ya posee un robot existente, para dotarlo de las capacidades necesarias en aplicaciones de soldadura.

Para operaciones de soldadura, es necesario controlar el desplazamiento y la orientación de la torcha [1,2] (efector final en soldadura), por ello se plantea incorporar tres grados de libertad adicionales, a los tres con los que cuenta el robot.

Se ha trabajado con el software SOLIDWORKS diseñando los mecanismos adicionales, incorporándolos al diseño del robot existente, Mediante simulación se busca determinar la viabilidad, de la arquitectura resultante del robot para tareas de soldadura

Se presentan la estructura del robot existente y los mecanismos propuestos, luego los resultados de la simulación del robot con los nuevos mecanismos incorporados, para dos casos de trayectorias rectas, una con movimiento alternativo, y otra simple, a continuación se presentan los volúmenes efectivos, para el caso, del robot existente con 3 grados de libertad e incorporando los mecanismos propuestos con 6 grados de libertad, finalmente las conclusiones.

## 2. ROBOT EXISTENTE

El robot existente posee una configuración de tipo antropomórfica, puede verse en el figura1, con articulaciones de cintura, hombro y codo, posee cuerpo, brazo y antebrazo, sus movimientos son accionados por tres servomotores de CC con sus mecanismos reductores.

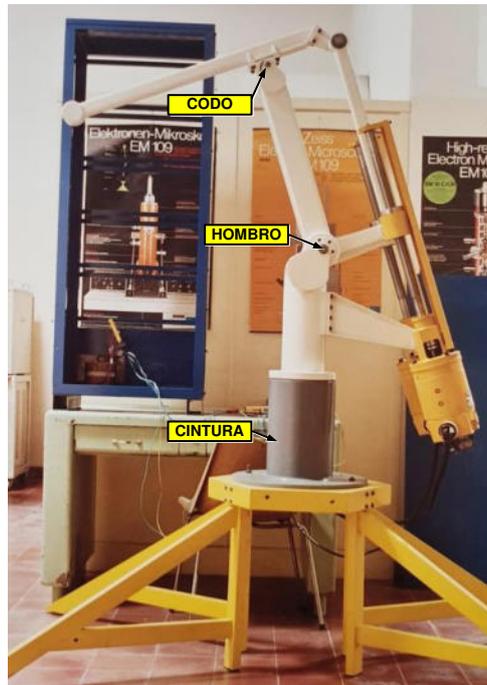


Figura 1: Robot existente en el laboratorio del IMA

Las articulaciones indicadas en la figura 1 permiten controlar la posición del extremo operativo o efector que viene representado por la ecuación 1.

$$P(q) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

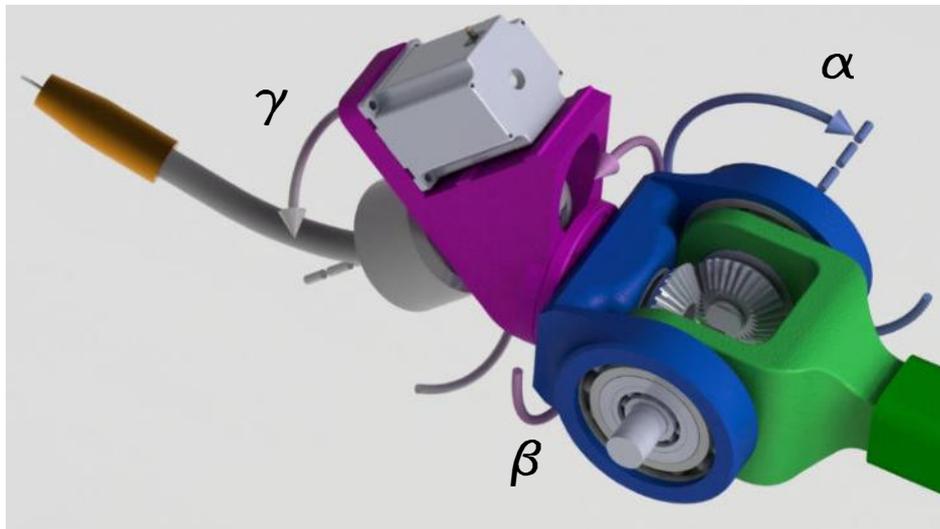
En el proceso de soldadura se debe orientar la torcha en el ángulo adecuado respecto a las piezas que se desean unir [1]. La estructura actual del robot no permite dicha acción, siendo incapaz de realizar la tarea propuesta.

### 3. MECANISMOS PROPUESTOS

Teniendo resuelto el proceso de posicionamiento con la configuración del robot existente, deben diseñarse los mecanismos que permitan la orientación de la torcha en los 3 ejes [3] que se indican en la ecuación 2.

$$\varphi(q) = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para agregar tres grados de libertad, se ha planteado el diseño de la figura 2, empleando un mecanismo diferencial para los movimientos de muñeca, y un eje de giro para la torcha, estos movimientos serán accionados por motores eléctricos, dos servomotores con reductores harmonic drive para los movimientos de muñeca, y un motor de pasos nema 23 para el giro de la torcha.



$\alpha$ : Eje de cabeceo de la muñeca  $\beta$ : Eje de giro de la muñeca  $\gamma$ : eje de giro del efector

Figura 2: Mecanismos de muñeca y efector final

Los movimientos de muñeca se logran con un tren compuesto de tres engranajes, dispuestos en diferencial. Cuando los engranajes situados sobre el eje de cabeceo  $\alpha$ , se accionan juntos y en el mismo sentido de giro, se logra el movimiento de cabeceo de muñeca, dependiendo del sentido de giro los motores este movimiento será ascendente o descendente. Cuando los engranajes del eje de cabeceo  $\alpha$  se accionan en sentido contrario se logra el movimiento en el eje de giro  $\beta$  de muñeca dependiendo del sentido de giro de ambos motores será el sentido resultante.

El tercer engranaje del tren compuesto es solidario al soporte del efector final. El soporte del efector final posee un eje  $\gamma$  (orientado a  $45^\circ$  grados respecto del eje de giro de muñeca  $\beta$ ), sobre el que gira la torcha accionada por un tercer motor.

#### 4. SIMULACION DE TRAYECTORIAS

Con los grados de libertad necesarios para controlar la orientación de la torcha, y con el diseño realizado en SOLIDWORKS, se empleó la herramienta Solidworks Motion para verificar que el conjunto de articulaciones permitan el movimiento deseado en el extremo operativo. De este modo se simularon las trayectorias de movimiento obteniendo la variación de las posiciones angulares necesarias en las articulaciones, para realizar las trayectorias planteadas [4,5,6], en la figura 3 pueden verse las posiciones extremas para las trayectorias simuladas. Las velocidades y aceleraciones en las articulaciones se obtienen a partir de los datos de posición respecto del tiempo

Se simuló una trayectoria recta horizontal de 150cm manteniendo la torcha perpendicular al plano de movimiento, con una variación cíclica de  $\pm 75$ cm respecto del centro del robot. Los valores de posición de la torcha y cada una de las articulaciones, respecto del tiempo pueden verse en la figura 4.



Figura 3: Posiciones inicial y final de la torcha para los movimientos simulados



Se simuló también una trayectoria recta horizontal de 150cm manteniendo la torcha perpendicular al plano de movimiento desde la posición inicial de +75cm a -75cm con velocidad constante. Los valores de posición de la torcha y cada una de las articulaciones, respecto del tiempo pueden verse en la figura 5.

Para las trayectorias utilizadas en la simulación se han considerado velocidades de desplazamiento para posicionamiento y orientación, superiores a las de soldadura, pero que corresponden a las condiciones de sollicitación más alta, para motores y articulaciones.

## 5. VOLUMEN DE TRABAJO

En la figura 6 se pueden ver los volúmenes de trabajo, el volumen menor en color verde representa el volumen de trabajo con la configuración actual de tres grados de libertad logrando control de posición x, y, z, el volumen mayor en color beige representa el volumen con los mecanismos de muñeca y giro de efector, de seis grados de libertad al incluir  $\alpha, \beta, \gamma$  con control de orientación de la torcha.

Más allá de la evidente mejora en el volumen de trabajo, la ventaja real proporcionada por el nuevo diseño radica en las trayectorias y orientaciones complejas que pueden lograrse con la torcha en aplicaciones de soldadura.

La metodología utilizada para encontrar los volúmenes de trabajo máximos, de ambas configuraciones (sin muñeca y con muñeca), se basó en el posicionamiento manual del efector final, en las posiciones correspondientes a sus extensiones máximas y mínimas respecto al eje de giro de la cintura. Dicho posicionamiento es posible gracias a que en el software SOLIDWORKS, cada articulación en este mecanismo abierto posee las restricciones reales y necesarias para su control (que en su totalidad corresponden a articulaciones de rotación pura, en los que el ángulo de giro se encuentra limitado por el contacto con el resto de los eslabones). De esta forma, acotando este posicionamiento a un plano vertical coincidente con el eje de la cintura, y extendiendo o retrayendo desde el extremo del efector del mecanismo, se obtiene una serie de puntos que unidos con una polilínea dan forma a un perfil. Como el robot tiene la posibilidad de girar 360° desde su cintura, este perfil se convierte en un volumen de revolución, que da la información necesaria respecto al alcance máximo del efector final. Luego se ha efectuado corte de los volúmenes con un plano vertical centrado en el eje de giro de cintura del robot.

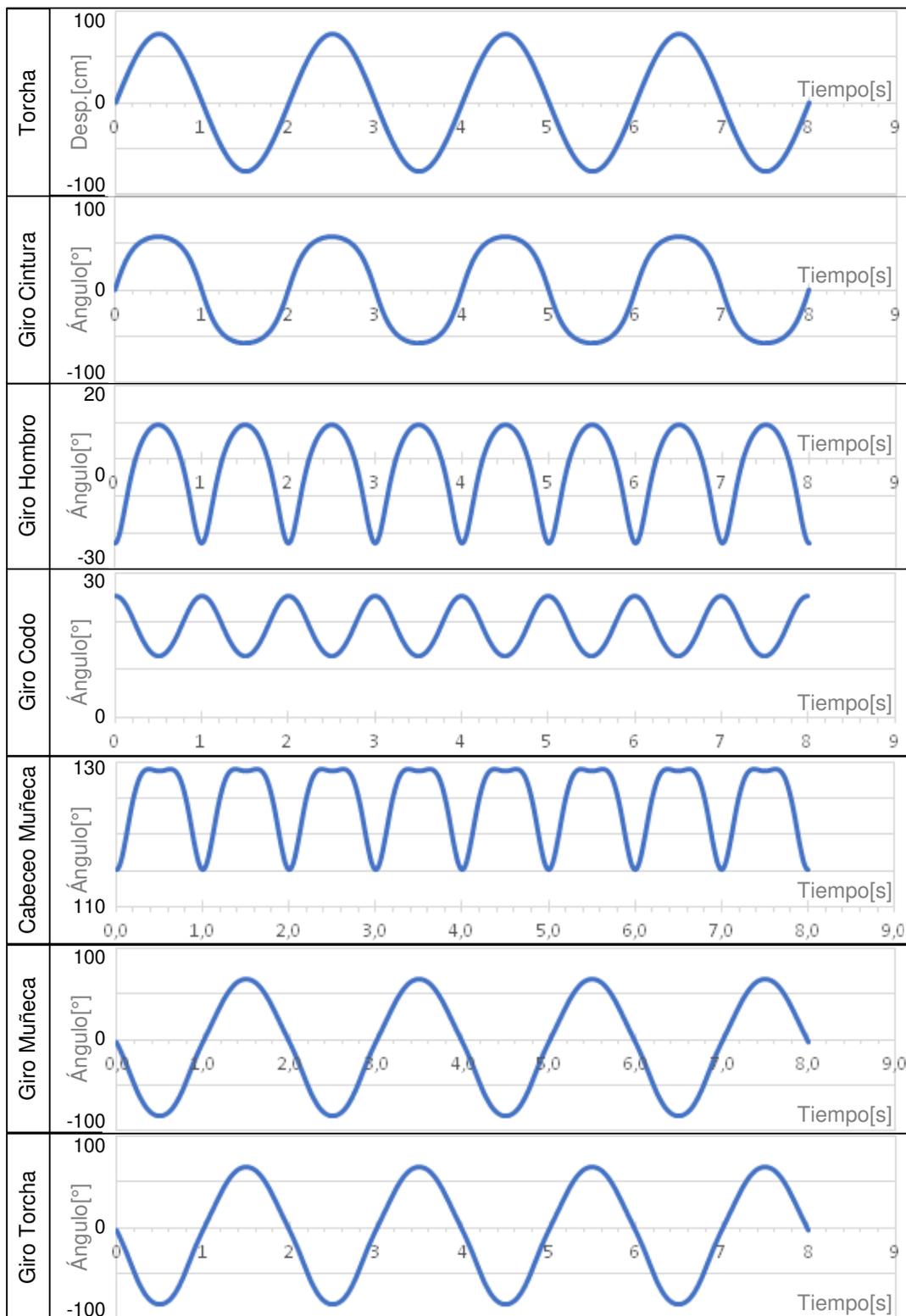


Figura 4: Gráficos de desplazamientos cíclico de la torcha y posiciones angulares de las articulaciones

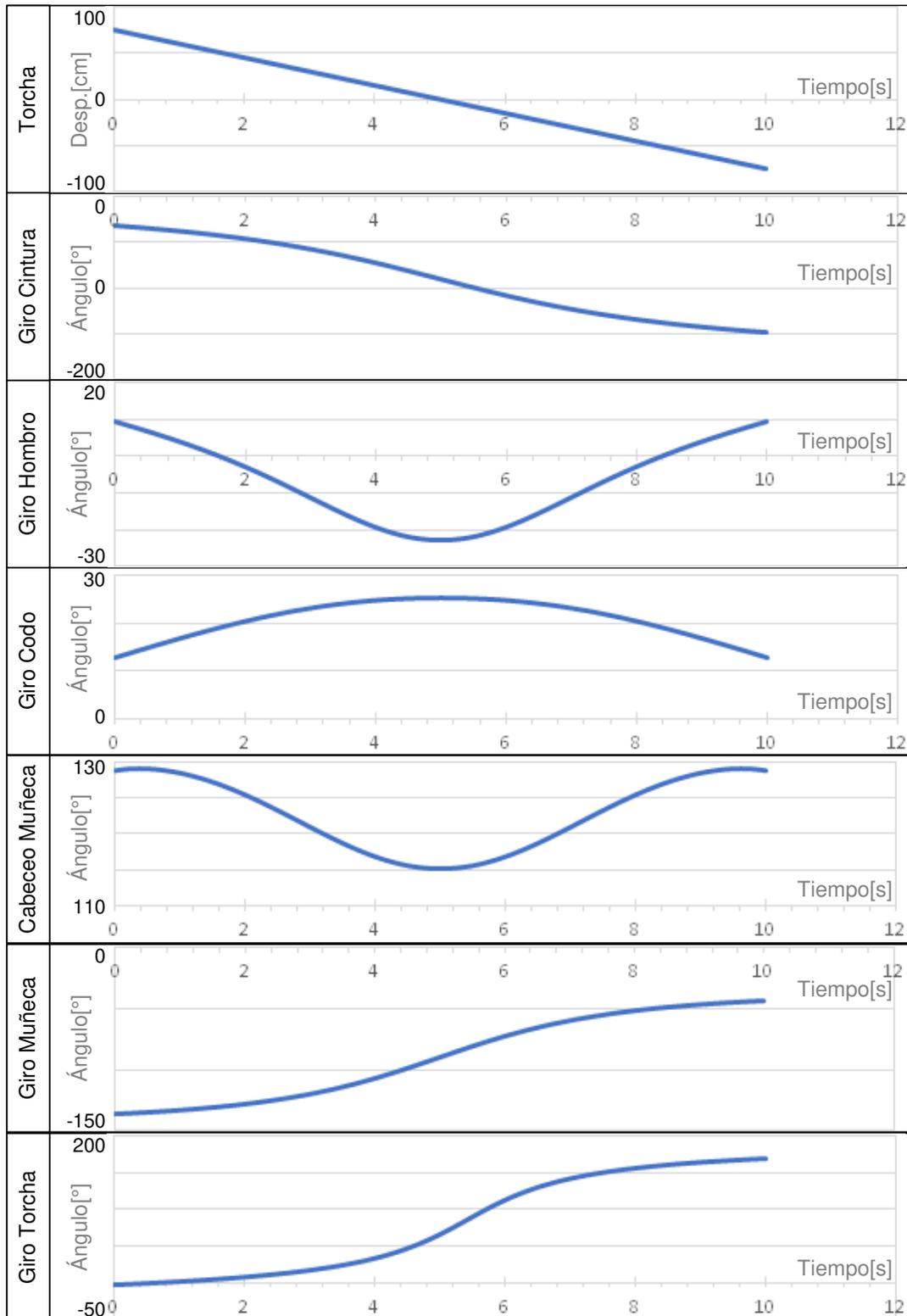


Figura 5: Gráficos de desplazamiento a velocidad constante de la torcha y posiciones angulares de las articulaciones

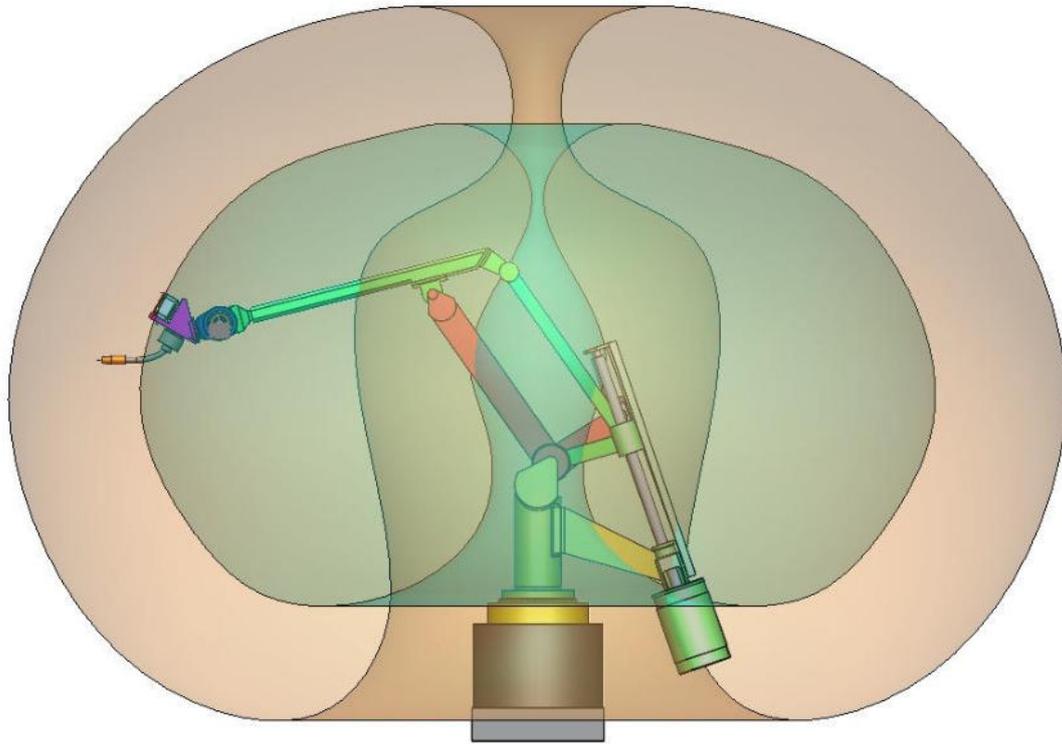


Figura 6: Volúmenes de trabajo

## 6. CONCLUSIONES:

En el presente trabajo se propuso la incorporación de 3 grados de libertad a un robot existente de tipo antropomórfico, con el objetivo de incrementar el rango de operaciones, permitiendo el posicionado y control de orientación de una torcha para trabajos de soldadura. El diseño mecánico planteado fue incorporado en un modelo 3D y simulado para verificar el cumplimiento del objetivo propuesto. El resultado de la simulación indica el correcto funcionamiento de las nuevas articulaciones permitiendo la versatilidad adecuada al robot existente para aplicación en soldadura siendo compatible con la geometría actual del robot

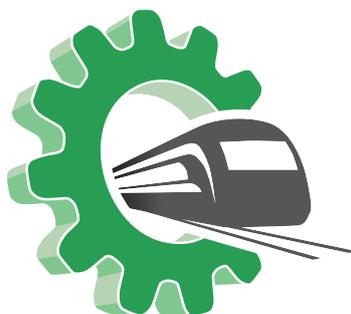


## REFERENCIAS

- [1] Pires N.; Loureiro A.; Böllmsjo G., *Welding Robots: Technology, System Issues and Applications* Libro ISBN-10: 1852339535 Springer-Verlag London Limited 2006
- [2] Spong M.; Vidyasagar M.; *Robot dynamics and control*. John Wiley & Sons, India, 2008
- [3] Uribe D.; Chavez E.; *Diseño de Robot Soldador de Bajo Costo* Tesis de grado Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Autónoma de Occidente, Cali Colombia 2019
- [4] Talli A. Sabnis C., Anjana N., Giriyaapur A. *Modelling and Simulation of Industrial Robot Using SolidWorks* libro Advances in Industrial Machines and Mechanisms (pp.173-182) Springer Singapore July 2021
- [5] AnciferovA, Gaponenko E., Kulakov L *Kinematic analysis of robotic complex within the SOLIDWORKS Motion system International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering"* (AIME 2018) Vol 57 (pp 26-31) Atlantis Press 2018
- [6] Martin G. *Diseño desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por un microcontrolador Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D* Tesis de Maestría Universidad Politécnica de Valencia España 2018

Área Temática

# Energía y Medio Ambiente





# EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA EMPLEANDO GASES DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA Y AGUA

## “UN ANÁLISIS EXPERIMENTAL”

### ENERGY EVALUATION OF A SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER EMPLOYING BIOMASS FLUE GAS AND WATER.

### "AN EXPERIMENTAL ANALYSIS"

*Stiven Sofan Germán<sup>1</sup>, Jorge Mendoza Fandiño<sup>2</sup>, Miguel Doria Oviedo<sup>3</sup>, Jesús Rhenals Julio<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Faculty of Science and Engineering, Electromechanical Engineering Program, University of Sinú-Elías Bechara Zainúm, Montería, Colombia, [stivensofan@unisinu.edu.co](mailto:stivensofan@unisinu.edu.co).

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Córdoba, Montería, Colombia, [Jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co](mailto:Jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co).

<sup>3</sup> Faculty of Science and Engineering, Electromechanical Engineering Program, University of Sinú-Elías Bechara Zainúm, Montería, Colombia, [migueldoria@unisinu.edu.co](mailto:migueldoria@unisinu.edu.co).

<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Córdoba, Montería, Colombia, [jesusrhenalsj@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jesusrhenalsj@correo.unicordoba.edu.co).

#### RESUMEN

Las investigaciones, las políticas gubernamentales y el desarrollo tecnológico están alentando el crecimiento del uso de energías renovables. Las investigaciones centradas en la biomasa como fuente de energía térmica buscan diseñar y optimizar parámetros para lograr un mejor rendimiento energético. En la investigación, se diseñó un intercambiador de calor de tubo y coraza para evaluar una forma de recuperar calor de los gases de combustión de biomasa para calentar agua. A partir de mezclas de combustibles sólidos densificados se realizaron algunas pruebas, cambiando los intercambiadores de calor de su posición según el montaje y se desarrolló un modelo matemático para evaluar el rendimiento del proceso de transferencia de calor desde la perspectiva de la exergía y disponibilidad para conocer la eficiencia real y el proceso de degradación de la energía en el sistema propuesto.

**Palabras claves:** Biomasa; Pellets; Intercambiadores de calor, Exergía, Modelación.

#### ABSTRACT

Research, government policies, and technological development are encouraging the growth of renewable energy use. The research focused on biomass as a source of thermal energy seeks to design and optimize parameters to achieve better energy performance. In this research, a shell and tube heat exchanger were designed to evaluate how to recover heat from biomass combustion gases to heat water. Some tests were conducted using blends of densified solid fuels, changing the position of heat exchangers according to the assembly, and a mathematical model was developed to evaluate the heat transfer process performance from the perspective of exergy and availability to determine real efficiency and the energy degradation process in the proposed system.

**Keywords:** biomass; pellets; heat exchangers; exergy, modeling.



## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente las energías renovables han jugado un papel importante en la búsqueda de fuentes alternativas para la obtención de energía. Se estima que para 2023 alcancen el 12.4 % de la demanda energética mundial (OCDE/IEA, 2018). El uso final de las energías renovables se puede destacar en tres sectores donde predomina la calefacción y refrigeración con 51 %, el transporte con un 32 % y la demanda de electricidad final con un 17% (Ren21, 2019a ). Por su parte la biomasa tradicional representó para 2017 el 7.5 % de energía consumida mientras que la bioenergía moderna alcanzó el 5.0 % de los cuales 2.2 % se utilizó como calor a nivel industrial, 1.4 % como calor en edificios y hogares, 1 % en el sector transporte y 0.4 % en generación eléctrica (Ren21, 2019b). Con el fin de hacer la biomasa más atractiva y eficiente, aumentar la densidad, estandarizar forma y medidas y reducir costo de almacenamiento se utilizan proceso de secado, reducción de forma y compresión dando origen a pellet y briquetas (Hernández et al., 2017). Estos biocombustibles son obtenidos en equipos diseñados para compactar y calentar la biomasa facilitando procesos termoquímicos que generan productos adherentes, favoreciendo la cohesión del material, comúnmente materia prima lignocelulósica.

La biomasa puede ser transformada tanto química como biológicamente, extrayendo energía almacenada de los enlaces químicos, posteriormente esa energía junto con el oxígeno provoca que el carbono de oxide generando CO<sub>2</sub> y vapor de agua (McKendry, 2002). La gasificación es uno de los procesos versátiles de conversión termoquímica de mayor antigüedad donde se realiza una combustión incompleta controlada y se produce una mezcla de gas de H<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub> (Ahumada et al., 2016). Por su parte la combustión directa busca oxidar completamente el carbono contenido en la biomasa para generar gases calientes para aplicaciones de calor o alimentar calderas para producción de vapor (Paterson y Hassee, 2009). Muchas investigaciones sobre combustión directa se han centrado en aumentar la eficiencia mediante el diseño de quemadores mientras que muy poco se han interesado en el aprovechamiento de los gases evacuados en el proceso de combustión según Delgado-García et al. (2016), así que diseñaron un calentador de baja temperatura y presión para quemar biomasa aprovechando el calor producido en la cámara de combustión y en el circuito de extracción de humo usando agua como fluido acumulador de energía.

Los intercambiadores de calor han jugado un papel importante como unidades de recuperación de calor. Se pueden encontrar desde equipos convencionales hasta diseños especiales con propósitos específicos según la aplicación (Stehlík, 2009). Se pueden encontrar publicaciones como la de Kilkovsky et al. (2014) que discuten sobre tipos de intercambiador de calor aplicables a procesos de recuperación de calor en combustión de biomasa, un sistema de simulación para parámetros de diseño térmico e hidráulico y problemas operacionales. Stehlik (2007) trabajó en el diseño un equipo compacto compuesto entre un intercambiador de calor y una cámara de



combustión para el procesamiento térmico de los gases resultados de la combustión de biomasa, resaltó los beneficios de usar la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como herramienta para el diseño y optimización de la operabilidad de los intercambiadores de calor. Con el fin de aprovechar la energía térmica para gases de combustión de residuos agrícolas en este trabajo se diseñó un prototipo de pruebas con intercambiadores de calor de tubo y coraza para evaluar la transferencia de calor en proceso de calentamiento de agua. Se evaluaron las efectividades alcanzadas variando composición elemental del combustible biomásico y el tamaño de los intercambiadores de calor y se observaron los perfiles de temperaturas de gases y temperatura final del agua.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Analizar la transferencia de calor entre gases de combustión de pellets de mezclas de biomasa y agua utilizando un banco de intercambiadores de calor de tubo y coraza, con configuración variable.

### 2.2. Objetivos específicos

- Construir un banco de intercambiadores de calor que permita evaluar la transferencia de calor entre gases de combustión y agua en contracorriente a través de cambios de configuración.
- Elaborar pellets de mezclas de biomasa a partir de una batería de ensayo obtenida de un diseño de mezclas.
- Modelar la transferencia de calor de las configuraciones del banco de intercambiadores para la evaluación energética y exérgica de su comportamiento.

## 3. Metodología

### 3.1. PROTOTIPO DE PRUEBAS

En el prototipo se acopló un quemador de pellet Sun P7 Ferroli, una cámara de postcombustión de fabricación propia de acero inoxidable con un recubrimiento en asbesto para minimizar las pérdidas por pared e intercambiadores de calor de tubo y coraza de acero inoxidable 316L. El intercambio de calor se basó en un modelo de transferencia de calor en contracorriente atendiendo a las recomendaciones del fabricante. Los gases que salen del quemador son recolectados por un cono en la zona de mayor de temperatura (según pruebas piloto) y pasan por el intercambiador 2 mientras el resto de los gases se conducen al intercambiador 1. El recorrido del fluido calentado inicia en depósito de almacenamiento donde se alimenta el intercambiador 1, la salida de este alimenta al segundo intercambiador y se controla flujo con una válvula.

La figura 1 muestra la configuración del prototipo, la circulación de los fluidos por el sistema y los tipos de intercambiadores que utilizaron según su referencia. Tanto en las entradas como salidas de fluidos se incorporaron termocuplas tipo k para registrar los perfiles de temperatura y la cantidad de flujo de másico. En el esquema de la figura 1 los números indican los puntos de toma de lectura de temperaturas. Las flechas negras señalan el flujo de gases de combustión mientras que las flechas blancas indican el flujo de agua. Se puede identificar los 6 tipos de montajes. Los gases circulan por el lado de los tubos y el agua circula por el lado de la coraza para facilitar labores de limpieza y mantenimiento.

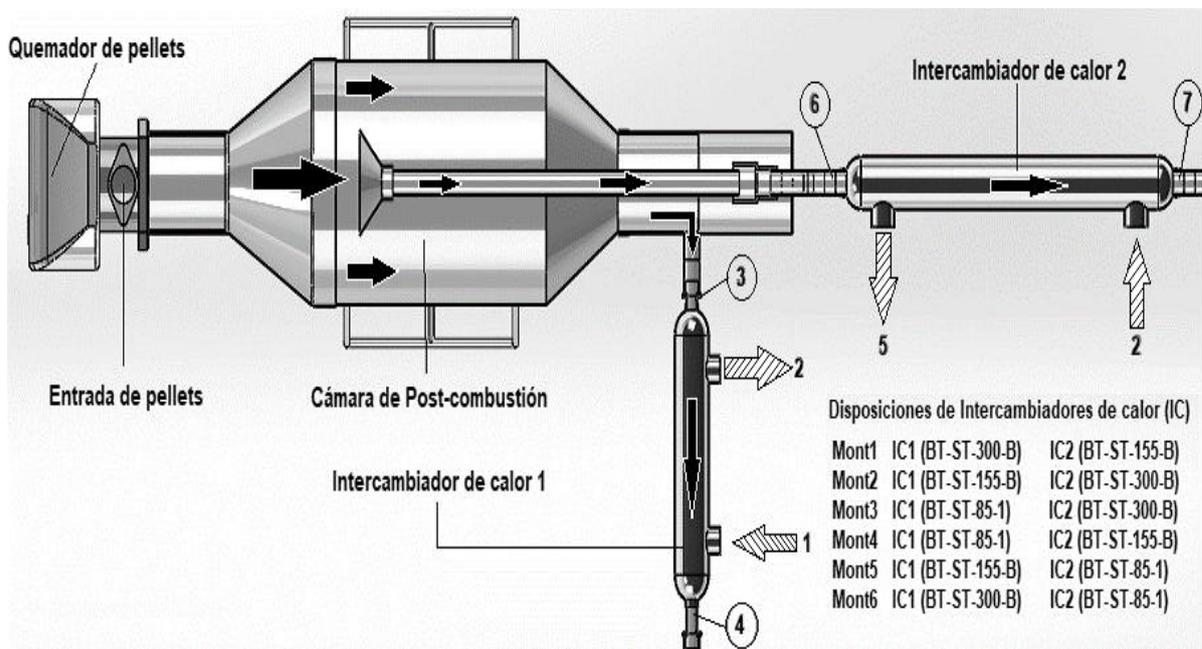


Figura 1. Prototipo de pruebas y 6 configuraciones posibles.

### 3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se consideraron cinco residuos biomásico de alta producción en el departamento de Córdoba Colombia como combustible de evaluación. A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Montería de investigaciones desarrolladas se escogió un batería de 37 mezclas diseñada para alta durabilidad, baja emisiones de material contaminante y altas eficiencias de combustión. Con las 37 mezclas mostradas (ver tabla 1) se realizó una regresión de porcentaje de biomasa vs temperatura de gases y se optimizó con un pronosticando 440 °C en la temperatura de gases.

Se peletizaron a través de la Peletizadora ZLSP S-230B obteniendo diámetros entre 5 mm y 10 mm y longitudes inferiores 60 mm. Se realizaron 30 pruebas experimentales evaluando 5 mezclas y 6 montajes del prototipo (combinaciones de intercambiadores de calor) con diferentes dimensiones como se muestra en la figura 1. El suministro de combustible se dio a una razón de



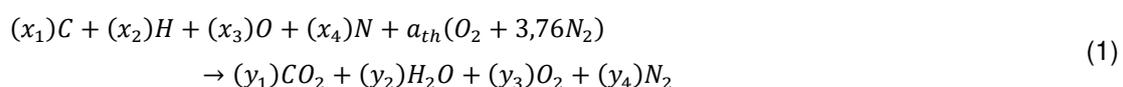
180 g/4 min debido a que en pruebas previas se observó estabilidad en la llama. Se registraron las temperaturas de entradas y salidas de los fluidos durante 30 min.

**Tabla 1.** Porcentajes en peso de residuos biomásicos por mezclas. Adaptado de Mendoza (2016).

Mix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Arroz (Ar)	3,06	10,56	0	15	8,06	0	3,06	6,11	10	15	3,06	8,06	3,06
Ajonjolí (Aj)	23,89	23,89	40	40	23,89	40	23,89	27,78	20	20	23,89	23,89	33,89
Algodón (Al)	47,78	45,28	60	0	47,78	0	12,78	25,56	0	0	17,78	12,78	12,78
Coco (Cc)	12,78	12,78	0	0	12,78	60	47,78	25,56	70	0	47,78	47,78	42,78
Tusa (Tu)	12,50	7,5	0	45	7,5	0	12,5	15	0	65	7,5	7,5	7,5
Mix	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Ar	15	15	3,06	0	3,06	10,56	10,56	0	3,06	10,56	15	3,06	0
Aj	40	40	23,89	40	28,89	33,89	33,89	20	33,89	33,89	20	33,89	20
Al	0	45	12,78	0	12,78	35,28	12,78	0	12,78	12,78	0	42,78	70
Cc	45	0	12,78	0	47,78	12,78	12,78	70	12,78	35,28	65	12,78	0
Tu	0	0	47,5	60	7,5	7,5	30	10	37,5	7,5	0	7,5	10
Mix	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37		
Ar	0	10	10,56	15	3,06	0	3,06	0	0	10,56	0		
Aj	20	20	23,89	20	28,89	30	23,89	20	30	23,89	20		
Al	70	70	12,78	65	47,78	70	47,78	0	0	12,78	10		
Cc	10	0	12,78	0	12,78	0	17,78	0	70	45,28	70		
Tu	0	0	40	0	7,5	0	7,5	80	0	7,5	0		

### 3.3 MODELO MATEMÁTICO

Modelación del prototipo para las 30 pruebas inicia con la estequiometría de la reacción de combustión completa con exceso de aire, como se muestra en la ecuación 1. A partir de las fracciones de los gases productos se calculan propiedades como la densidad y calor específico asumiendo una mezcla de gases ideales





Se establece el balance de energía por primera ley para los fluidos con los gases cediendo calor y el agua absorbiendo calor se muestra en la ecuación 2.

$$(\dot{m}C_p T_{in})_{gases} + (\dot{m}C_p T_{in})_{agua} = (\dot{m}C_p T_{out})_{gases} + (\dot{m}C_p T_{out})_{agua} + Q_{perdidas} \quad (2)$$

La ecuación 3 define la efectividad al establecer la relación entre el calor real transferido y el calor de transferencia máximo posible.  $Q_{max}$  se alcanza cuando el fluido con la capacidad calorífica más baja llega a una temperatura igual a la entrada de la otra corriente (Hesselgreaves et al 2017).

$$\varepsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{max}} = \frac{c_{agua} * (T_{salida-agua} - T_{entrada-agua})}{c_{min} * (T_{entrada-gases} - T_{entrada-agua})} \quad (3)$$

Las ecuaciones 4 y 5 definen el Método de la efectividad  $NTU - \varepsilon$  para el arreglo en contracorriente el cual simplificó el análisis de los intercambiadores de calor. Este método se basa en un parámetro adimensional llamado efectividad de la transferencia de calor y por esto se deduce las unidades de transferencia de calor y el coeficiente global de transferencia de calor.

$$NTU = \frac{UA_s}{c_{min}} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c)]}{1 - c * \exp[-NTU(1 - c)]} \quad (5)$$

#### 4. Resultados

Al evaluar regresiones no lineales para la tabla 1 en el software Minitab 17 arrojó una ecuación cúbica especial como la de mejor ajuste analizando los parámetros estadísticos. R2 de 82,46 %, un R2 ajustado de 47,39 %, S = 55,43 % y 7 observaciones inusuales. Se realizaron corridas eliminando mezclas inusuales y se observó que el R2 ajustado variaba lo que implica que no es posible eliminar mezclas para la regresión. Los coeficientes de regresión se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Coeficientes de regresión cubica especial, software Minitab 17

Variables	Coeficiente	Variables	Coeficiente
Aj (%)	-0,1046720	Al (%)*Cc (%)	0,0295903
Al (%)	1,3562400	Tu (%)*Cc (%)	0,3598000
Tu (%)	6,5201900	Ar (%)*Aj (%)*Al (%)	0,0644664
Cc (%)	3,6262900	Ar (%)*Aj (%)*Tu (%)	0,0774992
Ar (%)*Aj (%)	-1,8447700	Ar (%)*Aj (%)*Cc (%)	0,0852108
Ar (%)*Al (%)	0,1951470	Ar (%)*Al (%)*Tu (%)	0,0241376
Ar (%)*Tu (%)	-0,1114340	Ar (%)*Al (%)*Cc (%)	-0,0217620
Ar (%)*Cc (%)	-0,3126480	Ar (%)*Tu (%)*Cc (%)	-0,0136502
Aj (%)*Al (%)	0,0701282	Aj (%)*Al (%)*Tu (%)	0,0052857



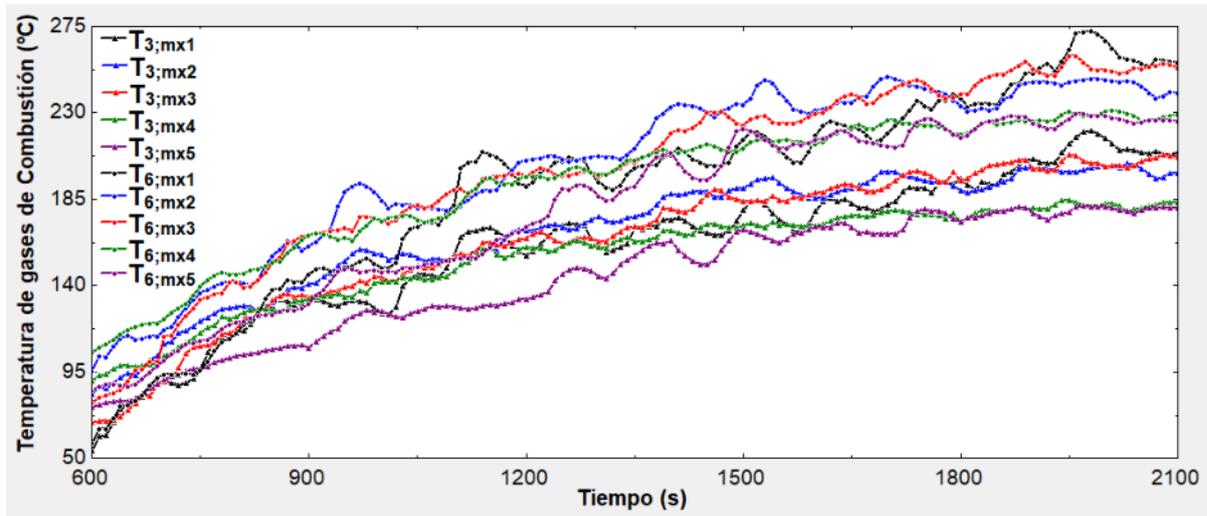
Aj (%)*Tu (%)	-0,0512506	Aj (%)*Al (%)*Cc (%)	-5,911E-04
Aj (%)*Cc (%)	0,0247513	Aj (%)*Tu (%)*Cc (%)	-0,0159175
Al (%)*Tu (%)	-0,1817030	Al (%)*Tu (%)*Cc (%)	0,0046321

Se optimizó en el software para una respuesta objeto de 440 °C, estableciendo límite inferior de 300 °C y superior de 500 °C. La tabla 3 muestra las mezclas obtenidas. La composición elemental se deduce de las fracciones de mezclas y el análisis de muestras evaluados en el laboratorio de ciencias de la energía de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

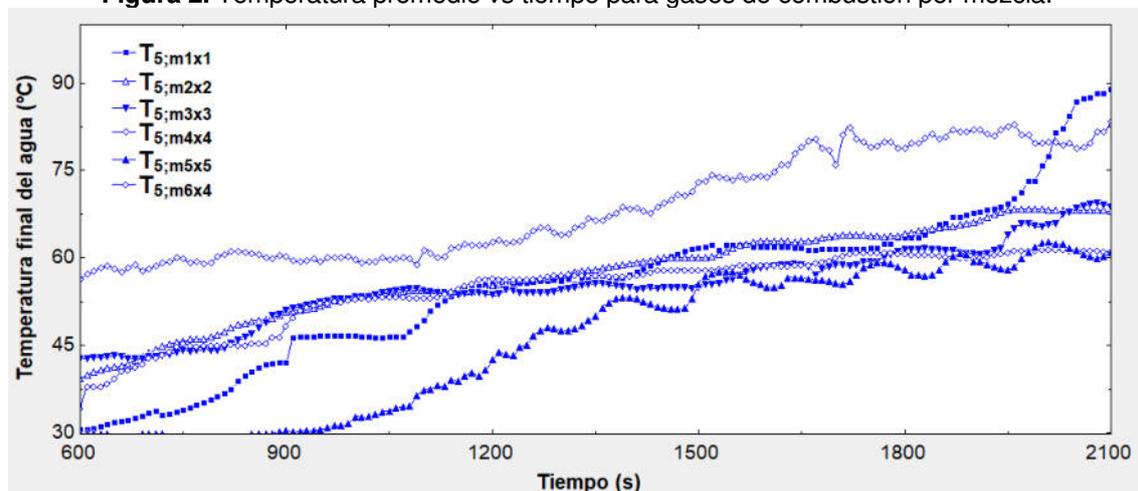
**Tabla 3.** Porcentaje en peso de biomasa por mezclas y su respectiva composición elemental.

	Ar (%)	Aj (%)	Al (%)	Cc (%)	Tu (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Mx1	6,11	27,77	25,56	17,22	23,33	0,37910	0,044550	0,5676	0,008781
Mx2	6,50	20,00	28,50	17,08	27,92	0,38380	0,045380	0,5621	0,008663
Mx3	7,00	29,00	0,00	60,07	3,92	0,37690	0,04209	0,5733	0,007696
Mx4	4,70	29,31	1,46	64,52	0,00	0,37650	0,04172	0,5739	0,007843
Mx5	3,83	30,02	47,46	0,00	18,69	0,3778	0,04491	0,5673	0,01003

El comportamiento de las temperaturas se registró desde la fase de ignición de los pellets hasta el enfriamiento. Se tomaron como datos relevantes entre el minuto 10 (600 s) y el minuto 35 (2100 s). Intervalo en que aumentó significativamente la temperatura del agua evidenciando transferencia de calor. Aunque se obtuvieron pico de temperaturas para los gases de hasta 350 °C no se mantenían durante un tiempo considerable. Las temperaturas de entradas en IC1 presentaron valores superiores a los de IC2. En la figura 2 se muestran las temperaturas promedio para las mezclas en las entradas IC1 e IC2. Se obtuvieron para los gases de la combustión de las mezclas densidades entre 0,7606 y 1,0326 kg/m<sup>3</sup>. El caso del calor específico de los gases tuvo una variación mínima tomando un valor aproximado de 1,0947 kJ/Kg °C. Para las temperaturas de salida del agua del sistema hasta los 35 min, los montajes 5 y 3 no alcanzan 70 °C mientras que los montajes 2 y 4 sobrepasan este valor para cualquier mezcla utilizada. En la prueba Montaje 2 -Mezcla 1 se logró generación de vapor. La figura 3 muestra los perfiles de temperatura final del agua.



**Figura 2.** Temperatura promedio vs tiempo para gases de combustión por mezcla.



**Figura 3.** Temperatura final del agua vs tiempo a la salida prototipo por prueba.

El 53,33 % y 36,67 % de las pruebas realizadas no superaron efectividades del 35 % en la posición 1 y 2 respectivamente. Los montajes 5 y 6 presentaron bajas efectividades durante toda la prueba inferiores al 40 %. El montaje 2 presentó efectividades bajas a excepción de la prueba hecha con la mezcla 1 donde alcanzaron valores de hasta 60 % pero para los 5 minutos finales de la evaluación. El montaje 3 presentó bajas efectividades a excepción de la prueba con la mezcla 3 donde se obtuvieron valores entre 50 y 70 %.

Para el montaje 1, solo la mezcla 5 presentó las efectividades más baja en el IC1 mientras que en el IC2 solo las mezclas 1 y 2 presentaron efectividades altas. El montaje 4 el 50 % de las pruebas superaron 50 % de efectividad para IC1 e IC2. Las figuras 4 y 5 muestran el comportamiento de las efectividades para algunas de las pruebas realizadas de los intercambiadores en la posición 1 y 2 respectivamente.

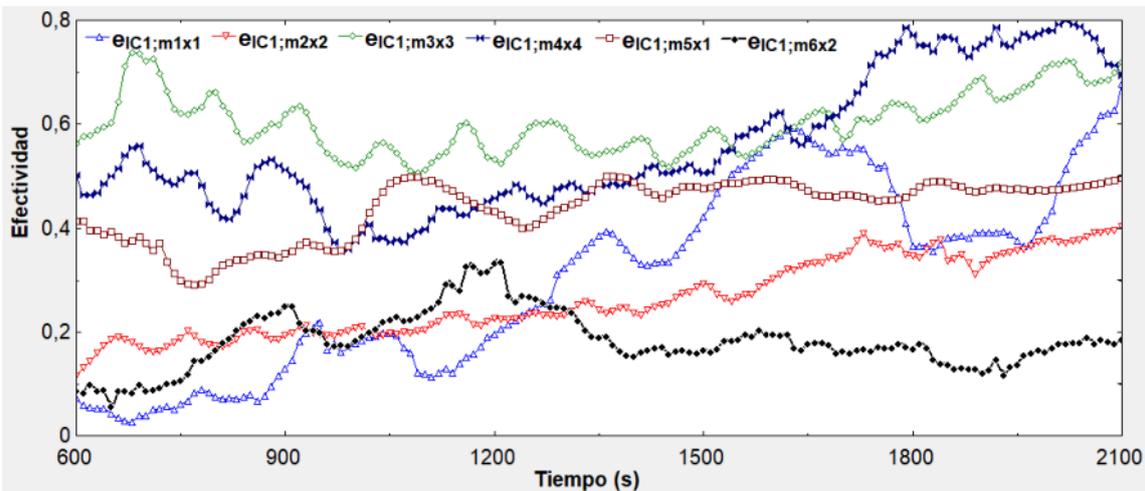


Figura 4. Graficas de efectividad vs tiempo para mezclas representativas. IC1.

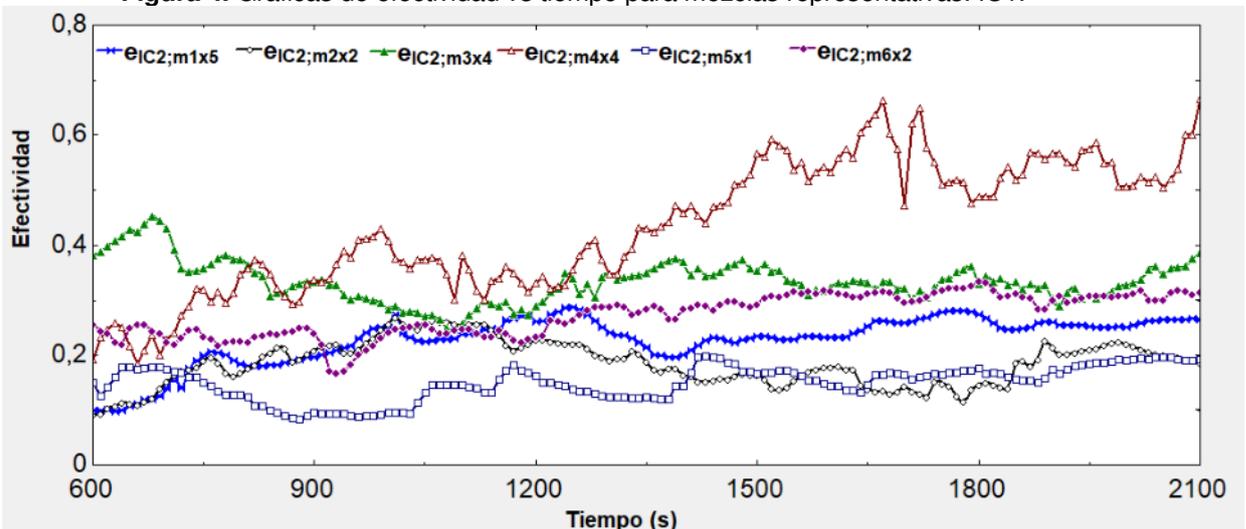


Figura 5. Graficas de efectividad vs tiempo para mezclas representativas IC2.

Para parámetros de transferencia de calor ligados a las pruebas se obtuvo una relación de capacidad calórica promedio para las mezclas entre 0,3385 y 0,3799. La tasa de transferencia de calor máxima alcanzada en las pruebas fue de 0,9883 kW lograda en el montaje 2 mezcla 1 donde se logró el cambio de fase.

## 5. CONCLUSIONES

Bajos las condiciones experimentales llevadas a cabo los montajes 5 y 6 no se recomiendan utilizarlos, aunque la temperatura final del agua alcanzó cerca de 70 °C. Representaron sistemas ineficientes con cerca del 60 % de energía térmica desaprovechada. El montaje 4 fue quien presentó resultados más convenientes, alcanzando hasta 84 °C en la temperatura final del agua en un intervalo de tiempo más corto, alrededor de 30 min. El rendimiento alcanzado en la mitad de las pruebas superó el 50% lo que indica que con un control de variable adecuado los



resultados podrían mejorar. En cuanto a la evaluación del combustible no se encontraron criterios suficientes para definir cuál fue la mezcla que presentó mayor desempeño. Sin embargo, con la mezcla 1 se alcanzó mayores temperaturas del agua al final del proceso incluso llegando al cambio de fase.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba como fuente académica para la realización de este proyecto de investigación. Así mismo agradecemos a los estudiantes Miguel Martín y Oscar Reza por la ayuda para poder culminar con el presente estudio.

Así mismo, los autores agradecen a la Universidad del Sinú, por el apoyo brindado académica y económicamente para culminar con el estudio.

## REFERENCIAS

Ahumada, L.M., Verdeza, A., Bula, A.J., Lombana, J., Optimización de las Condiciones de Operación de la Micro-gasificación de Biomasa para Producción de Gas de Síntesis, *Información Tecnológica*, 27(3), 179-188 (2016)

Delgado-García, R., Velasco-Roldán, L., Onofa-Cuichán, E., Armas-Figueroa, E., Desarrollo, Construcción y Pruebas de una Cocina-Calentador de Bajo Costo y Alta Eficiencia Energética para Biomásas de Reducido Poder Calorífico, *DYNA* 83(199), 183-190 (2016)

Hernandez, L.C., Forero, C.A., Sierra, F.E., Biomass Densification: a Review of the Current State-of-the-Art of the Pellet Market and Analysis of New Research Trends, *TECCIENCIA*, 12(23), 81-92 (2017)

Hesselgreaves, J.E., Richard Law, David A. Reay, *Compact Heat Exchangers (Second Edition)*, Butterworth-Heinemann, pp 275-360 (2017)

Kilkovsky, B., Stehlik, P., Jegla, Z., Tovazhnyansky, L.L., Arsenyeva, O., Kapustenko, P.O., Heat Exchangers for Energy Recovery in Waste and Biomass to Energy Technologies – I. Energy Recovery from Flue Gas, *Applied Thermal Engineering* 64 (1-2), 213-223 (2014).

McKendry, P., *Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of Biomass*. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46 (2002)

Mendoza, J.M. Convenio especial de cooperación n° 753. Proyecto de desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe. Informe Técnico. (2016)

OCDE/IEA (2018), *Renewables 2018 Analysis and forecasts to 2023*, Executive summary. Disponible en: <https://www.iea.org/renewables2018/>, Accedido: 13/07/2019

Peterson, D., Haase, S. *Market Assessment of Biomass Gasification and Combustion Technology for Small- and Medium-Scale Applications*. National Laboratory of the U.S. Department of Energy United States, Technical Report (2009). Disponible: <https://www.osti.gov/servlets/purl/963559>. Accedido: 20/07/2019

Ren21 (2019)a, *Renewables 2019 Global status report*, a comprehensive annual overview of the state of renewable energy. Capítulo 1 (Global overview). Disponible en: [https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/#fig\\_4](https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_01/chapter_01/#fig_4), Accedido: 15/07/2019



Ren21 (2019)b, Renewables 2019 Global status report, a comprehensive annual overview of the state of renewable energy. Capítulo 3 (Market and industry trends). Disponible en: [https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter\\_03/chapter\\_03/#ref\\_ii\\_01](https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_03/chapter_03/#ref_ii_01), accedido: 03/05/2019

Stehlík, P., Waste-to-Energy Systems as Examples of Efficient Process Systems Engineering Editor(s): de Brito, R.M., Oller, C.A., Approach, Computer Aided Chemical Engineering, 27, 143-148 (2009)

Stehlík, P., Thermal Design, Heat Transfer as an Important Subject in Waste-to-Energy Systems, Applied Thermal Engineering, 27 (10), 1658-1670 (2007)



## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL DESEMPEÑO ENERGÉTICO, OPERACIONAL Y ECONÓMICO DE TEGNOLOGÍAS COMERCIALES DE ABSORCIÓN Y DE COMPRESIÓN MECÁNICA PARA DISTRITOS DE ENFRIAMIENTO

Jorge Mendoza<sup>1</sup> Miguel Doria<sup>2</sup>, Stiven Sofan<sup>3</sup>, Jesús Rhenals<sup>4</sup>, Álvaro Osorio<sup>5</sup>, Duván González<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería Carrera 6 No. 77- 305 Montería, Colombia – [jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co)

<sup>2</sup> Programa de ingeniería electromecánica – Facultad de ciencias básicas e ingenierías, Universidad del Sinú-No. 38-153 4536534, Cra. 1W, Montería, Córdoba [migueldoria@unisinu.edu.co](mailto:migueldoria@unisinu.edu.co)

<sup>3</sup> Programa de ingeniería electromecánica – Facultad de ciencias básicas e ingenierías, Universidad del Sinú-No. 38-153 4536534, Cra. 1W, Montería, Córdoba [stivensofan@unisinu.edu.co](mailto:stivensofan@unisinu.edu.co)

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería Carrera 6 No. 77- 305 Montería, Colombia - [jesusrhenalsj@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jesusrhenalsj@correo.unicordoba.edu.co)

<sup>5</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería Carrera 6 No. 77- 305 Montería, Colombia - [aosoriomartinez@correo.unicordoba.edu.co](mailto:aosoriomartinez@correo.unicordoba.edu.co)

<sup>6</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería Carrera 6 No. 77- 305 Montería, Colombia - [dgonzalezgarces99@correo.unicordoba.edu.co](mailto:dgonzalezgarces99@correo.unicordoba.edu.co)

### RESUMEN

Este trabajo presenta el análisis comparativo entre el desempeño operacional y económico de Chillers Scroll, Tornillo, Centrifugo y Centrifugo de Levitación Magnética y de los Chillers más eficientes de absorción: doble efecto, en un distrito de térmico de factibilidad técnica y económica con beneficios ambientales. Se realizó una base de datos en la que se registraron diferentes capacidades comerciales similares por rangos entre los modelos de cada tecnología, el consumo, la eficiencia, el Gasto Operacional (OPEX) y el Gastos de Capital (CAPEX). Se llevó a cabo un análisis de desempeño operacional en el que se pudo concluir que las tecnologías de compresión son más eficientes al compararlas con las tecnologías por absorción. El ratio de Eficiencia Energética (EER) promedio de las tecnologías por Compresión es de 13,39745 y el EER promedio en Doble efecto es de 4,11, lo cual quiere decir que las eléctricas son 3,3 veces mayores en valor de eficiencia frente a las de Doble efecto. Desde lo económico, comparando el precio que tiene cada tonelada de refrigeración en las operaciones, se puede argüir que la tecnología más viable en términos económicos es la de Absorción con un precio promedio en pesos colombianos (\$COP) de \$4.886,26 COP/TR contra eléctricas de precio promedio de \$6,946,86 COP/TR. Finalmente, a partir de la relación costo-costo se determinó que el costo del gas para que los sistemas sean comparables, debe ser de 1,329 veces \$207,51241 COP/kWh, ya que se sobre entiende que las capacidades son similares y no hace falta compararlas para que la se cumpla la igualdad de la relación \$COP/TR

**Palabras clave:** Chiller, Scroll, Centrifugo de Levitación Magnética, OPEX y CAPEX.



## 1. INTRODUCCIÓN

Los distritos térmicos son una opción tecnológica para el desarrollo de entornos y servicios sostenibles para la climatización urbana, por tal motivo representan una oportunidad de evolución para diferentes ciudades del país en cuanto a criterios de sostenibilidad, eficiencia energética y bajo impacto ambiental [1]. Los distritos térmicos están compuestos por tres sistemas, central térmica, red de distribución y las estaciones de transferencia. El análisis de esta investigación está enfocado en realizar una evaluación del desempeño energético, operacional y económico, en la central térmica de estos distritos, comparando los resultados de los aspectos anteriormente mencionados al utilizar Chillers por absorción con los posibles resultados al utilizar Chillers por comprensión mecánica.

Las tecnologías por comprensión mecánica tienen un coeficiente de rendimiento mucho mayor respecto a las tecnologías por absorción, sin embargo, las tecnologías por absorción son una alternativa recomendable ya que, en lugar de presentar un gasto eléctrico, la energía de consumo puede provenir del calor residual de otros procesos, tomando en cuenta que los procesos de refrigeración en una empresa ocupan entre el 70% y 80% del gasto eléctrico [2].

Los Chillers por absorción y comprensión mecánica cuentan con los componentes de un sistema de refrigeración tradicional con la diferencia que los ciclos por absorción no cuentan con un compresor y en cambio presentan un mecanismo de absorción compuesto por un absorbedor y un generador.

Con el análisis económico se busca hallar los costos de calor que hacen comparables las tecnologías, por tal motivo al tener equipos de comprensión mecánica muy eficientes, la comparación se realizó seleccionando Chillers de absorción doble efecto accionados por gas natural, tomando como punto de partida que presentan coeficientes de desempeño altos con respecto a los equipos de absorción de una sola etapa.

El consumo de los Chillers de comprensión mecánica es completamente eléctrico, sin embargo, se deben considerar procesos de cogeneración para producir energía eléctrica, según estudios realizados producir este tipo de energía a través de gas resulta hasta 4 veces más económico que tomarla de la red local. [2].

La utilización de equipos por absorción no es una completa locura, en un estudio realizado a un edificio comercial de la ciudad de New York se instaló un Chiller por absorción que opera durante un periodo de tiempo de 12 horas, se encontraron ahorros en costos operacionales de 73 mil dólares anuales. En un segundo estudio se alternó el funcionamiento del Chiller por absorción con un Chiller centrífugo eléctrico, se encontraron ahorros anuales de 100 mil dólares en costos de operación anuales [3].



Por otro lado, es común que la energía consumida en el generador puede ser generada de distintas fuentes, actualmente de habla mucho de las energías renovables no convencionales que son una gran opción para producir la energía necesaria en el generador de equipos de refrigeración, con el fin de mantenerla capacidad de enfriamiento. Huashan Li et al. (2021), realizó el análisis de un Chiller de absorción accionado por energía recolectada en un colector solar en un clima cálido-húmedo, el estudio fue realizado variando el tipo de colector y se encontró que existe una temperatura optima que hace que el coeficiente de rendimiento (COP) en el sistema de refrigeración por absorción sea máximo, de igual manera se determinó que el colector solar parabólico compuesto tiene un mejor rendimiento termodinámico, mientras que el colector de tubo de vacío representa la alternativa con el menor costo de inversión.[4].

## 2. MATERIALES Y METODOS

Base de datos de enfriadoras de agua de compresión mecánica, donde se estiman las Toneladas de refrigeración (TONS), la potencia en kW, el ratio de Eficiencia Energética (EER) el Gasto Operacional (OPEX) y el Gastos de Capital (CAPEX).

**Tabla 1.** Chiller de Compresión Mecánica tipo Scroll modelo YLAA.

	TONS	kW	EER	OPEX	CAPEX
0155SE	70,0	41,0	17,6	261.783,4	108.500,0
0070SE	71,0	75,5	10,4	482.064,5	110.050,0
0120SE	71,0	43,1	16,0	275.191,8	110.050,0
0089SE	72,6	69,7	11,4	445.031,7	112.530,0
0080SE	77,8	86,3	10,0	551.022,1	120.590,0
0089SE	81,8	93,0	9,8	593.801,3	126.790,0
0100SE	86,5	88,5	10,7	565.069,0	134.075,0
0100SE	95,6	111,5	9,6	711.923,0	148.180,0
0136SE	95,7	73,7	13,4	470.571,6	148.335,0
0120SE	96,6	84,1	12,3	536.975,1	149.730,0
0155SE	101,5	71,3	14,4	455.247,7	157.325,0
0170SE	101,5	64,3	15	410.552,9	157.325,0
0136SE	108,0	91,9	12,3	586.777,8	167.400,0
0120SE	118,1	134,6	9,8	859.415,6	183.055,0
0136SE	126,1	142,6	9,7	910.495,3	195.455,0
0155SE	127,2	112,3	12,1	717.031,0	197.160,0
0170SE	127,9	98,8	13,3	630.834,0	198.245,0
0155SE	143,0	165,0	9,8	1.053.518,4	221.650,0
0170SE	148,5	142,3	11,2	908.579,8	230.175,0
0170SE	167,4	192,1	9,6	1.226.550,8	259.470,0



**Tabla 2.** Chiller de Compresión Mecánica tipo Tornillo modelo RTAC.

	TONS	kW	EER	OPEX	CAPEX
140 ESTÁND.	150,9	152,7	11,0	974.702,5	241.376,0
155 ESTÁND.	165,5	166,1	11,1	1.060.490,8	264.857,6
170 ESTÁND.	180,8	179,8	11,2	1.148.194,6	289.344,0
185 ESTÁND.	197,0	200,2	10,9	1.278.039,1	315.251,2
200 ESTÁND.	214,4	221,4	10,8	1.413.630,1	343.033,6
225 ESTÁND.	235,0	242,8	10,8	1.550.293,8	375.980,8
250 ESTÁND.	257,7	265,7	10,8	1.696.356,2	412.313,6
275 ESTÁND.	291,5	292,6	11,1	1.868.290,4	466.393,6
300 ESTÁND.	325,3	335,5	10,8	2.142.026,4	520.403,2
350 ESTÁND.	368,9	381,4	10,8	2.435.428,1	590.278,4

**Tabla 3.** Chiller de Compresión Mecánica tipo Centrifugo modelo CVHF.

TONS	kW	EER	OPEX	CAPEX
360	175,4	24,6	1.119.870,9	684.000,0
400	194,9	24,6	1.244.301,0	760.000,0
450	219,3	24,6	1.399.838,6	855.000,0
500	243,6	24,6	1.555.376,3	950.000,0
560	272,8	24,6	1.742.021,4	1.064.000,0
630	306,9	24,6	1.959.774,1	1.197.000,0
700	341,0	24,6	2.177.526,8	1.330.000,0
800	389,8	24,6	2.488.602,0	1.520.000,0
900	438,5	24,6	2.799.677,3	1.710.000,0
1000	487,2	24,6	3.110.752,5	1.900.000,0
1100	535,9	24,6	3.421.827,8	2.090.000,0
1200	584,6	24,6	3.732.903,0	2.280.000,0

**Tabla 4.** Chiller de Compresión Mecánica tipo Centrifugo-Magnético modelo YMC2.

	TONS	kW	EER	OPEX	CAPEX
S900AA	255,9	480,6	6,4	3.068.509,9	639.777,5
S1000AA	284,3	529,8	6,4	3.382.977,9	710.862,5
S1100AA	312,8	584,6	6,4	3.732.869,6	781.949,0
S1200AA	341,2	646,9	6,3	4.130.121,4	853.035,5
S1300AA	369,6	746,8	5,9	4.768.065,0	924.121,8

**Tabla 5.** Chiller de Absorción Doble Efecto accionado por gas de 70 a 180 TR.

	TONS	kW	EER	OPEX	CAPEX
DWHH70	70,0	186,3	4,5	309.220,2	59.406,5
DWHH80	80,0	212,9	4,5	353.394,5	67.858,7
DWHH100	100,0	266,1	4,5	441.743,1	85.004,4
DWHH120	120,0	319,3	4,5	530.091,7	101.908,8
DWHH150	150,0	399,1	4,5	662.614,7	127.265,2
DWHH180	180,0	480,2	4,5	797.145,5	152.863,1



**Tabla 6.** Chiller de Absorción Doble Efecto accionado por gas de 150 a 360 TR.

	TONS	kW	EER	OPEX	CAPEX
DWH150	150,0	439,1	4,0	728.876,2	127.265,2
DWH180	180,0	560,0	3,9	929.668,5	152.863,2
DWH210	210,0	615,6	4,0	102.2033,0	178.219,6
DWH240	240,0	703,9	4,0	116.8611,4	203.817,6
DWH280	280,0	820,1	4,0	1.361.372,0	237.867,7
DWH320	320,0	937,4	4,0	1.556.140,5	271.676,3
DWH360	360,0	1054,7	4,0	1.750.909,1	305.726,3

**Tabla 7.** Chiller de Absorción Doble Efecto accionado por gas de 360 a 1200 TR.

	TONS	kW	EER	OPEX	CAPEX
DW360	360,0	1259,1	3,4	2.090.248,1	305.726,3
DW400	400,0	1398,2	3,4	2.321.159,3	339.776,4
DW450	450,0	1573,6	3,4	2.612.308,2	382.037,2
DW500	500,0	1747,8	3,4	2.901.449,1	424.539,4
DW560	560,0	1958,2	3,4	3.250.827,8	475.493,8
DW630	630,0	2202,5	3,4	3.656.428,3	534.900,4
DW700	700,0	2446,9	3,4	4.062.028,8	594.306,9
DW800	800,0	2796,4	3,4	4.642.318,6	679.311,4
DW900	900,0	3146,0	3,4	5.222.608,5	764.315,8
DW1000	1000,0	3495,5	3,4	5.802.898,3	849.078,8
DW1100	1100,0	3846,3	3,4	6.385.196,0	934.083,3
DW1200	1200,0	4195,8	3,4	6.965.485,9	1.067.385,8

**Tabla 8.** Chiller de Absorción Doble Efecto accionado por gas de 280 a 360 TR.

	TONS	kW	EER	OPEX	CAPEX
DWHH	280,0	746,3	4,5	1.238.888,7	237.867,7
DWHH	320,0	846,7	4,5	1.405.546,3	271.676,3
DWHH	360,0	955,5	4,5	1.586.259,4	305.726,3

## 2.1 Modelo Análisis de Desempeño Operacional.

Para determinar el desempeño operacional y energético de tecnologías de absorción y compresión mecánica para distritos térmicos, se ha designado el EER como medida de cuan tan eficiente es, en términos energéticos, el Chiller durante el tiempo de operación, es decir; que con esta medida (EER) se garantiza que la eficiencia del equipo que se ha tenido como referente en el análisis, demuestre su desempeño durante su jornada operacional.

## 2.2 Modelo de Análisis de Desempeño Económico.

Por otro lado, se estimó el CAPEX de los equipos enfriadores de agua líquida comparados, teniendo en cuenta que las tecnologías por compresión mecánica poseen un precio aproximado



por cada tonelada de refrigeración. Es decir; en tecnología Scroll tiene un precio de aproximadamente 1550 USD por toneladas (Bula 2022), el Tornillo de 1600 USD por toneladas (Bula 2022), en Centrifugo 1900 USD (Bula 2022) y en Centrifugo-Magnético 2500 USD (Martínez 2022), y en tecnologías de Absorción 241,49 USD/kW [4]. También, se busca determinar, comparando los \$COP/TR operacional de cada tecnología y estableciendo una relación  $(\$COP/TR)_{MAYOR}/(\$COP/TR)_{MENOR}$  que defina la cantidad en precio que debe aumentar una tecnología para igualar en \$COP/TR a la otra, cuál debe ser el costo de calor de la fuente de energía de los Chillers que hace comparable ambas tecnologías.

Posteriormente, de una evaluación financiera hecha a cada tecnología comparada, teniendo en cuenta el OPEX, CAPEX y \$COP/TR de la operación, se recomienda cual es el campo más viable económicamente.

En los Chillers de Compresión Mecánica, su fuente de energía es eléctrica y tiene un valor económico actual según la reforma tributaria de \$798,12COP/kWh sin subsidios, el cual fue tomado de un recibo de energía eléctrica: luz, de un hogar familia. (Afinia, 2022)

Y, en los Chillers de Absorción, su fuente de energía es de gas natural, cuyo valor económico es de \$0,044 USD/kWh (GlobalPetrolPrices, 2022).

### 2.3 Análisis Operacional.

**Tabla 9.** Comparación de EER entre Scroll y Doble efecto.

SCROLL		DOBLE EFECTO	
TONS	EER	EER	TONS
70,0 – 77,8	13,1	4,5	70,0 – 80,0
81,8 – 101,5	11,7	4,5	80,0 – 100,0
101,5 – 118,1	12,4	4,5	100,0– 120,0
118,1 – 148,5	11,0	4,5	120,0 – 150,0
148,5 – 167,4	10,4	4,5	150,0– 180,0

### 2.4 Análisis Económico.

Evaluación financiera:

**Tabla 10.** Comparación de \$COP/TR entre Scroll y Doble efecto.

SCROLL			DOBLE EFECTO		
OPEX	CAPEX	\$COP/TR	\$COP/TR	CAPEX	OPEX
\$ 403.018,7	\$112.344,0	\$ 5.560,4	\$ 4.374,9	\$63.632,6	\$331.307,3
\$ 555.597,9	\$144.072,5	\$ 5.977,4	\$ 4.374,9	\$76.431,6	\$397.568,8
\$ 618.915,5	\$162.362,5	\$ 5.667,7	\$ 4.374,9	\$93.456,6	\$485.917,4
\$ 846.645,7	\$204.290,0	\$ 6.423,7	\$ 4.374,9	\$114.587,0	\$596.353,2
\$1.067.565,3	\$244.822,5	\$ 6.758,9	\$ 4.380,9	\$140.064,2	\$729.880,1



### Análisis Operacional.

**Tabla 11.** Comparación de EER entre Tornillo y Doble efecto.

TORNILLO		DOBLE EFECTO	
TONS	EER	EER	TONS
150,9 – 180,8	11,1	4,0	150,0 – 180,0
180,8 – 214,4	10,9	4,0	180,0 – 210,0
214,4 – 235,0	10,8	4,0	210,0 – 240,0
235,0 – 257,7	10,8	4,0	240,0 – 280,0
257,7 – 291,5	10,9	4,0	280,0 – 320,0
291,5 – 368,9	10,9	4,0	320,0 – 360,0

### 2.5 Análisis Económico.

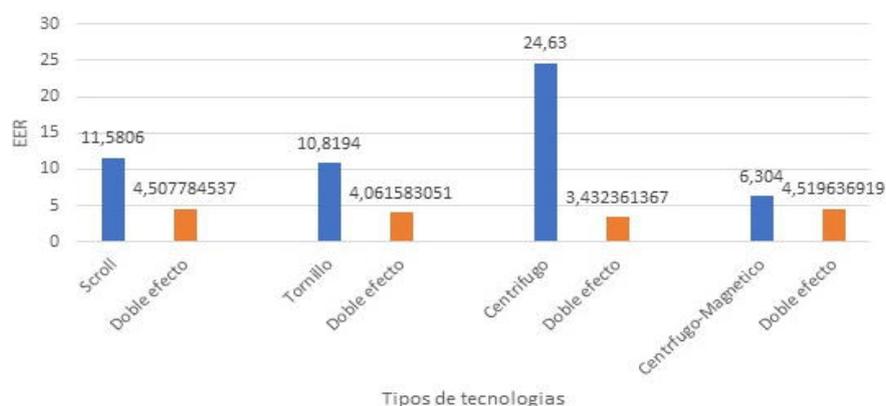
Evaluación financiera:

**Tabla 12.** Comparación de \$COP/TR entre Tornillo y Doble efecto.

TORNILLO			DOBLE EFECTO		
OPEX	CAPEX	\$COP/TR	\$COP/TR	CAPEX	OPEX
\$1.061.129,3	\$265.192,5	\$ 6.402,2	\$ 4.977,5	\$140064,2	\$829.272,3
\$1.279.954,6	\$315.876,3	\$ 6.483,3	\$ 4.956,1	\$165541,4	\$975.850,7
\$1.481.962,0	\$359.507,2	\$ 6.595,5	\$ 4.821,2	\$191018,5	\$1.095.322,0
\$1.623.325,0	\$394.147,2	\$ 6.589,7	\$ 4.818,5	\$220842,6	\$1.264.991,0
\$1.782.323,3	\$439.353,6	\$ 6.490,7	\$ 4.815,7	\$254771,9	\$1.458.756,0
\$2.148.581,6	\$555.340,8	\$ 6.539,4	\$ 4.816,5	\$288701,3	\$1.653.524,0

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Análisis de Desempeño Energético-Operacional.



**Figura 1.** EER de cada tecnología comparada. Fuente: elaboración propia.

Los Chiller tipo Scroll tiene una relación de eficiencia energética (EER) 2.57 veces mayor a los Chiller doble efecto, las tecnologías cuyo compresor es de tornillo presentan un EER de 2.66



veces mayor y los de compresor centrífugo y centrífugo magnéticos poseen un EER mayor de 7.63 y 1.33 respectivamente, con respecto a la tecnología evaluada por absorción.

Al comparar a condiciones similares un equipo tipo Scroll con uno Doble efecto, vemos que el \$COP/TR es \$1.658,972COP más que el \$COP/TR de absorción, lo cual quiere decir que el costo de la energía de entrada en el Chiller de absorción debe ser de 1,37544 veces el \$COP/kWh de calor con el que trabaja, para que los equipos sean similares técnica y económicamente.

Al comparar a condiciones similares un equipo Tornillo con uno Doble efecto, vemos que el \$COP/TR es \$1.601,887 COP más que el \$COP/TR de absorción, lo cual quiere decir que el costo de la energía de entrada en el Chiller de absorción debe ser de 1,32592 veces el \$COP/kWh de calor con el que trabaja, para que los equipos sean similares técnica y económicamente.

Al comparar a condiciones similares un equipo Centrifugo con uno Doble efecto, vemos que el \$COP/TR del Doble efecto es \$ 2.693,1222 COP más que el \$COP/TR del Centrifugo, lo cual quiere decir que el costo de la energía eléctrica de entrada en el Chiller Centrifugo debe ser de 1,86574 veces el \$COP/kWh de calor con el que trabaja, para que los equipos sean similares técnica y económicamente.

Al comparar a condiciones similares un equipo Centrifugo-Magnético con uno Doble efecto, vemos que el \$COP/TR es \$ 7.674,50312 COP más que el \$COP/TR de absorción, lo cual quiere decir que el costo de la energía de entrada en el Chiller de absorción debe ser de 2,74114 veces el \$COP/kWh de calor con el que trabaja, para que los equipos sean similares técnica y económicamente.

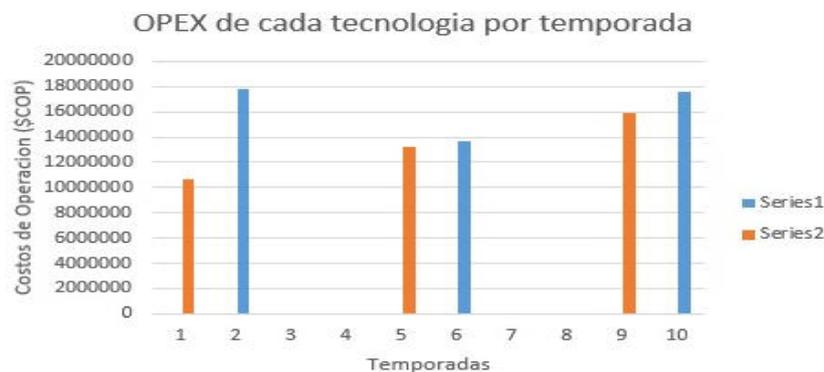
En cuanto a la parte económica los Chiller por compresión presentan los mayores gastos operacionales debido al constante aumento del kWh de energía eléctrica, así mismo los costos de inversión de estas tecnologías son mayores debido a su alto rendimiento en comparación con las tecnologías por absorción.

De lo anterior se concluye que las tecnologías comerciales por absorción a pesar de tener baja eficiencia energética y coeficientes de rendimiento, se convierten en una opción rentable y flexible, considerando los bajos precios de las fuentes de calor con las que funciona en comparación con las tecnologías comerciales por compresión mecánica que dependen netamente de la energía eléctrica para funcionar, por tanto el EER y COP no son una base sólida para seleccionar una tecnología de enfriamiento, y se debe recurrir a estudios económicos de operación que reflejen los beneficios de trabajar con un tipo de equipo en una determinada situación.



Necesidades de refrigeración por temporada (Toneladas de refrigeración)			
Cuarto	Baja	Media	Alta
Área 2	15,26	14,37	18,56
Área 3	8,79	8,79	8,79
Área 5	0	9,52	9,54
Área 6	6,33	6,62	6,64
Área 7	6,29	6,58	6,59
Zona 3	3,56	4,38	4,44
Zona 2	30,75	43,03	43,9
Zona 4	8,81	7,18	7,06
Total	79,79	100,46	105,51
Total, T<0°C	67,42	88,91	94,02
Total, T>0°C	12,37	11,56	11,5

**Figura 2.** Tabla de necesidades de refrigeración por temporada. Fuente: Serrano et al. 2022



**Figura 3.** OPEX mensual de las tecnologías por temporada. Fuente: elaboración propia.

Las series 1 y 2 representan los costos de operación de los Chiller por compresión mecánica y absorción respectivamente. Se concluye que los Chiller por absorción presentan menos gastos de operación, sin embargo, en las temporadas media y alta los costos de operación son similares por tanto se recomendaría utilizar los Chillers de compresión mecánica en temporadas media y alta, considerando su alta relación de eficiencia y en temporadas bajas utilizar los beneficios económicos brindados por los Chiller de absorción.

#### 4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba como fuente de financiación, en el marco de la Sostenibilidad de los Grupos de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica asociado al Grupo Ingeniería, Ciencia y Tecnología - ICT, así mismo a la Universidad del Sinú con el apoyo del programa de Ingeniería Electromecánica de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingenierías enmarcado dentro del programa de movilidad profesoral entre programas



académicos de pregrado y posgrado de facultades de Ingeniería de Instituciones de Educación Superior de la Región Caribe Colombiana ACOFI.

## 5.REFERENCIAS

[1] Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental, 2019. Guía metodológica; Distritos Térmicos, Ed: Mariaca Orozco, Hilda Cristina, Bogotá DC. [https://www.distritoenergetico.com/wp-content/uploads/2020/11/Gui%C3%ACa-metodolo%C3%ACgica-VF\\_2020.pdf](https://www.distritoenergetico.com/wp-content/uploads/2020/11/Gui%C3%ACa-metodolo%C3%ACgica-VF_2020.pdf)

[2] Serrano Ricardo, Soto Michelle, 2022, Diseño e implementación de un sistema de trigeneración de energía híbrida con optimización de sistemas de refrigeración para una empresa procesadora de marisco, Universidad del Norte. <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10571/Dise%C3%B1o%20e%20Implementacion%20de%20un%20Sistema%20de%20Trigeneracion%20de%20Energia-MdeC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[3] Mundo HVACR, (12 diciembre del 2022). Rompiendo mitos acerca de los chillers de absorción, Noticias. <https://www.mundohvacr.com.mx/2019/09/rompiendo-mitos-acerca-de-los-chillers-de-absorcion/>

[4] Huashan Li, Sihao Huang, Xianlong Wang, Yuan Zhao, Xianbiao Bu, Lingbao Wang, Analysis of H<sub>2</sub>O/EMISE absorption chiller driven by stationary solar collectors in hot-humid climate, Thermal Science and Engineering Progress, 27(2019) 101155. <https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2054/science/article/pii/S2451904921003140>

[5] André Chun, João Luiz Marcon Donatelli, José Joaquim Conceição Soares Santos a, Clayton Barcelos Zabeu, Monica Carvalho. Superstructure optimization of absorption chillers integrated with a large internal combustion engine for waste heat recovery and repowering applications: Thermodynamic and economic assessments, Energy, 263(2022) 125970. <https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2054/science/article/pii/S0360544222028560>

[6] Kyaw Thu, Jayaprakash Saththasivam, Bidyut Baran Saha, Kian Jon Chua, S. Srinivasa Murthy, Kim Choon. Experimental investigation of a mechanical vapour compression chiller at elevated chilled water temperatures, Applied Thermal Engineering, 123(2017) 226-233. <https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2054/science/article/pii/S1359431117321531>

[7] York. 2021. Modelo YLAA. Enfriadoras Scroll refrigeradas por aire con intercambiadores de calor de placas soldadas. Estilo b. Ecochillers.

PDF: [https://drive.google.com/file/d/1Ae9G5G3vX9K0HgFTNdc2oHcZ0HMLhJia/view?usp=drive\\_sdk](https://drive.google.com/file/d/1Ae9G5G3vX9K0HgFTNdc2oHcZ0HMLhJia/view?usp=drive_sdk)



[8] Trane. 2016. Modelo RTAC. Enfriadora de líquido tipo Tornillo. Enfriada por aire series R. Catálogo de productos TRANE.

PDF:[https://drive.google.com/file/d/1Aro3Rlq7HfKDO4U43\\_tAt30jiJFluiZy/view?usp=drivesdk](https://drive.google.com/file/d/1Aro3Rlq7HfKDO4U43_tAt30jiJFluiZy/view?usp=drivesdk)

[9] CenTraVac water-cooled chiller. (s/f). Trane.com. Recuperado el 16 de diciembre de 2022, de <https://www.trane.com/commercial/north-america/us/en/products-systems/chillers/water-cooled-chillers/centrifugal-liquid-cooled-chillers.html>

[10] Trane. 2022. CenTraVac Water-Cooled Chillers with Symbio Controls 120 – 4000+ Tons (450 – 14000+ kW), 60 y 50 Hz. Catálogo de productos TRANE.

PDF:<https://drive.google.com/file/d/1Aw8IGLsHrfAfCDg32WdZ2T44LB45phDC/view?usp=drivesdk>

[11] Navegador de soluciones. (s/f). Solutionnavigator.com. Recuperado el 16 de diciembre de 2022,

<https://www.solutionnavigator.com/s/productdetailpage?taxonomy=HVAC%20Systems%7C%7CHVAC%20Equipment%7C%7CWater%20Cooled%20Chillers%20and%20Heat%20Pumps%7C>

[%7CWater%20Cooled%20Chillers%20and%20Heat%20Pumps%7C%7CYMC2&status=Published&language=no](https://www.solutionnavigator.com/s/productdetailpage?taxonomy=HVAC%20Systems%7C%7CHVAC%20Equipment%7C%7CWater%20Cooled%20Chillers%20and%20Heat%20Pumps%7C%7CYMC2&status=Published&language=no)

[12] York. 2012. YMC2 MODEL A. WITH OPTIVIEW CONTROL CENTER. Solution Navigator.

PDF:<https://drive.google.com/file/d/1B1fv6DxgmNMa8fb0KCekGfje1vlsgIU3/view?usp=drivesdk>

[13] World Energy. 2019. Absorption Chiller. Absorption Chiller & Heat. Absorption Heat Pump. Catalogo de productos World Energy.

PDF:[https://drive.google.com/file/d/1B5wSFhi8LP\\_lgBacd6hIVc5xOwSedj-Y/view?usp=drivesdk](https://drive.google.com/file/d/1B5wSFhi8LP_lgBacd6hIVc5xOwSedj-Y/view?usp=drivesdk)

[14] Tractebel Engineering S.A. 2018. Informe Técnico Económico Montería (I-T-E-M). Inicio – Tractebel Engineering S.A.

Hoja Excel del cálculo de las propiedades mecánicas de las tecnologías de Compresión Mecánica:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1B7Hy3NtSbZgO6urtfWdDCREh53vP0btO/edit?usp=drivesdk&oid=103391000087841047257&rtpof=true&sd=true>

Hoja Excel del cálculo de las propiedades mecánicas de los equipos Doble efecto de Absorción:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1B9pC7Y4n5LYRIPTeTHXyVnfQcnnw6Dly/edit?usp=drivesdk&oid=103391000087841047257&rtpof=true&sd=true>



## APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE TASA DE RETORNO ENERGÉTICO Y DE EXERGÍA EXTENDIDA A LA PRODUCCIÓN DE SHALE GAS EN LA CUENCA NEUQUINA

Patricio Collazo <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Techint Ingeniería y Construcción  
Bouchard 557, Piso 12, Ciudad Autónoma de Buenos Aires (C1106ABG), Argentina  
[pacollazo@techint.com](mailto:pacollazo@techint.com)

### RESUMEN

Se denomina tasa de retorno energético EROI (energy return on investment), al cociente de la cantidad de energía total que es capaz de producir una fuente de energía y la cantidad de energía que es necesaria emplear o aportar para explotar ese recurso energético. Este indicador, por ejemplo, en el caso de un yacimiento de hidrocarburos (gas, petróleo, carbón), calcula la energía obtenida multiplicando la producción por el poder calorífico del producto. No tiene en cuenta el segundo principio de la termodinámica, según Kelvin-Planck: "Es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo reciba calor de un solo depósito y produzca una cantidad neta de trabajo". Los métodos de cálculo de EROI tampoco consideran factores de entrada como mano de obra, servicios auxiliares y factores ambientales. En este trabajo, se aplica el método tradicional de cálculo de EROI y el de exergía extendida (Extended Exergy Accounting method, EEA), en el cual se tiene en cuenta la calidad de la energía a través de concepto de exergía. El método EEA convierte no solo los flujos de materiales y energía, sino también las externalidades (costos laborales, de capital y ambientales) en flujos de exergía, de modo que todos los intercambios entre el sistema y el medio ambiente pueden explicarse por completo con un enfoque termodinámico en lugar de monetario. Ambos métodos se utilizan para analizar la producción de shale gas en la cuenca Neuquina.

**Palabras clave:** *Energía; Exergía; Tasa de Retorno Energético; Shale Gas.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento en la población trae aparejado un incremento de la demanda energética, a su vez, la energía consumida durante la explotación de los recursos energéticos también crece, como resultado, la proporción de energía utilizable disminuye. El EROI de la producción mundial de petróleo y gas ha estado en declive desde principios de la década de 2000. Cuando se llega al límite en que el sector energético solo proporciona suficiente energía para alimentar sus propios procesos, el excedente de energía es cero. El EROI es la relación entre la producción de energía y la entrada de energía para explotar los recursos energéticos. Durante el siglo XX, para la producción de gas y petróleo convencional, en la mayoría de los casos era de 20 a 80. Cuando cae por debajo de 10, la energía neta comienza a disminuir exponencialmente [1, 6].

El EROI es el método más utilizado, está basado en valores calóricos sin tener en cuenta la calidad de la energía. Gran parte de la energía consumida durante la explotación de los recursos energéticos suele ser de productos mejorados, como el diésel y la electricidad, mientras que las salidas siempre tienden a ser productos de energía primaria, como el petróleo crudo y el gas sin tratar. Por lo tanto, a menudo resulta inadecuado utilizar directamente el método del valor calórico para unificar la cuantificación y la contabilidad. Los métodos tradicionales de EROI basados en materiales y energía descuidan los efectos de la segunda ley de la termodinámica. Solo los métodos exergéticos se basan genuinamente en la segunda ley [2, 3].

Exergía: “Un sistema entrega el máximo trabajo posible cuando experimenta un proceso reversible del estado inicial especificado al estado de su ambiente, es decir, el estado muerto. Esto representa el potencial de trabajo útil del sistema en el estado especificado y se llama exergía. Es importante comprender que la exergía no representa la cantidad de trabajo que un dispositivo productor realmente entregará después de la instalación; sino que representa el límite superior en la cantidad de trabajo que un dispositivo puede entregar sin violar cualquier ley termodinámica. Habrá siempre una diferencia, grande o pequeña, entre la exergía y el trabajo real entregado por un dispositivo, diferencia que representa para los ingenieros la posibilidad para la mejora [14].”

El método EEA mide el equivalente de recursos exergéticos totales incorporados en un producto durante su ciclo de vida, incluyendo la energía, recursos materiales, mano de obra, capital y factores ambientales, obteniendo la cantidad de exergía que se usa en forma acumulativa para producir ese producto, durante su vida útil y para su descarte [5]. El indicador de eficiencia que puede utilizarse en el método EEA es el EXROI, retorno de la inversión exergética [9].

El propósito de este trabajo es aplicar ambos métodos a la producción de shale gas de la formación Vaca Muerta (VM) en la cuenca Neuquina.



## 2. DIFERENCIA ENTRE EROI Y EXROI

El EROI se centra en la entrada y salida de energía y su proceso de flujo circulante, Figura 1, y es igual a la relación entre la energía producida y la energía consumida por una unidad de producción [2].

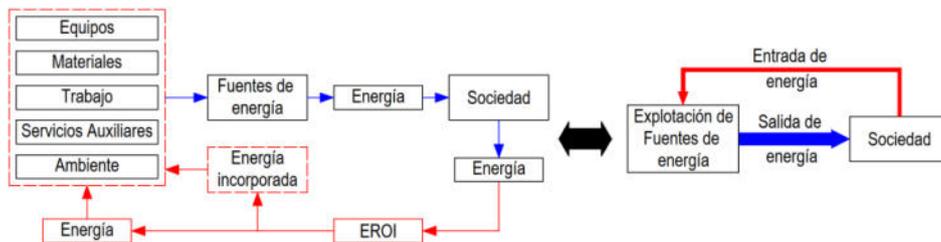


Figura 1: Explotación de una fuente de energía desde la perspectiva de EROI

El consumo de exergía relacionado con la fabricación de algún producto aparece no solo en la planta que lo fabrica, sino también en todas las plantas que entregan productos semi elaborados y materias primas para el proceso de producción final, y se lo denomina consumo acumulado de exergía CExC. Este permite el análisis del consumo de recursos naturales, de productos, de servicios y además se incorpora el trabajo, el capital y el impacto ambiental en los sistemas.



Figura 2: Dominio espacial y temporal simplificado del método EEA

Dado que el EEA proporciona una medida unificada que incluye todos los tipos de recursos consumidos en el ciclo de vida de un producto material o inmaterial, se obtiene una visión más profunda para los análisis de consumo de recursos que los estudios de EROI.

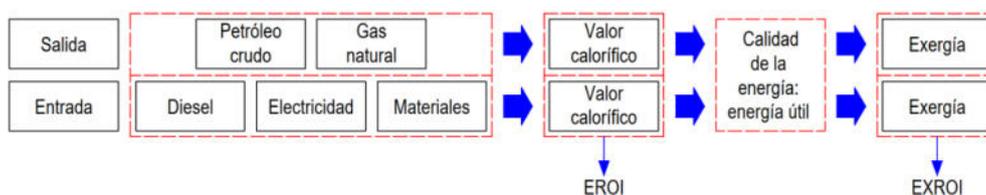


Figura 3: Diferencia entre EROI y EXROI

$$EROI = \frac{E_o}{E_d + E_{id}} \quad (1)$$

$$EXROI = \frac{E_{xo}}{E_{xd} + CEx_{id} + E_{xL} + E_{xK} + E_{xEnv}} \quad (2)$$



### 3. CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA Y EXERGÍA

Al realizar este trabajo, no se encontró publicada información detallada de los materiales requeridos para perforar un pozo en la formación VM, las cantidades de materiales utilizados se obtuvieron de lo informado en [1] y [4] para la perforación de un pozo típico de shale gas de la formación Marcellus en EEUU, incorporando un factor de corrección de 1,45 en función de la diferencia de profundidad. Un pozo típico de shale gas en la formación Marcellus tiene una profundidad de 1500 m y una longitud horizontal de 2600 m. Los pozos de VM tienen una profundidad de 3000 m y una longitud horizontal de 3200 m. No se consideran los gastos de energía y exergía en la etapa de exploración, ni los necesarios para la construcción de la infraestructura para el acondicionamiento y transporte del gas.

#### 3.1. Energía consumida – energía incorporada

La energía incorporada se define como la cantidad acumulada de energía invertida para extraer, procesar y fabricar un producto y transportarlo a su punto de uso. A continuación, se detalla la energía total que se invierte en cada etapa de la construcción de un pozo típico de shale gas.

Tabla 1. Energía gastada en las distintas etapas de construcción de un pozo típico [1, 10]

PREPARACION DE PAD DE POZO	Unidad	Cantidad	Contenido de energía [TJ]
Demalezado	m <sup>2</sup>	20200	0.056
Tratamiento de maleza y movimiento de rocas	m <sup>2</sup>	20200	0.175
Nivelación	m <sup>2</sup>	20200	0.573
Estanques			
Zanja de barros	m <sup>3</sup>	2800	19.705
Revestimientos de estanque	m <sup>2</sup>	2000	0.238
Empedrado	m <sup>2</sup>	20200	2.639
Tanques de almacenamiento (190 m <sup>3</sup> )	unidad	2	2.948
Total			26.334
PERFORACION DE POZO	Unidad	Cantidad	Contenido de energía [TJ]
Acero	t	210.903	3.648
Cemento	t	346.086	2.066
Diesel	t	302.514	11.713
Aditivos	t	79.692	0.186
Total			17.613
Requerimientos de combustible y electricidad para la gestión del fluido de fracking			
Item	Unidad	Cantidad	Contenido de energía [TJ]
Consumo de Diesel	t	24.404	0.943
Consumo de Electricidad	kWh	955.550	0.003
Total			0.946
Requerimientos de aditivos para la fractura hidráulica			
Componente			Contenido de energía [TJ]
Proppant			0.689
Materia inorgánica			0.338
Materia orgánica			0.202
Total			1.229

El consumo de diésel incluye tanto el transporte de agua para fractura como las necesidades de perforación. El requerimiento promedio de agua por pozo por trabajo de fractura es de 50000 t.



En total, el costo energético equivalente de la etapa del proceso de reacondicionamiento (workover) es de 13,57 TJ.

Gasto total de energía = Preparación del pad de pozo + Perforación de pozos + Fractura Hidráulica + Workover (3)

**Gasto total de energía = 26.334 + (17.613 + 0.946) + 1.229 + 13.57 = 59.7 TJ**

Este valor representa la suma de la energía directa ( $E_d$ ) e indirecta ( $E_{id}$ ) indicados en el denominador de la Ecuación (1). La energía directa se refiere a la requerida por el proceso de fabricación, mientras que la indirecta es la absorbida por la minería, la transformación y el transporte de los factores de producción.

### 3.2. Exergía consumida – exergía incorporada

La exergía incorporada en los productos manufacturados se refiere a cuánta energía útil queda y está incorporada en estos, y cuáles son las cantidades de emisiones y desechos causados por la depreciación de la energía en diferentes puntos del proceso de producción y consumo [8].

Tabla 2. Exergía incorporada directa  $Ex_d$  e indirecta  $CEx_{id}$

EXERGÍA INCORPORADA DIRECTA $Ex_d$				
Item	Unidad	Cantidad	Coef. Exergético [TJ/t]	Exergía [TJ]
Diesel	t	326.917	0.0444	15
EXERGÍA INCORPORADA INDIRECTA $CEx_{id}$				
Item	Unidad	Cantidad	Coef. de conversión $CEx_C$ [MJ/kg]	$CEx_C$ [TJ]
Diesel	t	326.917	67.2	22.0
Acero	t	210.903	58.77	12.4
Cemento	t	346.086	6.18	2.1
Electricidad	kWh	955.550	-	0.00344
Agua	t	50000	0.05	2.5
Proppant + Aditivos Varios	t	3150.000	0.021	0.066
Total				39.1

Una fuente de energía primaria es toda forma de energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada. La exergía incorporada directa es la cantidad de exergía primaria empleada directamente en la producción del producto. El  $CEx_{id}$  es el consumo de exergía indirecto incorporado en los recursos, está representado por todos los niveles aguas arriba del producto [3]. Se obtiene haciendo la sumatoria de los  $CEx_C$  de todos los materiales utilizados. Existen listados con factores de conversión a  $CEx_C$  para una gran cantidad de materiales terminados y vectores de energía [9, 19].

El método EEA se basa en dos postulados fundamentales [5]:



1<sup>er</sup> postulado: en cualquier sociedad, la afluencia global de recursos exergéticos se utiliza principalmente para sostener a los trabajadores que generan trabajo. La exergía incorporada por el trabajo se relaciona proporcionalmente con el flujo de exergía primaria (Exin) consumida por una sociedad en un año:

$$ExL \propto \alpha \cdot Exin [J] \quad (4)$$

2<sup>do</sup> postulado: el flujo de exergía necesario para generar la circulación monetaria M2 dentro de una sociedad durante un año, es proporcional a la exergía incorporada por el trabajo:

$$ExK \propto \beta \cdot ExL [J] \quad (5)$$

Donde tanto  $\alpha$  como  $\beta$  son factores numéricos que dependen del tipo de organización social, el período histórico, el nivel tecnológico, el consumo de recursos per cápita y la ubicación geográfica de la sociedad. Son constantes dependientes del tiempo y el espacio. Su valor no está asignado por la teoría y deben calcularse a partir de datos econométricos.

El coeficiente  $\alpha$  representa la fracción de la exergía primaria incorporada al trabajo.

$$\alpha = \frac{f \cdot esurv \cdot Nh}{Exin} \quad (6)$$

Donde Nh es la población total de una sociedad, esurv es el requisito mínimo de exergía para sobrevivir y f es un factor de amplificación que explica el hecho de que los estándares de vida modernos requieren un uso de exergía muy superior al mínimo de supervivencia.

El coeficiente  $\beta$  representa la fracción de la exergía del trabajo incorporada al capital.

$$\beta = \frac{M2-S}{S} \quad (7)$$

Donde S es la compensación salarial bruta de todos los trabajadores de una sociedad.

Para calcular la exergía incorporada por el trabajo ExL, es necesario determinar la exergía primaria incorporada en una hora de trabajo, eeL, que es igual al flujo de exergía total que se destina al trabajo dividido por el número acumulado de horas de trabajo generadas por toda una sociedad, Nw, considerando un período de un año.

$$eeL = \frac{\alpha \cdot Exin}{Nw} \left[ \frac{J}{\text{horas trabajadas}} \right] \quad (8) \quad ExL = eeL \cdot Nwh \quad (9)$$

Donde Nwh son las horas para finalizar un pozo típico de shale gas en VM, se asume 40 días de trabajo con 15 personas las 24 horas [7].

Para calcular la exergía incorporada por el capital ExK, es necesario determinar la exergía primaria incorporada en una unidad monetaria, eeK, que es la relación entre el flujo de exergía que se destina al capital y la circulación monetaria, considerando un período de un año.



$$eeK = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot Exin}{M^2} \left[ \frac{J}{USD} \right] \quad (10)$$

$$ExK = eeK \cdot Moa \quad (11)$$

Donde Moa es el capital utilizado en USD para la compra de servicios auxiliares, al que debe deducírsele el dinero usado para energía, materiales, mano de obra, etc.

Tabla 3. Parámetros Exin,  $\alpha$ ,  $\beta$ , eel y eeK, ExL y ExK [7, 13, 15, 16, 17]

Parámetro	Unidad	Promedio desde 2011 hasta 2021
Exin	TJ	3450891
$\alpha$	-	0.745
$\beta$	-	2.72
eel	MJ/horas trabajadas	36.24
eeK	MJ/USD	12.11
ExL	TJ	0.52
ExK	TJ	148

Los impactos ambientales son diversos y los datos difíciles de obtener. Se considera que el costo exergético para mitigar el impacto ambiental es del 0.5% del total de la exergía consumida [2].

$$ExEnv = 0.005 \cdot (Exd + CExid + ExL + ExK) = 1.01 \text{ TJ} \quad (12)$$

$$\text{Gasto total de exergía} = Exd + CExid + ExL + ExK + ExEnv \quad (13)$$

$$\text{Gasto total de exergía} = 15 + 39.1 + 0.52 + 148 + 1.01 = 204 \text{ TJ}$$

#### 4. CÁLCULO DE EROI Y EXROI

##### 4.1. Análisis de un pozo de explotación ideal de shale gas

Se tomó como pozo de explotación ideal al planteado por el Ministerio de Energía y Minería de la Nación, este proyecta la producción de hidrocarburos no convencionales utilizando perfiles de producción de tipo shale gas, que responden a una estructura de costos y a un nivel de precios que aseguran su viabilidad económica. En la Figura 4, se grafica el caudal en función del tiempo  $q(t)$  y la producción acumulada en función del caudal  $Q(q)$  [7].

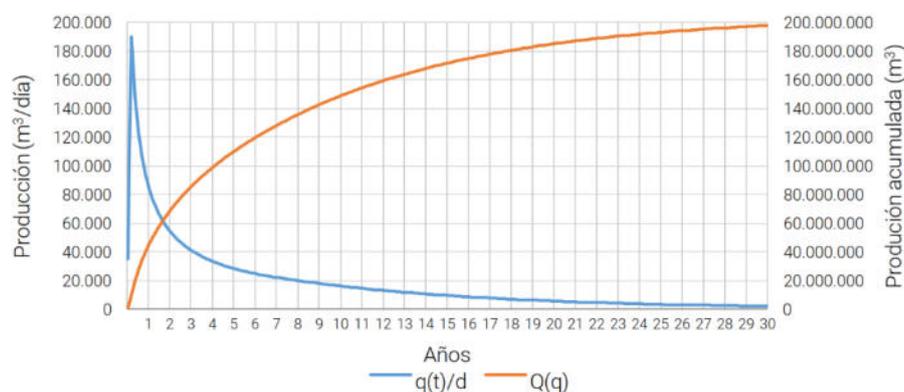


Figura 4: Perfil de pozo ideal de shale gas de la formación VM



Multiplicando los valores de producción acumulada por los coeficientes energético y exergético,  $42.7 \text{ MJ/m}^3$  y  $34.54 \text{ MJ/m}^3$  respectivamente, se calcula  $E_0$  y  $Ex_0$  en boca de pozo [9, 19]. Luego, considerando los gastos determinados en 3.1 y 3.2 y las Ecuaciones (1) y (2), se obtiene la evolución del EROI y EXROI indicada en la Tabla 4. En el pozo ideal solo se considera la producción de gas, no se tiene en cuenta la producción de condensados y de NGL.

Tabla 4. Evolución de un pozo ideal de shale gas en VM

Años de producción	Producción Acumulada Pozo Ideal [MMm <sup>3</sup> ]	Energía Acumulada Pozo Ideal (E <sub>0</sub> ) [TJ]	Exergía Acumulada Pozo Ideal (Ex <sub>0</sub> ) [TJ]	EROI	EXROI
1	42	1793	1451	30	7
4	99	4241	3430	71	17
12	154	6586	5328	110	26
28	197	8395	6791	141	33

#### 4.2. Análisis de pozos shale gas en yacimientos de la formación Vaca Muerta

Tabla 5. Total de producción y de pozos hasta el año 2022 inclusive

Nº	Yacimiento	Años de producción	Producción de Oil no Convencional Acumulada [Mm <sup>3</sup> ]	Producción de Gas no Convencional Acumulada [MMm <sup>3</sup> ]	Pozos de Explotación Acumulados [Unidad]	Producción de Oil no Convencional Acumulada por Pozo [Mm <sup>3</sup> ]	Producción de Gas no Convencional Acumulada por Pozo [MMm <sup>3</sup> ]
1	FORTIN DE PIEDRA	4	1038	19074	120	8.7	159
2	AGUADA DE CASTRO	4	0	754	6	0.0	126
3	LA CALERA	4	939	3887	36	26.1	108
4	AGUADA DE LA ARENA	4	92	2123	25	3.7	85
5	LA RIBERA BLOQUE I	4	141	1031	21	6.7	49
6	BAJO DEL CHOIQUE - LA INVERNADA	4	880	374	8	110.0	47
7	EL OREJANO	4	12	4413	111	0.1	40
8	RINCON DEL MANGRULLO	4	91	6388	166	0.5	38
9	RINCON LA CENIZA	4	327	442	14	23.4	32
10	BAJADA DE AÑELO	4	326	353	17	19.2	21
11	AGUADA FEDERAL	7	321	39	2	160.6	19
12	CHIHUIDO DE LA SIERRA NEGRA	4	67	75	8	8.4	9.3
13	BANDURRIA SUR	4	3,185	539	71	44.9	7.6
14	BANDURRIA CENTRO	4	442	113	16	27.6	7.1
15	LAS MANADAS	3	45	13	2	22.5	6.7
16	LA AMARGA CHICA	4	5,873	741	155	37.9	4.8
17	CRUZ DE LORENA	4	1,669	170	38	43.9	4.5
18	SIERRAS BLANCAS	4	958	90	21	45.6	4.3
19	LA ESCALONADA	4	19	8.7	3	6.2	2.9
20	COIRON AMARGO SUR OESTE	4	529	46	17	31.1	2.7
21	COIRON AMARGO SUR ESTE	4	535	26	12	44.6	2.2
22	AGUADA DEL CHIVATO	4	4	1.2	15	0.3	0.1
TOTAL - PROMEDIO		4.1	17496	40703	884	20	46
POZO IDEAL		4	-	99	1	-	99

De las publicaciones de la Secretaría de Energía de la Nación (SEN), se obtienen por yacimiento, las producciones de oil y gas no convencional y la cantidad de pozos perforados desde el inicio de la explotación hasta el año 2022 inclusive [17]. Con estos datos, se calcula la producción promedio de oil y gas de cada pozo, esta se multiplica por los coeficientes energético y exergético y luego se aplican las Ecuaciones (1) y (2) como se hizo en 4.1.



No se incluyeron los yacimientos en los que también se produce tight gas, ya que, en las publicaciones de producción no convencional de la SEN, no se discrimina entre tight y shale [11]. Existen yacimientos sin publicación de datos de producción y/o pozos de explotación perforados.

Tabla 6. Evolución del EROI y EXROI de cada yacimiento

N°	Yacimiento	2019		2020		2021		2022		2022	
		EROI Shale Gas	EXROI Shale Gas	EROI Shale Gas + Oil	EXROI Shale Gas + Oil						
1	FORTIN DE PIEDRA	49	12	86	20	102	24	114	27	114	27
2	AGUADA DE CASTRO	48	11	64	15	51	12	90	21	90	21
3	LA CALERA	18	4	93	22	74	18	77	18	79	19
4	AGUADA DE LA ARENA	19	4	38	9	39	9	61	14	61	14
5	LA RIBERA BLOQUE I	12	3	26	6	32	8	35	8	35	8
6	BAJO DEL CHOIQUE - LA INVERNADA	10	2	37	9	72	17	33	8	39	9
7	EL OREJANO	10	2	15	3	21	5	28	7	28	7
8	RINCON DEL MANGRULLO	7	2	13	3	19	5	28	7	28	7
9	RINCON LA CENIZA	7	2	13	3	19	4	23	5	24	6
10	BAJADA DE AÑELO	3	1	5	1	9	2	15	4	16	4
11	AGUADA FEDERAL	3	1	6	1	8	2	14	3	22	5
12	CHIHUIDO DE LA SIERRA NEGRA	0.4	0.1	1.0	0.2	4.0	0.9	6.7	1.6	7.07	1.69
13	BANDURRIA SUR	1.5	0.4	3.6	0.9	4.0	1.0	5.4	1.3	7.60	1.89
14	BANDURRIA CENTRO	1.8	0.4	3.3	0.8	4.4	1.0	5.1	1.2	6.40	1.57
15	LAS MANADAS	1.4	0.3	3.1	0.7	4.8	1.1	4.8	1.1	5.88	1.44
16	LA AMARGA CHICA	1.1	0.3	2.2	0.5	3.0	0.7	3.4	0.8	5.25	1.32
17	CRUZ DE LORENA	-	-	2.9	0.7	1.8	0.4	3.2	0.8	5.32	1.34
18	SIERRAS BLANCAS	1.0	0.2	1.9	0.5	1.9	0.5	3.1	0.7	5.26	1.33
19	LA ESCALONADA	0.5	0.1	1.6	0.4	2.5	0.6	2.1	0.5	2.37	0.57
20	COIRON AMARGO SUR OESTE	1.1	0.3	1.6	0.4	1.1	0.3	1.9	0.5	3.45	0.88
21	COIRON AMARGO SUR ESTE	0.2	0.1	1.1	0.3	1.3	0.3	1.6	0.4	3.71	0.96
22	AGUADA DEL CHIVATO	0.01	0.001	0.009	0.002	0.03	0.01	0.06	0.013	0.07	0.02
TOTAL - PROMEDIO		12	3	22	5	27	6	33	8		
POZO IDEAL		30	7	46	11	61	14	71	17		

Balance Positivo  
Balance Negativo

## 5. CONCLUSIONES

Como se indica en 4.1, el pozo de explotación ideal proyecta una producción de gas que asegura su viabilidad económica, en cuatro años acumula 99 MMm<sup>3</sup>. Solo los tres primeros yacimientos superan esta producción. Ver Tabla 5.

Para obtener un balance energético y exergético positivo al final del ciclo de vida, se supone como mínimo EROI = 33 y EXROI = 8 [2, 23]. Según este criterio, solo los primeros seis yacimientos tienen un balance positivo. El aporte energético y exergético del oil no convencional no es significativo en la mayoría de los casos. Ver Tabla 6.

La mitad de los yacimientos analizados tienen retornos muy bajos, EROI < 7.1 y EXROI < 2, asociados a una pobre producción por pozo, ver Tablas 5 y 6. Estos suman 358 pozos de explotación, considerando un costo promedio de USD 10 millones por pozo, el total sería de USD 3580 millones. Habría que evaluar cómo evolucionan y si es rentable seguir invirtiendo en su

desarrollo. Siempre teniendo en cuenta que en los yacimientos de shale gas las tasas de flujo iniciales disminuyen rápidamente, por lo general entre un 50 % y un 60 % después del primer año, ver Figura 4, y que recuperan menos gas (de <5 % a 20 %) que los yacimientos convencionales (de ~50 % a 90 %) [22].

Según se observa en el mapa de madurez térmica de la formación VM, los yacimientos con mejores EROI y EXROI, son aquellos cuyos valores de reflectancia de la vitrinita promedio (%Ro) están entre 1.35 y 1.5, ver Figura 5.

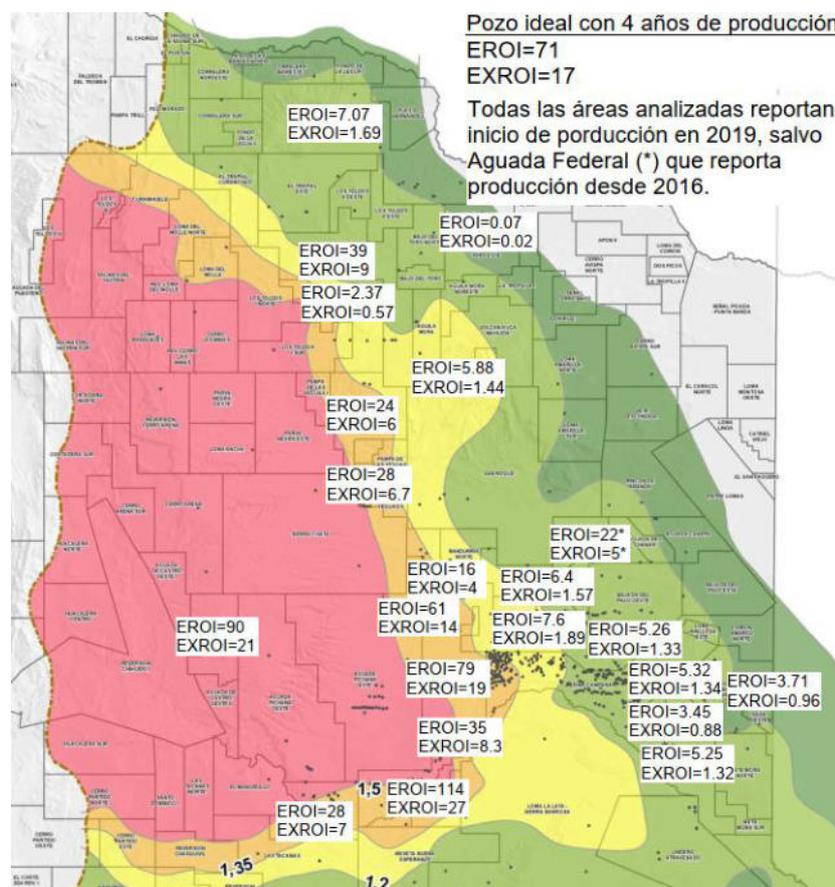


Figura 5: Retorno al 2022 vs. Madurez Térmica [18]

El principal insumo de la explotación del shale gas son los servicios auxiliares, equipos y tecnología utilizada para la perforación y la fractura, representados por ExK, que equivalen al 72% del total. El shale gas es un tipo de recurso no convencional que es mucho más difícil de explotar. Eso significa que la tecnología y la innovación son factores clave de entrada. En cierta medida, los resultados indican que el EROI ignora los servicios auxiliares y no puede utilizarse para evaluar la explotación de los recursos energéticos dependientes de la tecnología. Los resultados del EROI pueden inducir al error cuando se definen las políticas de explotación de un yacimiento tipo shale [2].



Como equivalente de exergía de los impactos ambientales, solo se consideró el 0,5% de la entrada total, lo que probablemente subestima el caso real. El bajo valor se debe a los limitados datos disponibles. Solo se consideran el carbono, el NOx y el tratamiento de aguas residuales, ya que otros impactos, por ejemplo, la contaminación de acuíferos y la destrucción de la ecología, son difíciles de medir y no están disponibles en los datos públicos. También hay que considerar los sismos inducidos por inyección, entre 2017 y 2021 ocurrieron 400 temblores en Vaca Muerta [2, 12].

## REFERENCIAS

- [1] Devin Moeller; David Murphy. *Net Energy Analysis of Gas Production from the Marcellus Shale*. Springer International Publishing, DOI10.1007/s41247-016-0006-8, Switzerland, 2016.
- [2] Yingchao Chen; Lianyong Feng; Songlin Tang; Jianliang Wang; Chen Huang; Mikael Höök. *Extended-exergy based energy return on investment method and its application to shale gas extraction in China*. Journal of Cleaner Production, 260, 2020.
- [3] M.V. Rocco; E. Colombo; E. Sciubba. *Advances in exergy analysis: a novel assessment of the Extended Exergy Accounting method*. Applied Energy 113, 1405–1420, 2014.
- [4] Noam Lior. *Exergy, Energy, and Gas Flow Analysis of Hydrofractured Shale Gas Extraction*. Journal of Energy Resources Technology, 138, 061601-1, 2016.
- [5] Enrico Sciubba. *A revised calculation of the econometric factors  $\alpha$  and  $\beta$  for the Extended Exergy Accounting method*. Ecological Modelling, 222, 1060-1066, 2011.
- [6] Ke Wang; Harrie Vredenburg; Ting Wang; Lianyong Feng. *Financial return and energy return on investment analysis of oil sands, shale oil and shale gas operations*. Journal of Cleaner Production, 223, 826-836, 2019.
- [7] Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación. *Escenarios Energéticos 2030*. Dirección Nacional de Escenarios y Evaluación de Proyectos, Subsecretaría de Escenarios y Evaluación de Proyectos, Secretaría de Planeamiento Energético Estratégico, 2017.
- [8] Mei Liao; Chao Ma; Dongpu Yao; Huizheng Liu. *Decomposition of embodied exergy flows in manufactured products and implications for carbon tariff policies*. Springerlink.com, DOI 10.1007/s10308-013-0357-3, Asia – Europa, 2013.
- [9] Matteo Vincenzo Rocco. *Primary Exergy Cost of Goods and Services An Input–Output Approach*. Springer, Milán, 2016.



- [10] Sandra Bettina Ferrante; Adriana Giuliani. *Hidrocarburos no convencionales en Vaca Muerta (Neuquén): ¿Recursos estratégicos para el autoabastecimiento energético en la Argentina del siglo XXI?*. Estado y Políticas Públicas, 3, 33-61, 2014.
- [11] Ministerio de Energía y Recursos Naturales, Gobierno de la Provincia del Neuquén, Mapa de reservorios de Tight Gas, <http://hidrocarburos.energianequen.gov.ar/mapa>.
- [12] Guillermo Tamburini-Beliveau; Javier A. Grosso-Heredia. *Evaluación de la deformación del suelo y la sismicidad en dos áreas de intensa producción de hidrocarburos en la Patagonia argentina. Versión adaptada*. Scientific Reports, 12:19198, 2022.
- [13] bp Statistical Review of World Energy, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [14] A. Çengel; Michael A. Boles; Mehmet Kanoğlu. *Termodinámica, Novena Edición*. McGRAW-HILL, México, 2019.
- [15] Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina, <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel3-Tema-4-31>.
- [16] Gerencia de Estadísticas Monetarias - Banco Central de la República Argentina. [https://www.bcra.gob.ar/publicacionesestadisticas/Monetarias\\_financieras.asp](https://www.bcra.gob.ar/publicacionesestadisticas/Monetarias_financieras.asp).
- [17] Secretaría de Energía de la Nación, Producción de Petróleo y Gas, <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/produccion-de-petroleo-y-gas>.
- [18] Ministerio de Energía y Recursos Naturales, Gobierno de la Provincia del Neuquén, Madurez Vaca Muerta, <https://www.energianequen.gob.ar/vaca-muerta-madurez/>.
- [19] Szargut. *EXERGY METHOD: TECHNICAL AND ECOLOGICAL APPLICATIONS*. WIT Press, Southampton, 2005.
- [20] Julija Gusca, Andres Siirde, Meelis Eldermann. *Energy related sustainability analysis of shale oil retorting technologies*. Energy Procedia, 72, 216-221, 2015.
- [21] Qingchun Yang, Yu Qian, Andrzej Kraslawski, Huairong Zhou, Siyu Yang, Meelis Eldermann. *Advanced Exergy Analysis of an Oil Shale Retorting Process*. School of Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, P. R. China, 2016.
- [22] EnergyBusinessReports. *Oil Sands, Gas and Oil Shales*. EnergyBusinessReports.com, 2020.
- [23] Louis Delannoy, Pierre-Yves Longaretti, David Murphy, Emmanuel Prados. *Assessing Global Long-Term EROI of Gas: A Net-Energy Perspective on the Energy Transition*. Energies, 14 (16), pp.5112. 10.3390/en14165112. hal-03322866, 2021.



## LA RADIACIÓN SOLAR EN VILLA MERCEDES – SAN LUIS A PARTIR DE LA TEMPERATURA

Jorge A. Adaro, Jorge N. Diaz

Departamento de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Escuela de Ingeniería y Ciencias Ambientales,  
Universidad Nacional de Villa Mercedes, Balcarce 302, Villa Mercedes – San Luis, Argentina

Email: [jaadaro@unvime.edu.ar](mailto:jaadaro@unvime.edu.ar), [diazjnicolas@gmail.com](mailto:diazjnicolas@gmail.com)

### RESUMEN

El gran incremento de la demanda energética producido en las últimas décadas ha llevado a buscar alternativas en la producción de la energía y que sea amigable con el medio ambiente. La energía solar es una de las alternativas más atractivas ya que es muy abundante y su acceso es prácticamente gratuito, salvo los costos tecnológicos asociados. La hipótesis es que la ciudad de Villa Mercedes y su región de influencia presenta un potencial solar para la utilización de equipamientos que funcionan a partir de la energía solar, pero no cuenta con suficientes datos de irradiación solar diaria. Para el dimensionamiento de sistemas generadores de energía solar fotovoltaica o térmica es necesario contar con datos diarios y hasta horarios de irradiación solar, como también para uso de aplicaciones solar térmicas y arquitectura solar.

En el presente trabajo se estima la irradiación solar global diaria en la Ciudad de Villa Mercedes. Para estimar la irradiación diaria hemos utilizado un método que puede ser fácilmente replicable en otras localidades. En la metodología propuesta se toman datos de temperaturas de Red Estaciones Meteorológicas (REM) de la Universidad de La Punta, y se estima la irradiación diaria utilizando el modelo de Hargreaves y Samani, que utiliza la irradiación solar extraterrestre, los valores máximos y mínimos de temperatura diarios y una serie de constantes para obtener la irradiación solar diaria. La validez del método utilizado es verificada a través de la elevada correlación encontrada entre los datos estimados y los datos medios.

**Palabras clave:** energía solar, irradiación solar, temperatura, modelo de Hargreaves-Samani.



## 1. INTRODUCCIÓN

El gran incremento de la demanda energética producido en las últimas décadas ha llevado a buscar alternativas en la producción de la energía y que sea amigable con el medio ambiente. La energía solar es una de las alternativas más atractivas ya que es muy abundante y su acceso es prácticamente gratuito, salvo los costos tecnológicos asociados. La hipótesis es que la ciudad de Villa Mercedes y su región de influencia presenta un potencial solar para la utilización de equipamientos que funcionan a partir de la energía solar, pero no cuenta con suficientes datos de irradiación solar diaria. Para el dimensionamiento de sistemas generadores de energía solar fotovoltaica o térmica es necesario contar con datos diarios y hasta horarios de irradiación solar, como también para uso de aplicaciones solar térmicas y arquitectura solar.

En el presente artículo se estima la irradiación solar global diaria en la Ciudad de Villa Mercedes. Para estimar la irradiación diaria hemos utilizado un método que puede ser fácilmente replicable en otras localidades. En la metodología propuesta se toman datos de temperaturas de Red de Estaciones Meteorológicas (REM) de la Universidad de La Punta [1], y se estima la irradiación diaria utilizando el modelo de Hargreaves y Samani [2], que utiliza la irradiación solar extraterrestre, la diferencia de temperaturas diaria para el lugar y una serie de constantes para obtener la irradiación solar diaria.

## 2. METODOLOGÍA

Por simplicidad e inmediatez se puede trabajar perfectamente con el modelo de Hargreaves y Samani [2], sin sacrificar precisión, por lo que en el presente trabajo se utiliza este modelo para estimar la irradiación global diaria en la ciudad de Villa Mercedes. En este modelo la irradiación solar diaria se relaciona de manera lineal con la raíz cuadrada de la diferencia, entre la temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y temperatura mínima ( $T_{min}$ ), modulada por la constante solar y un coeficiente "a".

El modelo utilizado se desarrolló combinando la ecuación original de Hargreaves para la estimación de la irradiación solar con la ecuación desarrollada junto con Samani. El modelo utiliza parámetros térmicos y la irradiación solar extraterrestre, que se estima a partir de la latitud. El método presenta la ventaja de que se puede aplicar con sólo datos de temperatura, pero es necesario resaltar que la ecuación supone que la diferencia de temperaturas máxima y mínima se relaciona con la irradiación solar, por este motivo el modelo está sujeto a errores ocasionados por factores meteorológicos como son el viento o la nubosidad al influir estos en el rango térmico diario, y en consecuencia se recomiendan la utilización del método en intervalos de tiempos largos.

Para obtener la irradiación solar extraterrestre es necesario conocer las relaciones astronómicas tierra-sol, los distintos términos y conceptos que definen la posición y el movimiento aparente del



sol con respecto a la tierra en determinados momentos, y sirven para poder estimar la irradiación que llega a la tierra.

La declinación solar es el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la normal a un plano horizontal en la superficie de la Tierra a medida que recorre su órbita. En el hemisferio sur el ángulo de declinación solar varía desde  $+23.45^\circ$  en el solsticio de invierno (21 o 22 de junio) hasta  $-23.45^\circ$  en el solsticio de verano (20 o 21 de diciembre) y se hace nulo en los equinoccios (22 de marzo y 22 de setiembre). La declinación se puede calcular mediante distintas ecuaciones existentes como la propuesta por Spencer [3]:

$$\delta(n) = 0.006918 - 0.0399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 58 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \quad (1)$$

donde  $\Gamma$  es el ángulo diario [rad] que viene determinado por:  $\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365}$ , y  $n$  es el número de día en el año juliano.

Debido a que la fórmula de Spencer es fácil de utilizar en cálculos por computadora y posee un menor margen de error, calculamos la declinación mediante esta fórmula (1), dando el resultado en grados ( $^\circ$ ).

El ángulo horario  $\omega$  indica el desplazamiento angular del sol, de este a oeste, a una tasa de 15 grados/hora debido a la rotación de la tierra. Por convención, se considera el ángulo horario nulo en el mediodía solar, positivo en la mañana y negativo por la tarde. Este ángulo se define sobre el plano del ecuador, como el ángulo entre los meridianos del Sol y el de un observador ubicado en el hemisferio sur. Lo importante para este trabajo es el valor del ángulo horario a la salida o puesta del sol, el cual se calcula mediante la ecuación (2):

$$\cos(\omega_s) = -\operatorname{tg}(\phi) * \operatorname{tg}(\delta) \quad (2)$$

donde  $\phi$  es la Latitud del Lugar [ $^\circ$ ]

La órbita terrestre no es circular, sino que es elíptica con el sol en un foco, la órbita posee una excentricidad y en consecuencia la distancia de la tierra al sol varía en el tiempo y la irradiación presenta una variación estacional de  $\pm 3\%$  debido a esta excentricidad. Para considerar este efecto se utiliza el coeficiente  $E_0$  denominado corrección por excentricidad de la órbita o corrección orbital, que Spencer [3], propone la siguiente expresión en función del ángulo día:

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cos(\Gamma) + 0,001280 \sin(\Gamma) + 0,000719 \cos(2\Gamma) + 0,000077 \sin(2\Gamma) \quad (3)$$

La constante solar representa el flujo de radiación proveniente del sol que cruza por unidad de área, medida en la parte superior de la atmósfera terrestre y en forma normal a los rayos del sol, considerando una distancia de la tierra al sol de 1 UA (unidad astronómica). El valor de la constante solar considerado en este trabajo es  $I_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2$ .

La irradiación solar extraterrestre no tiene el mismo valor que el de la constante solar todos los días, el valor de la irradiación varía diariamente de acuerdo a las condiciones astronómicas y también que este último valor se calcula para un plano horizontal y no para uno normal. Por lo que se debe calcular la radiación solar extraterrestre diaria.

La irradiación solar extraterrestre es la energía por unidad de área sobre un plano horizontal ubicado fuera de la atmósfera. Para calcular la irradiación solar extraterrestre  $H_0$  en un día y latitud determinados, utilizamos la siguiente ecuación tomada de Cooper[4]:

$$H_0 = 24 I_{CS} E_0 (\cos\delta \cos\phi \sin\omega_s + \omega_s \sin\delta \sin\phi) \quad (4)$$

dónde:  $H_0$  es la Irradiación solar extraterrestre en un día [kWh/m<sup>2</sup>/día].

La localidad bajo estudio es Villa Mercedes, en la Provincia de San Luis, una ciudad localizada en centro de Argentina, se ubica a 33,67° de latitud sur y 65,46° de longitud oeste. Presenta un clima semiárido con una temperatura caliente-árida con una media anual de 18°C, posee una clasificación climática BSk como se puede apreciar en el Mapa de climas de Argentina de la Figura 1, que muestra la clasificación según Köppen-Geiger [5], para el intervalo desde 1980 a 2016. El potencial solar de esta ciudad y región es de un nivel importante, de acuerdo al Atlas de Energía Solar de la República Argentina [6], pero no se dispone de datos diarios que permita diseñar las aplicaciones que utilizan la radiación solar.

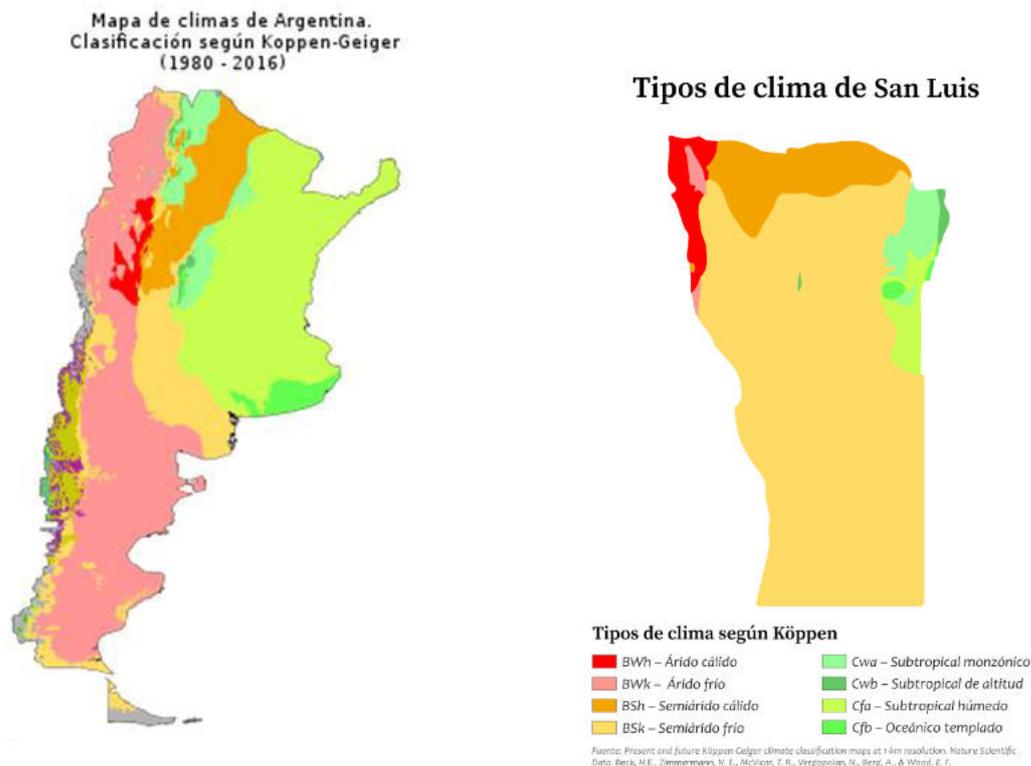


Figura 1: Mapa de Clasificación Climática Köppen-Geiger obtenido de [5]



El método desarrollado en este trabajo consiste en estimar la irradiación solar diaria a partir de datos de temperaturas diarias máxima y mínima. En este caso los datos de temperatura fueron obtenidos del sitio REM [1], el cual registran datos diarios de temperaturas en diversas ciudades de la provincia de San Luis.

Para determinar la constante de ajuste del método se adoptó la propuesta de Annadale [7], y se verifico la correlación utilizamos los datos de radiación global que se encuentran en el sitio web de la NASA [8].

Para estimar esta radiación hemos utilizado el modelo de Hargreaves-Samani, el cual utiliza los valores máximos y mínimos de temperatura diarios y mediante una constante de ajuste “a” denominada transmitancia atmosférica, estima la radiación solar con una buena precisión. La radiación solar diaria en la tierra considerando un plano horizontal en Wh/m<sup>2</sup>, viene determinada por:

$$H = a H_0 \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (5)$$

donde  $a$  es =constante de ajuste que representa la transmitancia atmosférica,  $H_0$  es Radiación solar extraterrestre diaria en Wh/m<sup>2</sup> calculada por la ecuación (4).  $T_{max}$  es la temperatura máxima diaria °C y  $T_{min}$  temperatura mínima diaria en °C.

### 3. RESULTADOS

A partir de la irradiación solar extraterrestre, las relaciones astronómicas y los valores máximos y mínimos de temperaturas vistos anteriormente, se puede estimar la irradiación solar diaria sobre la tierra, la cual es diferente a la irradiación extraterrestre debido a la atmosfera y de los efectos climáticos.

Los valores de temperaturas diarios los hemos obtenido anteriormente, y la diferencia de temperaturas se puede obtener fácilmente a partir de estas. Se utilizan los valores diarios de diferencia de temperaturas entre  $T_{max}$  y  $T_{min}$ , de Villa Mercedes para el año 2017, con los que se tiene las amplitudes térmicas diarias dando noción de proporcionalidad con los valores de radiación.

La constante de ajuste “a” se obtiene basándonos en la propuesta de Annadale et al. (2002), que modificaron el modelo incluyendo una corrección por altitud, proponiendo un nuevo coeficiente:

$$a = (1 + 2,7 \times 10^{-5} z) a' \quad (6)$$

En esta ecuación “a’” es el coeficiente propuesto por Hargreaves [9] para zonas costeras y  $z$  la elevación sobre el nivel del mar (m).



Para Villa Mercedes utilizando la ecuación (6), con una Altitud de 512 metros sobre el nivel del mar, da un valor de constante “a” de 0.1926.

El coeficiente obtenido, está entre los sugerido sugeridos en la bibliografía, que propone que sea igual al valor de 0.16 para localizaciones de interior y 0.19 para zonas costeras.

Con los datos obtenidos se procedió a calcular los valores de radiación a partir del modelo de Hargreaves-Samani, y su correlación con los datos de NASA.

El gráfico de dispersión obtenido a partir de la correlación se muestra en la Figura 2. Se obtiene un coeficiente de correlación de 0.90 lo cual representa un valor muy aceptable. El coeficiente de correlación  $R^2$  toma un valor aproximado de 0.81 por lo que es comparable con los valores obtenidos por la mayoría de los autores en trabajos concernientes a la estimación de la irradiación solar. De este modo se valida el método utilizado en este trabajo y el modelo de Hargreaves-Samani en Villa Mercedes. Los datos estadísticos de la correlación se muestran en la Tabla 1. La Figura 3 muestra una comparación entre los datos medidos y los estimados en el presente trabajo. Se aprecia como la línea roja que representa los valores medidos se asemeja a la línea azul que representa los valores estimados mediante el modelo.

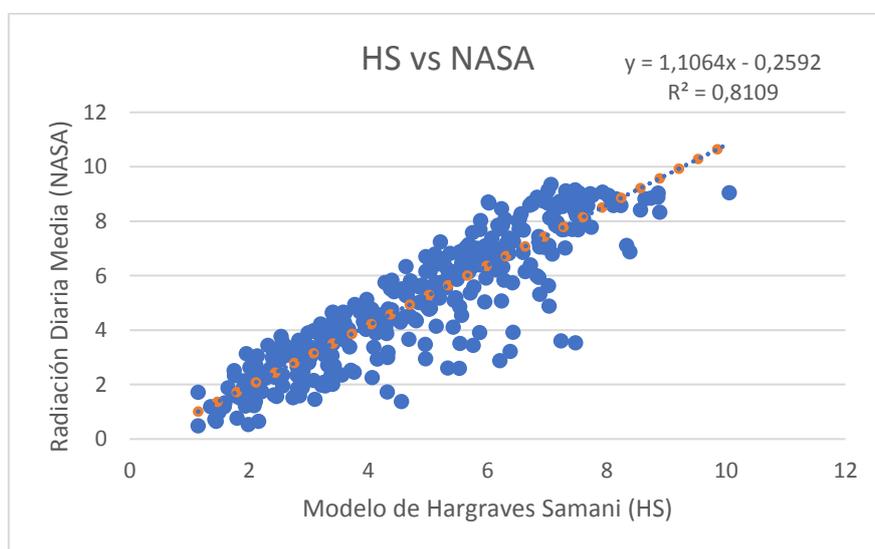


Figura 2: Correlación entre datos estimados por el modelo y medidos

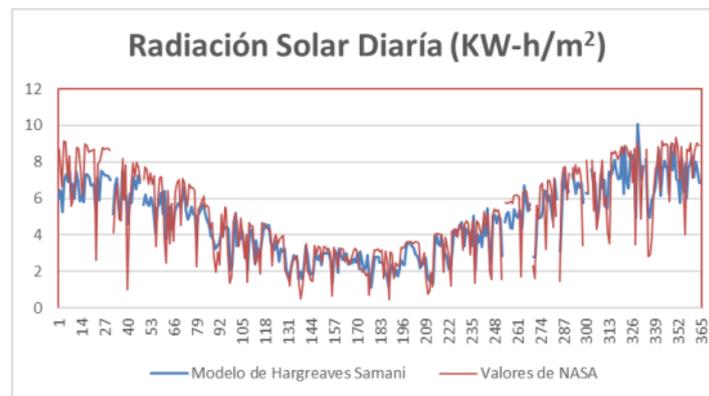


Figura 3: Comparación entre los valores estimados mediante el modelo HS [KWh/m<sup>2</sup>] y los obtenidos de NASA

Tabla 1: Valores estadísticos de la correlación entre los datos medidos y el modelo de Hargreaves Samani.

Números de datos	365
Valores medios de los datos Medidos NASA	5,03 kW/m <sup>2</sup>
Valor medio de Hargreaves Samani	4,78 kW/m <sup>2</sup>
Coefficiente de correlación (de Pearson)	0,9004
Coefficiente de Determinación R <sup>2</sup>	0,8109

#### 4. CONCLUSIONES

Este trabajo fue realizado con la finalidad de proporcionar un método fácil y confiable de estimar datos diarios de irradiación solar que sirvieran para facilitar y promover las aplicaciones en energía solar. Así también proporcionar un modelo factible para realizar la evaluación de la energía solar en la ciudad de Villa Mercedes y localidades próximas de una manera rápida y segura.

Para estimar la irradiación solar se utilizó el modelo de Hargreaves-Samani. El método utilizado tiene la ventaja de estimar la irradiación solar a partir los datos de temperaturas máximas y mínimas, los cuales son fáciles de obtener y se cuenta con estos en casi todo el país. Con estas consideraciones concluimos que:



- a) El modelo de Hargreaves-Samani es un método aplicable, confiable y válido para estimar la radiación solar en alguna localidad. Para Villa Mercedes, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.8109 entre los datos estimados y los datos medidos, lo cual valida y da fiabilidad al uso de este modelo para estimar la radiación en esta localidad.
- b) Se obtuvo un valor para la transmitancia atmosférica “a” igual a 0.1926, el cual coincide con el valor de 0.162 estimado para locaciones que no están en la costa.

La ciudad de Villa Mercedes tiene una irradiación solar global de 4.78 kWh/m<sup>2</sup>/día en promedio anual, proporcionando una energía total anual de 1.74 MWh/m<sup>2</sup>, por lo que posee un potencial solar muy rentable de acuerdo con la clasificación de la Organización Latinoamericana de Energía OLADE, la cual menciona que radiación solar mayor a 4,0 kWh/m<sup>2</sup>/día son rentables y de 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/día muy rentable. Los valores de irradiación más altos corresponden a los meses de diciembre y enero.

## 5. REFERENCIAS:

- [1] REM [en línea] Red de Estaciones Meteorológicas – Universidad de La Punta - Ministerio de Ciencia y Tecnología – Gobierno de San Luis <<https://www.clima.edu.ar>>.
- [2] Hargreaves G.; Samani Z. (1982). Estimating Potential Evapotranspiration, Journal of the Irrigation and Drainage Division, vol. 108, nº 3, pp. 225-230.
- [3] Spencer, J. W. (1971). Fourier series representation of the position of the sun, Search, vol. 2, nº 5, p. 172.
- [4] Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. Solar Energy, vol. 12, pp. 333-346.
- [5] Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B. y Rubel F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, Meteorologische Zeitschrift, vol. 15, nº 3, pp. 259-263.
- [6] Grossi Gallegos H. y Righini R. (2007). Atlas de Energía Solar de la República Argentina. ISBN: 978-987-9285-36-7.
- [7] Annandale, J.G., Jovanic, N.Z., Benade, N. y Allen, R.G. (2002). Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. Irrigation Science 21: 57-67.
- [8] NASA [en línea] Prediction Of Worldwide Energy Resources <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>> [consulta febrero2022].
- [9] Hargreaves, G.H. (1994). Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe. Dept. Paper. Dept. Biol. And Irrig. Eng., Utah State Univ., Logan, Utah.



## ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA SISTEMAS MICRO-EÓLICOS A PARTIR DE INFORMACIÓN DE VELOCIDADES DE VIENTO REGISTRADAS POR ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE USO AGRÍCOLA

Andres Crespo <sup>1</sup>, Leonardo Sanchez <sup>1</sup>, Gabriel Campetelli <sup>1</sup> y Claudio Reineri <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencia (IPSEP), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta 36, Km 603, Río Cuarto (CP: 5.800), Córdoba.  
e-mail: andrescrespo1999@hotmail.com

### RESUMEN

El artículo aborda la temática de la estimación de la energía eléctrica generada por un sistema micro-eólico en un punto geográfico empleando información de velocidades de viento registradas por estaciones meteorológicas de uso agrícola próximas al lugar de instalación. Para ello se ha empleado como referencia un aerogenerador de 1200 W, acoplado a la red, del cual se dispone de su curva característica de potencia vs velocidad del viento, los registros de generación de energía y de velocidad del viento durante un período de observación.

Se compararon los resultados obtenidos mediante el uso de histogramas de velocidad y distribuciones estadísticas. Se utilizaron longitudes de rugosidades obtenidas a través de un método estimativo a partir del factor de ráfaga.

Se puede observar la diferencia en la estimación de la longitud de rugosidad, utilizando la herramienta proveniente del factor de ráfaga en lugar de tablas. También se observa una importante coincidencia en los valores de estimación energética a partir de histogramas de velocidades de tres estaciones meteorológicas en un entorno próximo, lo que sugiere que se podría estimar la generación de energía a partir de dicha información.

El artículo concluye que el uso de histogramas de velocidad es eficaz para estimar la generación de energía de un sistema micro-eólico en un área específica a partir de información de velocidades de viento registradas por estaciones meteorológicas de uso agrícola. Sin embargo, se debe tener en cuenta la variación estacional de la vegetación y la longitud de rugosidad sectorial. Por otro lado, a partir de la diferencia de la estimación de longitudes de rugosidades, se resalta la debilidad del uso de tablas para la estimación de energía.

**Palabras Clave:** *Generación Distribuida, Sistemas Mini/Micro Eólicos, Estimación de Producción de Energía.*



## 1. INTRODUCCIÓN

En el transcurso de las últimas décadas, a partir de las problemáticas inducidas por la dependencia de combustibles fósiles, ha tenido un gran impulso la diversificación de la matriz energética global, particularmente la de generación de energía eléctrica. En tal sentido, en algunos países en vías de desarrollo, como en el caso de Argentina, se proponen a alcanzar un alto porcentaje de generación a partir de fuentes renovables para un futuro próximo [1].

El cumplimiento de tales objetivos admite dos grandes alternativas:

1. Mediante la incorporación de bloques de generación (parques eólicos o solares) en un sentido físico análogo a los clásicos esquemas operativos de los sistemas eléctricos (centrales térmicas, nucleares o hidráulicas, como grandes bloques de generación).

2. A través del desarrollo de los Sistemas de Generación Distribuida (SGD), en donde el clásico "usuario" (residencial, comercial u otra categoría), demandante de EE, puede también generarla e inyectarla en la red adquiriendo la categoría de prosumidor en este nuevo escenario. Su presencia puede resultar en importantes posibilidades de mejoras técnicas (regulación de tensión, reducción de pérdidas eléctricas, de calidad de suministro, etc), de seguridad y confiabilidad, y obviamente ambientales ya que su incorporación desplaza las centrales de generación térmica con combustibles fósiles y consecuentemente la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Que un usuario pueda participar generando y aportando energía a la red obtenida a través de la transformación de un RR implica la posibilidad de un involucramiento directo de la sociedad en el proceso de TE. Particularmente Argentina regula y promueve este sistema mediante la legislación pertinente [2].

Una tecnología alternativa mediante la cual los usuarios pueden participar de un sistema SGD son los aerogeneradores comerciales de baja potencia [3].

Para grandes parque eólicos se han desarrollado métodos probabilísticos que permiten una predicción de generación de energía con muy alta precisión [4]. Sin embargo, la situación resulta considerablemente distinta cuando se trata de instalaciones de baja potencia (mini o micro eólicas) típicas de los SGD.

El objetivo de este trabajo es realizar un aporte en este campo del conocimiento. Se trata entonces de estimar el potencial de generación de energía eléctrica en un punto geográfico para un sistema micro-eólico a partir de datos de velocidad y dirección de viento recopilados mediante estaciones meteorológicas de uso agrícola. También se evalúa la utilización de diferentes métodos para caracterizar el viento, como histogramas de velocidades y distribuciones estadísticas (Weibull y Rayleigh), y se compara la eficacia de estos métodos en la estimación de la energía producida utilizando una curva de potencia vs velocidad del viento de un micro-aerogenerador de referencia.

Además, se utiliza una herramienta para la estimación de la longitud de rugosidad sectorial a partir del factor de ráfagas y se comparan los resultados con los adquiridos a partir de tablas de



longitud rugosidad estándar. También se realiza un análisis de las direcciones del viento en el área de estudio para identificar posibles obstáculos que puedan afectar la circulación del viento. Entre los antecedentes para el estudio, se encuentra la estimación de energía utilizando curva de potencia y tablas de rugosidad, como se observa en [5,6].

También se exploró un método empleando una correlación a través de un modelo matemático [7] entre las velocidades obtenidas en la ubicación del aerogenerador de referencia y las obtenidas a través de una estación meteorológica cercana, pero no se obtuvieron resultados satisfactorios. En dicho trabajo se emplearon tablas de longitud de rugosidad para obtener un parámetro inicial y esto puede ser el origen de tales resultados.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Histograma, distribuciones estadísticas y curva de potencia

En la metodología utilizada en este estudio, se emplearon diferentes herramientas para caracterizar las velocidades de viento registradas por las estaciones meteorológicas, tal y como la construcción de histogramas de frecuencias de velocidades de viento y distribuciones estadísticas como la distribución de Weibull y la distribución de Rayleigh. Además, se utilizó la curva de potencia de un aerogenerador de 1200 W acoplado a la red como referencia.

La curva de potencia, representa la relación entre la velocidad del viento y la potencia eléctrica generada por un sistema micro-eólico. A partir de tal información, provista por el fabricante, es posible estimar la generación de energía eléctrica para cada "bin" de velocidades de viento relacionando la frecuencia de ocurrencia de cada "bin" con el total de las horas del período de evaluación [8].

Los histogramas clasifican, dentro de un determinado período de tiempo, la probabilidad de ocurrencia de las velocidades de viento en ciertos rangos o "bins". Esto permite luego correlacionar la cantidad de horas a la cual el aerogenerador está sometido a cada uno de los rangos de velocidades, para que luego, a partir de su curva de potencia, se pueda conocer la cantidad de energía que se genera en cada "bin". Esto se puede observar en la Figura 1.

Las funciones de densidad de probabilidad, se utilizan para caracterizar el viento y realizar cálculos de potencial energético. Generalmente se trabajan con datos anuales, pero aquí se evaluará la eficacia de las mismas representando periodos de aproximadamente 30 días.

#### 2.1.1 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull, permite calcular el potencial energético y la energía anual que puede producir un aerogenerador. Expresa el comportamiento de las velocidades para un año "medio" o "tipo", por lo que los valores para un año en particular pueden diferir de los calculados a partir

de la misma. El procedimiento de su uso se basa en ajustar los histogramas de frecuencias de velocidades a una distribución de Weibull, Para determinar los parámetros de dicha distribución, se utilizaron los valores registrados promediados para el intervalo de representación junto con la desviación estándar de dicho periodo [9].

### 2.1.2 Distribución de Rayleigh

La representación de Rayleigh, es un caso particular de Weibull. Es más sencilla de tratar al tratarse de una función de un solo parámetro (velocidad media). En casos de baja turbulencia y pequeña variabilidad del viento, su distribución se ajusta bastante bien a una ley de Rayleigh. Muchos fabricantes de aerogeneradores indican la energía anual que puede obtenerse de la máquina, a partir de la velocidad media anual del viento a la altura del buje de la máquina, por lo que se utiliza la distribución en cuestión [9].

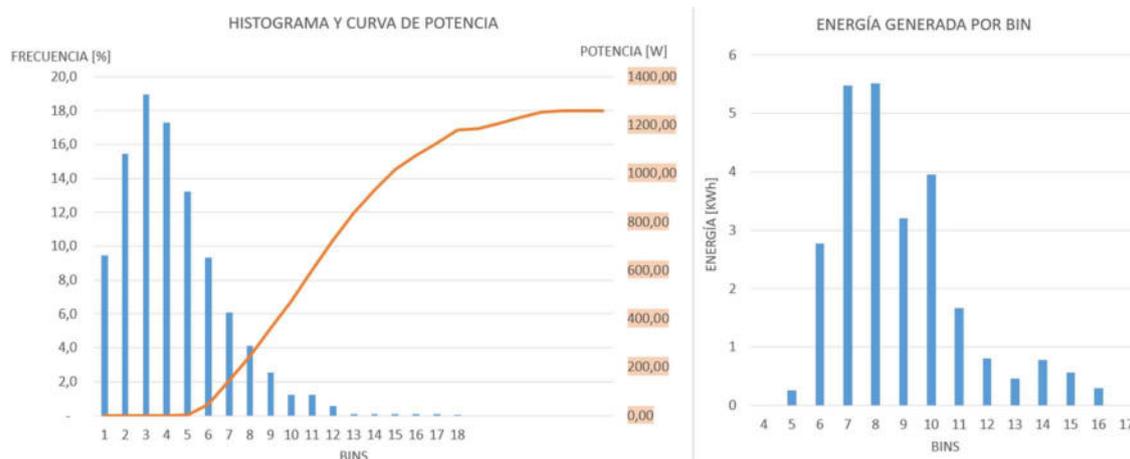


Figura 1: Histograma y curva de potencia- estimación de energía generada por bin

## 2.2 Aerogenerador, medidor-registrador e inversor

El aerogenerador utilizado como referencia en este estudio fue el modelo Aerogenerador Giacobone EOLUX 1200 48V, con una capacidad de generación de 1200 W. Este aerogenerador se encuentra a una altura de 21 metros del suelo, y posee un rotor de 2.15 metros de diámetro. Para medir la energía generada, se utilizó un medidor de energía eléctrica modelo discar DiMET-G. Además, se usó el inversor modelo ABB UNO-2.0- I- OUTD- W para acoplar a la red.

## 2.3 Estaciones meteorológicas disponibles

Se presentan en la Tabla 1 las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio, junto con su ubicación geográfica para obtener información de las condiciones meteorológicas en el área del estudio.

Tabla 1. Información de las estaciones meteorológicas disponibles

Denominación de estación	Altura de medición	Información adicional
IPSEP	17 metros	Ubicada en la torre del aerogenerador de referencia
Agronomía	2 metros	Ubicada en la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Río Cuarto
La Rural	2 metros	Pertenciente a un programa de la Provincia de Córdoba
Sol de Mayo	1.75 metros	Pertenciente a un privado en la Provincia de Córdoba, datos obtenidos a partir de eccowitt

## 2.4 Ubicación de estaciones meteorológicas y disposición de aerogenerador

En la Figura 2 se observa la ubicación de las estaciones meteorológicas en una imagen satelital del entorno de la ciudad de Río Cuarto y la disposición del aerogenerador de referencia en conjunto con su estación meteorológica.

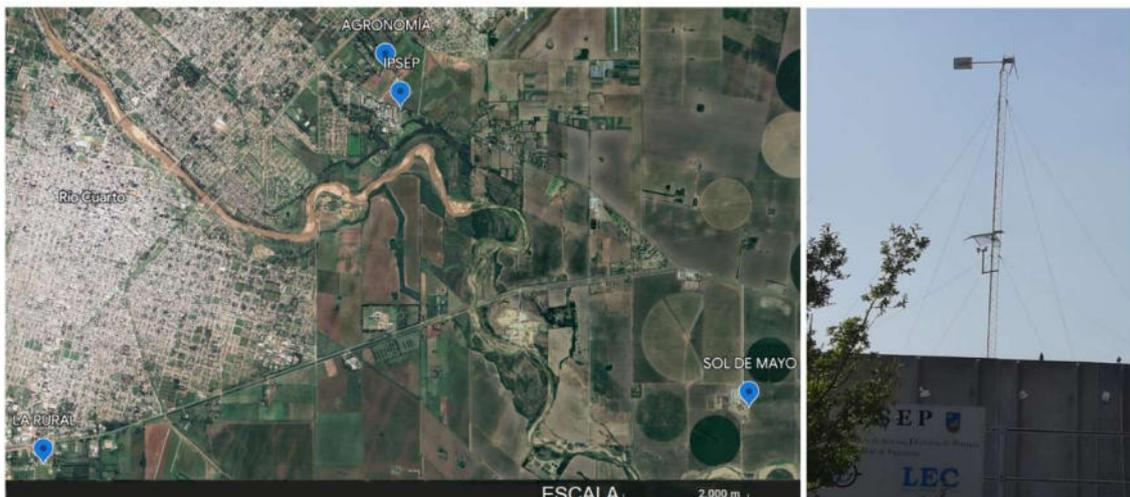


Figura 2: Georreferenciación de estaciones meteorológicas y disposición del aerogenerador y su correspondiente estación meteorológica

## 2.5 Perfil vertical del viento.

Al perfil vertical del viento se lo utiliza para referenciar a la altura del rotor del aerogenerador las velocidades del viento medio medidas por las estaciones meteorológicas, La variación de las velocidades se debe principalmente a turbulencias de orígenes mecánico y térmico. Las primeras causadas por las irregularidades de la superficie del suelo (relieve, obstáculos y rugosidad) y las segundas, por el gradiente vertical de temperatura que crea corrientes convectivas verticales. Al ser  $U_1$  y  $U_2$  dos velocidades medias (ej, cada 10 min), a las alturas  $Z_1$  y  $Z_2$  respectivamente, existe una correlación, entre dichas variables dadas por la Ecuación (1). Donde  $z_0$  es la longitud de rugosidad del terreno [9].



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)} \quad (1)$$

## 2.6 Longitud de rugosidad de terreno ( $z_0$ ), por tablas, y método factor de ráfaga

Para la obtención valores de  $z_0$ , se realizan mediciones a distintas alturas utilizando mástiles anemométricos. Sin embargo, esta opción no siempre es posible debido a diversas limitaciones. En aquellos casos en los que no se cuenta con mediciones de viento a distintas alturas se ha utilizado un enfoque basado en "tablas de longitud de rugosidad" para estimar  $z_0$  en terrenos homogéneos [10]. Sin embargo, este método puede ser poco preciso ya que no todos los terrenos son homogéneos en la realidad lo que puede conducir a errores en la estimación de  $z_0$ . Para superar esta limitación se ha propuesto el uso del método basado en el factor de ráfaga utilizado en [11] el cual resulta apropiado cuando a partir de la estación es posible disponer de ráfagas máximas, velocidad promedio del viento y la dirección en el momento de la ocurrencia de la ráfaga. El método permite una estimación más refinada de la longitud de rugosidad al sectorizar la estimación en función del factor de ráfaga, denotado como  $\langle G \rangle$ . Si las estaciones involucradas cuentan con lo enunciado, es posible definir la longitud de rugosidad para sectores de 30 grados, según la Ecuación (2).

$$z_{0g(\text{sector})} = z_s \exp\left(-\frac{A f_t \left\{1.42 + 0.3 \ln\left(-4 + \frac{10^3}{U_t}\right)\right\}}{\langle G \rangle_{(\text{sector})} - 1 + A - f_t A}\right) [m] \quad (2)$$

Donde,  $Z_s$  es la altura de medición,  $A$ , es la atenuación de  $U_1$  provista por el anemómetro.  $U_t$ , es la longitud de onda promedio de las ráfagas máximas observadas por la combinación dada de estación (anemómetro y registrador), y varía generalmente entre 50 y 100 m. La mediana del factor de ráfaga,  $\langle G \rangle_{(\text{sector})}$ , es para un sector angular determinado, y este factor está dado por la relación entre la velocidad de ráfaga y la velocidad promedio ( $U_1$ ) de una muestra.

La variación de  $f_t$ , según el tiempo donde se promedia, está definido por Oemraw [12], como la Ecuación (3), donde  $T$  hace referencia a los minutos de promediado.

$$f_t = 0.002 T + 0.98 \quad (3)$$

La determinación de los parámetros  $A$  y  $U_t$ , parámetros de calibración de las estaciones, se obtienen a partir de la clasificación indicada en [13]. Asumiendo los valores más adecuados para las estaciones utilizadas, se toma  $U_t = 30$  m y  $A = 0,93$ .

## 2.7 Rosa de vientos

En este estudio se utiliza la rosa de los vientos para caracterizar los vientos [9]. Se busca identificar posibles variaciones en la caracterización del viento en una estación meteorológica en



comparación con otras estaciones. Esto se hace para observar si los vientos tienen patrones similares o si existen variaciones debido a obstáculos. Esta información es útil para determinar cuándo es posible comparar la estimación de generación de energía y cuándo no. La conformación de la rosa de vientos se realiza a partir de un procedimiento similar a la de los histogramas de velocidades, presentado en 2.1, pero en este caso con las direcciones, en donde se grafica la frecuencia de ocurrencia para un número de grupos de direcciones determinados (completando los 360 grados agrupadas cada 20 grados). La frecuencia de ocurrencia es obtenida a partir de cotejar la cantidad de muestras de cada grupo de direcciones con la cantidad total de mediciones.

### 3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados y análisis del estudio. El mismo se realiza para diversos períodos asociados a meses del año 2022. Se empleó información de las 4 estaciones meteorológicas.

Se utilizó el perfil vertical planteado en 2.5 para elevar los registros de velocidades de todas las estaciones a 21m (altura a la cual se ubica el aerogenerador de referencia) y se hizo uso del método planteado en 2.6 para determinar la longitud de rugosidad de terreno. Además, se utilizó la curva de potencia del aerogenerador de referencia.

A continuación, se describe el contenido de las subsecciones:

En la subsección 3.1 del estudio, se utiliza la información recopilada por la estación ubicada en la base del aerogenerador (IPSEP) para estimar la cantidad de energía que el aerogenerador produce. Para hacerlo se emplea la curva de potencia del equipo y se comparan los resultados obtenidos a partir de tres métodos de caracterización de la velocidad del viento: histogramas de frecuencia y las distribuciones estadísticas mencionadas en las secciones 2.1.1 y 2.1.2 respectivamente en relación a la energía medida por el equipo de medición.

En la subsección 3.2 se hace uso de la rosa de los vientos con el fin de visualizar que los datos de vientos recopilados por la estación IPSEP no poseen las mismas características que las estaciones RURAL y Agronomía. Por este motivo se descartan los datos de la estación en cuestión para el análisis de 3.3.

En la subsección 3.3, se compara la energía estimada a partir de información de las estaciones La Rural y Agronomía suponiendo que el aerogenerador de referencia está ubicado donde se encuentran las estaciones y mediante el uso de histogramas. Por otro lado, en la sección 3.3.1 se comparó un nuevo período agregando los datos provenientes de la estación Sol de Mayo; el motivo de esta decisión está basado en el hecho de que sobre la misma se dispone solo de 11 días continuos de información asociados al mes de marzo.



En la subsección 3.4, para el período indicado en 3.3.1, se estimó la generación de energía variando el método para la obtención de la  $z_0$ , visualizando los efectos de dicha variación.

### 3.1 Estimación de energía a partir de histogramas y distribuciones estadísticas a partir de datos de la estación al pie del aerogenerador

En la Tabla 2 se puede ver la estimación de energía producida por el aerogenerador de referencia a partir de la medición de velocidades provista por la estación meteorológica ubicada al pie del aerogenerador (IPSEP) durante 11 meses del año 2022. En la tabla en cuestión es posible visualizar la energía registrada por el medidor de energía y la estimada a partir del uso de histogramas y las funciones de distribución de Rayleigh y Weibull.

Tabla 2. Energía medida y estimada empleando histogramas y las funciones de distribución

Periodo	MEDIDOR[kWh].	HISTOGRAMA[kWh].	Rayleigh[kWh].	Weibull[kWh].
ENERO	29,40	22,41	9,03	22,48
FEBRERO	25,60	17,66	4,41	18,02
MARZO	40,93	40,65	15,28	41,01
ABRIL	31,40	32,27	14,69	32,57
MAYO	14,65	12,73	2,65	11,68
JULIO	30,43	28,01	11,59	28,09
AGOSTO	34,86	45,1	16,27	44
SEPTIEMBRE	41,33	55,64	20,29	55,99
OCTUBRE	51,76	69,16	32,81	71,3
NOVIEMBRE	50,72	39,36	0,21	13,19

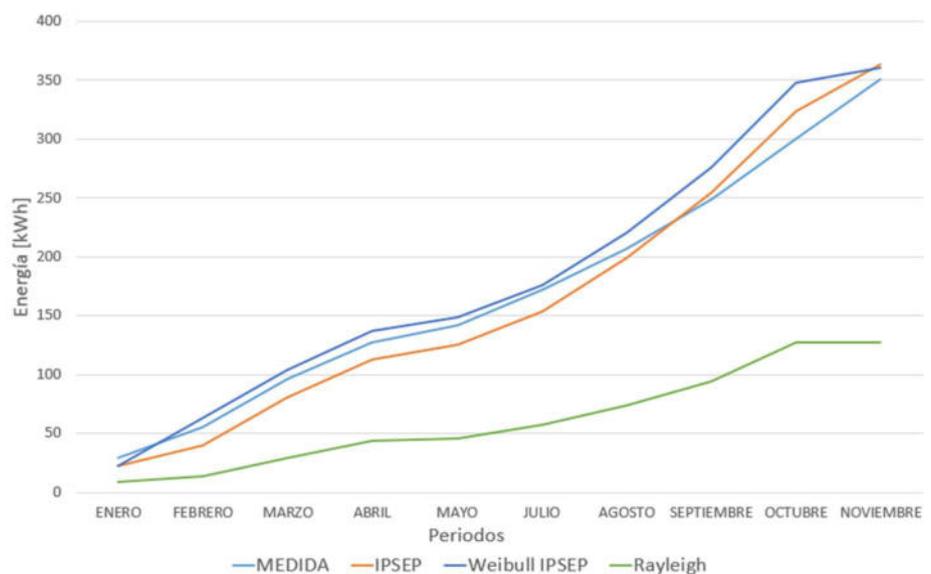


Figura 3: Comp. energía acumulada medida, y estimada a partir de histogramas/ distribuciones



En la Figura 3 se muestra la energía acumulada mes a mes. Si bien es observable una diferencia importante en los valores de energía que se muestran en la Tabla 2, cuando tales magnitudes se muestran acumuladas a lo largo del tiempo tales diferencias se reducen considerablemente. Esto se manifiesta tanto para las estimaciones a partir de histogramas como para cuando se emplea la distribución de Weibull.

### 3.2 Análisis rosas de viento de los emplazamientos

En la Figura 4 se muestra la representación gráfica de la rosa de vientos para el mes de marzo de las estaciones IPSEP, Agronomía y La Rural. Se puede observar que la rosa de vientos de la estación IPSEP discrepa en gran medida a la rosa de vientos generada a partir de los datos de las otras 2 estaciones. Por este motivo se descartan los datos provenientes de la estación IPSEP, para el próximo análisis.

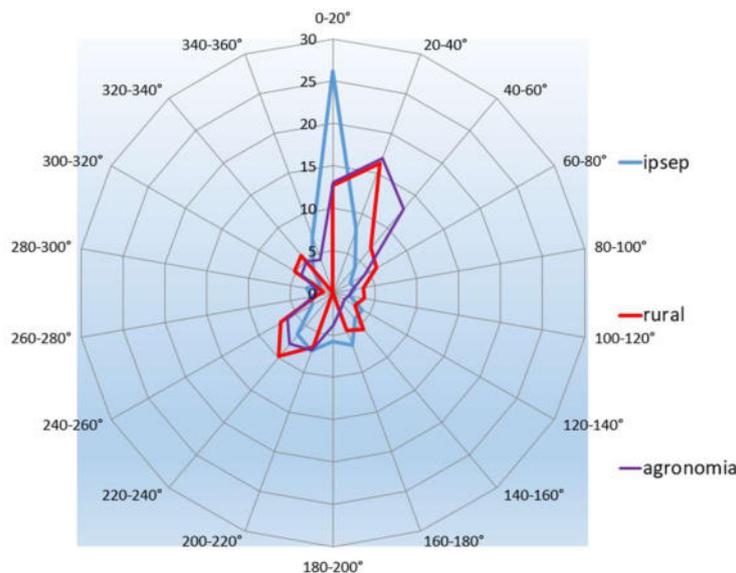


Figura 4: Rosa de los vientos correspondiente a un período analizado

### 3.3 Estimación de energía del aerogenerador con datos de otras estaciones

Tabla 3. Estimación para diversos periodos a partir de diversas estaciones meteorológicas

MES	Estimación de energía [kWh]			
	La Rural	Agronomía	La Rural ac.	Agronomía ac.
ENERO	65,83	85,04	65,83	85,04
FEBRERO	45,85	64,09	111,68	149,13
MARZO	91,51	103,65	203,19	252,77
ABRIL	66,38	88,19	269,57	340,96
JULIO	44,80	88,05	314,37	429,01
AGOSTO	80,56	95,72	394,94	524,72
SEPTIEMBRE	100,49	122,04	495,43	646,76
OCTUBRE	137,10	172,78	632,53	819,55
NOVIEMBRE	167,16	194,44	799,69	1013,99



A partir de lo comentado y visualizado en la representación de la rosa de vientos, se han descartado los datos de la estación IPSEP y en la Tabla 3 se compara la estimación de generación de energía empleando los histogramas de las estaciones Agronomía y La Rural. Se puede observar una importante coincidencia en la estimación de energías a partir de ambas estaciones.

### 3.3.1 Inclusión de la estación “Sol de Mayo” en la estimación

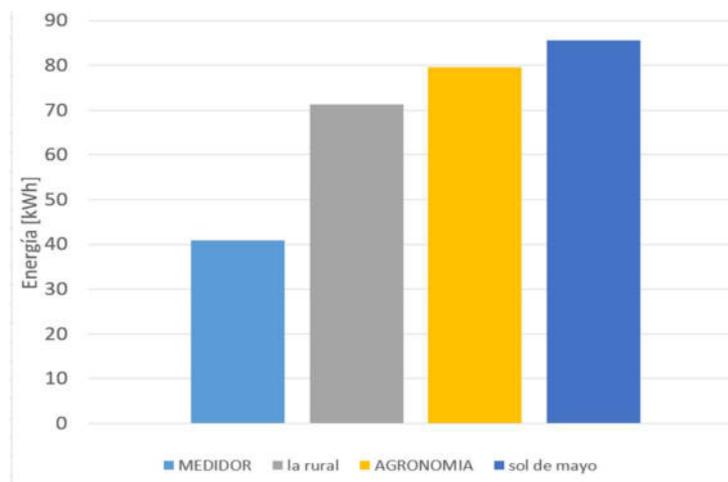


Figura 5: Energía estimada a partir de registros de 3 estaciones

En la Figura 5 se muestra la energía estimada para el periodo en cuestión. Se observa una amplia consonancia en la estimación de generación de energía a partir de los histogramas, registrados a partir de las 3 estaciones bajo análisis. Se advierte la discrepancia de las tres estimaciones con la energía medida por el medidor de energía.

### 3.4 Visualización del efecto en la selección del método utilizado en la estimación de la longitud de rugosidad para la estimación de la generación de energía

Para visualizar el efecto en la selección del método de la estimación de longitud de rugosidad se toma como referencia el período de marzo acotado donde se cuenta con las 3 estaciones. Se estima la generación de energía a partir de los datos de las 3 estaciones. Se ajusta la longitud de rugosidad de terreno, a partir de tablas según [10], pudiéndose establecer para las estaciones Agronomía y Sol de Mayo  $z_0=0,15\text{m}$  (cultivo con granos) y para la estación La Rural, se ajustó  $z_0=0,35\text{m}$  (matorrales continuos). Es de interés observar, en función de las tablas, que para estudios anuales es necesario tener en cuenta la variación estacional de la vegetación.

En la Tabla 4 se muestra la longitud de rugosidad de terreno determinada según el método descripto para las distintas estaciones, observándose una considerable variabilidad de la longitud



de rugosidad en relación al sector. Esto pone de manifiesto el problema de operar con tablas de longitud de rugosidad a la hora de suponer los terrenos como homogéneos.

Tabla 4. Long. de rugosidad para diversos sectores y distintas estaciones meteorológicas en metros [m]

SECTOR	La Rural	Agronomía	Sol. de mayo
1	0,32	0,14	0,05
2	0,39	0,09	0,22
3	0,42	0,07	0,43
4	0,48	0,13	0,3
5	0,16	0,31	0,22
6	0,39	0,27	0,15
7	0,36	0,2	0,02
8	0,39	0,07	0,07
9	0,24	0,08	0,4
10	0,33	0,18	0,43
11	0,32	0,01	0,15
12	0,3	0,3	0,04

En la Tabla 5 se puede observar el efecto de la selección del método para definir la longitud de rugosidad de terreno ( $z_0$ ) en la generación de energía. El método derivado de tablas para terrenos homogéneos tiene una elevada dispersión debido a que está basado en un número limitado de opciones (según tamaño de tablas). También  $z_0$ , se define por inspección visual con lo cual esto puede influir en la estimación de la longitud de rugosidad y por ende en la estimación de energía.

Tabla 5. Energía estimada [kWh], a partir de la selección de  $z_0$  por tablas y a partir de 2.6

Estación	Energía ( $z_0$ a partir de tablas)	Energía( $z_0$ a partir de factor de ráfaga)
La Rural	72,98	71,29
Sol de mayo	96,35	68,26
Agronomía	97,88	79,62

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha observado que tanto el histograma de velocidades como la distribución de Weibull son métodos efectivos para caracterizar el viento en estos periodos. Aunque cabe destacar que ambos presentaron algunos errores en relación a la medición de energía durante los periodos de prueba. Estos errores fueron acotados al visualizar la estimación de la energía acumulada. Por otro lado, se resalta la baja efectividad cuando se emplea la distribución de Rayleigh en la estimación de generación de energía. Esto muestra las debilidades de este modelado para tales objetivos.

Los resultados sugieren que es posible utilizar histogramas de estaciones meteorológicas locales de uso agrícola para estimar la generación de energía eólica para micro-aerogeneradores.



Se debe tener especial cuidado en el uso de tablas de longitud de rugosidad en la estimación de energía ya que, por un lado, se suponen a los terrenos homogéneos no teniendo en cuenta las posibles variaciones direccionales, y por otro, el efecto de selección de longitud de rugosidad por inspección visual. Además, la estimación a partir de tablas debe contemplar la estacionalidad.

## 5. REFERENCIAS

- [1] *Ley 27.191: Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación.* 2015.
- [2] *Ley 27.424: Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública.* 2017.
- [3] IEC 61400-2, Small Wind Turbines. The International Electrotechnical Commission (IEC). 2013.
- [4] Mortensen, N. G., Heathfield, D. N., Myllerup, L., Landberg, L., Rathmann, O., Troen, I., & Lundtang Petersen, E. (2003). *Getting started with WASP 8.* Risø National Laboratory. Risø-I No. 1950, 2003.
- [5] Oñate Males, *Estimación de la producción de energía eléctrica en base a la velocidad de viento registrado en la estación meteorológica ubicada en el Campus Sur de la Sede Quito de la Universidad Politécnica Salesiana.* Tesis, Universidad politécnica Salesiana, 2020.
- [6] Gutiérrez Sola. *Estudio del recurso eólico en Cantabria mediante modelos regionales y su aplicación.* Tesis, Universidad de Cantabria, 2013.
- [7] Perez, Falco, Careglio, *Correlaciones referidas al recurso eólico en Río Cuarto.* Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 6,39-44,2002.
- [8] IEC 61400-12-1, Wind energy generation systems- Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines. The International Electrotechnical Commission (IEC). 2017.
- [9] Lopez, M .V.. *Ingeniería de la energía eólica Primera Edición.* Marcombo, España. 2012.
- [10] Wiernga, J. *Representative roughness parameters for homogeneous terrain.* Boundary-Layer Meteorology, 63, 323-363, 1993.
- [11] Wieringa, J. *Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages.* Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 112, 473, 867-889, 1986.
- [12] Oemraw, B. *Beschuttingscorrectie wind.* Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Netherlands, 1984.
- [13] Wieringa, J. *Does representative wind information exist?.* Journal of wind engineering and Industrial Aerodynamics, 65, 1-3, 1-12, 1996.



## INCORPORACIÓN DE GENERACIÓN ELÉCTRICA RENOVABLE EN LA FORMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA DE UN EDIFICIO UNIVERSITARIO

Sergio M. Arocas <sup>1</sup>, Geraldine D. Coria Hoffmann <sup>2</sup>, Ivan Calla <sup>3</sup>

<sup>1</sup> UIDET-IAME, Facultad de Ingeniería UNLP, Calle 1 y 47, La Plata, Argentina, martin.arocas@ing.unlp.edu.ar

<sup>2</sup> UIDET-IAME, Facultad de Ingeniería UNLP, Calle 1 y 47, La Plata, Argentina, geraldine.coria@ing.unlp.edu.ar

<sup>3</sup> UIDET-IAME, Facultad de Ingeniería UNLP, Calle 1 y 47, La Plata, Argentina, ivancalla20@gmail.com

### RESUMEN

La gestión energética en edificaciones permite conocer las características del suministro y de la demanda, continuando con la evaluación y aplicación de acciones para disminuir el consumo energético, el gasto y las emisiones relacionadas a la energía. Cuando esto se realiza dentro de un sistema de gestión de la energía (Norma ISO 50001:2018), se procura la mejora continua.

Este trabajo tiene como objetivo incorporar una instalación solar fotovoltaica on-grid en la formulación del plan de acción del sistema de gestión de la energía para un edificio universitario. Para el dimensionamiento, se evaluó el recurso solar disponible en la terraza del edificio en estudio, Departamento de Mecánica Facultad de Ingeniería UNLP, considerando ángulos de inclinación y orientación (respecto al Norte) de los paneles fotovoltaicos de 30° y 45°, respectivamente. El ángulo de orientación seleccionado permite facilitar la instalación eléctrica y la disposición de los paneles en la terraza, a expensas de una disminución del 5% de la radiación solar incidente anual. Se considera abastecer la demanda de energía de iluminación, contando al 2019 con luminarias de tecnología fluorescente en gran parte de sus locales. Se determinó que la cantidad de paneles fotovoltaicos de 415 Wp, teniendo en cuenta la variación mensual de la demanda, del recurso solar y del performance ratio de la instalación, resulta entre 89 y 194.

Pero, como la instalación formará parte del plan de acción de un sistema de gestión de la energía, se re-evaluó la cantidad de paneles considerando las demás acciones involucradas en el plan, resultando entre 52 y 110 de esos paneles.

Concluyendo, la generación renovable no puede ser concebida de forma independiente a las demás medidas del plan de acción. Se propone, entonces, la inclusión de una instalación solar fotovoltaica de 29,88 kWp, dentro de la formulación del sistema de gestión del edificio universitario.

**Palabras Clave:** *Energía, Gestión, Fotovoltaica*



## 1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un recurso necesario para realizar las distintas actividades de las personas y el uso eficiente de la misma conlleva beneficios económicos y ambientales. Así, el ahorro de energía eléctrica permite disminuir el consumo de combustibles en la generación de electricidad reduciendo también la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera.

Además el aprovechamiento del recurso solar disponible da la posibilidad de mejorar los beneficios antes mencionados y por ello se considera el diseño de una instalación solar fotovoltaica que permita dar cumplimiento al marco regulatorio vigente, más precisamente la Ley N°27.191 *Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica* y Ley N° 27.424 y su modificatoria donde se establece el *Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable integrada a la Red Eléctrica Pública* y se incorpore al plan de acción del sistema de gestión de la energía de un edificio educativo.

El objetivo de este trabajo es incorporar una instalación solar fotovoltaica on-grid en la formulación del plan de acción del sistema de gestión de la energía para un edificio universitario.

Para esto resulta necesario determinar el recurso solar disponible en la ubicación geográfica, la potencia eléctrica instalada de iluminación en el Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería UNLP y la demanda de energía anual.

Considerando que la instalación fotovoltaica forma parte de un plan de acción, se compara el diseño de la misma en la situación actual frente a una nueva situación que se pudiera lograr luego de aplicar medidas de eficiencia energética.

## 2. DESARROLLO

Para el diseño una instalación solar fotovoltaica resulta necesario analizar el recurso solar disponible en el lugar donde se proyecta su ubicación y definir una demanda de diseño que permita determinar la cantidad de paneles necesarios. Se definen la situación actual y una situación donde se implementen previamente medidas de eficiencia energética a fin de optimizar el aprovechamiento de la energía generada con la instalación fotovoltaica. A continuación, se analiza el recurso solar y se determina la demanda de energía eléctrica de diseño.

### 2.1. Recurso solar

En el diseño de instalaciones fotovoltaicas fijas (sin seguimiento solar), se debe definir el período del año para el que se quiere maximizar la energía solar recibida y esto se puede dar en los meses de verano, invierno o el máximo promedio anual, dependiendo de las características de



la demanda a abastecer. A los fines comparativos en el diseño de una instalación fotovoltaica que cubra la demanda de energía eléctrica correspondiente a la instalación de iluminación del Departamento de Mecánica, se considera el criterio de máximo aprovechamiento del recurso solar en el año. Bajo este criterio, para determinar la inclinación óptima, se recomienda en la práctica utilizar la Ecuación (1) [1].

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \cdot |\phi| \quad (1)$$

donde,  $\beta_{opt}$  es el ángulo de inclinación óptimo y  $\phi$  la latitud del lugar.

Así es que, siendo la latitud  $34,92^\circ$ , se determina  $\beta_{opt} = 27,79^\circ \approx 28^\circ$ .

El recurso solar disponible en el lugar de emplazamiento del sistema fotovoltaico a dimensionar se obtiene utilizando datos estadísticos disponibles en la aplicación *Power Data Access* [2], donde se presenta la irradiación en el plano horizontal (HH) y la irradiación corregida (HT) se obtiene mediante el factor de transposición el cual se obtiene de tabla según dos criterios, uno en función de la orientación y el segundo de acuerdo a la inclinación que se adopte para los paneles fotovoltaicos.

Se considera la ubicación de la instalación fotovoltaica en la terraza del edificio y paralela a la línea arquitectónica, que se encuentra con una orientación de  $45^\circ$  Oeste respecto del Norte. En la Tabla 1 se presenta el recurso solar disponible en el plano horizontal, el factor de transposición (R) [3] y el recurso disponible en el plano inclinado, para un ángulo de orientación de  $45^\circ$  Oeste y una inclinación de  $30^\circ$ .

Tabla 1. Determinación de la irradiación promedio diaria corregida para los meses del año.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>HH</b> [kWh/m <sup>2</sup> *día]	7.27	6.33	5.20	3.90	2.70	2.29	2.40	3.16	4.43	5.51	6.81	7.43
<b>R</b>	0.94	0.96	1.04	1.14	1.26	1.32	1.28	1.18	1.07	0.99	0.95	0.93
<b>HT</b> [kWh/m <sup>2</sup> *día]	6.83	6.08	5.41	4.45	3.40	3.02	3.07	3.73	4.74	5.45	6.47	6.91

Se analiza el efecto de la orientación de  $45^\circ$  Oeste (respecto al Norte) en el aprovechamiento del recurso solar, resultando en una pérdida en promedio del 5% disponible en el año y se distingue que en los meses de invierno la pérdida es de 11%. En la Tabla 2 se detalla mes a mes la pérdida del aprovechamiento del recurso solar.



Tabla 2. Porcentaje de energía solar de pérdida por orientación.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Azimut 0º, Inclinación 30º HT [kWh/m2*día]</b>	6.76	6.26	5.62	4.76	3.78	3.41	3.43	4.04	4.96	5.56	6.40	6.83
<b>Azimut 45º O, Inclinación 30º HT [kWh/m2*día]</b>	6.83	6.07	5.41	4.45	3.40	3.02	3.07	3.72	4.74	5.45	6.47	6.91
<b>Porcentaje de pérdida [%]</b>	<b>-1.08</b>	<b>3.03</b>	<b>3.70</b>	<b>6.56</b>	<b>10.00</b>	<b>11.41</b>	<b>10.49</b>	<b>7.81</b>	<b>4.46</b>	<b>1.98</b>	<b>-1.06</b>	<b>-1.09</b>

En síntesis, para el diseño de la instalación solar fotovoltaica se considera el criterio de máximo aprovechamiento anual del recurso solar, así el ángulo de inclinación adoptado es de 30º y la línea arquitectónica del edificio define que la orientación de los paneles es de 45º Oeste. La pérdida de energía solar por orientación se acepta a fin de simplificar la construcción.

## 2.2. Determinación de la demanda de energía eléctrica de diseño

Para determinar la demanda de energía eléctrica de diseño se realiza el relevamiento de la potencia eléctrica instalada en el edificio del Departamento de Mecánica y se considera dimensionar una instalación fotovoltaica para atender el consumo de iluminación. Para esto se relevan las luminarias en cada sector del edificio y se estima la cantidad de horas de funcionamiento según la ocupación programada de cada aula y para las oficinas, baños y demás sectores se realiza una estimación en función del uso de cada sector.

En el relevamiento se observó que las luminarias instaladas correspondían en su mayoría a tubos fluorescentes y lámparas fluorescentes compactas (lámparas de bajo consumo). Por lo tanto, previo al dimensionamiento del sistema fotovoltaico, se analiza cómo afecta al consumo de energía el reemplazo tecnológico a luminarias led, resultando en una disminución de 43% en la energía utilizada. Es por eso que para el diseño de la instalación fotovoltaica, se tiene en cuenta, además de la situación actual, el consumo de energía eléctrica del edificio luego del reemplazo del tipo de luminarias, aplicando así uno de los criterios de uso racional de la energía previo a la implementación de generación a partir de fuentes renovables, el cual forma parte del plan de acción en el marco del sistema de gestión de la energía que se viene desarrollando. En la Tabla 3 se puede observar una comparación de la potencia instalada en cada sector del edificio, así como la estimación de la energía consumida por día para el sistema de iluminación con luminarias fluorescentes (situación actual) y luminarias led (situación con eficiencia energética).



Tabla 3. Comparación de potencia eléctrica instalada y energía diaria consumida para el sistema de iluminación con fluorescentes y luminarias led del edificio del Departamento de Mecánica.

Sector	Horas de uso [h/día]	Tubos fluorescentes		Tubos led	
		Potencia instalada [W]	Energía [Wh/día]	Potencia instalada [W]	Energía [Wh/día]
Secretaría plata baja	8	1732	13586	816	6528
Taller y oficinas del IAME	10	3304	33040	1880	18800
Buffet	11	1324	14564	636	6996
Baños planta baja	3	208	624	96	288
Hall planta baja	6	624	3744	288	1728
Aulas 1er piso	6	2340	14040	2340	14040
Baños 1er piso	6	728	4368	336	2016
Hall 1er piso	12	1160	13920	552	6624
Aulas 2do piso	6	2340	14040	2340	14040
Baños 2do piso	6	728	4368	336	2016
Hall 2do piso	12	1432	17184	672	8064
Oficinas 3er piso	5	4188	20940	1632	8160
Baños 3er piso	4	624	2496	288	1152
Hall 3er piso	4	2556	10224	1188	4752
<b>Total</b>	-	<b>23288</b>	<b>167408</b>	<b>13400</b>	<b>95204</b>

En la situación actual, se observa que las aulas del primer piso y aulas del segundo piso ya cuentan con iluminación LED. Mientras que en las áreas restantes es posible el reemplazo tecnológico de las luminarias hacia tecnología led, tal como se considera en el plan de acción correspondiente al sistema de gestión de la energía. Con este reemplazo se puede disminuir el consumo de energía eléctrica en iluminación de 167,4 kWh a 95,2 kWh al día, lo que representa una reducción del 43% del consumo de energía actual en iluminación.

Se consideran estos consumos de energía como demanda de diseño de la instalación solar fotovoltaica.



### 3. DISEÑO DE LA INSTALACION SOLAR FOTOVOLTAICA

Para el diseño de la instalación solar fotovoltaica se considera la demanda de energía estimada y esta se corrige teniendo en cuenta las pérdidas por diferentes factores, como las atribuidas al rendimiento del inversor y por efecto Joule en los cables de conexión [4].

La energía demandada corregida (EDC) y el factor de corrección de la demanda (FCD) se obtienen a partir de las Ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

$$EDC = \frac{ED}{FCD} \quad (2)$$

$$FCD = 1 - K_c - K_v \quad (3)$$

Donde: ED es la demanda de energía de diseño.

$K_c$  es el coeficiente de pérdidas del inversor el cual cuantifica la diferencia de energía entre la entrada y la salida del mismo, teniendo un valor de 0,05 para un inversor de onda senoidal pura.

$K_v$  representa las pérdidas por variaciones en la red y efecto Joule en los cables siendo 0,05 a 0,15 los valores de referencia; el valor utilizado es 0,1.

En la Tabla 4 se resume la energía demandada corregida para la situación actual y la situación donde la instalación de iluminación corresponde a tecnología LED.

Tabla 4. Determinación de la demanda de energía corregida.

<b>Factor de corrección de la demanda FCD</b>	FCD=1-0,05-0,1= 0,85
<b>Demanda Corregida Situación Actual</b>	EDC <sub>SA</sub> = 196.950 Wh/día
<b>Demanda Corregida Situación Iluminación LED</b>	EDC <sub>LED</sub> = 112.004 Wh/día

A partir de la energía diaria corregida, se debe hallar el performance ratio (PR) que es un valor que permite comparar la energía real que genera la instalación fotovoltaica con la energía que se podría generar con la misma instalación operando en condiciones standard STC. La Ecuación (4) para el cálculo del PR se presenta a continuación.

$$PR = \frac{EDR}{HPS * P_p} \quad (4)$$

Donde:  $P_p$  es la potencia pico que debe tener el conjunto de todos los paneles solares.

HPS son las horas de pico solar (horas de luz solar por día en base a una irradiancia de 1 kW/m<sup>2</sup>).



La cantidad de paneles necesarios se obtiene a partir de la potencia pico utilizando la siguiente Ecuación (5).

$$N_p = \frac{P_p}{P_U} \quad (5)$$

Siendo,  $N_p$ : cantidad de paneles y  $P_U$ : potencia de cada panel en condiciones standard STC.

El panel fotovoltaico seleccionado tiene un valor de  $P_U$  de 415 Wp y sus especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico seleccionado

Características eléctricas	STC: AM 1,5 -	NOCT: AM 1,5 -
	1000W/m <sup>2</sup> - 25°C	800W/m <sup>2</sup> 20°C - 1 m/s
Modelo	LRS-54HPH-415M	
Condiciones de prueba	STC	NOCT
Potencia máxima (W)	415	310,2
Tensión de circuito abierto (V)	37,50	35,26
Corriente de cortocircuito (A)	13,94	11,27
Tensión a potencia máxima (V)	31,49	29,25
Corriente a potencia máxima (A)	13,18	10,60
Eficiencia del panel (%)	21,3	

El performance ratio se determina mediante la Ecuación (6) considerando las pérdidas eléctricas y rendimientos de los componentes del sistema.

$$PR(\%) = (100 - A - P_{temp}) * B * C * D * E * F \quad (6)$$

Donde: A: pérdidas en los módulos por suciedad (3%), sombra (2%), reflectancia (2%) y no uniformidad de las características de los paneles (2%).

B: pérdidas en los cables del lado de corriente continua (en este punto del proyecto aún no se han dimensionado los cables por lo que se elige un valor de referencia de 1%).

C: pérdidas en los cables del lado de corriente alterna (en este punto del proyecto aún no se han dimensionado los cables por lo que se elige un valor de referencia de 1%).

D: pérdidas por disponibilidad, se refiere a los casos en que la red no se encuentre disponible o que el generador no pueda estar en funcionamiento debido a tareas de mantenimiento, el valor de pérdidas es del orden del 1% (el valor utilizado en la fórmula es 99%).



E: rendimiento del inversor (sin haberse seleccionado el inversor se utiliza un valor de referencia de 98% presente en la mayoría de los inversores comerciales).

F: pérdidas por rendimiento de seguimiento del punto de máxima potencia del generador (el seguidor del punto de máxima potencia o MPPT es el elemento encargado de adaptar la tensión de funcionamiento para lograr la mayor potencia posible en el generador), se utiliza un valor de 99%.

$P_{temp}$ : representa las pérdidas por el efecto de temperatura en la potencia de los paneles; estas pérdidas crecen con la temperatura y se calculan con la siguiente Ecuación (7).

$$P_{temp}(\%) = 100 - 100 * [1 - g * (T_c - 25)] \quad (7)$$

Siendo:

g: gradiente de pérdidas de potencia del panel, el mismo se especifica en la hoja de datos del módulo seleccionado, para este caso es  $0,0034 \frac{1}{^\circ C}$ .

$T_c$ : es la temperatura del panel y se calcula con la siguiente Ecuación (8).

$$T_c = T_{amb} + (NOCT - 20) * \frac{E}{800} \quad (8)$$

$T_{amb}$ : es el valor de temperatura promedio para cada mes, los mismos se obtienen de los datos estadísticos del Servicio Meteorológico Nacional.

NOCT: es la temperatura de las celdas en condiciones nominales de operación, la misma la especifica el fabricante de los módulos, en el caso del panel elegido la NOCT es  $45^\circ C$ .

E: es el valor de irradiación promedio para cada mes, se adopta  $850 \text{ W/m}^2$ .

Del cálculo para la situación actual se determina la cantidad de paneles necesarios para atender la demanda de energía, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 6. Se observa que la cantidad mínima se da en el mes de diciembre (89 paneles) y la máxima en el mes de junio (194 paneles).

En la Tabla 7 se determina la cantidad de paneles para atender la demanda de energía en la situación con implementación previa de la medida de eficiencia energética definida en el plan de acción, es decir, considerando iluminación led en todo el edificio analizado. Se observa que la cantidad mínima se da en el mes de diciembre (51 paneles) y la máxima en el mes de junio (110 paneles).



Tabla 6. Determinación de la cantidad de paneles para la situación actual.

Mes	T <sub>amb</sub> [°C]	T <sub>c</sub> [°C]	P <sub>temp</sub>	PR	P <sub>p</sub> [Wp]	Cantidad de paneles
ene	24,2	50,76	0,088	0,771	37.377	90
feb	23,2	49,76	0,084	0,774	41.861	100
mar	21,2	47,76	0,077	0,781	46.656	113
abr	17,5	44,06	0,065	0,792	55.912	135
mayo	14,5	41,06	0,055	0,802	72.204	174
jun	11,2	37,76	0,043	0,812	80.215	194
jul	11,1	37,66	0,043	0,813	78.900	190
ago	12	38,56	0,046	0,810	65.231	158
sep	14,4	40,96	0,054	0,802	51.801	125
oct	17	43,56	0,063	0,794	45.480	110
nov	20,2	46,76	0,074	0,784	38.843	94
dic	22,9	49,46	0,083	0,775	36.769	89

Tabla 7. Determinación de la cantidad de paneles para la situación con iluminación Led.

Mes	T <sub>amb</sub> [°C]	T <sub>c</sub> [°C]	P <sub>temp</sub>	PR	P <sub>p</sub> [Wp]	Cantidad de paneles
ene	24,2	50,76	0,088	0,771	21.256	52
feb	23,2	49,76	0,084	0,774	23.806	58
mar	21,2	47,76	0,077	0,781	26.533	64
abr	17,5	44,06	0,065	0,792	31.797	77
mayo	14,5	41,06	0,055	0,802	41.062	99
jun	11,2	37,76	0,043	0,812	45.618	110
jul	11,1	37,66	0,043	0,813	44.870	109
ago	12	38,56	0,046	0,810	37.097	90
sep	14,4	40,96	0,054	0,802	29.459	71
oct	17	43,56	0,063	0,794	25.864	63
nov	20,2	46,76	0,074	0,784	22.090	53
dic	22,9	49,46	0,083	0,775	20.910	51

Al considerar la implementación previa de una medida de eficiencia energética, la demanda de energía eléctrica anual puede ser abastecida por una instalación solar fotovoltaica con menor cantidad de paneles.

A fin de evaluar la cantidad y distribución de los paneles en el área disponible en la terraza del edificio, se determina la distancia mínima entre paneles que evita el sombreado entre ellos

utilizando la siguiente Ecuación (9) y los parámetros involucrados se esquematizan en la Figura 1.

$$L = d1 + d2 = l * \left( \frac{\sin \beta}{\tan h_0} + \cos \beta \right) \quad (9)$$

Donde: L: separación mínima entre los paneles.

$\beta$ : ángulo de inclinación del panel.

$h_0$ : altura solar del mediodía más desfavorable;  $h_0 = 30^\circ$  para la ciudad de La Plata.

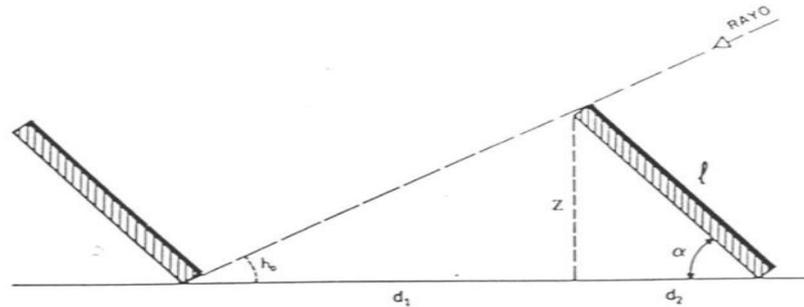


Figura 1. Parámetros involucrados en el cálculo de la distancia mínima entre paneles

Resultando:

$$L = 1,722m * \left( \frac{\sin 30}{\tan 30} + \cos 30 \right) = 2,98m$$

Considerando que el promedio anual de cantidad de paneles es 74, debiendo cumplir con una distancia mínima entre paneles de 3 m, y teniendo en cuenta también la superficie disponible de la terraza del edificio y los obstáculos que se encuentran en la misma, se propone una instalación formada con 72 paneles con la distribución que se muestra en la Figura 2.

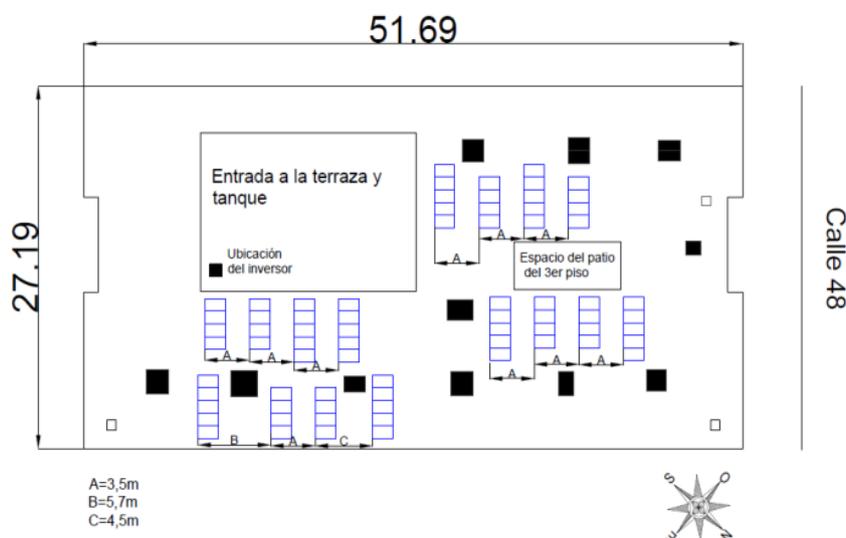


Figura 2. Distribución de la instalación fotovoltaica.



Bajo esta configuración de instalación fotovoltaica, la energía que se puede generar se resume en la siguiente Tabla 8, donde también se muestra la energía demandada por mes para la situación en que se implementa previamente el recambio a luminarias LED.

Tabla 8. Generación de energía y demanda mensual de la instalación de iluminación.

Mes	Cantidad de paneles	Energía producida al mes [kWh]	Energía demandada al mes [kWh]
ene	72	4.820	1.120
feb	72	3.889	2.240
mar	72	3.867	2.464
abr	72	3.129	2.464
mayo	72	2.507	2.464
jun	72	2.188	2.464
jul	72	2.298	1.120
ago	72	2.779	2.464
sep	72	3.382	2.464
oct	72	3.976	2.464
nov	72	4.498	2.464
dic	72	4.903	1.680
<b>Anual</b>	72	42.240	25.873

Dado que la instalación funciona todos los días del mes y que la iluminación del Departamento de Mecánica no se utiliza los fines de semana y en los periodos de recesos, con una instalación de 72 paneles de 415Wp resulta posible atender la demanda de energía eléctrica para iluminación anual. En el caso del mes de junio donde el recurso solar es mínimo, la instalación fotovoltaica no cubre totalmente la demanda de diseño, mientras que el resto de los meses del año se logra abastecerla completamente. Se hace notar que en el caso con iluminación led, con una cantidad de paneles inferior al mínimo obtenido en la situación actual, es posible atender la demanda de diseño.

Se observa que en el mes de enero la energía que se genera y no se consume en el edificio (por encontrarse sin actividad) puede ser inyectada a la red de distribución. Además, se nota que la generación de energía eléctrica de la instalación propuesta puede alcanzar los 42.240 kWh/año mientras que la demanda máxima de energía anual de iluminación es de 25.873 kWh/año. Así es que la instalación fotovoltaica cubre la demanda anual de diseño y genera excedentes, posibilitando su inyección a la red o su utilización para atender otras cargas del edificio.

A fin de evaluar de forma completa la instalación solar fotovoltaica se debe seleccionar el inversor, determinar las protecciones eléctricas del lado de corriente continua y del lado de corriente alterna, las secciones de los cables, la estructura soporte de los paneles y realizar el



cómputo de materiales y presupuesto de la instalación luego de implementar la medida de eficiencia energética.

#### 4. CONCLUSIONES

En el diseño de la instalación solar fotovoltaica para el edificio del Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería UNLP, se considera el criterio de máximo aprovechamiento anual del recurso solar, así el ángulo de inclinación adoptado es de 30° y la línea arquitectónica del edificio define que la orientación de los paneles es de 45° Oeste.

Con el reemplazo tecnológico de las luminarias del edificio se puede disminuir el consumo de energía eléctrica en iluminación de 167,4 kWh a 95,2 kWh al día, lo que representa una disminución del 43% del consumo de energía actual. La demanda de energía corregida en la situación actual resulta de 197 kWh/día y con iluminación led la demanda resulta en 112 kWh/día.

La instalación fotovoltaica para atender la demanda de diseño luego de implementar el reemplazo tecnológico requiere de 51 paneles como mínimo y 110 como máximo, resultantes de los meses de junio y diciembre, respectivamente. Es posible ubicar en la terraza un total de 72 paneles de 415 Wp, donde la separación mínima entre ellos es de 3 m.

La generación eléctrica de la instalación propuesta puede alcanzar los 42.240 kWh/año mientras que la demanda máxima de energía anual de iluminación es de 25.873 kWh/año. Así es que la instalación fotovoltaica cubre la demanda anual de diseño y genera excedente para ser inyectado a la red de distribución o para atender otras cargas del edificio.

Por último, como trabajo con perspectiva a futuro, se deben definir todos los componentes de la instalación a fin de realizar una evaluación técnica, económica y ambiental que permita incorporarla como medida práctica de aplicación al plan de acción correspondiente al sistema de gestión de la energía del edificio analizado.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Juan J. Negroni, Luis Canales, Cristián Yáñez. *Diseño y dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos*. Corporación de Desarrollo Tecnológico, Chile, 2013.
- [2] <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [3] Dr. Ing. Christian Navntoft, Ing. María Paz Cristófalo. *Guía del recurso solar Argentino. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Gobierno de Energía, 2019.*
- [4] Departamento de Energía Solar del IDEA, *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red*, España, 2002.



## CONFECCIÓN DE LA LÍNEA DE BASE ENERGÉTICA DE UN EDIFICIO UNIVERSITARIO EN EL MARCO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA

**Sergio M. Arocas**<sup>1</sup>, **Geraldine D. Coria Hoffmann**<sup>2</sup> y **Mauro I. Jaciuk**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> UIDET IAME Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería UNLP  
1 y 47, La Plata, Argentina- [martin.arocas@ing.unlp.edu.ar](mailto:martin.arocas@ing.unlp.edu.ar).

<sup>2</sup> UIDET IAME Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería UNLP  
1 y 47, La Plata, Argentina- [geraldine.coria@ing.unlp.edu.ar](mailto:geraldine.coria@ing.unlp.edu.ar).

<sup>3</sup> UIDET IAME Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería UNLP  
1 y 47, La Plata, Argentina- [maurojaciuk@gmail.com](mailto:maurojaciuk@gmail.com)

### RESUMEN

El mundo experimenta un proceso de transición energética, proyectando una sociedad de bajo carbono y con menor intensidad energética como mecanismo para controlar el cambio climático.

Esto conlleva a poner foco en las edificaciones que representan el 30% del consumo de energía mundial. Su gestión energética puede realizarse siguiendo los lineamientos de la Norma ISO 50001:2018, donde se define la línea de base energética como una referencia cuantitativa para la comparación del desempeño energético, permitiendo verificar el cumplimiento de metas dentro del sistema de gestión.

El objetivo de este trabajo es la confección de la línea de base energética de un edificio universitario en el que se presenta la dificultad de no poder acceder a datos históricos de facturación.

Para ello se definió el límite físico contemplado en el sistema de gestión y se realizó un relevamiento energético del caso de estudio (Departamento de Mecánica Facultad de Ingeniería UNLP), para determinar los equipos consumidores de energía y su tiempo de uso. Se identificó que el consumo de los equipos de aire acondicionado tipo split, ubicados en las oficinas, representa la mayor dificultad de estimación. Por lo tanto, se midió la corriente y la tensión durante el funcionamiento en época invernal de uno de ellos, permitiendo concluir que, en una hora de funcionamiento, el equipo consumía la energía equivalente a estar funcionando entre 30 y 39 minutos a potencia nominal, con una temperatura de seteo de 21°C, y entre 20 y 31 minutos con seteo en 20°C.

Con base en esto, se determinan los usos significativos de la energía del edificio universitario, se analiza un período típico de línea de base de un año para reflejar los cambios en condiciones climáticas estacionales y variaciones en la ocupación. Concluyendo con la confección de la primera versión de la línea de base energética.

**Palabras clave:** *Eficiencia Energética; Energía; Gestión.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Las probadas consecuencias ambientales del uso de combustibles fósiles para abastecer el creciente consumo de energía de la población han llevado a que en la actualidad se esté experimentando un proceso de transición energética y se proyecte una sociedad de bajo carbono y con menor intensidad energética como mecanismo para controlar el cambio climático.

El 30% del consumo de energía mundial en 2021 correspondió a las edificaciones. Mostrando un incremento desde 115 EJ en 2010 hasta casi 135 EJ en 2021 [1]. En términos de intensidad energética, la relación entre el consumo de energía anual de las edificaciones con su superficie se mantuvo alrededor de 150 kWh/m<sup>2</sup> en los últimos seis años (periodo 2016-2021) [2].

En lo que refiere a los suministros energéticos más utilizados en los edificios, en 2021 el 36% fue aportado por los combustibles fósiles (gas natural, petróleo y carbón), el 34% por electricidad y el 18,5% biomasa. Por ello, los valores de consumo de energía deben ser analizados en conjunto con las emisiones de gases de efecto invernadero. En 2021, el funcionamiento de los edificios representó el 27% del total de emisiones directas e indirectas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del sector energético mundial. Este porcentaje se traduce en 10 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> liberadas a la atmósfera, representando el pico histórico máximo para este sector [1].

La necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles ha llevado a plantear distintas estrategias y metodologías para la gestión de la energía en las edificaciones con los propósitos de conocer la forma en que se consume la energía, tender a la implementación de acciones de eficiencia energética y aplicar fuentes de energía no contaminantes.

La norma ISO 50001 “*Sistemas de Gestión de la Energía. Requisitos con orientación para su uso*” es una de las herramientas desarrolladas en la última década que define los procesos necesarios para alcanzar la mejora continua en términos energéticos en cualquier tipo de organización [3]. La norma ISO 50001 se basa en el ciclo de mejora continua “Planificar – Hacer – Verificar – Actuar” e incorpora la gestión energética a las prácticas organizacionales existentes. Para cada una de estas etapas del ciclo, la norma establece requisitos que deben cumplirse para prestar conformidad a la misma.

Dentro de los conceptos tratados para la fase de planificación del sistema de gestión de la energía (SGEn) de una organización, se define al *desempeño energético (DEn)* como los resultados medibles relacionados con la eficiencia energética, el uso de la energía y el consumo de energía; su medida o unidad se expresa a través de uno o más *indicadores de desempeño energético (IDEn)* definidos por la organización. También, se establece la definición de *línea de base energética (LBEEn)* como una referencia cuantitativa que proporciona la base para la comparación del desempeño energético [3].



Como complemento a la norma mencionada, surge la norma ISO 50006 “*Sistemas de Gestión de la Energía – Medición del desempeño energético utilizando líneas base de energía e indicadores de desempeño energético – Principios generales y orientación*” para proporcionar una orientación práctica sobre la creación, uso y mantenimiento de los IDEn y de la LBEn, que son dos elementos claves en el SGEN [4]. Para establecer IDEn y LBEn apropiados, se requiere del acceso, procesamiento y análisis de los datos disponibles de energía de la organización. En caso de experimentar falta de datos medidos por los proveedores de energía, lo que conlleva a utilizar valores estimados, estos deben estar correctamente documentados junto con los supuestos y métodos de obtención aplicados.

El objetivo de este trabajo es la confección de la línea de base energética de un edificio universitario, en el marco de la formulación de un SGEN, en el que se presenta la dificultad de no poder acceder a datos históricos de facturación de suministros energéticos.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

El edificio en estudio es el Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (FI UNLP), con una superficie cubierta de 4400 m<sup>2</sup> distribuida entre planta baja, primer, segundo y tercer piso; en la Tabla 1 se presentan las principales características sus espacios.

Tabla 1. Sectores del edificio Departamento de Mecánica FI UNLP

	<b>Sectores</b>	<b>Superficie [m<sup>2</sup>]</b>
<b>Planta Baja</b>	Secretaría	142
	Hall - Escaleras	181
	Pasillo exterior	72
	Buffet	100
	Laboratorio IAME	624
<b>Primer Piso</b>	Aulas	713
	Pasillos - Escaleras	312
	Baños	58
<b>Segundo Piso</b>	Aulas	800
	Pasillos - Escaleras	293
	Baños	58
<b>Tercer Piso</b>	Oficina	422
	Aula	36
	Salas de reuniones	69
	Pasillos - Escaleras	547
	Baños y Cocina	70

Para la formulación de la LBEn y de los IDEn de este edificio universitario, se siguen los lineamientos generales presentados en la norma ISO 50006 (Tabla 2), realizando las adecuaciones necesarias para adaptarlos a la formulación de este SGEN específico. El alcance



del presente trabajo excluye la identificación y evaluación de acciones de mejoras del DEn para el edificio en estudio.

Tabla 2. Lineamientos para medición del desempeño energético, según norma ISO 50006 [4]

<b>1º) OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN RELEVANTE SOBRE EL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DESDE LA REVISIÓN ENERGÉTICA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Definición de límites de IDEn</li> <li>Definición y cuantificación de los flujos de energía</li> <li>Definición y cuantificación de variables relevantes</li> <li>Definición y cuantificación de factores estáticos</li> <li>Recolección de datos</li> </ul>
<b>2º) IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificación de usuarios de indicadores de desempeño energético</li> <li>Determinación de características específicas de desempeño a ser cuantificado</li> </ul>
<b>3º) ESTABLECIMIENTO DE LÍNEA BASE DE ENERGÍA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Determinación de cuándo es necesaria la normalización</li> <li>Cálculo de las mejoras de desempeño energético</li> </ul>
<b>4º) MANTENIMIENTO Y AJUSTE DE INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO Y DE LÍNEA DE BASE DE ENERGÍA.</b>

Como primer paso, se debe establecer el límite (físico u organizacional) dentro del cual se pretende implementar el SGEN y, por lo tanto, donde se evaluarán los IDEn y la LBEn. En este edificio, el límite engloba la totalidad del primer, segundo y tercer piso, y el sector del hall-escaleras y pasillo exterior de la planta baja, quedando por fuera del límite el Laboratorio IAME, la Secretaría y el buffet. El primero se excluye por tratarse de un sector con características particulares de funcionamiento y consumo energético, recomendándose su tratamiento en un SGEN separado. En tanto que a la Secretaría y al buffet no se pudo tener acceso por las restricciones sanitarias al momento de realizar la revisión energética (primer semestre 2021).

Para la definición y cuantificación de los flujos de energía, se procede a ejecutar entonces una revisión energética dentro del límite físico previamente definido. Se identifican primeramente las fuentes de energía que abastecen al edificio y las instalaciones que la consumen en cada uno de los sectores. El edificio se abastece con energía eléctrica y gas natural, utilizándose este último únicamente para la instalación de calefacción de las aulas del primer y segundo piso.

Luego, se releva información sobre el equipamiento consumidor de energía indicando cantidad, potencia y modo de uso [5]. Se destacan los siguientes aspectos hallados al momento del relevamiento:

- La instalación de iluminación presenta luminarias fluorescentes y led, correspondiendo el 80% de la potencia instalada en iluminación a las primeras.



- Las aulas no cuentan con equipos para su refrigeración, excepto ventiladores en algunas de ellas.
- La calefacción de las aulas se realiza mediante estufas de tiro balanceado que consumen gas natural.
- En el tercer piso, las oficinas, el aula y las dos salas de reuniones cuentan con equipos de aire acondicionado tipo split para su calefacción y refrigeración.

En la Figura 1 se muestra un esquema de los flujos de energía, desde cada suministro hasta las instalaciones, explicitándose además la potencia instalada para cada una.

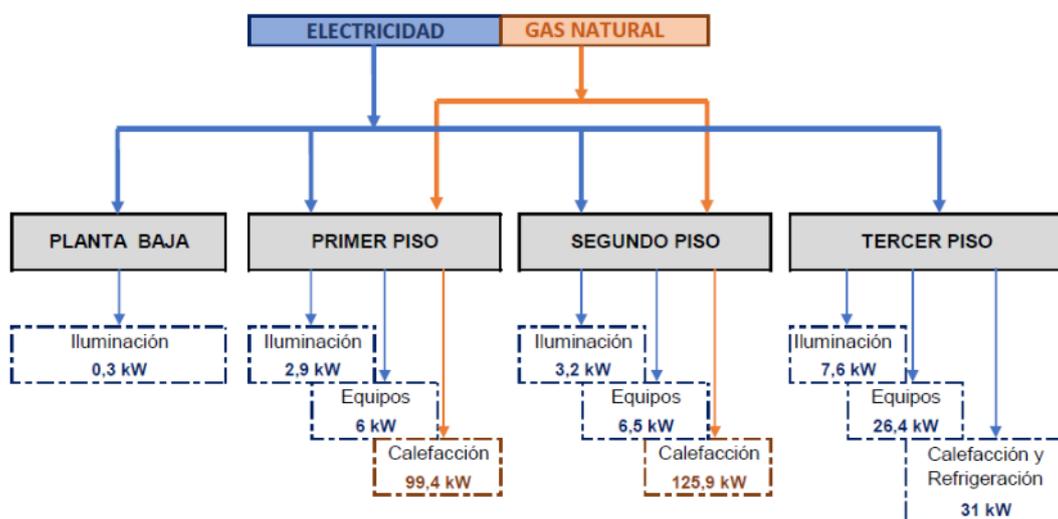


Figura 1: Esquema flujos de energía y potencia instalada relevada en edificio universitario (*“Equipos” engloba equipamiento ofimático, electrodoméstico y ventiladores*)

Dentro de la revisión energética se debe incluir la recolección y el análisis de datos de facturación de los suministros energéticos. Sin embargo, el edificio del Departamento de Mecánica no cuenta con medición y registro propio de sus consumos debido a que los medidores instalados contabilizan la energía consumida por un conjunto de edificios ubicados en el mismo predio.

Entonces, para cuantificar el consumo de energía del edificio y posteriormente establecer sus IDEn y LBEEn, se realiza una simulación mes a mes basada en los datos recolectados durante el relevamiento y en tiempos de uso de los equipos según registros de ocupación de las aulas y las oficinas. En este punto se presentó la dificultad de la estimación del consumo de 31 equipos de aire acondicionado tipo split ubicados en el tercer piso (oficinas, aula y salas de reuniones). Si bien se puede estimar la cantidad de horas por día en que se encuentran encendidos con base en la ocupación de los locales, presentan el particular funcionamiento on-off del motor del compresor. Esto se traduce en que el consumo de energía no puede ser calculado simplemente

como el producto entre la potencia eléctrica nominal y la cantidad de horas del equipo encendido porque llevaría a una sobreestimación del consumo de energía eléctrica.

Para superar este inconveniente y poder establecer la LBE<sub>n</sub> del edificio, se decide realizar una serie de mediciones en uno de los equipos ubicado en una de las oficinas (Figura 2a). Se utiliza un analizador de redes para la medición de tensión y corriente, registrando también tiempo (fecha y hora) y potencia. Se complementa con la medición de temperatura en diferentes puntos de la oficina (Figura 2b). El equipo split es TRANE frío/calor de 2,6 kW de potencia de enfriamiento/calentamiento y 810 W / 720 W de potencia eléctrica, respectivamente. Las mediciones se realizaron para el equipo funcionando en modo calor, en los días 26, 27 y 28 de agosto de 2021 y se complementaron con los valores horarios de temperatura exterior provistos por el Servicio Meteorológico Nacional para la estación La Plata (Aero) [6].

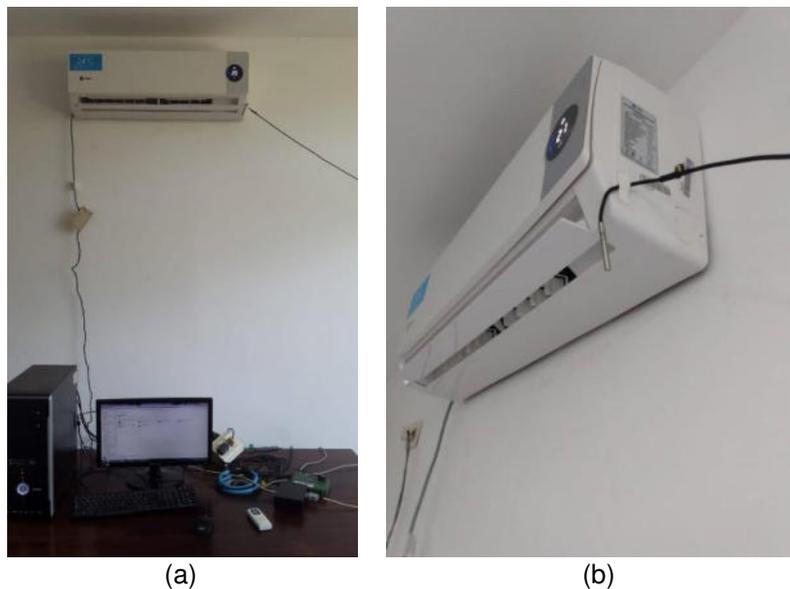


Figura 2: Medición de corriente, tensión y temperatura en oficina con equipo split

### 3. RESULTADOS

Las mediciones de tensión y corriente del equipo split encendido en modo calefacción se ejecutaron con frecuencia de medición de 1 minuto, estableciendo dos temperaturas de seteo, 20°C y 21°C.

El procesamiento de los datos consistió en descartar los valores de medición inmediatos al encendido del equipo y al cambio de temperatura de seteo; además, para facilitar el análisis y la muestra de resultados, se agruparon las mediciones por hora de funcionamiento realizando la sumatoria de la energía eléctrica consumida en ese tiempo y obteniendo el promedio y la desviación estándar de las temperaturas.



En las Figuras 3 y 4 se exhiben, a modo de ejemplo, algunos de los resultados obtenidos del procesamiento de las mediciones, correspondientes a las temperaturas de seteo 21°C y 20°C, respectivamente. Se evidencia el mayor consumo de energía por hora cuando la temperatura de seteo es mayor, encontrándose entre 369 y 478 kWh y la temperatura exterior se encuentra entre 4°C y 17°C; mientras que para temperatura de seteo de 20°C el consumo de electricidad por hora se ubica entre 279 y 371 kWh (rango de temperatura exterior 7,5°C-14°C). Los valores obtenidos concuerdan con los presentados en la bibliografía que afirman un ahorro de energía del 20% al disminuir 1°C los termostatos de los equipos de calefacción en la zona central de nuestro país [7], validando los registros realizados.

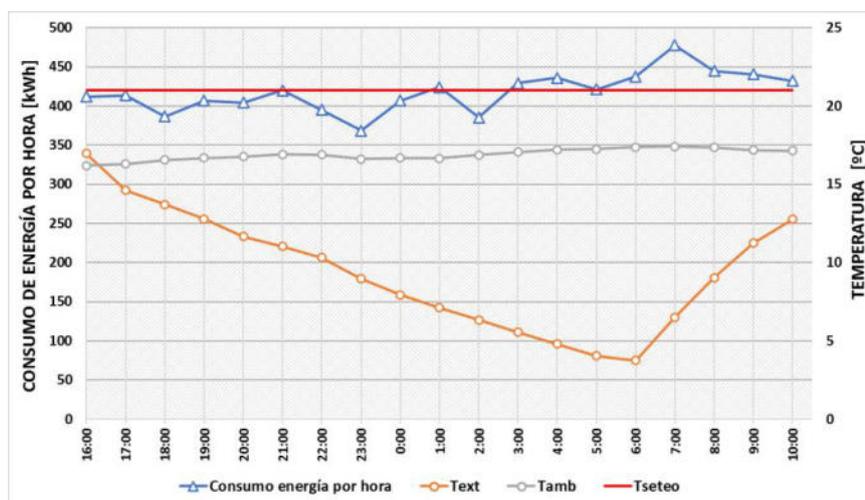


Figura 3: Resultados de mediciones con temperatura de seteo 21°C.  
(Temperaturas: “ext” exterior; “amb” dentro del local; “seteo” seteo del split)

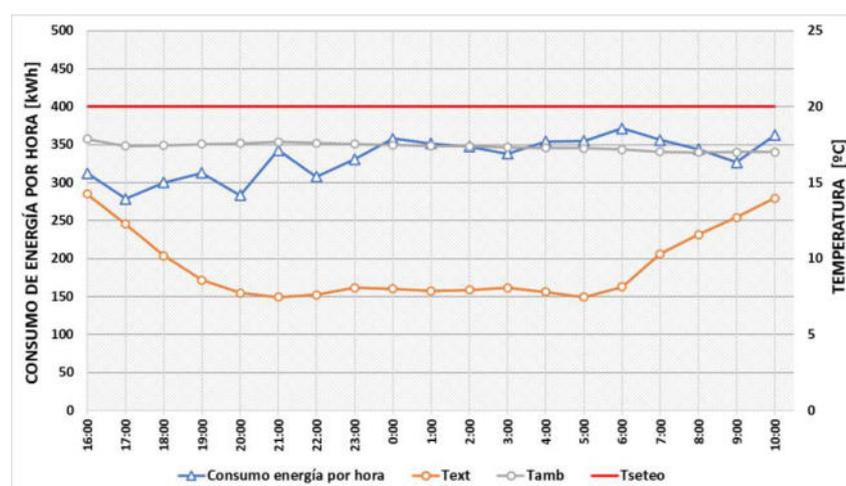


Figura 4: Resultados de mediciones con temperatura de seteo 20°C.  
(Temperaturas: “ext” exterior; “amb” dentro del local; “seteo” seteo del split)



Además se extrae que, en el periodo de una hora, el equipo split consume la energía eléctrica equivalente a estar funcionando a potencia nominal (720 W) durante 30-39 minutos para el caso de los 21°C de seteo y durante 20-31 minutos para 20°C.

Esta información obtenida se utiliza para la simulación del consumo de energía del Departamento, con cálculos que incluyen además la información relevada y una serie de hipótesis fundamentadas sobre el uso de los equipos, como por ejemplo considerar encendidas las luminarias de los baños del tercer piso durante 6 horas por día de lunes a viernes, en tanto que las correspondientes a los baños del segundo y tercer piso lo están 12 horas por día hábil.

Aquí se debe definir el período de línea base a ser considerado, teniendo en cuenta la naturaleza de las actividades del edificio. Este período debe ser lo suficientemente largo para asegurar que la variación en los patrones de operación sea correctamente contabilizada en la LBEn [4]. En el edificio en estudio se desarrollan actividades educativas que siguen un calendario académico basado en dos semestres bien definidos, con períodos de receso de labores de 15 días en julio y 20 días en enero. Por este motivo, en complemento con la variación climática estacional que impacta en el consumo de calefacción y refrigeración, se selecciona un período de evaluación de la LBEn de 12 meses para el Departamento de Mecánica FI UNLP.

Con esto en consideración, se construye el consumo de energía eléctrica y de gas natural del edificio, arribándose a un total anual de 63 MWh y 102 MWh, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, el único uso de gas natural es para la calefacción de las aulas. En tanto que los usos de la energía eléctrica son variados y se encuentran resumidos en la Figura 5, donde también se observa que los usos correspondientes a la iluminación y la climatización eléctrica del edificio representan el 80% del consumo anual de electricidad. Por lo tanto, estos se consideran como usos significativos de energía eléctrica del edificio en estudio.

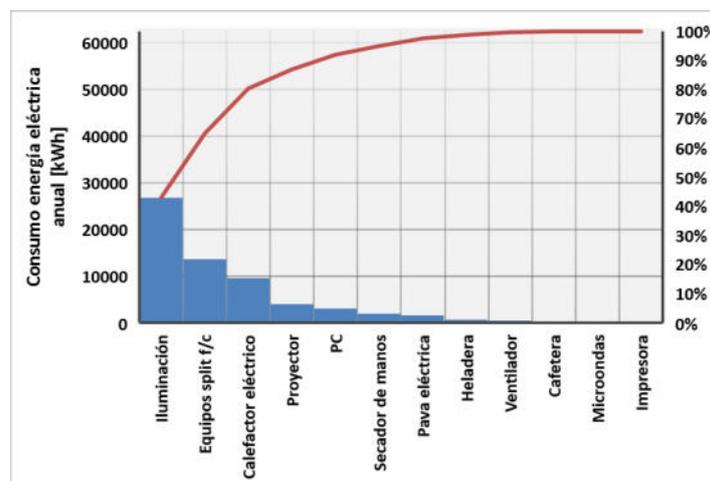


Figura 5: Consumo de energía eléctrica anual por usos del Departamento de Mecánica FI UNLP



Como últimos pasos de esta metodología, se deben identificar los factores estáticos y las posibles variables relevantes que inciden en el consumo de energía y, con ello, en la LBE<sub>n</sub> y en los IDE<sub>n</sub>. El término factor estático hace referencia a aquel que impacta en el desempeño energético pero que no cambia de manera rutinaria, a diferencia de la variable relevante que se modifica de forma rutinaria [4].

En función de la revisión energética realizada, los factores estáticos identificados para este edificio son la superficie destinada a aulas y la superficie destinada a oficinas. Esto se traduce en que se deberá actualizar la LBE<sub>n</sub> del Departamento de Mecánica FI UNLP cuando se produzca alguna modificación en cualquiera de estos dos factores, respecto a la situación actual, ya que mantener la LBE<sub>n</sub> aquí formulada llevaría a que la misma no sea una referencia cuantitativa adecuada del desempeño energético futuro de esta institución.

En tanto que las posibles variables relevantes que se identifican en función de los usos significativos de la energía son: los grados día de calefacción (GDC) para el suministro de gas natural y los grados día de calefacción, los grados día de refrigeración (GDR) y la temperatura media mensual (TMM) para el suministro de energía eléctrica.

Para cada una de estas potenciales variables relevantes se analiza si la influencia es significativa en el consumo de energía, de tal manera que exijan ser incorporadas como un parámetro de normalización de la LBE<sub>n</sub>. Esta posible influencia se evalúa siguiendo el procedimiento recomendado en la norma ISO 50006 a través de graficar cada variable versus el consumo de energía y determinar si existe algún tipo de relación (lineal o no lineal). Las relaciones evaluadas y los resultados obtenidos se evidencian en la Tabla 3, concluyendo que para la energía eléctrica, los GDC y GDR son variables relevantes para los meses abril a octubre y noviembre a marzo, respectivamente; en tanto que para el consumo de gas natural es variable relevante los GDC.

Tabla 3. Evaluación de variables relevantes, según norma ISO 50006 [4]

	<b>Relación lineal</b> <b>Consumo de energía mensual</b> <b>[MWh]</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	
<i>GDC vs Consumo de gas natural en meses abril a octubre</i>	$0,1099 \cdot GDC [^{\circ}C] + 0,285$ (Relación 1)	0,979	<b>VARIABLE RELEVANTE</b>
<i>GDC vs Consumo de electricidad en meses abril a octubre</i>	$0,0175 \cdot GDC [^{\circ}C] + 3,2265$ (Relación 2)	0,968	<b>VARIABLE RELEVANTE</b>
<i>GDR vs Consumo de energía eléctrica en meses noviembre a marzo</i>	$0,0364 \cdot GDR [^{\circ}C] + 3,9289$ (Relación 3)	0,646	<b>VARIABLE RELEVANTE</b>
<i>TMM vs Consumo de energía eléctrica en meses enero a diciembre</i>	$-0,1702 \cdot TMM [^{\circ}C] + 7,9663$ (Relación 4)	0,218	<b>NO ES VARIABLE RELEVANTE</b>



Finalmente, se construye la primera versión de la línea de base energética para el SGE<sub>n</sub> del edificio del Departamento de Mecánica de FI UNLP, en función de las variables relevantes. La LBE<sub>n</sub> de la Figura 6 corresponde al consumo de energía eléctrica y se construye con las relaciones 2 y 3 de la Tabla 3. La LBE<sub>n</sub> de la Figura 7 es la referida al consumo de gas natural del edificio, basada en la relación 1 (Tabla 3).

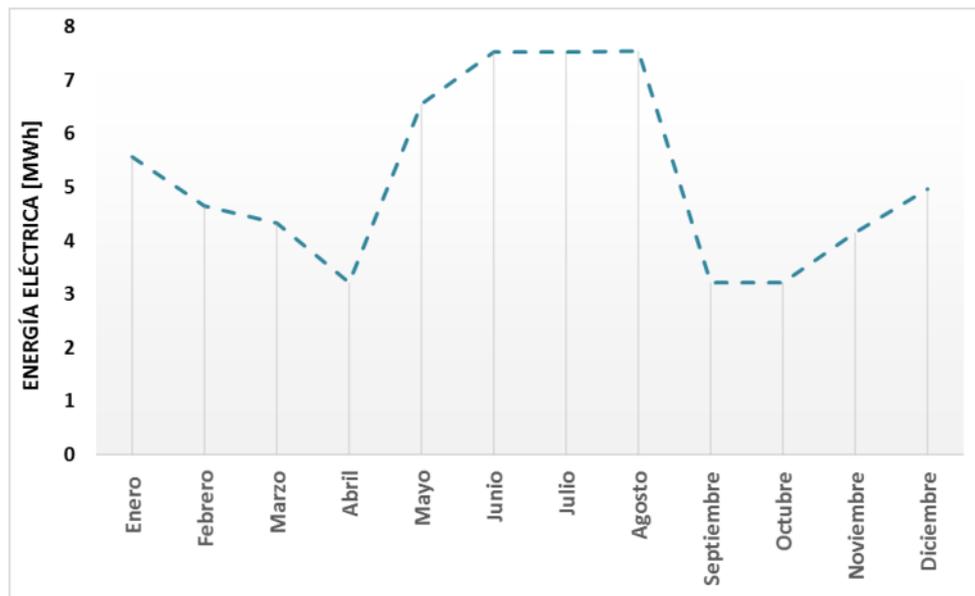


Figura 6: Línea de base energía de electricidad del SGE<sub>n</sub> Departamento de Mecánica FI UNLP

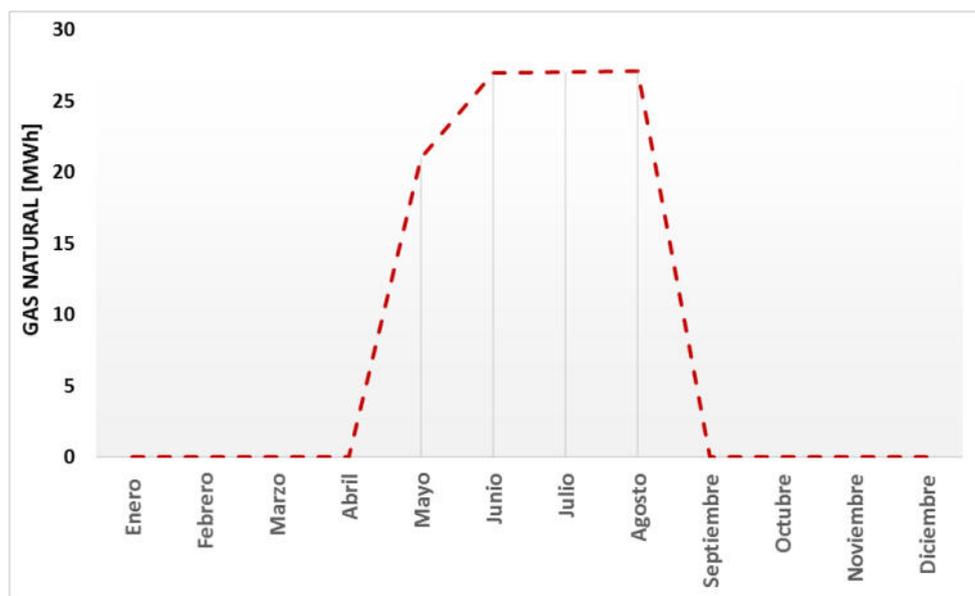


Figura 7: Línea de base energía de gas natural del SGE<sub>n</sub> Departamento de Mecánica FI UNLP



Se propone como IDEn a la relación entre el consumo de energía para el año en que se evalúa el desempeño energético del edificio y el consumo de energía de la LBEEn formulada, según se muestra la Ecuación (1). Se destaca que el indicador se debe calcular de forma separada para gas natural y electricidad teniendo en cuenta las LBEEn correspondientes.

$$IDEn = \frac{\text{Consumo energético evaluado}}{\text{Consumo energético LBEEn}} \quad (1)$$

El IDEn y las LBEEn propuestas forman parte del SGEN del edificio del Departamento de Mecánica y se utilizarán en los pasos siguientes de la fase de planificación del sistema de gestión de la energía, para la confección de las metas y los objetivos de desempeño energético dentro del plan de acción.

#### 4. CONCLUSIONES

El 30% de la energía consumida globalmente en 2021 correspondió a las edificaciones y representó el 27% del total de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del sector energético. La necesidad de reducir el consumo de combustibles contaminantes ha llevado a plantear distintas estrategias y metodologías para la gestión de la energía en las edificaciones siendo una de ellas la que plantea la norma ISO 50001 que, junto con la norma ISO 50006, presentan los lineamientos para la formulación de la línea de base energética (LBEEn) y los indicadores de desempeño energético (IDEn) en el marco de un sistema de gestión de la energía.

El edificio en estudio es el Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (FI UNLP), con una superficie cubierta de 4400 m<sup>2</sup>. Para la formulación de la LBEEn y de los IDEn de este edificio universitario, se establece el límite del sistema y se procede a ejecutar una revisión energética. La no disponibilidad de registros de facturación de los suministros energético lleva a realizar una serie de mediciones en uno de los equipos split instalados para utilizar los datos de la medición en la estimación del consumo anual del edificio. Se extrae que, en el periodo de una hora, el equipo split consume la energía eléctrica equivalente a estar funcionando a potencia nominal (720 W) durante 30-39 minutos para el caso de los 21°C de seteo y durante 20-31 minutos para 20°C.

Se simula entonces el consumo de energía eléctrica y de gas natural del edificio, arribándose a un total anual de 63 MWh y 102 MWh, respectivamente. Se observa que los usos correspondientes a la iluminación y la climatización eléctrica del edificio representan el 80% del consumo anual de electricidad, considerándose usos significativos.

Los factores estáticos identificados para este edificio son la superficie destinada a aulas y la superficie destinada a oficinas. En tanto que se evalúan las variables relevantes resultando ser



los grados día de calefacción y de refrigeración para el caso del consumo de energía eléctrica y los grados día de calefacción para el gas natural.

Finalmente, se construye la primera versión de la línea de base energética para el sistema de gestión de la energía del edificio del Departamento de Mecánica de FI UNLP, para gas natural y para energía eléctrica, en función de las variables relevantes. Y se propone como IDEn la relación entre el consumo del año en evaluación y el consumo obtenido con las LBEEn propuestas.

## REFERENCIAS

- [1] United Nations Environment Programme. *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi, 2022.
- [2] <https://www.iea.org/reports/buildings> (Accedido el 09/05/2023).
- [3] IRAM -ISO 50001. *Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso*. IRAM. 2019.
- [4] ISO 50006. *Sistemas de gestión de la energía – Medición del desempeño energético utilizando líneas de base energética e indicadores de desempeño energético. Principios generales y orientación*. ISO. 2014.
- [5] Junta de Castilla y León. *Manual de procedimiento para la realización de auditorías energéticas en edificios*. España. 2009.
- [6] <https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos> (Accedido el 21/04/2022)
- [7] Consorcio liderado por GFA Consulting Group. *Proyecto “Eficiencia energética en Argentina” financiado por la UE. Informe Sector residencial: Acondicionamiento térmico*. Argentina. 2021.



## DISEÑO DE UN SISTEMA ECONOMICO DE SENSORES DE GASES DE ESCAPE PARA BANCO DE MOTORES

Luis E. Fauroux <sup>1</sup>, Agustín J. Lohigorry <sup>2</sup>, Omar J. Degaetani <sup>3</sup>, Marisa A. Morais <sup>4</sup>, Carla A. del Puerto <sup>5</sup> y César F. Piñero <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería e Inv. Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza Florencio Varela 1905, San Justo, Argentina- [lfauroux@unlam.edu.ar](mailto:lfauroux@unlam.edu.ar).

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería e Inv. Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza Florencio Varela 1905, San Justo, Argentina- [alohigorry@unlam.edu.ar](mailto:alohigorry@unlam.edu.ar).

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería e Inv. Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza Florencio Varela 1905, San Justo, Argentina- [odegaetani@unlam.edu.ar](mailto:odegaetani@unlam.edu.ar).

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería e Inv. Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza Florencio Varela 1905, San Justo, Argentina- [mmorais@unlam.edu.ar](mailto:mmorais@unlam.edu.ar).

<sup>5</sup> Departamento de Ingeniería e Inv. Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza Florencio Varela 1905, San Justo, Argentina- [cdelpuerto@unlam.edu.ar](mailto:cdelpuerto@unlam.edu.ar).

<sup>6</sup> Departamento de Ingeniería e Inv. Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza Florencio Varela 1905, San Justo, Argentina- [cpinero@unlam.edu.ar](mailto:cpinero@unlam.edu.ar).

### RESUMEN

En el contexto de la utilización de hidrógeno como combustible, es necesario desarrollar un sistema de sensores para determinar la calidad de los gases de escape.

La combustión del hidrógeno conlleva riesgos, y altas temperaturas, cambios en la admisión, la velocidad de inyección de hidrógeno, las presiones, temperatura de trabajo, y los volúmenes de mezcla, junto a los sensores específicos para el análisis de gases de escape (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc.). Son conocidos los problemas de generación por combustión de gases derivados de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), que también son contaminantes, cuya formación se ve favorecida con el incremento de la temperatura, y de la concentración en la mezcla, del nitrógeno presente en el aire de admisión. Si bien, el quemado directo de hidrógeno (H<sub>2</sub>) en motores de combustión interna tiene una fuerte mejora en cuanto emisiones respecto a combustionar hidrocarburos, dado que no se genera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ni otras sustancias tóxicas como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), continúan presentes emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Para mitigar el efecto de estas últimas emisiones la industria avanza, ya sea desarrollando sistemas de postratamiento que permitan eliminarlas en su mayoría, y/o trabajando sobre la admisión de los motores con relaciones de aire muy superiores a la estequiométrica, a mayor cantidad de oxígeno, menor generación de NO<sub>x</sub>, entre otras opciones. Es de destacar, que también es posible trabajar con mezclas de combustibles donde el hidrógeno sea sólo una parte, logrando una contribución parcial al medioambiente.

**Palabras clave:** Sistema; Sensores; Gases de Escape



## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se encuentra enmarcado en el contexto de un proyecto integral para la utilización de hidrógeno ( $H_2$ ) verde, producido mediante energía solar fotovoltaica, en motores destinados a movilidad “pesada” [1].

Es sabido que el hidrógeno es un gas con gran poder explosivo, siendo importante manejar su velocidad, presión, y temperaturas. Dado que el objetivo es reconvertir el parque de locomoción pesada, y que por su robustez el diésel está diseñado para tolerar temperatura y presión elevadas, se investigarán entonces motores de este tipo, siendo necesario plantear el cambio del ciclo diésel (por compresión), al ciclo Otto (por chispa). Esta reconversión implica analizar la viabilidad técnico-financiera, cambios en la admisión, la velocidad de inyección de hidrógeno, las presiones y temperatura de trabajo, y los volúmenes de mezcla. También son conocidos los problemas de generación de gases derivados de nitrógeno ( $NO_x$ ), contaminantes que se ven favorecidos con el incremento de temperatura, y concentración del nitrógeno (presente en el aire de admisión) en la mezcla. La motivación de este trabajo radica en los elevados costos de estos sistemas de postratamiento, y la adquisición de los conocimientos necesarios para la búsqueda de soluciones alternativas más económicas.

## 2. DESARROLLO

Tanto los motores que funcionan en ciclo Otto (encendido por chispa), como aquellos que operan en ciclo Diésel (encendido por compresión), serían pasibles de ser adaptados al uso con  $H_2$ . El proyecto integral propone trabajar en ciclo Otto adaptado a funcionamiento con  $H_2$  [2], dado que la utilización del hidrógeno es mediante chispa (bujía). Como primer paso, sería posible comenzar la investigación mezclando el  $H_2$  con combustibles líquidos, o gas natural, siendo necesario trabajar en cambiar el avance del encendido del motor (el tiempo entre que salta la chista y el pistón llega a punto muerto superior “PMS”), la alteración de la puesta a punto, ya que el  $H_2$  en altas proporciones provoca un funcionamiento “inestable”.

Por lo antedicho, y si bien el objetivo es la mitigación del daño ambiental provocado por los gases de escape resultantes de la combustión de  $H_2$  en presencia de aire, el dispositivo de análisis y control es, también, compatible para ser usado también sobre motores de combustión convencional, por lo que se optó en diseñar el sistema utilizando un motor diésel para camión, reduciendo así costos y riesgos asociados a la manipulación del hidrógeno.

Las investigaciones subsiguientes tendrán vinculación, y transferencia, con entidades, tanto públicas como privadas, en el marco de los convenios específicos correspondientes, y serían



realizadas con el propio suministro de tubos de hidrógeno [1] a 30 bares, o bien adquiridos, sobre un banco de pruebas instalado para tal fin, junto a los sensores de interés mecánico.

A diferencia del quemado directo de hidrógeno ( $H_2$ ) en motores de combustión interna, que tiene una fuerte mejora en cuanto emisiones respecto a combustionar hidrocarburos (HC), la combustión del gasoil genera dióxido de carbono ( $CO_2$ ), y otras sustancias tóxicas como el dióxido de azufre ( $SO_2$ ), además de las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), que sí son comunes en ambos procesos [3]. Para evitar que estas últimas emisiones afecten al ambiente, la industria avanza, por ejemplo, desarrollando sistemas de postratamiento in-situ que permitan eliminarlas en su mayoría, y/o trabajando sobre la admisión de los motores con relaciones de aire muy superiores a la estequiométrica, a mayor cantidad de oxígeno, menor generación de  $NO_x$ , entre otras opciones. Es de destacar, que también es posible trabajar con mezclas de combustibles donde el hidrógeno sea sólo una parte, logrando una contribución parcial al ambiente, ya que, si bien hay menores emisiones de  $CO_2$ , se incrementa producción de  $NO_x$ . En el caso de los postratamientos, hay varias opciones que están investigando, donde las opciones incluyen a la urea, membranas separadoras, y otras soluciones.

Considerando, entonces, la utilización de combustibles fósiles se estudió la composición cualitativa de los gases de escape, que consiste en la presencia de monóxido de carbono (CO), causado por la combustión incompleta, dióxido de carbono ( $CO_2$ ), agua ( $H_2O$ ), hidrocarburos (HC), como aldehídos, bencénicos, etc., amoníaco ( $NH_3$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), y dióxido de azufre ( $SO_2$ ), a causa de la presencia de azufre, o derivados, que siempre se hallan en mayor o menor medida en el petróleo, que como lamentablemente aún no pueden ser eliminados por vía catalítica, se intenta en este sentido, reducir la presencia de este tipo de compuestos en los combustibles comercializados. Finalmente, los filtros de partículas completan el post-tratamiento que realizan en primera instancia los catalizadores.

La norma Euro 3 (2000) [4], establece en límite en 500 mg/km para producción de  $NO_x$  en los motores diésel, límite que progresivamente hasta la nueva normativa Euro 6 (2020) a 80 mg/km [5]. Esto implica una reducción de más del 80% en menos de 20 años, y que, hacia el 1 de enero de 2021, para lograr la homologación, los nuevos vehículos debieron cumplir, además, los requisitos de emisiones en conducción real, que se centra en las emisiones generadas durante la conducción diaria habitual. La producción de los óxidos de nitrógeno es particularmente alta en los motores diésel, porque funcionan con exceso de aire, y alta temperatura, situación semejante al caso de la combustión de hidrógeno, y por lo tanto extrapolable.

El tratamiento general consiste en colocar un catalizador de oxidación, seguido de un filtro de partículas, con función de reducción catalítica selectiva (Figura 1).

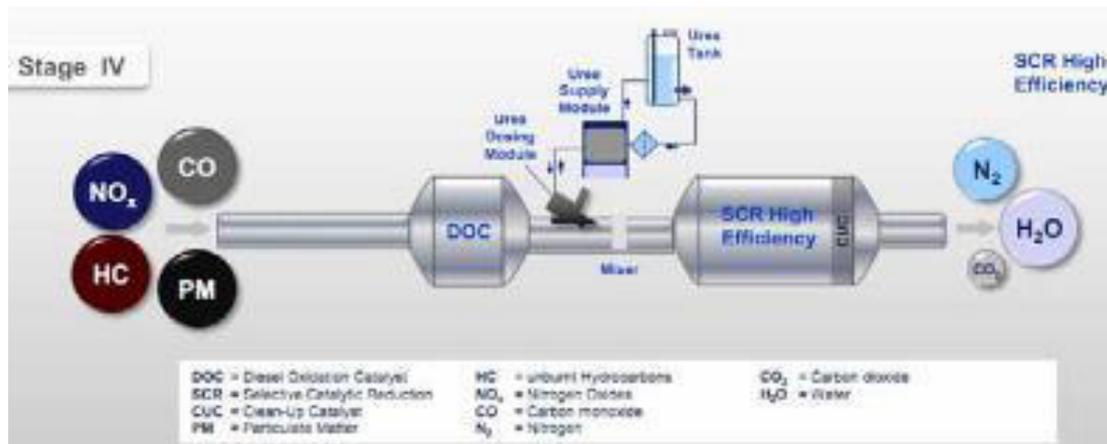


Figura 5. Esquema del tratamiento de los gases de escape (GreenChem)

El proceso químico de termólisis de la urea que se produce en el interior del sistema convierte el agregado consumible en amoníaco, que reacciona con los óxidos de nitrógeno que aún no han sido reducidos [6]. Esta reacción da como resultado agua y nitrógeno elemental, un gas que representa casi el 80 por ciento de la composición de la atmósfera terrestre. La urea [7] se inyecta en el flujo de gases de escape calientes y por encima de los 180°C, aproximadamente, se produce una hidrólisis. En esta reacción se forma amoníaco (NH<sub>3</sub>) según la Ecuación (1).

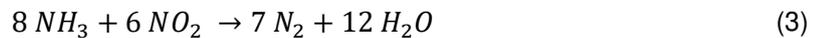
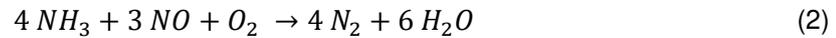


Para que las reacciones se produzcan de manera efectiva, no debe contaminarse la urea, y deben mantenerse las condiciones físicas del proceso. Aunque no es determinante por sí sola, la exposición a temperaturas superiores a 25°C durante largos periodos, pueden acortar su vida útil, dado que se provoca la hidrólisis que conlleva a la formación de amoníaco, a la vez que el aumento de la presión en el envase y la reducción de la vida útil. Por termo descomposición, a temperaturas cercanas a los 150 / 160 °C, se producen gases inflamables y tóxicos, más otros compuestos, como amoníaco, dióxido de carbono, cianato de amonio (NH<sub>4</sub>OCN), y biurea HN(CONH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>. Si el proceso de calentamiento continúa, se obtienen compuestos derivados del ácido carbámico [8].

De hecho, las soluciones de urea neutras, se hidrolizan muy lentamente en ausencia de microorganismos, dando amoníaco y dióxido de carbono. Aunque esta cinética aumenta con la temperatura, el agregado de ácidos, o bases, y también a mayores concentraciones de urea. Por otra parte, la temperatura estimada para su almacenamiento está por encima de los -5°C, para evitar su cristalización, que sucede a partir de los -11,5°C. Cabe destacar que el volumen de la urea cuando cristaliza, se expande en un 7% respecto a su volumen en fase líquida. Finalmente, la urea es sensible a agentes contaminantes, por lo que debe ser conservada en recipientes correctamente cerrados.



Continuando con el tratamiento de los gases, luego, en el catalizador metálico reaccionan los  $\text{NO}_x$  y el  $\text{NH}_3$ , procedente de la anterior, Ecuación (1), transformándose en nitrógeno y agua.



La función del catalizador es completar la oxidación del monóxido de carbono, llevándolo a dióxido de carbono. Su estructura es cerámica, con forma de panal de abeja, y unas superficies de platino y paladio, metales costosos, que reaccionan químicamente en contacto con los gases.

El dispositivo diseñado consiste, entonces, en dos juegos de sensores a colocarse antes, y después, del dosificador de la solución de urea. Cada uno de ellos consta de los sensores listados en la Tabla 1 [9].

Tabla 1. Sensores de determinación de gases

Sensor	Determinación
MQ-7	CO
MQ-135	$\text{NH}_3$ , $\text{NO}_x$ , $\text{CO}_2$ , HC
2SH12	$\text{SO}_2$
MQ-136	$\text{H}_2\text{S}$

Todos los sensores son compatibles con la placa ARDUINO® ONE y ARDUINO® MEGA, a la que se suma una pantalla LCD de 3.5" para la lectura y configuración. Los sensores tienen una conformación genérica (Figura 1), para facilitar la conexión con placas ARDUINO®.

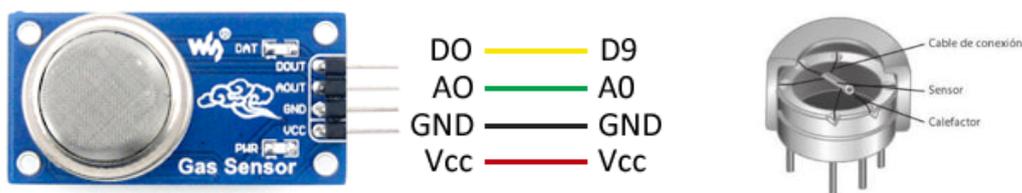


Figura 2. Esquema genérico de un sensor de la familia MQ®

Además, al juego de sensores colocado antes del dosificador, se agrega un sensor de temperatura LM-35.

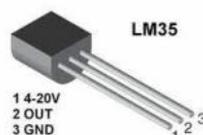


Figura 3. Sensor de Temperatura LM-35



La placa ARDUINO® ONE R3 (Figura 4) [10], tiene 14 pines, de entrada/salida, digitales, de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas moduladas por ancho, o de pulso (PWM), 6 entradas analógicas, un vidrio de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado de Programación Serie en Circuito (ICSP), y un botón de reinicio. Lo interesante, de la elección de ARDUINO®, es que una plataforma de hardware, software, y contenido, de código abierto.

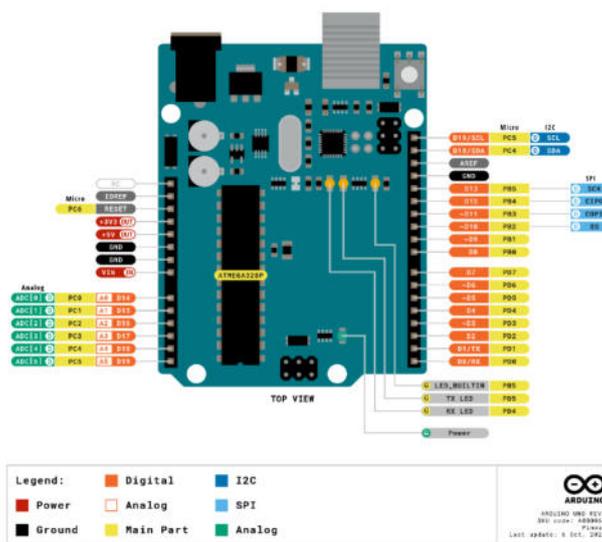


Figura 4. Esquema de conexiones de la placa ARDUINO® ONE R3

De este modo, la conexión genérica de los sensores está representada en la Figura 4.

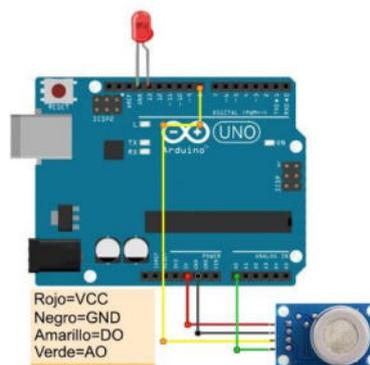


Figura 5. Esquema genérico de conexión de Sensores MQ®

El sistema puede controlar, o bien una electroválvula de caudal variable, o bien un motor paso a paso, u otros actuadores, como variante económica, junto a un dosificador de efecto Venturi, a los efectos de pulverizar la solución de urea, en la corriente de los gases de escape.

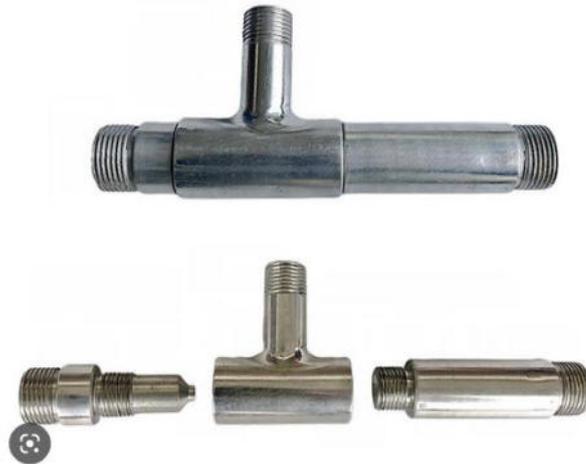


Figura 6. Dosificador Venturi de urea

El sistema se completa con una sonda Lambda, si es que el vehículo ya no posee una, y cabe resaltar que las fallas en la sonda Lambda arrastran fallas en los otros. En muchos vehículos, la sonda se halla instalada en el sistema de escape, pero cada vez más se lo está haciendo más cerca del motor, ya que mide el porcentaje de oxígeno en la corriente de escape, en tiempo real, instruyendo al control del motor.

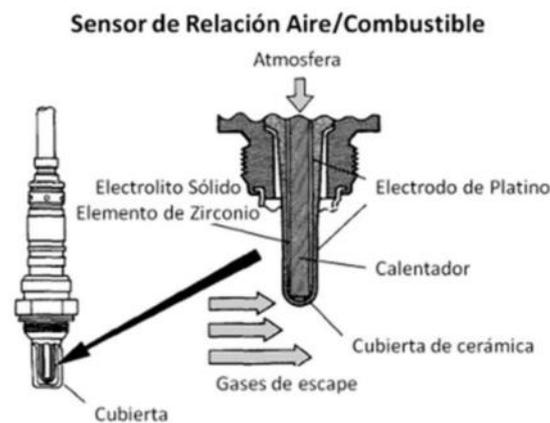


Figura 7. Esquema de una sonda Lambda

El catalizador puede dañarse por el uso de combustibles de baja calidad, con plomo, o de bajo octanaje, y si éste falla se nota un mayor consumo de combustible, mayores emisiones contaminantes, reducción de la potencia del motor y del voltaje eléctrico del vehículo, sobrecalentamiento del motor, y mal funcionamiento de los inyectores.

Asimismo, un exceso de aceite en el cárter de los motores diésel, puede inundar y romper el catalizador, mientras que un bajo nivel de la solución de urea, puede ocasionar daños en los dos catalizadores, en uno por esfuerzo, y en el otro por necesidad de las inyecciones del líquido. Sin embargo, la urea no es un fluido obligatorio para el funcionamiento del motor.



### 3. CONCLUSIONES

Las problemáticas a contemplar radican en los tiempos de respuesta y la sensibilidad, tanto de los sensores, como de la placa utilizados en la investigación.

Las limitaciones de esta familia de sensores radican en la temperatura y humedad de trabajo, aunque en el caso del presente trabajo, podrían asumirse constantes. La resistencia de calentamiento posee un consumo relativamente alto, cercano a los 750mW, dato a tener presente al construir el circuito electrónico, aunque la temperatura de los gases de escape, en este sentido, se comportaría como una ayuda adicional, dado que además los sensores recién comenzarán a trabajar correctamente al alcanzar su temperatura de trabajo.

Los sensores MQ® presentan ciertas dificultades al convertir la tensión de salida analógica en concentraciones de partes por millón (miligramos por litro). Si se trata de un sensor múltiple, por ejemplo, al sensor MQ-135, que reacciona a la presencia de NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, e HC, es conveniente calibrarlo respecto al gas de mayor interés (NO<sub>x</sub>). La función que relaciona las concentraciones de gas con la tensión de salida no es lineal, y en la documentación técnica de los sensores no se incluye la ecuación de la curva. Calibrar un sensor significa averiguar el valor de resistencia del mismo para un valor conocido de concentración. En este caso, podría aplicarse una solución Spline cúbica para describir la curva de respuesta, o curva “patrón”, en corrientes de gases de composición conocida. El valor más fácil de medir es la ausencia de concentración de gas en aire limpio, para tomar su respuesta como línea de base, también llamada “cero”. Este valor de resistencia obtenido puede ser diferente para cada sensor, por lo que se le asignará, en el código, a cada sensor el valor de su constante específica.

Si bien a régimen de vueltas de motor constante, o en régimen estacionario, esto no supone un inconveniente, esta situación sólo se reduce a la conducción por rutas, autopistas, etc., y durante tiempos prolongados, sin embargo, la conducción urbana, y aquellas que requieran operación a torques variables, en períodos cortos de tiempo, suponen grandes variaciones instantáneas en la composición de gases de escape, por lo que las velocidades de respuesta cobran mayor importancia, del mismo modo que lo hace la utilización de una electroválvula de caudal variable para la dosificación de urea, en lugar de simple motor paso a paso actuando sobre la manguera de dosificación. En este contexto, es de esperar que los sensores, placa, y electroválvula, sean sensiblemente más onerosos. No obstante, en la Universidad Nacional de La Matanza se trabaja, desde su polo tecnológico, con empresas en el rubro que se encuentran interesadas en recibir la transferencia de los resultados de la investigación, evaluando la viabilidad técnico-financiera para la aplicación de los métodos y resultados en el desarrollo de sistemas de sensores comerciales, de bajo costo, y mejores prestaciones.



#### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Eterovic, J.; Alterini, F.; Lohigorry A.; Blanco, G. (2022). "Hidrogeno verde, una oportunidad sustentable para el transporte". Revista Digital del Depto de Ingeniería. Universidad Nacional de La Matanza. DOI: <https://doi.org/10.54789/reddi.7.1.3>
- [2] Bugna L., Barilá D., Distel G., Soria G., Gómez R. *Instalación Experimental para la investigación de motores de combustión interna con hidrógeno*. Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación. La Plata, Buenos Aires Argentina. 2016
- [3] Bernaola Alonso, M. La emisión de aerosoles de partículas y gases en motores de diésel. Seguridad y Salud en el Trabajo. Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. INSHT. Número 73. 2013
- [4] Euro 3. Directiva 98/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. 2000.
- [5] Euro 6. Reglamento de Ejecución (UE) 2022/1362 de la Comisión de 1 de agosto de 2022 por el que se aplica el Reglamento (CE) n.o 595/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo. 2020
- [6] Fernández Ríos P., Araya J. Tecnologías de reducción de Emisiones de NOx. Caso: Uso sistema de Reducción Catalítica Selectiva (SCR). Better Technologies. San José de Costa Rica. 2012.
- [7] INGENIERIA QUIMICA. Ficha Técnica urea vehicular AUS 32/SCR- FACTORY para motores diésel bajo Norma EURO IV, IV y VI. 2019
- [8] Pablo Antuña I. Producción industrial de Urea. Argentina. 2017
- [9] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. Winsen MQ Sensor  
<https://www.winsen-sensor.com/mq-sensor.html>. 2003
- [10] ARDUINO SRL Arduino Uno Rev3. <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?>. 2021



## HIDRÓGENO EN TRENES, UNA OPCIÓN VERDE FRENTE AL DIÉSEL

Jorge E. Eterovic <sup>1</sup>, Gabriel E. Blanco <sup>2</sup>, Federico J. Alterini <sup>3</sup>, Pablo H. Sobral <sup>4</sup>, Gabriel E. Pisera <sup>5</sup>, Luis E. Fauroux <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de la Matanza, Florencio Varela 1903, San Justo, Provincia de Buenos Aires.  
[eterovic@unlam.edu.ar](mailto:eterovic@unlam.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de la Matanza, Florencio Varela 1903, San Justo, Provincia de Buenos Aires.  
[g2blanco@unlam.edu.ar](mailto:g2blanco@unlam.edu.ar)

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de la Matanza, Florencio Varela 1903, San Justo, Provincia de Buenos Aires.  
[fealterini@unlam.edu.ar](mailto:fealterini@unlam.edu.ar)

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de la Matanza, Florencio Varela 1903, San Justo, Provincia de Buenos Aires.  
[psobral@unlam.edu.ar](mailto:psobral@unlam.edu.ar)

<sup>5</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de la Matanza, Florencio Varela 1903, San Justo, Provincia de Buenos Aires.  
[gpiseral@unlam.edu.ar](mailto:gpiseral@unlam.edu.ar)

<sup>6</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de la Matanza, Florencio Varela 1903, San Justo, Provincia de Buenos Aires.  
[lfauroux@unlam.edu.ar](mailto:lfauroux@unlam.edu.ar)

### RESUMEN

La electrificación de ramales evita problemas de suministro de combustible y emisiones locales, pero la alta inversión asociada la torna poco rentable o inaccesible. Así, el hidrógeno producido con bajas emisiones de carbono, por sus beneficios ambientales, cobra fuerza para líneas no electrificadas como reemplazo del diésel. A medida que el costo del hidrógeno disminuya por escala y tecnología, podría ser competitivo.

Los requerimientos de energía y potencia de una locomotora limitan su autonomía a tracción eléctrica con baterías recargables (a su vez pesadas), una tecnología más factible para transportar pasajeros a corta distancia que para cargas y a larga distancia. La celda de combustible es una mejora sustancial en cuanto a autonomía y peso, pero principalmente para cargas se plantea la disyuntiva entre celda de combustible y combustión interna a hidrógeno. La utilización de hidrógeno en un motor de combustión interna es aún incipiente, pero representa la posibilidad de adaptar las actuales locomotoras diésel-eléctricas (con menor inversión, pero con peor rendimiento energético frente a las celdas). A su vez, el tiempo de reabastecimiento del hidrógeno es comparable al del diésel. En este trabajo, se analiza la factibilidad técnica, dejando la económica para cuando el proyecto aporte información necesaria. En particular, se estudia la factibilidad en un corredor ferroviario de cargas (dimensionando consumo, almacenamiento y producción de hidrógeno).

La UNLaM se propone contribuir a estudiar la viabilidad de una locomotora que combustione hidrógeno, en lugar de diésel. Se harán ensayos de motores genéricos sobre un banco de pruebas que se planea instalar en la universidad, con hidrógeno adquirido hasta que esté operativa la planta piloto de hidrógeno verde planificada. Luego se avanzaría con las pruebas en condiciones reales. En términos ambientales, si bien no se genera CO<sub>2</sub> ni otras sustancias tóxicas, continuarán presentes óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), que deberán mitigarse.

**Palabras Clave:** Locomotora; Hidrógeno verde; Cargas; Banco de motores



## 1. INTRODUCCIÓN

Si bien la actividad de carga por trenes en Argentina representa solo el 4% de los volúmenes de carga transportados y el sector de transporte ferroviario de cargas solo emite alrededor del 0.3% de todas las emisiones de transporte en el país [1], no es motivo para desconocer que las locomotoras de carga utilizan motores de combustión interna a ciclo diésel para generar electricidad e impulsar motores de tracción eléctricos, con un alto consumo de combustible, emisiones de dióxido de carbono y de óxido de nitrógeno.

Los principales *drivers* para adoptar material rodante alimentado por hidrógeno y/o baterías son los beneficios ambientales y sociales de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector ferroviario. Además de la innovación tecnológica y el desarrollo de estas estrategias para el transporte ferroviario y del seguro derrame hacia otros sectores.

### Algunos antecedentes locales, en favor del ambiente [2]

En Argentina se avanza con distintas alternativas para reemplazar el diésel en las locomotoras. A través de Ferrocarriles Argentinos Sociedad del Estado se ejecuta un convenio con la empresa estadounidense Optifuel Systems LLC para llevar adelante un proyecto para reconvertir locomotoras diésel a gas natural, en asociación con YTEC, INTI y UBA. El Ministerio de Transporte de la Nación avanza en un proyecto para desarrollar un prototipo de locomotora propulsada con celdas de hidrógeno. También la electrificación de los ramales es una opción en curso, pero para el transporte de pasajeros, y el Ministerio de Transporte junto con Trenes Argentinos y con financiamiento externo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Banco Mundial (BM), ya está trabajando en diversos proyectos de electrificación (líneas Belgrano Sur, Belgrano Norte, San Martín y ramales de la línea Mitre, entre otros).

### **1.1. La combustión del hidrógeno frente a las celdas de combustible, las baterías y la electrificación de ramales.**

Los trenes de hidrógeno en el mundo utilizan celdas de combustible para convertir el hidrógeno y el oxígeno en electricidad, lo que alimenta los motores de tracción. Entre sus ventajas destacamos la alta densidad de energía (kWh/kg) del hidrógeno comprimido a 350 bares frente a las baterías, largo alcance, rápido reabastecimiento de combustible y potencial para utilizar fuentes de hidrógeno renovables. Los trenes de baterías utilizan baterías recargables para almacenar y entregar electricidad, que puede obtenerse de cables aéreos, terceros rieles o estaciones de carga. Pueden operar tanto en líneas electrificadas como no electrificadas, y reducen el ruido y las emisiones en comparación con los trenes diésel. Sin embargo, la densidad de energía es menor, el alcance más limitado, los tiempos de carga mayores, alto el peso e



importante el impacto ambiental de la producción y de la disposición final de las baterías. Tanto las celdas de combustible como las baterías enfrentan el alto costo y la complejidad de la producción. En particular, el hidrógeno exige una red de almacenamiento y distribución, como así también mayores cuidados en aspectos de seguridad.

Los trenes eléctricos usan electricidad de cables aéreos o terceros rieles para alimentar los motores de tracción. Tienen una alta eficiencia, rendimiento y confiabilidad, bajos costos de operación, y reducidas emisiones y ruido. Sin embargo, también enfrentan algunos desafíos, como el alto costo de capital y la complejidad de la infraestructura de electrificación, la dependencia de la estabilidad y la disponibilidad de la red.

El uso de hidrógeno bajo en carbono en los motores ferroviarios de combustión interna (aquel hidrógeno obtenido con energías renovables o de origen fósil con captura y almacenamiento de carbono), supone una alternativa, en sí misma, con menores emisiones de efecto invernadero u otros contaminantes para líneas no electrificadas donde ahora circulan trenes diésel eléctricos. En cambio, en los servicios con ramales electrificados y/o con baterías la contribución al ambiente dependerá del origen de la electricidad utilizada.

En este contexto desde la UNLaM se procura realizar pruebas y contribuir al desarrollo de tecnologías que permitan la utilización del hidrógeno bajo en carbono como combustible, en motores estacionarios y en el transporte pesado donde resultaría más competitivo frente a la locomoción a baterías, hoy de litio: fundamentalmente por autonomía, tiempos de recarga y una menor exigencia de espacio y peso para su funcionamiento. Aceptando un rendimiento energético inferior (ciclo Otto: 25 a 30% vs celda: > aprox. 57%), pensamos que podría cobrar fuerza en Argentina por las dificultades para acceder a la tecnología y al crédito. Si bien entendemos a la combustión del gas natural como muy relevante para la transición energética, dadas las menores emisiones frente a otros combustibles fósiles y las importantes reservas con las que cuenta el país, destacamos que el destino final tendrá que ser “más verde” y el hidrógeno bajo en carbono es un candidato.

Así, es posible que se esté en la puerta de entrada de una nueva era donde el hidrógeno será una de las soluciones más prometedoras para reducir emisiones a nivel global. Pero nada de eso será realidad sin condiciones de costo e inversiones competitivas *per se* o por beneficios fiscales o ambientales. Premios al consumo de energías limpias, o penalidades a las emisiones contaminantes y de efecto invernadero, podrán ser parte del menú para una solución que le permita competir al hidrógeno bajo en carbono frente al combustible fósil.

## 1.2. El hidrógeno en motores de combustión interna. Consideraciones generales



Emplear hidrógeno puro en motores, exige importantes modificaciones. En cambio, el hidrógeno se puede utilizar como combustible complementario ya sea en motores con encendido a chispa o a compresión con mínimas adaptaciones, pero así también será menor la contribución al cuidado del ambiente.[3]

Cuando se utiliza hidrógeno como aditivo en motores de encendido por chispa y de encendido por compresión, se reduce la eficiencia volumétrica del motor. La relación de masa aire/combustible es 34/1 para la combustión completa de hidrógeno en el cilindro. Esto significa que se debe mezclar 1 parte de hidrógeno y 34 partes de aire para una combustión completa. Esta relación es 17/1 para motores diésel y 15/1 para motores de gasolina. El hidrógeno ocupa aproximadamente el 30% de la cámara de combustión en condiciones estequiométricas, mientras que este valor está entre el 1 y el 2% para los motores de gasolina. Esta reducción en la eficiencia volumétrica redundará en menor potencia y par del motor. [4]

El hidrógeno es más adecuado para su uso en motores de encendido por chispa que en motores de combustión por compresión. Algunas propiedades [5]: La velocidad avance del frente de llama del hidrógeno, a igualdad de exceso de aire en la combustión, por ejemplo, es mucho mayor que la de la gasolina (1,85 vs aprox.0,4 m/seg.), lo que mejoraría la estabilidad de la combustión. Además, el hidrógeno tiene un coeficiente de difusión ( $m^2/seg.$ ) significativamente mayor que la gasolina (4x), lo que daría como resultado una mezcla más homogénea de aire y combustible. A su vez, debido a que el hidrógeno tiene una temperatura de auto ignición más alta (alrededor de 858 K vs 623 K de la gasolina), se adapta mejor a los motores a encendido por bujías que a los motores de combustión por compresión. Como contrapartida, la energía de activación es mucho menor que la de la gasolina (0,02 mJ vs 0,24 mJ) con lo cual será mucho más susceptible a auto-encendido.

La modificación principal requerida para convertir un motor alimentado a diésel a otro alimentado 100% a hidrógeno es la instalación de un sistema de encendido. Deberá mitigarse también el riesgo de pre-encendido y golpeteos, como así también las emisiones de NOx térmico formado por el nitrógeno del aire de combustión ante las altas temperaturas de la combustión del hidrógeno.

La inyección de hidrogeno directamente en la cámara de combustión (inyección directa) al final de la carrera de compresión garantizaría que la pre-ignición se produzca como muy pronto luego de la inyección y aseguraría también que la combustión sea lo suficientemente rápida para lograr el quemado total del fluido de hidrógeno que ingrese. Seguramente un desafío será el eficiente sellado del sistema de inyección para evitar fugas, un riesgo que se acentúa con el uso del hidrógeno. Se debe prestar especial atención a todo el circuito de inyección, incluyendo la bomba inyectora, no solo por las presiones necesarias de trabajo, sino también por el riesgo de



fragilización de materiales a causa del hidrógeno, este último tema, en particular, será objeto de un estudio de materiales a realizar. Actualmente se utiliza una gama de aceros inoxidables austeníticos (304L y 316L) o aleaciones de Ni-Cr-Mo (Alloy C22). En términos prácticos, el inyector de diésel tendrá que ser reemplazado por un inyector de hidrógeno y deberán incorporarse bujías de encendido. Estimamos que, al coincidir la combustión con el periodo de inyección, las presiones en el cilindro se mantendrán dentro de límites admisibles para un buen funcionamiento.

Es cierto que probablemente la opción de mayor facilidad de implementación sea la de premezclar hidrógeno y aire en el colector de admisión (inyección indirecta) dado que requeriría mínimas modificaciones a nivel de equipos. Pero como antes comentáramos, el volumen que ocuparía el hidrógeno en la cámara de combustión limitaría la cantidad de aire admitido, afectando potencia y par del motor. Tampoco solucionaría las desventajas de la pre-ignición por temperatura.

Para el tratamiento de las emisiones la industria avanza, desarrollando sistemas postratamiento que permitan eliminarlas en su mayoría y/o trabajando sobre la admisión de los motores con relaciones de aire muy superiores a la estequiométrica, a mayor cantidad de aire, menor temperatura, menor generación de NOx térmico. [6]

### **1.3. Prefactibilidad para la adaptación a hidrógeno de las locomotoras del Belgrano Cargas – El caso del corredor J.V. González (Salta) - Rosario (Santa Fe)**

#### **1.3.1 Sistema Argentino de cargas por ferrocarril**

Trenes Argentinos posee tres líneas operativas, Belgrano, San Martín y Urquiza que en conjunto suman 9.100 kilómetros. Recorren 17 provincias lo que corresponde al 70% del país con un total de 5 pasos internacionales. Las cargas que se transportan incluyen cereales, oleaginosos, subproductos, azúcar, cemento, piedra, fundente, carbón, fertilizantes, metales, madera, vino, aceitunas, melaza, agua, entre otras.

En particular, el ferrocarril Belgrano abarca 14 provincias, con conexiones incluso regionales (Chile y Bolivia). La línea Belgrano cuenta con 60 locomotoras y 2.860 vagones en servicio según datos de CNRT a 2020 [7]. Su extensión actual (en funcionamiento) es de casi 5.000 km.

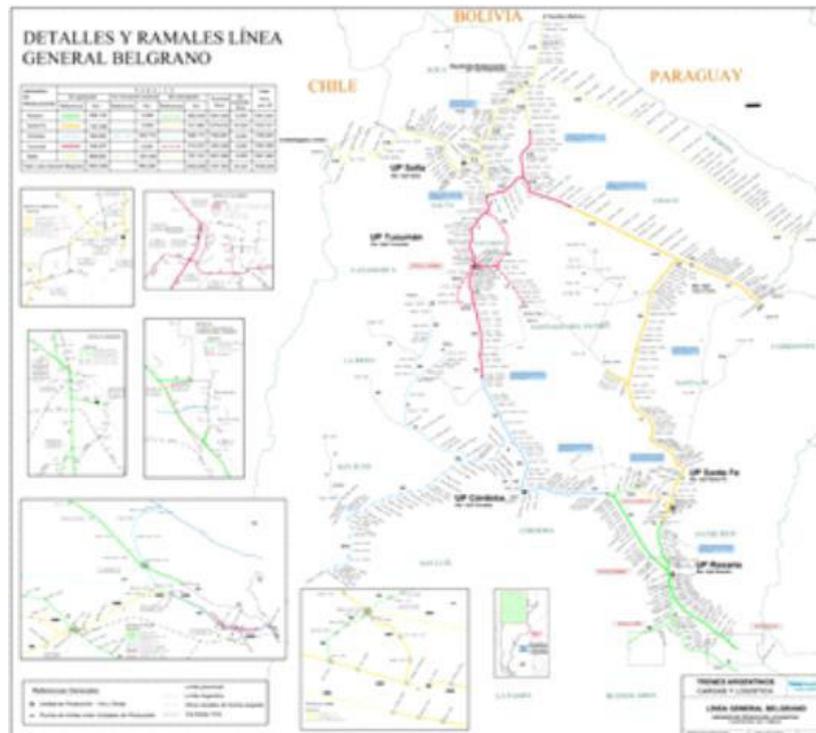


Figura 1: Ramales Línea General Belgrano

En particular, el corredor entre el norte del país (Joaquín V Gonzalez, Salta) y el puerto de Rosario, Santa Fe posee un recorrido de 1.170 km siendo muy relevante para la actividad agroexportadora.

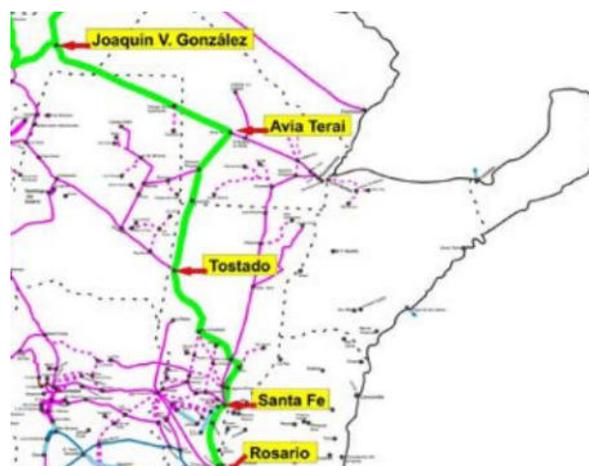


Figura 2: Corredor J.V. González (Salta) – Rosario (Santa Fe) [8]

### 1.3.2 Renovación equipamiento e infraestructura de los trenes de carga



Conforme al proyecto de renovación integral de vías, adquisición de material rodante (vagones y locomotoras) y otras obras complementarias, durante la última década, se ha logrado aumentar sustancialmente el transporte de cargas, alcanzando un total de 2.843.000 toneladas en 2022 [7] de las cuales 1.600.000 de toneladas corresponden a este último corredor [9]. La mencionada renovación de vías, sumada a la mejora del equipamiento rodante, ha logrado disminuir el tiempo de circulación de las formaciones de carga en mencionado corredor a la mitad entre 2012 (88 horas) y 2022 (43 horas) [9].

El proyecto de renovación integral incluyó la compra de 40 locomotoras nuevas para la línea Belgrano, que se suman a las ya existentes, donde además se ha logrado, en los últimos años, la recuperación de 21 locomotoras (reparadas integralmente).

Las locomotoras nuevas, se adquirieron a CRCC de China y han logrado transportar formaciones de hasta 100 vagones (duplicando las antiguas formaciones de 45 vagones) y con más peso por vagón, llegando así a formaciones de 6.000 toneladas netas, lo que equivale a unos 200 camiones (y, respecto a eficiencia de combustible diésel, en el orden de 4 a 1 más eficiente el tren en términos de litros de combustible por tonelada cada 100 km) [10].

### ***1.3.3 Algunas especificaciones técnicas de interés de las unidades de CRRC [8]***

- **Motor diésel: MTU16V4000R43 de 2.200 kW**, 16 cilindros y velocidad nominal de 1.800 rpm. **Consumo de combustible: 206 g/kWh**
- **Tanque de combustible: 4.000 litros.**
- Velocidad máxima: 80 km/h.

### ***1.3.4 Estimación del consumo de combustible de una formación***

De acuerdo con los datos previamente citados, y para este análisis, se asume que se recorren los 1.170 km del corredor J.V. González - Rosario en 43 horas y que las formaciones tendrán, todas, un peso neto (carga) de 6.000 toneladas:

- Velocidad promedio = 27,2 km/h (1.170 km en 43 horas).
- Se asume una potencia promedio de 2.000 hp (1.491 kW) que representan 2/3 de la potencia máxima; a dicha potencia, se consumen unos 382 litros por hora de marcha [8].
- Diésel estimado requerido para todo el trayecto = 16.426 litros (382 l/h \* 43 hs).
- 2,74 litros de diésel por tonelada transportada (16.426 litros para 6.000 TON).

### ***1.3.5 Reemplazo del combustible diésel por hidrógeno – dos escenarios***



**Escenario nro. 1:** reemplazo del 70% del diésel por hidrógeno verde, manteniendo toda la mecánica diésel. Se espera una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y de otras nocivas derivadas de la presencia de hidrocarburos. Los NO<sub>x</sub> seguirán presentes por las altas temperaturas de trabajo.

**Escenario nro. 2:** reemplazo del 100% del diésel por hidrógeno, reconvirtiendo el motor a ciclo Otto pero reutilizando la mayor parte de su estructura. Luego de la reconversión, por diferencias de eficiencias entre motores diésel (promedio de 37,5%) y ciclo Otto (promedio de 27,5%), se considerará entonces una pérdida de eficiencia del 26,7% respecto a la del motor original diésel ( $1 - (27,5\% / 37,5\%)$ ).

En términos de rendimiento energético, utilizando la equivalencia según los poderes caloríficos inferiores del diésel (43,1 MJ/kg) y del hidrógeno (120 MJ/kg) y de la densidad del diésel = 0,85 kg/l, para 1 tonelada transportada serían necesarios 2,74 litros de diésel, que son 2,33 kg y que, por lo tanto, equivalen a 100,38 MJ de energía. Entonces, para cada escenario resulta:

Tabla 1. Combustible necesario para transportar 1 tonelada todo el trayecto

	Escenario 1	Escenario 2
<b>Diésel</b>	30%*100,38 MJ = 30,11 MJ del diésel (0,699 kg de diésel = <b>0,822 l de diésel</b> )	-
<b>H<sub>2</sub></b>	70%*100,38 MJ = 70,27 MJ del H <sub>2</sub> ( <b>0,586 kg de H<sub>2</sub></b> )	100,38 MJ / (1-26,7%) eficiencia = 136,94 MJ de H <sub>2</sub> ( <b>1,141 kg de H<sub>2</sub></b> )

Entonces, para un tren de 6.000 TON netas de carga transportada que recorra el mencionado trayecto, serían necesarios:

Tabla 2. Combustible necesario para una formación (6.000 TON netas) todo el trayecto

	Escenario 1	Escenario 2
<b>Diésel</b>	0,822 l/TON * 6.000 TON = <b>4.932 litros de diésel</b>	-
<b>H<sub>2</sub></b>	0,586 kg/TON * 6.000 TON = <b>3.516 kg de H<sub>2</sub></b>	1,141 kg/TON * 6.000 TON = <b>6.846 kg de H<sub>2</sub></b>

Luego, asumiendo que se pudiera adaptar a un vagón de la formación algo similar a un *trailer* como el que ha presentado la empresa española Calvera en 2023 (que transporta 1.300 kg de hidrógeno comprimido a 517 bar, y tiene una longitud de 45 pies – aprox. 14 m) para tener el combustible para un trayecto, serían necesarios:

Tabla 3. Equivalencia combustible con tanque / contenedores



	Escenario 1	Escenario 2
<b>Diésel</b>	4.932 litros de diésel -> <b>es necesaria una recarga (ya que el tanque es de 4.000 litros)</b>	-
<b>H<sub>2</sub></b>	3.516 kg de H <sub>2</sub> -> <b>3 vagones como el del ejemplo citado</b>	6.846 kg de H <sub>2</sub> -> <b>6 vagones como el del ejemplo citado</b>



Figura 3: Camión tipo *trailer* para tubos de H<sub>2</sub> comprimido – empresa Calvera

### 1.3.6 Dimensionamiento de la producción de hidrógeno requerida por año

Retomando la cantidad de toneladas transportadas en 2022 en el corredor elegido (1.600.000 TON) y considerando lo supuesto previamente (6.000 TON por formación, todas iguales por simplicidad para esta prefactibilidad) resultan necesarias 267 formaciones de 6.000 TON por año (aprox. 5 formaciones por semana).

Tabla 4. Cantidad de combustible total por año, según escenario

	Escenario 1	Escenario 2
<b>Diésel</b>	4.932 litros de diésel por formación -> <b>1.316.844 litros por año</b>	-
<b>H<sub>2</sub></b>	3.516 kg de H <sub>2</sub> por formación -> 938.772 kg <b>(939 TON) de H<sub>2</sub> por año o 2,57 TON de H<sub>2</sub> por día</b>	6.846 kg de H <sub>2</sub> por formación -> 1.827.882 kg <b>(1.828 TON) de H<sub>2</sub> por año o 5,01 TON de H<sub>2</sub> por día</b>

Por cuestiones de economías de escala (el porte requerido del electrolizador, etapa de compresión del hidrógeno para el reaprovisionamiento, parque de generación de la energía renovable para alimentar al electrolizador, para que de esta forma el hidrógeno sea verde, etc.)



en primera instancia sería conveniente instalar la generación del hidrógeno y reaprovisionamiento en las cabeceras, acarreado el hidrógeno necesario para todo un trayecto.

A continuación, se cita como ejemplo un modelo de planta de producción de hidrógeno, que actualmente es ofrecida por un fabricante conocido (NEL) de electrolizadores, y que estaría en el orden de magnitud del porte necesario para cubrir la producción de hidrógeno citada.

Specifications	A3880
Net Production Rate	
Nm <sup>3</sup> /h @ 0°C, 1 bar	2400-3880 Nm <sup>3</sup> /h
kg/24 h	5.180-8.374 kg/24 h
Production Capacity Dynamic Range	15-100% of flow range
Power Consumption at Stack	3.8-4.4 kWh/Nm <sup>3</sup>

Figura 4: Algunas especificaciones del electrolizador A3880 de NEL.

Finalmente, es importante notar que debe afectarse lo anterior al factor de planta de la central de generación de energía renovable, que variará según las condiciones del lugar y del tipo de generación (como por ejemplo solar fotovoltaica, eólica, etc).

#### 1.4. Banco de pruebas de motores. Plan preliminar

##### 1.4.1 Marco general

La UNLaM avanza con su proyecto de instalar un banco de prueba de motores sobre el cual se desarrollarán investigaciones que permitan comprender el comportamiento de los motores de combustión interna con hidrógeno como combustible, ya sea en forma total o parcial. Dado los riesgos y altas temperaturas que conllevan la combustión del hidrógeno, entendemos que el tipo de motor que mejor se ajusta a la reconversión es, por su robustez, el diésel. Sin embargo, por las consideraciones antes nombradas, sería necesario implementar cambios sobre las mecánicas.

El suministro de hidrógeno para las pruebas se alimentará con tubos de hidrógeno presurizado, en un principio de terceros hasta que la UNLaM tenga en funcionamiento su propio electrolizador. Se contará con sensores tanto de interés mecánico, como los específicos para el análisis de gases de escape (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc),

Las investigaciones tendrán vinculación y transferencia con entidades, tanto públicas como privadas, en el marco de los convenios específicos correspondientes. El hidrógeno y los motores,



como cualquier otro insumo o equipo, podrán ser suministrados por empresas u organismos interesados, tanto públicos como privados.

#### **1.4.2 Plan preliminar de trabajo**

La utilización del hidrógeno puro en motores de combustión interna como un vector para reducir fuertemente las emisiones nocivas y de efecto invernadero, exige adecuar el sistema de inyección de combustible de diésel a hidrógeno y dotar al motor de un sistema de encendido a chispa a ciclo Otto, se requerirá trabajar sobre el avance del encendido (el tiempo entre que salta la chispa y el pistón llega a punto muerto superior "PMS"), las presiones (y velocidad) de inyección de combustible, el momento apropiado para realizar la inyección de forma de evitar la autoignición. Se estudiará la composición de la mezcla carburante. Se contemplará la viabilidad técnico-financiera.

Se investigarán alternativas para la inyección de hidrógeno en la cámara de combustión, y el tratamiento de los gases de escape, así como variar las condiciones de mezcla y su impacto en la potencia y torque, entre otras variables.

En un principio se realizarán pruebas sobre motores mono-cilíndricos, dada su menor complejidad técnica, para luego escalar a motores de mayor envergadura. Se comenzará incorporando el hidrógeno como aditivo al combustible fósil como camino para lograr una utilización al 100% de hidrógeno.

Se estudiará la necesidad de incorporar nuevos materiales ante el riesgo de fragilización de materiales que conlleva la utilización de hidrógeno.

## **2. CONCLUSIONES**

Los países desarrollados avanzan con el uso del hidrógeno en el mundo ferroviario, pero basados en celdas de combustible. La viabilidad del uso del hidrógeno como combustible en motores de combustión interna, permitiría dar una segunda vida a las locomotoras diésel-eléctricas, que hoy transitan el sistema ferroviario argentino, en un mundo que busca ser más "verde". La reconversión sería ventajosa en términos de capital frente a las celdas de combustible, pero deberá asumirse un rendimiento energético de casi la mitad. El hidrógeno aventaja a las baterías en el transporte pesado y en lo operativo resulta similar al diésel en términos de autonomía y tiempos de reabastecimiento. En nuestros números, las necesidades que plantea el uso de hidrógeno en un corredor ferroviario de carga, serían dimensionalmente viables en términos de consumo, almacenamiento y producción de hidrógeno. Sin embargo, las viabilidades técnicas no son suficientes para garantizar que el hidrógeno avance a toda máquina en la tracción



ferroviaria, deberán darse, entre otras, condiciones de mercado que permitan al hidrógeno ser competitivo en términos de precio, frente a los combustibles fósiles. En nuestros números se necesitarían 0,4 kilogramos de hidrógeno para reemplazar 1 litro de diésel, mientras el litro de diésel en USA se puede conseguir a menos de 1 dólar estadounidense (US Energy Information Administration) frente a los 10 dólares necesarios para adquirir un kilogramo de hidrógeno (Stanford University. Decarbonizing Heavy-Duty Transportation - 2021). Hoy es factible producir hidrógeno verde en el país del norte a un costo de 5 USD/KG, y de cumplirse el objetivo para 2030 (Hydrogen Shot Summit- 2021) ese valor se reduciría hasta 1 USD/KG, podría entonces ganar competitividad.

## REFERENCIAS

- [1] International Transport Forum, « Descarbonizando el Sistema de Transportes en Argentina : Trazando un Rumbo a Seguir », Publicaciones de la OCDE, página 10,. París, Año 2020.
- [2] Portal del Gobierno Argentino <https://www.argentina.gob.ar/transporte/transporte-sostenible/lo-que-estamos-haciendo>, Año 2023.
- [3] Shadidi, B.; Najafi, G.; Yusaf, T. A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines. Energies 2021, Año 2021.
- [4] Akal, D.; Öztuna, S.; Büyükkakin, M.K. A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-Lpg-diesel) from combustion performance aspect. International Journal of Hydrogen Energy 2020, Año 2020.
- [5] Ho Lung Yip, Aleš Srna, Anthony Chun Yin Yuen, Sanghoon Kook, Robert A. Taylor, Guan Heng Yeoh, Paul R. Medwell and Qing Nian Chan. A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion, página 5., Applied Sciences, Año 2019.
- [6] Jim Nevergall, How do hydrogen engines work?, Cummins Web Site, Año 2022.
- [7] CNRT. Trenes de cargas (estadísticas operativas), Datos generales ferrocarriles de carga, Año 2020.
- [8] Luna, E. Las "Chinas" del Belgrano, Tren Rodante, Número 259, Año 2020.
- [9] Juárez, M. y San Cristóbal, D. Mundo Ferroviario, El Impacto de la Renovación de Vía en el Belgrano Cargas, Año 2022.
- [10] Golato, M. y Cárdenas, G. EEAOC, Consumo de combustible y energía en el transporte de bioetanol, Avance Agroindustrial, Número 33-1, Año 2012.



## Perspectivas de la electrificación vehicular en Argentina

Gustavo Jiménez-Placer<sup>1</sup>, Daniel Zambrano<sup>1</sup>, Amado Vitali<sup>1</sup>, Gonzalo Delcauce<sup>1</sup>,  
Juan Agotegaray<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Industria-Universidad Nacional de General Sarmiento, Juan María Gutiérrez 1150 (1613), Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina. Correo-e: Gustavo Jiménez Placer: [gplacer@campus.ings.edu.ar](mailto:gplacer@campus.ings.edu.ar); Daniel Zambrano: [dzambrano@campus.ungs.edu.ar](mailto:dzambrano@campus.ungs.edu.ar); Amado Vitali: [avitali@campus.ungs.edu.ar](mailto:avitali@campus.ungs.edu.ar); Gonzalo Delcauce: [jdelcauce@campus.ungs.edu.ar](mailto:jdelcauce@campus.ungs.edu.ar); Juan Agotegaray: [jagotega@campus.ungs.edu.ar](mailto:jagotega@campus.ungs.edu.ar)

### RESUMEN

La electrificación del parque vehicular en el mundo es un objetivo planteado por los gobiernos y que surge de la necesidad de controlar emisiones para de alguna manera disminuir su impacto en el cambio climático. El panorama que se presenta en los países desarrollados difiere enormemente de las perspectivas y la realidad que se manifiesta en los países subdesarrollados. América latina presenta disparidades en cuanto al desarrollo y el futuro de la implementación de este cambio, y la diferencia aún es más significativa cuando comparamos con Europa, América del Norte o China. En este artículo se desarrolla una mirada inicial sobre estas diferencias y el horizonte a cercano y a mediano plazo. Si bien esto es solo una visión limitada muestra que tanto nuestro país como el resto de América presentan condiciones disímiles que, a pesar de contar con recursos tecnológicos claves para el desarrollo de este proceso de electrificación, factores como la geografía, infraestructura y condiciones socioeconómicas, no permiten ver que en el corto o mediano plazo esta transformación sea una realidad para el ámbito del transporte vehicular, especialmente en Argentina.

**Palabras Clave:** *Electrificación; Parque Vehicular; Cambio Climático; Argentina.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Reemplazar los vehículos de motor convencional por vehículos híbridos y eléctricos puede ser un proceso complejo y requiere de un enfoque integral que involucre a diferentes sectores y actores, incluyendo gobiernos, empresas, fabricantes de vehículos, consumidores y la sociedad en general. Por ello la sustitución de vehículos convencionales no es un simple cambio en la fuente de potencia del vehículo sino una transformación compleja en la que inciden principalmente cuestiones que exceden el aspecto técnico e involucra complejas decisiones.

Este artículo solo es el inicio de un proceso de investigación que pretende analizar algunos de estos factores y está relacionado con un proyecto de investigación que se ha puesto en marcha recientemente en la Universidad Nacional de General Sarmiento, que pretende mediante el análisis de datos, su compilación y comparación con experiencias realizadas en Argentina con la introducción del GNC (Gas Natural Comprimido) para uso vehicular, analizar un modelo de la posible expansión y afianzamiento de la electrificación vehicular, teniéndolo en cuenta como modelo comparativo, que ya lleva más de 30 años desde su implementación en Argentina.

Las dificultades planteadas por la implementación del GNC cuyo objetivo tenía en cuenta variables similares a las hoy planteadas para la introducción de la electrificación en el ámbito del transporte, teniendo en cuenta la reducción del impacto ambiental proveniente del uso vehicular, nos permitirá analizar similitudes y diferencias con la introducción de vehículos híbridos y eléctricos en nuestro contexto socioeconómico. El proyecto se basa en analizar datos estadísticos, provenientes de la introducción, expansión y afianzamiento del uso del GNC en Argentina. Y elaborar un modelo que permita prever la evolución de la electrificación en nuestro país, ya que tanto la tecnología del GNC como la electrificación comparten en gran parte las variables que permitieron la evolución del GNC. Debemos tener en cuenta que cuando se decidió implementar como alternativa la utilización del GNC en nuestro país, se plantearon los problemas de una escasa infraestructura tanto de distribución de la energía y los puntos de carga, ,a escasa autonomía, el costo de la implementación en los vehículos por mayores costos donde el costo del almacenamiento (tanque) fue y es el mayor costo de transformación de un vehículo, lo que sería equivalente a la batería en los vehículos eléctricos.. Se puede observar que pese a los intentos de extender esta tecnología como única fuente de energía (utilizar solo GNC) no prosperó, debido a las dificultades de abastecimiento y la limitada autonomía, factores que hoy pueden observarse en la introducción de vehículos eléctricos. Lo que ha perdurado en Argentina, son los vehículos que comparten una movilidad "híbrida", vehículos pueden funcionar tanto con GNC como con combustible tradicional. Por ello también esto hace a la similitud en la implementación de la electrificación donde podemos observar que vehículos híbridos (motor de combustión-eléctrico) son una solución, por lo menos transitoria, para lograr el paso hacia la electrificación total.



## 2. Desarrollo

En Europa, existen grandes diferencias en cuanto a la penetración de mercado que han tenido los vehículos eléctricos e híbridos y diferencias notables en cuanto al tipo de utilización de vehículos sean estos de uso particular o para transporte público. En estos últimos la incidencia de las decisiones gubernamentales es fundamental para la introducción de estos vehículos y su explotación, debido al alto costo inicial y a la necesidad de contar con una infraestructura adecuada.

Analizando algunos países europeos vemos que por ejemplo, en los últimos años, la electrificación de los vehículos en España ha experimentado un crecimiento notable, aunque aún queda margen para su consolidación. Según los últimos datos de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), en 2020 se alcanzó una cuota de mercado del 4,8% de vehículos eléctricos e híbridos enchufables.

El Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia presentado por el Gobierno español incluye medidas para impulsar la movilidad eléctrica, con una inversión prevista de más de 3.000 millones de euros en los próximos años. Entre ellas se encuentran la instalación de más de 100.000 puntos de recarga en lugares públicos, la renovación de la flota pública de vehículos y la puesta en marcha de programas de incentivos para la compra y renovación de vehículos eléctricos.

Sin embargo, todavía hay varios obstáculos a superar, como la falta de infraestructura de carga en carreteras y zonas rurales, la escasez de modelos disponibles en el mercado y el precio elevado de los vehículos eléctricos en comparación con los convencionales. Además, en algunos casos, la falta de información y formación sobre las ventajas y desventajas de los vehículos eléctricos puede suponer una barrera para su adopción. Según datos de la Asociación Empresarial para el Desarrollo e Impulso del Vehículo Eléctrico (AEDIVE), a finales de 2020 había en España cerca de 30.000 vehículos eléctricos matriculados, entre turismos, motocicletas, furgonetas y autobuses. Respecto a los vehículos híbridos, según datos del Instituto de Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), en 2020 se matricularon en España un total de 55.386 vehículos híbridos enchufables y no enchufables. Según datos de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), a enero de 2021, existen alrededor de 28 millones de turismos y vehículos comerciales ligeros alimentados principalmente con gasolina o diésel, mientras que alrededor de 25.000 turismos y vehículos comerciales ligeros son totalmente eléctricos. En cuanto a vehículos híbridos que son considerados la transición hacia vehículos eléctricos, alrededor de 11.000 turismos y vehículos comerciales ligeros son híbridos enchufables y alrededor de 85.000 híbridos convencionales.

Según datos de la Asociación Europea de Fabricantes de Automóviles (ACEA) en 2020, el país de Europa con más vehículos híbridos y eléctricos en circulación es Noruega, seguida de Islandia



y Suecia. En Noruega, el 54% de los coches nuevos vendidos en 2020 eran completamente eléctricos, mientras que los híbridos enchufables representaban el 24% de las ventas. Esto se debe en gran parte a la política gubernamental en Noruega que incluye exenciones fiscales para los coches eléctricos y una amplia red de puntos de carga públicos, y el bajo valor de la energía eléctrica.

Como en el resto del mundo, existen varios problemas principales para la expansión de los vehículos eléctricos en Europa, entre ellos la infraestructura de carga insuficiente, que a pesar de que la red de carga está creciendo en Europa, aún existen lugares donde es difícil encontrar estaciones de carga, lo que limita la autonomía y la conveniencia de los vehículos eléctricos. Un factor fundamental sigue siendo el precio de los vehículos eléctricos que sigue siendo elevado en comparación con los vehículos de combustión interna. Además, la limitada oferta de modelos en comparación con los vehículos de combustión interna.

El uso de vehículos eléctricos en Alemania ha ido en aumento en los últimos años, gracias a los incentivos y políticas gubernamentales para impulsar la movilidad eléctrica, a través de la rebaja en impuestos y subsidios al transporte de pasajeros y al valor de la energía eléctrica. Según cifras de la Asociación Alemana de la Industria del Automóvil, en los primeros siete meses de 2021 se registraron unas 127.000 unidades de vehículos eléctricos nuevos, lo que representa una cuota de mercado del 15,9% y un aumento del 159% en comparación con el mismo periodo del año anterior. A pesar del fuerte crecimiento experimentado en los últimos años, la mayoría de los vehículos en circulación en Alemania todavía son de combustión interna. Según datos de la Agencia Federal de Transporte de Alemania, a principios de 2021 había unos 47,7 millones de vehículos registrados en el país, de los cuales solo unas 600.000 eran eléctricos puros o híbridos enchufables. Esto significa que los coches eléctricos solo representan alrededor del 1,3% del total de los vehículos en Alemania. Sin embargo, la tendencia es al alza y se espera que la cifra de vehículos eléctricos siga creciendo en los próximos años.

Si analizamos el resto del mundo, teniendo en cuenta la penetración de los vehículos eléctricos e híbridos, vemos que China figura en primer término con más de 7 millones de vehículos, y en un año el mercado creció más de 3,3 millones (datos al 2021). Luego se encuentra Estados Unidos, con poco más de 2 millones de vehículos electrificados, pero con un crecimiento, más bajo que otros países, de apenas 286.000 nuevas unidades. En tercer lugar, se encuentra Alemania, que es el primer país europeo con unos 1,3 millones de vehículos eléctricos, Reino Unido con 745.000, casi la mitad que Alemania, Francia con 724.000 vehículos electrificados. Le siguen Noruega con 636.000 vehículos y Países Bajos con 385.000, pero con un crecimiento que no pasa de las 94.000 unidades.

Si bien, toda Europa está de acuerdo en que el vehículo eléctrico es el futuro, no todos los países van a la misma velocidad. Los del norte (más ricos) están acelerando mucho más que sus vecinos del sur (en general, más pobres). Así, según datos de la consultora Jato, el vehículo



eléctrico acaparó un 15% de la cuota de mercado en el norte europeo en el tercer trimestre de este año, frente al 3,8% del sur, es decir casi cuatro veces más. Estas diferencias se explican, en parte, por el menor poder adquisitivo de los europeos del sur. Sin embargo, hay otros factores que influyen, como las ayudas y los incentivos de los respectivos gobiernos tanto en el subsidio al precio directo del vehículo, la rebaja o exención de impuestos para vehículos de emisión “cero”. En el caso noruego, por ejemplo, la persona que decida hacerse con un coche eléctrico no pagará IVA (para los de combustión es del 25%) ni impuesto de matriculación.

En el caso del gobierno chino ha implementado una serie de políticas e incentivos para apoyar el crecimiento del mercado de vehículos eléctricos. Estos incluyen subsidios para la compra de vehículos eléctricos, exenciones de impuestos a la compra y restricciones a la venta de vehículos a gasolina en algunas ciudades. En general, el mercado de vehículos eléctricos en China ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsado por las políticas gubernamentales, la demanda de los consumidores y el desarrollo de infraestructura de apoyo. El gobierno chino ha establecido objetivos ambiciosos para la adopción de vehículos eléctricos, con el objetivo de que los vehículos eléctricos representen el 20 % de las ventas totales de automóviles nuevos para 2025.

Dentro del continente americano, un jugador que, si bien fue pionero, hoy no ocupa un lugar preferencial en este cambio hacia el futuro, es Estados Unidos. El mercado de vehículos eléctricos en Estados Unidos ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años. En 2020, se vendieron alrededor de 328.000 vehículos eléctricos en Estados Unidos, lo que representó un aumento del 140% en comparación con el año anterior. Aunque los vehículos eléctricos aún representan una pequeña fracción del mercado automotriz total en el país, su crecimiento es notable. A pesar del crecimiento, los vehículos eléctricos todavía representan una parte relativamente pequeña de las ventas totales de vehículos en Estados Unidos. En 2020, los vehículos eléctricos representaron aproximadamente el 2% de las ventas totales de automóviles nuevos en el país. El gobierno federal y varios estados en Estados Unidos han implementado políticas y estímulos para fomentar la adopción de vehículos

Uno de los principales problemas para la introducción de los vehículos eléctricos, es la necesidad de infraestructura pública. En Argentina contamos con un caso testigo que fue la introducción del GNC como combustible para los vehículos livianos y de transporte público. En el año 87 se comenzó con la introducción de la tecnología que permitía adaptar directamente un motor de combustión convencional para utilizar GNC. Si bien en un principio contó con gran interés por parte de la población en general y contaba con el apoyo gubernamental, algunas dificultades tecnológicas, el alto costo del equipo, y sobre todo la limitación en cuanto a la autonomía de los vehículos y la necesidad de una infraestructura adecuada, limitaron durante mucho tiempo su expansión masiva. Si bien fue adoptado en las grandes ciudades y sobre todo por particulares pero que realizaban viajes cortos y recorrían muchos kilómetros diariamente (ejemplo de taxis),



esta tecnología se vio limitada principalmente por la infraestructura, ya que se necesitaba de la implementación de una red de gas de alta presión en las cercanías de las estaciones de servicio donde además era necesario poseer equipo de compresión de alta presión y un sistema de abastecimiento a alta presión que limitó las inversiones. Pese a ello en las grandes ciudades el vehículo a GNC tuvo buena acogida, pero la limitación de autonomía fue fundamental para su fracaso en la adopción masiva. La infraestructura fue creciendo de a poco en el resto del país, pero aun hoy en algunos lugares es muy difícil cargar combustible. Si bien en este caso los vehículos son duales (utilizan combustible convencional y GNC) el poder haber utilizado tecnologías exclusivas para GNC hubiese representado una ventaja fundamental por su mejor comportamiento energético (rendimiento con mayor compresión del motor) y su menor impacto ambiental. Este es un tema que se desarrollará durante el proyecto de investigación que se está realizando en la UNGS, y que tomaremos como modelo para inferir el posible desarrollo de la electrificación del parque automotor en Argentina.

Teniendo en cuenta la experiencia realizada durante la implementación del GNC en Argentina y contando con algunos datos de países que llevan la delantera en el desarrollo de la implementación de la introducción de los vehículos eléctricos, analizaremos durante el desarrollo del proyecto de investigación recién iniciado, un modelo, que junto a las informaciones que surgen de investigaciones ya realizadas por otras universidades como la Universidad de Buenos Aires [7], nos permitirá diseñar un modelo que permita “predecir” el comportamiento de la electrificación del parque automotor.

Una de las principales dificultades que presenta la introducción de vehículos eléctricos puros es precisamente la red de infraestructura y a que los mismos poseen una autonomía limitada, sobre todo aquellos vehículos de más bajo costo, dado que la batería representa el mayor costo de estos. Esta limitación en cuanto a su autonomía es la que también nos acerca a utilizar el modelo de implementación de GNC pues el mismo también tiene el mismo factor dominante en cuanto a su masificación, junto al valor del equipo que debe montarse en el vehículo. También encontramos, por ahora, la ventaja económica de su costo operativo, ya que el GNC tiene un precio histórico equivalente a 1/3 del costo del combustible convencional (nafta)

Siguiendo en esta línea, y con el fin de analizar y justificar la lección del modelo a desarrollar para la implementación de la electrificación, tomamos también las experiencias internacionales como, por ejemplo, la influencia de los factores implicados en la expansión de la electrificación. Es así como uno de los principales problemas para explicar las bajas ventas de coches eléctricos por ejemplo en España es la escasa infraestructura de recarga pública con la que cuenta ese país. No solo en cantidad, sino también en calidad y la fiabilidad de los puntos de carga, ya que muchos que no funcionan o no cargan a la velocidad suficiente.

Si bien China es, por lejos, líder mundial en construir y usar transporte público eléctrico debido a sus políticas industriales estatales y su plan de reducción del carbono, las ciudades de América



Latina empiezan a ser importantes partícipes en este mercado emergente. Se estima que hacia fines de 2020 había más de 2.000 autobuses eléctricos circulando en, al menos, 10 países de América Latina. Se espera que esta cifra sea cada vez más alta: un análisis predice que hacia 2025 la región añadirá más de 5.000 autobuses eléctricos al año [1]. Los autobuses eléctricos surgen como una necesidad imperiosa de reducir las emisiones de diésel que contaminan el aire y contribuyen al cambio climático. Es probable que la implementación generalizada genere un cambio importante, dado que, según informes [2], la cantidad de usuarios de transporte público per cápita en la región es la más alta del mundo.

La Corporación Financiera Internacional (IFC), una organización mundial de desarrollo que forma parte del Grupo del Banco Mundial y C40 (una coalición de acción climática) publicó un informe [3] donde destacó dos notables ejemplos de ciudades con grandes inversiones en autobuses eléctricos. Santiago, la capital de Chile, tiene una flota de más de 700 unidades y suma cada vez más. Es la mayor flota fuera de China. Santiago apunta a una flota con cero emisiones para 2035. En Colombia, Bogotá ha emprendido una labor ambiciosa para habilitar más de 1000 buses eléctricos [4], vinculada con un plan para recortar emisiones de carbono, en más de un 20% hacia el 2030.

Ambas ciudades están utilizando acuerdos de financiamiento público y privado para incentivar la transformación. En Bogotá, para entregar la flota de autobuses, Transmilenio, la entidad municipal de transporte público, realizó un acuerdo con Celsia Move [5], una subsidiaria del conglomerado multinacional Grupo Argus centrada en cuestiones energéticas.

Los trenes y autobuses eléctricos requieren una inversión inicial mucho mayor que sus versiones que utilizan combustibles fósiles, siendo aproximadamente el doble o más de costo. Pero, según el informe antes mencionado [5], estas recientes asociaciones público-privadas impulsan el compromiso de más de 15 inversionistas y fabricantes, que recaudaron unos US\$ 1.000 millones para alimentar la incorporación de 3.000 autobuses eléctricos más, en varias ciudades. El financiamiento internacional para respaldar a los autobuses electrónicos y otros proyectos ecológicos en toda la región provino de bancos como el Banco Interamericano de Desarrollo y la iniciativa P4G (Partnering for Green Growth and the Global Goals 2030) [6], cuyos fondos iniciales provinieron del gobierno danés.

El transporte eléctrico sigue siendo insignificante dentro del transporte público de América Latina, y la pandemia acarreó nuevas dificultades. No obstante, el mercado latinoamericano podría estar particularmente preparado para capitalizar y expandir esta tendencia. La región es conocida por su buena predisposición ante las innovaciones en transporte, desde tranvías eléctricos en los años 50 hasta el autobús de tránsito veloz de hoy, los taxis de GNC y propano en países de la región y a la adopción de biocombustibles (etanol, en Brasil). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, es mucho más difícil el cambio de tecnología hacia un sistema eléctrico en un ámbito donde existen problemas estructurales y deficiencias en el transporte público. Teniendo en



cuenta que, América Latina tiene una relación comercial cada vez más fuerte con China, que fabrica cerca del 98 por ciento de la flota mundial de autobuses eléctricos, este sería un factor que podría ayudar e impulsar el posicionamiento de la región como líder en una transición que, con el tiempo, ocurrirá en todo el planeta.

Una columna importante en la electrificación es la participación de la industria automotriz que debe acompañar este cambio de tecnología. Es importante entender que este cambio producirá muy profundos reformas en los sistemas de producción, abastecimientos y sobre todo incidirá en los proveedores de componentes. Los vehículos eléctricos poseen mucho menos componentes por lo que esto producirá una migración de los actuales productores a la concentración en algunos grupos como motores eléctricos componentes electrónicos y productores de baterías y cables. De todas formas, los sistemas de suspensión, dirección, sistemas auxiliares se conservan, por lo que los más afectados serán los productores de motores de combustión y sus proveedores.

La electromovilidad se extiende rápidamente por el mundo; sin embargo, quedan varios desafíos por resolver, como la transformación de los proveedores y la cadena de suministro, la implementación de la infraestructura de carga y la adopción de vehículos eléctricos.

Actualmente, los vehículos híbridos-eléctricos, híbridos-conectables, eléctricos de rango extendido y de batería eléctrica son una alternativa frente a los automóviles de combustión interna, los cuales, generan emisiones de carbono. Por ello, la transición hacia la electromovilidad en las potencias económicas, como Estados Unidos, China y Japón, y en varios países de Europa, está en plena expansión pues en estas regiones se ofrecen hasta incentivos económicos para facilitar la movilidad eléctrica.

En cuanto a los fabricantes es necesaria una reconversión ya que los vehículos dependen de proveedores que fabrican el motor tradicional y sus componentes como cilindros, válvulas, bombas, mangueras de combustible, silenciadores, convertidores, entre otros, los cuales no serán necesarios, ya que los autos eléctricos estarán demandando otro tipo de componentes. Es así que la cadena de suministro debería comenzar a reconvertirse para hacer frente a las nuevas necesidades de la industria.

Los autos eléctricos carecen de sistemas esenciales para los vehículos de combustión interna, pero surgen nuevas necesidades como, por ejemplo, sistemas de batería con alto voltaje, cables eléctricos de alto voltaje y una electrónica de potencia para transmisión y motor. Existen también nuevas oportunidades en el ámbito de la fabricación de equipos de recarga, con el fin de mejorar la infraestructura y, a su vez, mejorar el crecimiento de la manufactura eléctrica al contar con un aumento en la demanda de vehículos eléctricos.

Siguiendo con el análisis en América latina, para el caso de México, y de acuerdo con cifras de la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz y del Registro Administrativo de la Industria Automotriz de Vehículos Ligeros, durante el 2021 en México se vendieron 42.969 vehículos con



tecnologías electrificadas. Además, las ventas de autos híbridos, híbridos enchufables y eléctricos representaron el 4,5% del total de autos nuevos que se compraron en México en el primer semestre del 2022. Ante el crecimiento en los últimos años, la Comisión Federal de Electricidad, calcula que, para 2041, en el país estarán en circulación cerca de 700.000 vehículos eléctricos. Esto quiere decir que, para satisfacer la demanda de energía, serán necesarias 40.000 estaciones de recarga.

Un punto importante en la estructura que permita la implementación de la movilidad eléctrica, se encuentra la infraestructura de carga. Según datos En cuanto a la infraestructura para carga, al finalizar 2021 existían alrededor de 1,8 millones de cargadores públicos (de carga rápida y lenta) en el mundo, de los cuales, el 64% se encuentran en China, el 20% en Europa, el 12% en Estados Unidos y el resto distribuido en el mundo [8]. En la actualidad, en México existen más de 2.000 cargadores públicos en todo el país a julio del 2022. De acuerdo con el estudio “*Los Vehículos Eléctricos y el Futuro de la Cadena de Valor Automotriz en México*”, elaborado por FUMEC, este tipo de automóviles alcanzarán su punto de inflexión en 2024, cuando se tendrá mayor aceptación del cliente, posiblemente se tenga un menor costo del total de propiedad, se mejore la infraestructura, así como se amplíe la cartera de modelos eléctricos y haya una paridad de precios con las unidades de motor de combustión interna

El crecimiento de las ventas de vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables crece en América Latina. Altos precios e insuficiente infraestructura se cuentan entre los obstáculos del sector. Un total de 118.191 vehículos híbridos y eléctricos se matricularon en 2021 en América Latina, más de un 100 por ciento más con respecto a 2020, año en que se registraron 57.078 unidades, según datos proporcionados por la asociación Nacional de Movilidad Sostenible de Colombia, Andemos [9].

En varios países de la región, el crecimiento respecto al primer trimestre de 2021 superó ampliamente el 200 por ciento. En el caso de Brasil, las ventas de vehículos eléctricos crecieron en un 331,6 por ciento; en Ecuador, un 315,8 por ciento; en México, un 298,6 por ciento; y en Colombia, un 229,4 por ciento, por citar los casos más notables. En números absolutos, Colombia lidera con 1.296 unidades eléctricas matriculadas en 2021, y 1.097 en los tres primeros meses de 2022, bastante lejos del segundo puesto de México, con 1.140 vehículos eléctricos registrados en 2021, a los que se suman 570 en el primer trimestre de este año [10].

Distinto es el panorama respecto a los vehículos híbridos (impulsados por motores tanto de combustión interna como eléctricos), e híbridos enchufables (combinan también un motor eléctrico y un motor a gasolina, pero además sus baterías se pueden recargar por medio de un enchufe). En estas categorías, México ocupa el primer lugar con 42.447 unidades híbridas matriculadas en 2021 y 3.492 unidades híbridas enchufables. Brasil va en segundo lugar, con 32.130 unidades híbridas matriculadas en 2021 y 2.141 unidades híbridas enchufables, y Colombia, está en tercer lugar, con 14.694 vehículos híbridos y 1.712 híbridos enchufables



registrados en 2021. En este sentido, los vehículos híbridos son considerados vehículos de transición, y allí radica también su potencial.

Es más probable que un consumidor de un vehículo de combustión interna, migre primero a un vehículo híbrido, que directamente a un vehículo eléctrico, debido a que no es necesario contar con la infraestructura de recarga pública y el vehículo no solo conserva, sino que aumenta su autonomía, uno de los puntos débiles del vehículo eléctrico, que impide su rápido crecimiento y adopción por parte de las personas.

En Argentina se han realizado varios trabajos para establecer cuáles son las posibilidades y oportunidades que pueden presentarse para el desarrollo de la industria y la generación de trabajo. En este sentido citando textualmente, “producir una primera valoración de las posibilidades de que la Argentina se incorpore como productor al paradigma de propulsión eléctrica (PE). El análisis comprende la producción de vehículos impulsados por motores eléctricos (EV) y su transición (vehículos híbridos), y sus partes y componentes principales; asimismo, se incluyen otros medios de micromovilidad (motos, cuadriciclos, bicicletas, monopatinos y similares). En la medida en que aparece como una industria promisoriosa y con oportunidades, se introducen también algunas consideraciones sobre los cargadores eléctricos [11].

Si tomamos por ejemplo un país como Uruguay, en el que se ha implementado políticas para incentivar el uso de energías alternativas, la electrificación de vehículos se encuentra aún en sus etapas iniciales, pero está realizando avances significativos en este campo. Algunos aspectos importantes sobre la situación de la electrificación de vehículos en Uruguay, son los incentivos y políticas gubernamentales implementadas por el gobierno uruguayo, que, mediante una serie de incentivos y políticas para fomentar la adopción de vehículos eléctricos en el país, donde se incluyen exenciones fiscales, reducción de impuestos y aranceles para la importación de vehículos eléctricos, y la promoción de la instalación de infraestructura de carga. Un punto a tener en cuenta es la infraestructura de carga. Uruguay está desarrollando gradualmente su infraestructura de carga para vehículos eléctricos, se están instalando estaciones de carga en áreas urbanas, como estacionamientos públicos, centros comerciales y hoteles. Además, algunos concesionarios de automóviles y empresas privadas también están instalando puntos de carga en sus instalaciones.

Hemos analizado brevemente los distintos escenarios donde se está produciendo la transformación de la movilidad. eléctricos. Esto incluye incentivos fiscales, subvenciones y programas de descuentos para la compra de vehículos eléctricos, así como la expansión de la infraestructura de carga.

### 3. Conclusiones



En los países desarrollados, especialmente en Europa, América del Norte y China, se han realizado avances significativos en la adopción de vehículos eléctricos. Estos países cuentan con una infraestructura más desarrollada, incluyendo una red de carga eléctrica bien establecida y accesible, lo cual facilita la transición hacia la movilidad eléctrica. Además, suelen contar con incentivos fiscales y políticas gubernamentales favorables que promueven la adquisición de vehículos eléctricos. En contraste, en los países subdesarrollados de América Latina, como Argentina, existen desafíos adicionales que dificultan la electrificación del parque vehicular en el corto y mediano plazo. Estos desafíos incluyen la falta de una infraestructura de carga adecuada, especialmente en áreas rurales o remotas, y la limitada capacidad económica de los consumidores para adquirir vehículos eléctricos, que tienden a ser más costosos que los vehículos de combustión interna.

Además, la geografía también puede jugar un papel importante. En países extensos como Argentina, la falta de estaciones de carga en áreas alejadas de los centros urbanos puede ser un obstáculo significativo para la adopción de vehículos eléctricos, especialmente en comparación con países más pequeños y densamente poblados. A pesar de estos desafíos, es importante destacar que muchos países latinoamericanos están tomando medidas para fomentar la electrificación del transporte. Algunos están implementando políticas y programas de incentivos, como exenciones fiscales y subsidios, para promover la adquisición de vehículos eléctricos e incluso prohibiciones o restricciones legales que aceleran el paso hacia la transformación de la movilidad. También se están realizando inversiones en infraestructura de carga, aunque a un ritmo más lento que en los países desarrollados.

En resumen, si bien la electrificación del parque vehicular es un objetivo global, la realidad y las perspectivas difieren entre los países desarrollados y los países en desarrollo. En América Latina, incluyendo Argentina, existen desafíos significativos relacionados con la geografía, la infraestructura y las condiciones socioeconómicas que hacen que la transformación hacia la movilidad eléctrica sea más lenta. Sin embargo, a medida que avanza la tecnología y se implementan políticas adecuadas, es posible que se logren avances significativos en el mediano y largo plazo. Reemplazar los vehículos de motor convencional por vehículos híbridos y eléctricos puede ser un proceso complejo y requiere de un enfoque integral que involucre a diferentes sectores y actores, incluyendo gobiernos, empresas, fabricantes de vehículos, consumidores y la sociedad en general.

A manera de inicio del estudio que se está realizando mediante el proyecto de investigación que se está desarrollando en la UNGS, podríamos concluir que la elaboración de un modelo siguiendo los parámetros que permitieron la implementación del GNC en Argentina, como la infraestructura, los incentivos legales y fiscales, precio de la energía, precio del vehículo, autonomía, lo que permitirá prever cómo será la transición hacia una flota vehicular más sostenible en Argentina. Por ello es importante conseguir un modelo que permitirá analizar los



distintos escenarios, analizando la influencia de cada una de las variables, con lo cual podríamos aconsejar la implementación de políticas y regulaciones que promuevan la adopción de vehículos híbridos y eléctricos. Esto podría incluir incentivos fiscales para los compradores de vehículos eléctricos o la imposición de impuestos adicionales a los vehículos de motor convencional. Además, las autoridades podrían establecer objetivos y plazos para la electrificación de la flota vehicular del país. Es importante que exista una infraestructura de carga adecuada para los vehículos eléctricos e híbridos. El gobierno y los sectores privados podrían trabajar juntos para instalar más estaciones de carga en lugares públicos y privados como centros comerciales, estacionamientos y calles públicas. Es importante educar a los consumidores y la sociedad en general sobre los beneficios de los vehículos híbridos y eléctricos, así como sobre las diferentes opciones disponibles. Para promover la transición a vehículos más sostenibles, es importante que los diferentes sectores trabajen juntos. Los fabricantes de vehículos podrían colaborar con el gobierno y los sectores privados para desarrollar tecnologías más eficientes y sostenibles, y para producir vehículos asequibles y de alta calidad, donde los incentivos financieros que podrían otorgar los sectores públicos y privados promoverían la actividad.

## REFERENCIAS

- [1] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas. Capacidad de Producción de Buses Eléctricos en América Latina. Año 2022.
- [2] <https://e360.yale.edu/features/an-increasingly-urbanized-latin-america-turns-to-electric-buses>
- [3] [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/industry\\_ext\\_content/ifc\\_external\\_corporate\\_site/infrastructure/resources/leading%20a%20clean%20urban%20recovery%20with%20electric%20buses](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/industry_ext_content/ifc_external_corporate_site/infrastructure/resources/leading%20a%20clean%20urban%20recovery%20with%20electric%20buses)
- [4] <https://www.greencarcongress.com/2021/01/20210112-byd.html>
- [5] <https://www.greencarcongress.com/2021/01/20210112-byd.html>
- [6] <https://theicct.org/next-stop-for-zero-emission-buses-latin-america/>
- [7] Aportes a la movilidad eléctrica, Proyecto Vectores, publicado en Junio 2022.
- [8] <https://thelogisticsworld.com/transporte/3-propuestas-de-transporte-sustentable-que-se-presentaron-en-the-logistics-world-summit-expo-2022/>
- [9] <https://www.andemos.org/>
- [10] <https://www.dw.com/es/colombia-es-l%C3%ADder-en-transporte-el%C3%A9ctrico-debido-a-incentivos-y-pol%C3%ADticas-no-por-azar/a-61905532>
- [11] Baruj G., Dulcich F., Porta F., Ubogui M. La transición hacia la electromovilidad-Panorama general y perspectivas para la industria argentina. ISSN 2718-8124. Año 2021.



## DESHIDRATADOR SOLAR DE HIERBAS INDIRECTO, CON BANDEJAS GIRATORIAS Y RECIRCULACIÓN DE AIRE

Pablo Galimberti<sup>1</sup>, Alba Lema<sup>1</sup>, María Milanesio<sup>1</sup>, Jorge Morsetto<sup>1</sup>,

Oriana Arias<sup>1</sup> y Jorge Barral<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Energía Solar. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nacional 36 Km 601, Río Cuarto, Argentina - [alema@unrc.edu.ar](mailto:alema@unrc.edu.ar).

### RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados del desempeño de un prototipo de deshidratador solar indirecto con recirculación de aire, aplicado al secado de perejil. El equipo utiliza la energía solar como única fuente de energía para cubrir los requerimientos térmicos y eléctricos demandados por la operación de secado.

El sistema de calefacción de aire para el secado, utiliza un colector solar de tubos evacuados para aumentar la energía térmica del agua, que luego es parcialmente transferida al aire en un intercambiador de calor agua-aire. El agua se calienta en el calefón solar y se mueve en un circuito cerrado mediante la utilización de una bomba de 12 voltios.

El aire fresco ingresa al equipo mediante un ventilador y se mezcla con el aire recirculado. Luego de su paso por el intercambiador de calor, entra a la cámara de secado y toma contacto con el producto a secar ubicado en cuatro bandejas giratorias. El aire húmedo que abandona la cámara de secado es parcialmente recirculado a los fines de aumentar el aprovechamiento térmico.

La evaluación del equipo se realizó a través del análisis de los datos obtenidos en la experimentación efectuada. Los resultados se presentan en gráficos. Se determina la cinética de secado para el perejil fresco en las condiciones de operación del secadero, obteniéndose una humedad final en base húmeda inferior al 10 % al cabo de 8 horas.

Se constata que el equipo de secado analizado depende energéticamente sólo del recurso solar disponible constituyendo un diseño idóneo, ya que se logra un secado adecuado respecto a la calidad del producto obtenido y al tiempo empleado.

**Palabras Clave:** *Energía Solar, Deshidratado Solar, Secado Solar Indirecto, Secado de Hierbas.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Las hierbas aromáticas y/o medicinales pueden ser consumidas frescas o secas. Al momento de la cosecha es común encontrar niveles de humedad superiores al 70 % y la adecuada deshidratación del material es una opción para prolongar su tiempo de vida, conservando los principios activos al inhibir la destrucción enzimática. Asimismo, estabiliza el color, el olor, el sabor y la composición química; permite disminuir su volumen para un posterior almacenamiento y/o transporte; y en caso de que el material sea empleado para producir aceites esenciales, reduce tiempos y costos de destilación.

En un emprendimiento económico dedicado a la producción y comercialización de hierbas aromáticas y/o medicinales, el secado es una de las operaciones claves del proceso productivo, de ésta operación depende en gran medida el éxito o fracaso del emprendimiento, ya que la calidad del producto final, esto es, los cambios que se producen en el material vegetal durante la deshidratación, son de carácter irreversible y dependen en gran medida, de la selección del método de secado [1].

Para el secado de hierbas, la humedad final recomendada varía con la especie, y suele estar por debajo del 10 % expresada en base húmeda. Para obtener un producto final de buena calidad, se requiere trabajar en ambientes con temperaturas inferiores a los 50 °C y de baja luminosidad a los fines de eliminar el factor lumínico [1].

Es en este sentido que los secadores solares indirectos presentan numerosas ventajas: permiten un mayor control en el proceso, facilitan la manipulación de los productos, permiten integrar una fuente auxiliar de energía y posibilitan el secado de productos sensibles a la radiación solar directa sin pérdida de calidad, ya sea color natural, destrucción de vitaminas y/o valor nutritivo.

La operación de secado in situ, presenta la ventaja de poder deshidratar el material recién cosechado, evitando pérdidas de calidad por deterioro del mismo. Desde esta perspectiva, la posibilidad de utilizar del recurso solar como única fuente de energía permite desarrollar el emprendimiento de secado de manera autónoma en la cercanía de los sembradíos.

Integrantes del Grupo de Energía Solar (GES) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, han desarrollado un prototipo de secadero indirecto para hierbas, con recirculación de aire, que utiliza la energía solar como única fuente de energía para cubrir los requerimientos térmicos y eléctricos demandados en la operación de secado.

Se utilizó perejil (*Petroselinum sativum*), como material a secar, posee propiedades antioxidantes y un importante valor nutricional, caracterizándose por tener un alto contenido de vitamina C, tiamina,  $\beta$ -caroteno, vitamina E y riboflavina, por eso al momento de secarlo es importante que la temperatura del aire no supere los 60 °C [2].



En este trabajo se describe el equipo de secado desarrollado, se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la experimentación realizada, que dan cuenta del desempeño del equipo. La operación de secado, se completa en un día parcialmente soleado y se obtiene un producto final de excelente aspecto, en lo que refiere a color y olor.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO

Desde hace algunos años, miembros del Grupo de Energía Solar (Facultad de Ingeniería – UNRC), vienen trabajando en el desarrollo de un prototipo de deshidratador solar, que cumpla con las características de: autonomía energética no convencional, tiempos de operación reducidos y un producto seco homogéneo y de buena calidad [3]. El diseño del equipo de secado desarrollado y construido se muestra en la Figura 1.

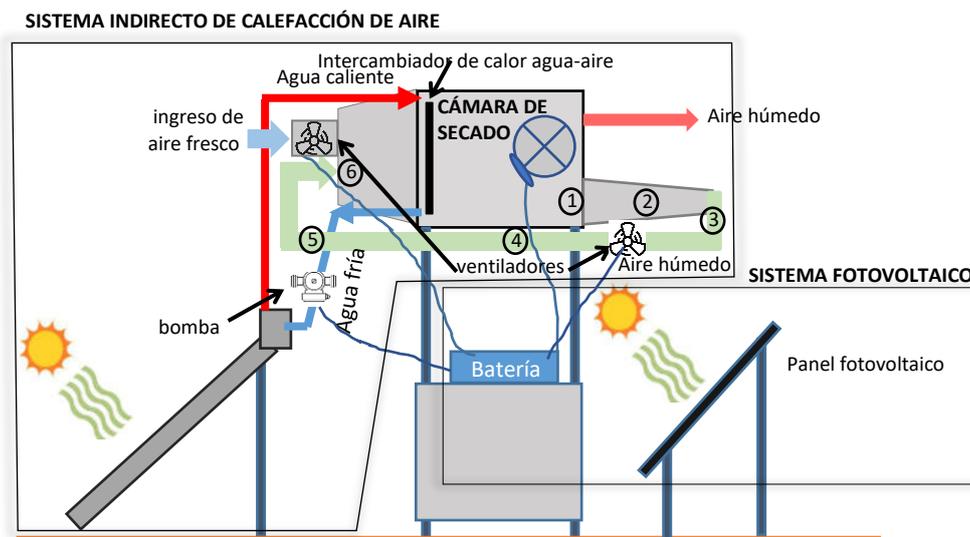


Figura 1: Esquema del prototipo de secadero solar indirecto con recirculación de aire

El equipo puede describirse en términos de tres secciones diferenciadas: la cámara de secado, el sistema de calefacción de aire y un equipo fotovoltaico que provee la energía eléctrica requerida para la operación de secado. Todo el conjunto, conforma un diseño de secador solar con calentamiento indirecto de aire, energéticamente autónomo de fuentes convencionales.

### 2.1. Cámara de secado

La cámara de secado, ocupa la parte posterior (sur) de un monovolumen montado sobre una estructura plana, tal como se observa en la Figura 1 y 2 a. El monovolumen fue fabricado con chapa galvanizada mayormente plegada. La rigidez del armazón de chapa está dada por la estructura tronco cónica que corresponde a la sección de entrada de aire a la cámara de secado.

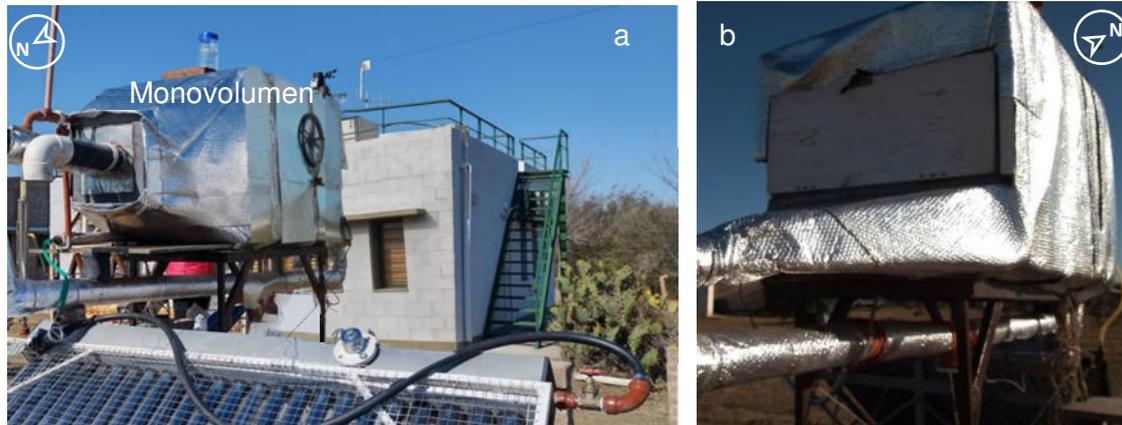


Figura 2: a) Secadero solar. Vista norte. b) Puerta de acceso a la cabina de secado. Vista sur

Con el propósito de eliminar la incidencia de la posición del sol en la cinética de secado, de aminorar los efectos del viento y disminuir las pérdidas térmicas en general, se aisló el monovolumen con telgopor de alta densidad de 50 mm de espesor y se utilizó espuma de polietileno de 5 mm con película aluminizada en forma de lámina, para envolverlo.

En la Figura 3 b, se muestra una vista posterior (sur) de la cámara de secado, donde se observa la puerta de acceso al interior de la misma, por donde se ingresan las bandejas.

En la cámara de secado, se ubican 4 bandejas sobre las cuales se dispone el producto a secar.

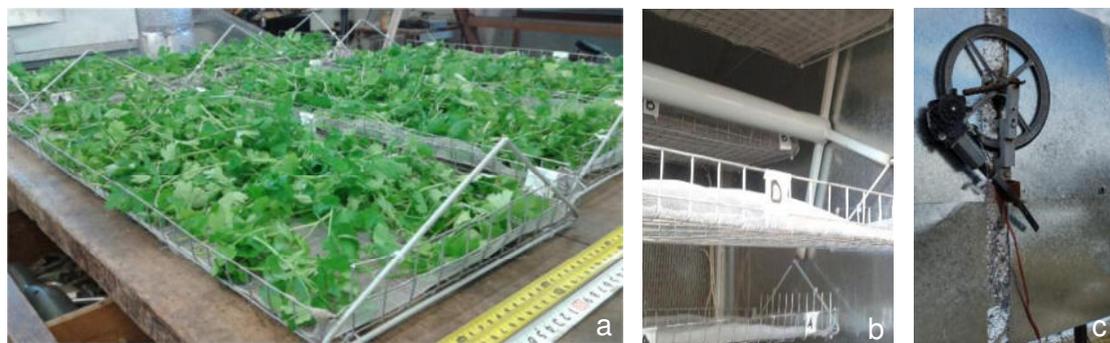


Figura 3: a) Bandejas cargadas b) Interior de la cámara de secado c) Mecanismo giratorio

Están construidas con una malla galvanizada de 2 cm x 2 cm y, para evitar el derrame del producto a medida que se torna seco y quebradizo, se recubrieron con una malla mosquitera aluminizada (Figuras 3 a y b). Cada una de las bandejas tiene un área de 0.21 m<sup>2</sup>, dando lugar a una carga promedio de la secadora de 1,2 kg de producto fresco por área de superficie de bandeja, garantizando un buen contacto entre la superficie del producto con el aire de secado, lo que resulta en un producto seco de calidad homogénea [6]. Las bandejas están integradas a un mecanismo que transmite el movimiento de rotación, formado por una polea y un motor de 12

voltios de uso habitual en el levantamiento de cristales en automóviles (Figura 3 c). Tienen en cada extremo un soporte triangular que permite acoplarlas y desacoplarlas fácilmente al sistema giratorio, que está diseñado para que las mismas permanezcan siempre en posición horizontal durante el movimiento giratorio (Figura 3 b). El eje de giro es paralelo a la posición de las bandejas y la velocidad de giro es de 3 rpm.

El movimiento de las bandejas dificulta la estratificación térmica del aire desecante, generando en el recinto condiciones cuasi homogéneas de humedad y temperatura.

## 2.2. Sistema indirecto de calefacción de aire

El diseño del sistema indirecto de calefacción solar de aire, puede observarse en la Figura 4. El agua es el fluido caloportador, se calienta en un colector solar y se mueve en un circuito cerrado impulsada por una bomba de 12 voltios. La energía que se almacena en el agua, es luego transferida parcialmente al aire, en el intercambiador de calor agua-aire.

### 2.2.1 Intercambiador de calor agua - aire

El intercambiador de calor agua - aire, se muestra en la parte superior izquierda de la Figura 4.

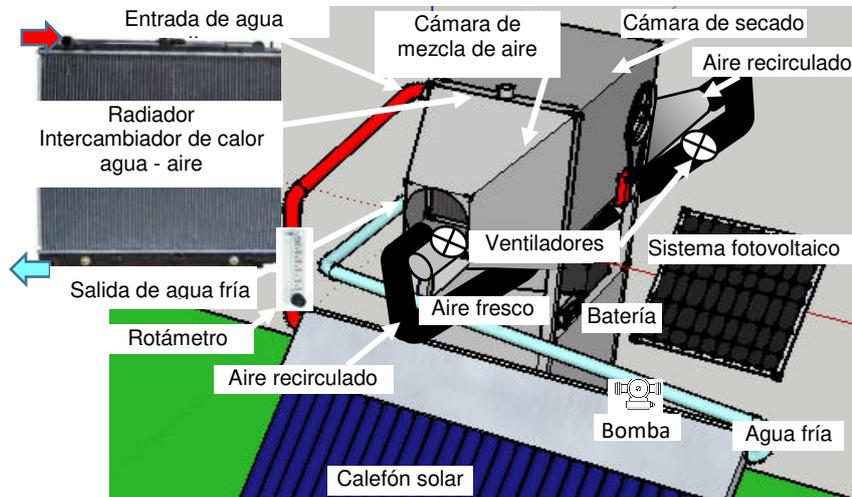


Figura 4: Sistema indirecto de calefacción térmica de aire. Detalle del radiador

Consiste en un radiador de uso automotriz de paso simple con aletas exteriores, y los tubos por donde circula el agua están también aletados interiormente. El radiador consta de un domo superior, por donde ingresa el agua caliente, un panel de tubos y aletas, que es donde se realiza el intercambio de calor y un domo inferior donde se recoge el agua fría que sale del radiador. Antes de su ingreso al radiador el agua pasa por un medidor de caudal marca ZhengZing - Flowtech, Modelo Z3000, construido en acrílico y rango hasta 4 litros por minuto. La entrada y la



salida del agua están del mismo lado del radiador y el área del panel de intercambio es de 0,69 m de ancho por 0,59 m de altura.

### 2.2.2 Calefón solar

Entre los equipos disponibles en el laboratorio del GES (Grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto), el colector solar que presentaba características más favorables, es uno de tubos evacuados, del tipo water-in-glass, conocido como Manifol que se muestra en la Figura 5 a. Este equipo tiene una estructura soporte que lo posiciona a  $45^\circ$  respecto a la horizontal, que es un ángulo adecuado para la región centro-sur de la provincia de Córdoba (Argentina). Está compuesto por 25 tubos, y opera con una masa de agua cercana a los 75 kg.

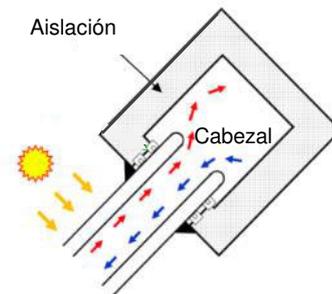


Figura 5: a) colector solar Manifol b) Tecnología del sistema water-in-glass

El principio de funcionamiento del sistema water-in-glass, se esquematiza en la Figura 5 b. Está formado por un vaso de doble pared de vidrio (borosilicato) donde se ha hecho vacío, estando la pared interna recubierta de un material selectivo que absorbe la radiación solar. La existencia de vacío entre la pared interna y la externa, minimiza las pérdidas de calor por conducción y convección. Los tubos se inervan en la parte superior a un cabezal de sección cuadrada y la impulsión en el cabezal ocurre debido a un levantamiento del colector del lado caliente de 5 cm, con el objeto de garantizar que la circulación termosifónica se inicie en ese sentido. En el interior de los tubos, el movimiento de calentamiento del fluido, se da por convección natural.

Este colector, debido a su construcción basada en tubos cilíndricos, es capaz de asegurar un buen desempeño en días de invierno y días nublados ya que captan la radiación solar desde la salida del sol hasta su ocaso, incluyendo la radiación difusa. Los sistemas del tipo water-in-glass, tienen una inercia térmica muy grande [5], que es la característica requerida para el sistema de calentamiento de agua incorporado al equipo de secado.

### 2.2.3 Circuito del aire desecante

El ingreso del aire al equipo, se realiza mediante dos entradas colindantes e independientes, como se puede observar en la Figura 6 a. El aire fresco ingresa por un ducto que, por su diseño, es poco sensible al alcance de las ráfagas de viento, ya que tiene una apertura de entrada de orientada hacia abajo. La otra entrada de aire (Figuras 6 a y b), corresponde al aire recirculado. Este diseño permite, mediante un anemómetro de paletas, medir la velocidad del aire en el ducto de recirculación y en el de ingreso de aire fresco.



Figura 6: Ingreso de aire al equipo a) vista exterior b) vista interior del equipo c) ventilador

La mezcla de aire fresco y recirculado se calienta al atravesar en flujo cruzado el intercambiador de calor agua – aire. El aire caliente abandona el intercambiador ingresando a la cámara de secado donde toma contacto con el producto a secar colocado sobre las bandejas giratorias.

Luego, es recolectado en la porción siguiente del equipo que tiene forma de pirámide rectangular truncada irregular y es recirculado hasta la entrada del ventilador, a través de un conducto de polipropileno negro, de sección circular de 110 mm de diámetro, que ocupa la parte inferior del monovolumen y ha sido recubierto con un aislante térmico aluminizado (Figura 7).



Figura 7: Vista sur de la cámara de secado

El movimiento a lo largo del equipo se realiza mediante dos ventiladores tipo cooler turbina habitualmente utilizado en las computadoras, que se conectan a una batería de 12 voltios. Uno de los ventiladores está ubicado en el ducto de entrada de aire fresco (Figura 6 c) y el otro en el



ducto de aire recirculado (Figura 7). El flujo de entrada de aire se autorregula de acuerdo a la máxima potencia que puede entregar el ventilador y a la pérdida de carga que se genera en el circuito del aire con recirculación.

### 2.3. Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico provee los requerimientos eléctricos del sistema: los ventiladores, la bomba de agua y el mecanismo de bandejas giratorias. Consiste en un panel solar y un regulador conectado a una batería de 12 voltios. El panel fotovoltaico es policristalino de 36 celdas con marco de aluminio anodizado y entrega una potencia de 90 W con una Corriente de 4,8 Volts.

El regulador de carga CP-10-12/24 tiene reconocimiento automático de voltaje. Las especificaciones indican que este regulador se utiliza con un módulo cuya corriente sea de 10 A y una potencia máxima de 150 W.

## 3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL EQUIPO DE SECADO

A diferencia de los componentes y sistemas solares, tales como: colectores, calentadores solares de aire y agua, para los cuales existen procedimientos estandarizados de prueba para evaluar rendimientos, en el caso de los secaderos, no están disponibles [4]. Esto se debe en gran medida a la versatilidad de diseños. Por lo tanto, la evaluación del equipo de secado desarrollado se realizó a partir del análisis de los resultados obtenidos de la experimentación.

## 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizó una experiencia de secado de perejil, a partir de la cual se determinó la curva de secado y se midieron variables de operación. El ensayo se realizó durante los días 12 y 13 de mayo. La primera jornada de trabajo se inició a las 10 hs y culminó a las 19:30 hs, momento en que ya no había luz solar; se desconectaron los ventiladores, la bomba de agua y el mecanismo de giro de las bandejas, permaneciendo las mismas en el interior de la cámara de secado. A las 8 hs del día siguiente, se retomó la operación, con un producto casi seco, la humedad en base húmeda fue inferior al 10 % (dato que se conoció 24 hs después de finalizada la operación). A los fines de analizar la transferencia de calor bajo condiciones de operación modificadas, se disminuyó el caudal de agua a menos de la mitad y a partir de la 11 hs se suspendió la rotación de las bandejas. A las 16 hs, se dio por finalizada la experiencia.

Se tomaron registros de temperaturas del agua y del aire en diferentes puntos del equipo, a saber: agua a la entrada y a la salida del radiador, aire exterior, ingreso y salida del aire en el intercambiador de calor, ingreso y salida del aire en la cámara de secado, ductos de circulación

del aire, también se tomaron registros de la radiación solar sobre el plano del colector solar y humedad relativa ambiente y en el interior de la cámara de secado. Las mediciones se realizaron en intervalos de diez minutos mediante el uso de registradores Data Loggers HOBO (humedad y temperatura) y Agilent (radiación y temperaturas). El primer día se trabajó con un caudal de agua de 1.75 litros/min, mientras que el segundo día fue de 0.75 litros/min.

La velocidad del aire se midió con un anemómetro de paletas en el conducto de entrada de aire y de recirculación (Figura 8 a y b), obteniéndose una velocidad promedio en cada uno de los ductos de 2 m/s. Finalizada la operación se ingresaron las muestras a la estufa, para determinar masa seca.

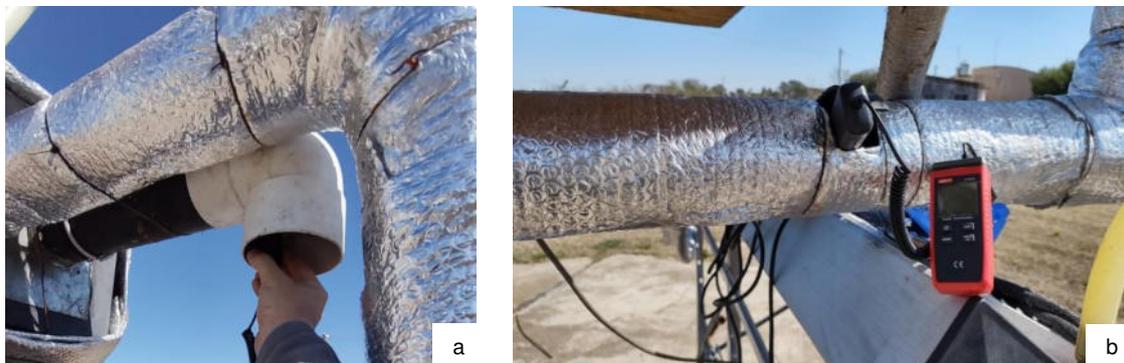


Figura 8. Medición de la velocidad del aire. a) Aire fresco b) Aire recirculado

Se dispuso secar perejil fresco, desprovisto mayormente de los tallos y con una humedad inicial del 86 %. Se distribuyó equitativamente 1,2 kg de material húmedo entre las cuatro bandejas y el seguimiento del proceso de secado se realizó a partir de muestras testigos colocadas sobre las bandejas para las cuales se registró la pérdida de humedad en intervalos de tiempo conocidos. La determinación de la materia seca para cada una de ellas, se realizó por secado en estufa a 104 °C, durante 24 horas.

## 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos registrados durante la experimentación se muestran en gráficos y se presenta un análisis de los mismos.

La Figura 9 a, muestra la curva de secado obtenida. Finalizado el primer día de secado, es posible observar que el producto seco tiene una humedad del 9 %. Al iniciar el secado al día siguiente, el producto está con la humedad deseada (inferior al 10 %) y por acción del aire desecante llega hasta una humedad cercana al 5 %, manteniendo el olor y color (figura 9 b).

En la misma Figura 9, puede observarse, que la temperatura del aire sobre las bandejas A y C, ubicadas de manera diametralmente opuestas (Figura 3 b), es prácticamente coincidente durante el primer día (con el mecanismo de rotación de bandejas activado), lo cual indica ausencia de estratificación térmica en la cámara de secado. El segundo día, a partir de las 11 hs, se detiene el movimiento giratorio de las bandejas y las curvas se separan, quedando en evidencia el poder de mezcla y homogeneización que tiene el movimiento de las bandejas sobre el aire de secado en la cámara de secado.

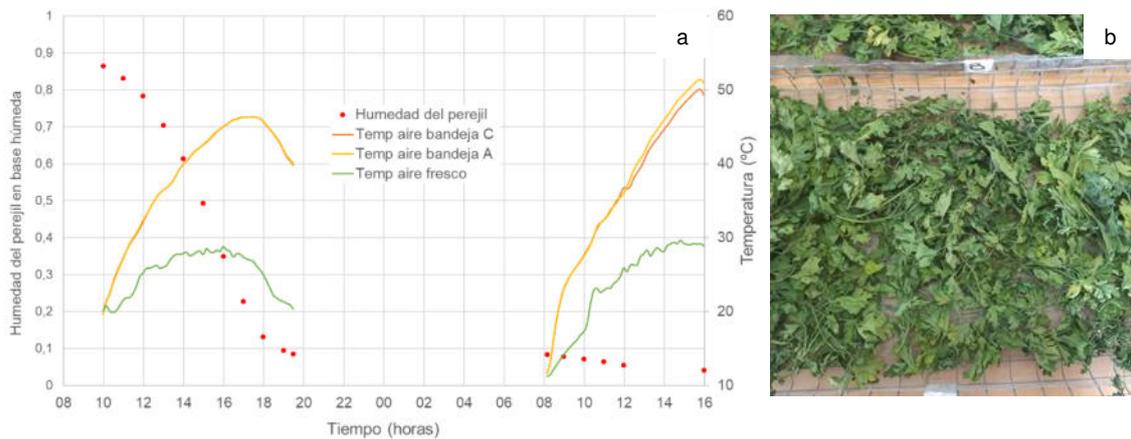


Figura 9: a) Cinética de secado, temperatura del aire fresco y sobre las bandejas A y C.  
b) Aspecto del perejil seco

La Figuras 10, muestran datos de radiación, temperaturas de entrada y salida del agua y aire en el intercambiador de calor y temperaturas del aire a la entrada y salida de la cámara de secado, para cada uno de los días ensayados.

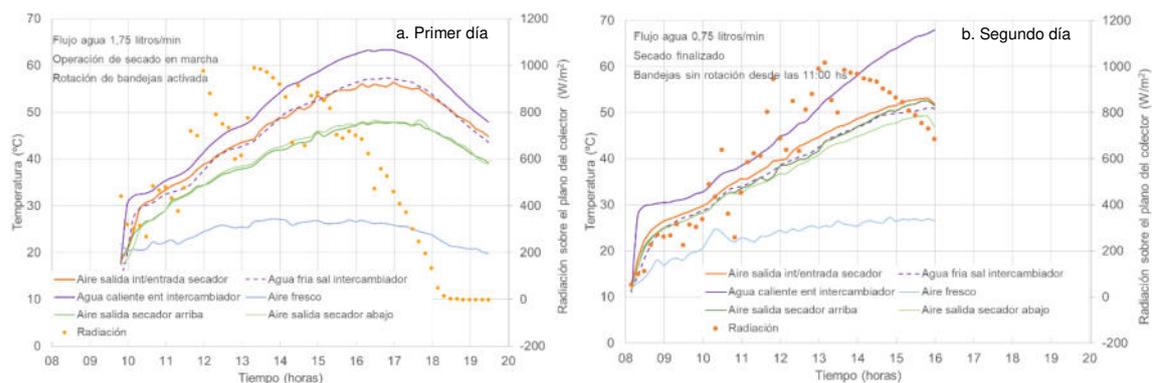


Figura 10: Registros de Radiación y Temperaturas. a) Primer día. b) Segundo día

Se observa para el primer día, que si bien a partir de las 18:30 hs no hay más radiación solar disponible para el calefón, es posible extender el tiempo de secado debido a la alta inercia térmica del calefón solar que permite continuar con el calentamiento del aire. A las 19:30 hs, el intercambiador de calor, aumenta en más de 20 °C la temperatura del aire exterior.



Es posible observar en la misma Figura 10, que la radiación solar (parcialmente nublado por la mañana) y la temperatura del aire exterior son semejantes en ambos días, sin embargo, el salto térmico para el agua en el intercambiador de calor, es mayor el segundo día. El caudal de agua el segundo día disminuye en más del 50 %, y al circular el agua por el calefón con menor velocidad, el tiempo de permanencia en el colector solar es más grande, dando por resultado mayor temperatura de calentamiento para el agua. De igual modo, un menor caudal de agua le deja más tiempo de permanencia en el intercambiador de calor, lo que se traduce en una menor temperatura para el agua a la salida.

La Figura 10 da cuenta que, durante el primer día, las temperaturas a la salida de la cámara de secado (arriba y abajo), prácticamente coinciden debido al movimiento de las bandejas, mientras que, a partir de las 11 hs del segundo día, que se detienen las bandejas, dichas temperaturas comienzan a separarse. Por otro lado, las temperaturas en la cámara de secado (entrada y salida), se mantienen cercanas durante el segundo día, no observándose enfriamiento significativo del aire desecante, dado que el producto tiene muy baja humedad.

En la Figura 11, se presentan las temperaturas registradas para el aire desecante desde que abandona la cámara de secado hasta que ingresa nuevamente al equipo en la cámara de mezcla. Los puntos de toma de datos son enumerados del 1 al 6 y se muestra su ubicación en la Figura 1. Puede verse la disminución progresiva de la temperatura del aire, a medida que se aleja de la cámara de secado, debido a una aislación insuficiente en los ductos de recirculación de aire. En la misma figura se muestra la humedad relativa del aire fresco y del aire en la cámara de secado. Puede observarse que, el aire aumenta sustancialmente su capacidad para retener humedad, al disminuir significativamente la humedad relativa.

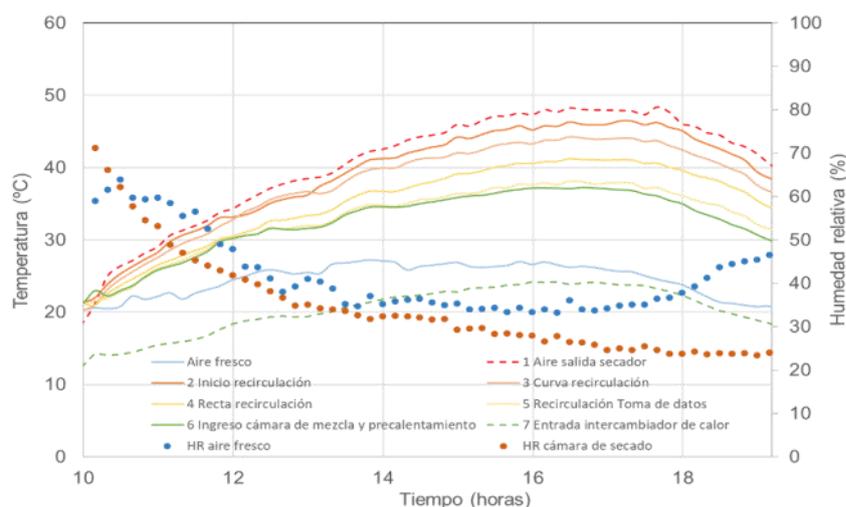


Figura 11: Temperatura y humedad relativa del aire en distintos puntos para el primer día



## 6. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos de la experimentación y de la operación del equipo de secado en general, se obtienen las conclusiones que se detallan a continuación:

Es posible secar 1,2 kg/m<sup>2</sup> de perejil en 8 hs de operación del equipo, disminuyendo su humedad desde 86 % a 9 %, en un día de otoño parcialmente nublado.

El perejil seco que se obtiene mantiene el color, el olor y presenta un aspecto homogéneo.

No hay evidencias de estratificación del aire en la cámara de secado, proveyendo condiciones homogéneas para la operación.

Se constata que el prototipo de secado propuesto constituye un diseño idóneo en relación a la operación de secado aplicado al perejil, y que su funcionamiento depende solamente del recurso solar disponible.

Para evaluar la versatilidad del equipo, es necesario ensayarlo con nuevas especies aromáticas y/o medicinales, frutas, verduras, como así también modificar la carga y determinar su capacidad máxima.

## 7 REFERENCIAS

- [1] García Vásquez, A. *Manual Técnico de diseño y evaluación económica de secadores ambientales para hierbas aromáticas*. El Taller Asociación de Promoción y Desarrollo. Arequipa. Perú. 2009.
- [2] Díaz Maroto, M., Pérez Coello, M., Cabezado, M. *Effect of different drying methods on the volatile components of parsley (*Petroselinum crispum* L.)*. European Food Research and Technology 215, 227-230. 2002.
- [3] Morsetto J., Lema A., Pontin M., Lucchini, J. *Implementación de un sistema de calefacción térmica de aire, aplicado al secado de hierbas*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 22, 02.49-02.59. 2018.
- [4] Augustus Leon, M., Kumar S., Bhattacharya, S. *A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 6 367–393. 2002.
- [5] Barral, J., Lucchini, J., Garnica, J. *Cálculo de sistemas de calentamiento de agua activos que utilizan colectores de tubos evacuados del tipo water-in-glass*. Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 5, pp. 03.69-03.80. 2017.



## EVALUACIÓN DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE EL RECURSO EÓLICO EN EL AREA DEL RÍO DE LA PLATA

Pablo G. Provenzano<sup>1</sup>, Luis A. Fernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas  
– Universidad Nacional de La Matanza  
Florencio Varela 1903 – San Justo- Provincia de Buenos Aires – Argentina.

[pprovenzano@unlam.edu.ar](mailto:pprovenzano@unlam.edu.ar)

[lfernaar@yahoo.com.ar](mailto:lfernaar@yahoo.com.ar)

### RESUMEN

El Comunicado del IPCC del mes de febrero de 2022 es contundente, uno de sus párrafos expresa: “*Si se sigue retrasando la puesta en marcha de una acción concertada a nivel mundial, se agotará el plazo breve y en rápida disminución del que disponemos para asegurar un futuro digno*”

Una alternativa eficaz en términos de mitigación del Cambio Climático es el avance progresivo de la matriz energética hacia las formas renovables. Un trabajo nuestro recientemente publicado informa sobre las características del recurso eólico en el Río de La Plata. Por otra parte, este área fluvial alberga espacios de alta densidad poblacional, como el AMBA (Ámbito Metropolitano de Buenos Aires) que se incluye dentro de las 20 demografías más pobladas del planeta y consecuentemente constituye un centro de gran demanda de energía y factor de alta emisión de gases de Efecto Invernadero

Se presenta, como continuación del trabajo arriba citado, la evaluación del potencial eólico en el área del Río de La Plata que circunda la costa del AMBA. Se analizaron las cualidades del recurso mediante el estudio de la *performance* de un aerogenerador de 500 kW de potencia nominal operando en el plano de 100 metros sobre cota fluvial de referencia. En este análisis se emplearon los resultados del estudio de la calidad eólica en ese plano en altura y las características técnicas del aerogenerador, aplicando el criterio de solapamiento del recurso con las curvas características de la máquina.

Los resultados hallados son promisorios en términos cuantitativos de la energía cero emisión obtenible y, derivado de esa condición, en el ahorro de dispersión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo que permite apreciar el interesante recurso que ofrece este amplio y cercano Río para la generación limpia y su aporte a la mitigación del Efecto Invernadero local.

**Palabras Claves:** *Potencial Eólico - Del Plata -Aerogenerador -GEI*



## 1. Introducción

La situación climática planetaria actual parece estar alcanzando un nivel de criticidad que impone la ejecución de los mecanismos de mitigación del Cambio Climático y de resiliencia de forma más acelerada y también la búsqueda y el cumplimiento de acciones que aporten a esta verdadera *Cruzada Planetaria*. El informe de prensa emitido el 28 de febrero de 2022 por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, su sigla en idioma inglés) organismo que monitorea desde hace más de 30 años la concentración de emisiones de Gases de Efecto Invernadero y las consecuencias de estas emisiones crecientes sobre la salud del planeta, señala que *‘este informe entraña una seria advertencia sobre las consecuencias de la inacción’* (Hoesung Lee, Presidente del IPCC) [1]. Y agrega: *“En este informe se reconoce la interdependencia del clima, la biodiversidad y las personas, y se integran las ciencias naturales, sociales y económicas más eficazmente que en las evaluaciones anteriores del IPCC”. “Se hace hincapié en la necesidad urgente de adoptar medidas inmediatas y más ambiciosas para hacer frente a los riesgos climáticos. Ya no es posible continuar con medias tintas”* y concluye: *“Si se sigue retrasando la puesta en marcha de una acción concertada a nivel mundial, se agotará el plazo breve y en rápida disminución del que disponemos para asegurar un futuro digno”* [1]. El llamado de atención a la *Sociedad Mundial* es claro. Todos los estamentos de la Sociedad están convocados a participar en las acciones de mitigación del Cambio Climático, estas acciones van desde el uso racional de la energía en el plano individual y familiar, comunal, comercial, industrial hasta la implementación de desarrollos tecnológicos de generación masiva de energía limpia, en el plano gubernamental y empresarial. La formación de recursos humanos en áreas técnicas como en áreas de difusión y de concientización pedagógica es también parte imprescindible de la estrategia para el saneamiento ambiental y es tarea de las instituciones académicas y educativas en todos los niveles.

La definición de esta problemática planetaria queda expuesta en estos enunciados y la conclusión inmediata remite a la activación de todos los recursos disponibles en todos los niveles anteriormente mencionados. Toda intención materializada en favor de la mitigación del Cambio Climático es válida y esto incluye, por ejemplo, desde el uso más frecuente y masivo de la bicicleta para traslado dentro del radio urbano hasta el estudio, proyección e instalación de parques solares para generación eléctrica sin emisión de gases de *Efecto Invernadero* (GEI). En este sentido, el *Acuerdo de París*, suscripto en el año 2015 por 195 países (la Argentina es país suscriptor del Acuerdo) exhorta a las Naciones a implementar un cambio progresivo de la matriz energética actual hacia una participación cada vez mayor en ella de las formas de generación mediante recursos renovables, compatibles con un medioambiente sano, como una de las políticas más ambicionadas y eficaces en el camino hacia la mitigación del *Efecto Invernadero* [2].

La necesidad de contribuir a la formulación de respuestas tendientes a una transición global de la matriz energética hacia la generación de energía eléctrica (indispensable para la vida y el desarrollo humano actual) mediante procesos y mecanismos amigables con el medioambiente no admite objeciones de ninguna clase. El *Cambio Climático*, consecuencia del uso indiscriminado de combustibles de origen fósil a través de décadas en todo tipo de maquinaria industrial, en la movilización de toda clase de medios de transporte y en la generación masiva de energía eléctrica se manifiesta como una alteración creciente del equilibrio térmico planetario con consecuencias serias para el entorno ambiental y humano.



La transición energética viene siendo una de las respuestas más eficaces y probadas, más visible desde las últimas décadas en varios países del mundo mediante el aprovechamiento de las fuentes no convencionales. Se destacan, principalmente, las formas solar y eólica. Se cita a España como uno de los ejemplos de ese crecimiento sostenido en este rubro, desde hace cuatro décadas viene invirtiendo en la generación eólica y la cobertura de la demanda eléctrica total proveniente de esta fuente en ese país alcanzó el 21,9 por ciento en el año 2021, es decir, una quinta parte de su demanda eléctrica, cubierta desde el viento. Ocupa esta Nación el quinto puesto en el *ranking* mundial de generación eólica, con una potencia instalada de 27,45 GW [3]. La Argentina, con todas las formas de generación de energía (hidroeléctrica, termoeléctrica, nuclear y renovables) presentaba una potencia instalada total de 42,28 GW en el mes de marzo de 2021, de los cuales 2,99 GW (es decir, el 7 por ciento de ese total) corresponden a sistemas eólicos [4].

Haciendo un repaso de estos datos, la potencia eólica instalada en España representó en ese año el 65 por ciento de la potencia eléctrica total (incluyendo todas las formas de generación convencional y no convencional) instalada en la Argentina. Por otra parte, de este modo aquel país contribuyó a evitar la emisión de 29 Mton. de CO<sub>2</sub> (uno de los gases principales que generan el Efecto Invernadero) anuales a la atmósfera, y esto equivale al 53,7 por ciento de las emisiones anuales del parque automotor (en todas sus modalidades) de la Argentina en el año 2014 [5] mostrando un resultado efectivo en el camino de contribuir a mitigar el *Efecto Invernadero*.

Resulta más ilustrativo aún conocer la calidad de este recurso en el país ibérico: la velocidad de los vientos de mejor *performance* llegan a los 5,5 m/s en promedio, en la región suroeste del país. En este sentido, en el sur de la Provincia de Buenos Aires, en el área de Bahía Blanca hasta la localidad de Pehuen- Co hacia el este, y el Distrito de Carmen de Patagones al sur, junto a las localidades de Thornquist, Mayor Buratovich, Darregueira, Ingeniero White, Punta Alta las velocidades promedio llegan a 6,0 m/s [6].

La región noreste de esta Provincia ha sido menos estudiada en términos de energía eólica. Una particularidad interesante en este cuadrante es la presencia del enorme estuario del Río de La Plata, extensa planicie fluvial en forma de amplio cono, con una desembocadura al mar que supera los 200 kilómetros de ancho, confirmando a este río el *status* de río más ancho del mundo. Este particular estuario forma un amplio corredor para los vientos que provienen del Atlántico Sur, que ingresan libremente desde el mar, sin encontrar prácticamente obstáculos en su recorrido, llegando hasta las costas de las márgenes argentina y uruguaya y hasta su nacimiento. Se agrega otra singularidad: el asentamiento en ambas márgenes del Plata de ciudades de alta densidad poblacional: Montevideo, La Plata, Buenos Aires y el Gran Buenos Aires. Estos dos últimos distritos constituyen un conglomerado indiviso denominado AMBA, el mayor conglomerado urbano-industrial del país que, superando los 15 millones de habitantes, se ubica dentro de las 20 aglomeraciones urbanas más grandes del mundo, entre las 1934 ciudades que superan los 300000 habitantes en el planeta [7]. Ostenta el rango de *megaciudad* y la erige también como un centro importante de demanda de energía y de emisión de gases de *Efecto Invernadero*. Actualmente, gran parte de la energía eléctrica que consume el AMBA es generada en plantas termoeléctricas, alimentadas por alguna forma de combustible de origen fósil. Otro aspecto destacado de este río es que paradójicamente tiene un lecho poco profundo: unos 13 metros en promedio, lo cual facilita notablemente toda labor en la instalación de la infraestructura del parque eólico comparado, por ejemplo, al caso alemán, cuarto lugar en el *ranking* de países con mayor potencia eólica instalada y con un gran desarrollo *off shore*,



pero en un mar, el Báltico, cuya profundidad media es de 53 metros y con un régimen de olas que en ocasiones sobrepasa los 4 metros de altura, en contraste con el rango de 0,60 metros a 1,50 metros que presenta el Río de La Plata.

El trabajo presentado reúne los resultados obtenidos en el análisis del recurso eólico y las posibilidades de generación limpia en el área del Río de La Plata de jurisdicción argentina, como una respuesta local en relación a las directivas emanadas del *Acuerdo de París* y en atención a las condiciones particulares que reúne el área del Plata, arriba comentadas. Y se agrega también otro elemento de peso que justifica este estudio, como es la posibilidad de generación de energía limpia frente a la costa del AMBA, lo cual deriva en varios beneficios, entre ellos, el ahorro en infraestructura (tendido de cables de alta tensión, torres, logística de potencia, etc.) que supone la generación de energía en el mismo espacio donde se la demanda y el ahorro en pérdidas eléctricas, estas últimas del orden del 15 por ciento cuando la transmisión supera la distancia de 150 km debido a fenómenos eléctricos inevitables en el transporte de energía en alta tensión como las *Corrientes Disruptivas* y el *Efecto Corona* [15].

Los resultados del análisis de la calidad del viento en el plano de 100 metros sobre cota de referencia ya han sido presentados [8]. En este trabajo se expone la evaluación realizada sobre la producción eolieléctrica que esta fuente renovable, en el área del Plata lindante con la costa del AMBA, ofrece en términos de energía colectable mediante el análisis teórico de la *performance* de un aerogenerador marca *Hengfeng* modelo HF47, de 500 kW de potencia nominal, operando en las condiciones que ofrece el viento en este sector fluvial, en el plano de 100 metros sobre cota de referencia, aportando, desde nuestro espacio universitario, más elementos de validez en el camino hacia la transición energética reclamada por los *Foros Internacionales*. Y se focalizó, paralelamente, en el ahorro de CO<sub>2</sub> dispersado al ambiente que introduce el empleo de aeroturbinas en la generación masiva de electricidad.

### 1.1 Objetivos

- ▼ Contribuir con propuestas de mitigación del Efecto Invernadero en acuerdo con los compromisos asumidos por nuestro país como nación que suscribe el *Acuerdo de París*.
- ▼ Contribuir al cambio de la matriz energética nacional hacia formas de producción eléctrica de cero emisión de gases que provocan el *Efecto Invernadero* (GEI).
- ▼ Evaluar el potencial de generación eólica en el sector de jurisdicción argentina del Río de La Plata y estimar el rédito que este sector geográfico puede introducir en términos energéticos y ambientales.

### 2. Materiales y Métodos

Han sido analizados los registros de velocidad y dirección del viento correspondientes al periodo 2008 a 2018, pertenecientes a la Estación *Aeroparque* de la Ciudad de Buenos Aires, provistos por el *Servicio Meteorológico Nacional*. Las mediciones han sido efectuadas en el plano de 10 metros sobre el nivel del suelo. Los datos de velocidad han sido procesados tomando un dígito decimal en cada dato. Se han extrapolado los mismos al plano de 100 metros mediante aplicación de la fórmula logarítmica de perfil de viento, asignando una altura de rugosidad  $Z_0 = 0,5$  como función de las características físicas de relieve de este vasto espacio fluvial costero, según el criterio de clasificación de *Davenport* [9,12]. Los datos de velocidad de viento han sido agrupados en intervalos de clase para cada mes.



Este agrupamiento se empleó en la confección de histogramas de frecuencia, que muestran la recurrencia de cada rango de velocidad durante el mes en estudio, conformando un primer arreglo discreto (por rangos de velocidad) que ha sido el material de trabajo en la elaboración de un modelo de distribución continua para cada periodo mensual del periodo 2008-2018. Una organización similar se muestra en los datos de dirección del viento: se han dividido los 360 grados que incluyen a todas las direcciones posibles en dieciséis direcciones de predominio (como intervalos de clase).

Se estimaron, paralelamente, los parámetros de posición y dispersión horaria, diaria y mensual que dan argumento al conjunto de datos a analizar. La media aritmética ha sido empleada como medida de posición en los intervalos de clase y la esperanza matemática, en el tratamiento de distribución de probabilidades. Las medidas de dispersión permitieron ajustar la variabilidad del viento en cada periodo de tiempo analizado.

Junto con los histogramas se emplearon las expresiones (1) y (2) en la elaboración de la curva de distribución de probabilidad continua de *Weibull*, de forma acampanada, con sesgo. Se aplicó para ello el criterio diferencial cuya integración da como resultado la acumulación total de probabilidades en el continuo.

$$F(v) = \int_0^{\infty} f(v) dv \quad (1)$$

La *Distribución de Weibull* da un ajuste aceptable para las frecuencias de velocidad estudiadas, permite obtener información sobre frecuencias acumuladas a partir o hasta determinado valor de velocidad [10]. La función de probabilidad tiene la forma:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

donde  $k$  y  $c$  son parámetros de forma y de escala de la distribución.

Las Curvas de Distribución de Probabilidad de *Weibull* se han confeccionado para el plano de 100 metros sobre el suelo, con ellas se exponen las frecuencias de velocidad de cada mes del periodo analizado. Se presentan, por razones de espacio, sólo seis gráficas de Distribución de Probabilidad de *Weibull* para distintos meses de ese periodo.

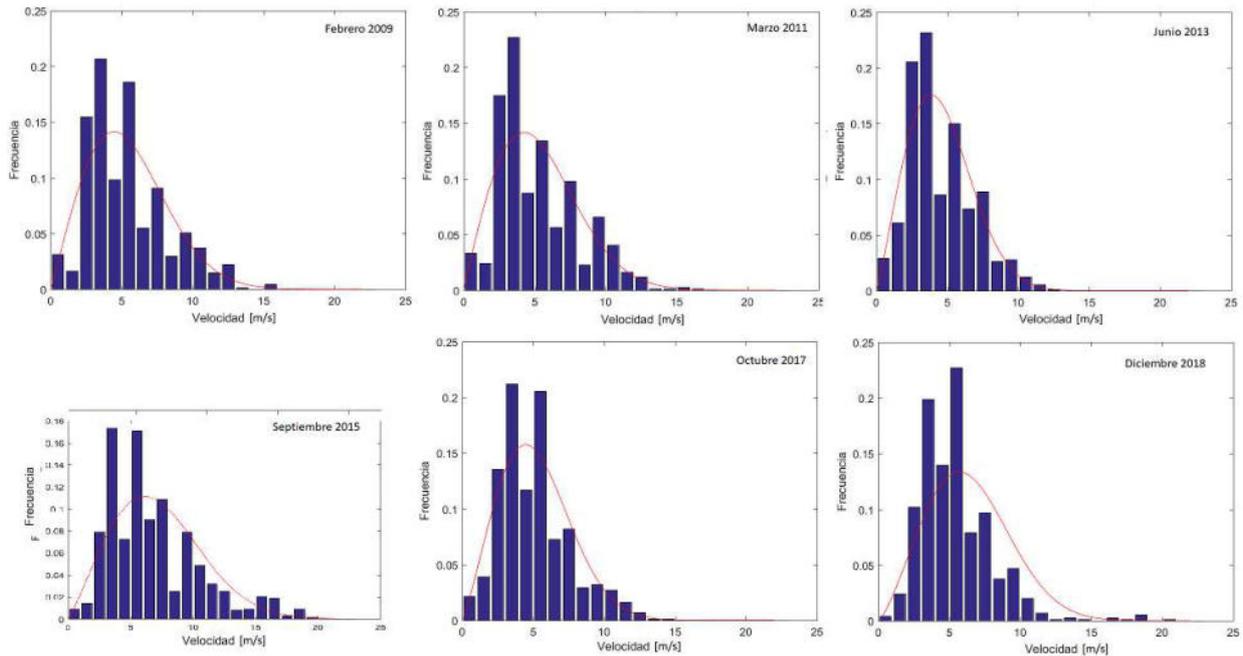


Figura 1: Histogramas de Frecuencia de velocidad de viento por rangos (columnas azules) y distribuciones de probabilidad de velocidad de *Weibull* (línea roja).

Se analizó, posteriormente, la *performance* del aerogenerador marca *Hengfeng* modelo HF47, de origen chino, con potencia nominal de 500 kW operando con las condiciones del viento halladas en el plano de 100 metros para el área estudiada. La especificación técnica de la máquina se detalla a continuación:

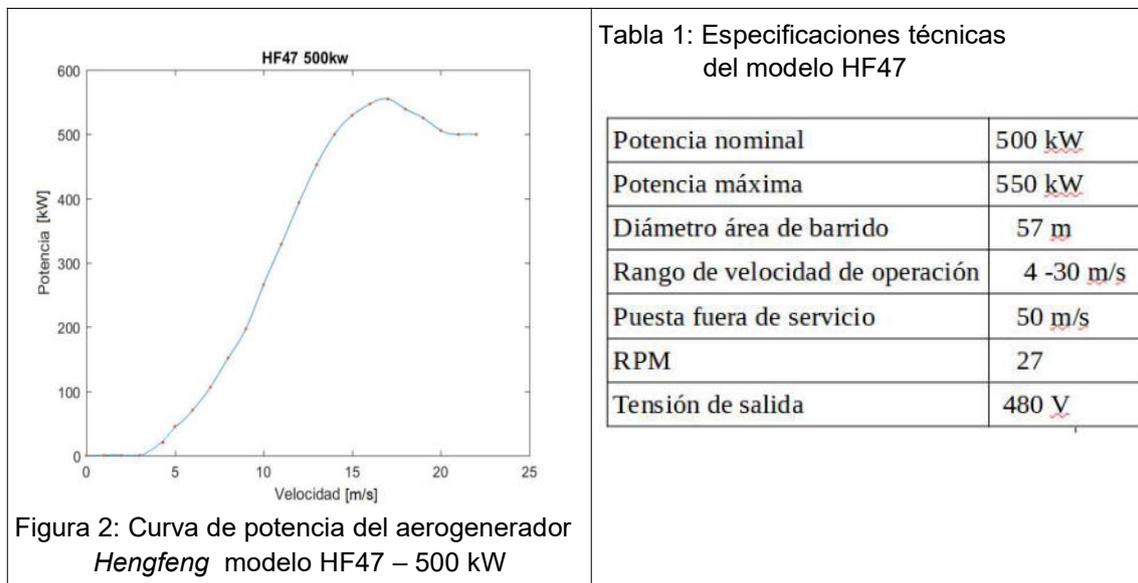


Figura 2: Curva de potencia del aerogenerador *Hengfeng* modelo HF47 – 500 kW

Tabla 1: Especificaciones técnicas del modelo HF47

Potencia nominal	500 kW
Potencia máxima	550 kW
Diámetro área de barrido	57 m
Rango de velocidad de operación	4 -30 m/s
Puesta fuera de servicio	50 m/s
RPM	27
Tensión de salida	480 V

La curva de potencia se obtuvo mediante la hoja de datos proporcionada por el fabricante de la máquina, aplicando una interpolación suave con polinomios *spline* de grado 3.

Con este material se avanzó en el cálculo de la potencia entregada por el aerogenerador, estimada por solapamiento de la curva de potencia con las distribuciones de frecuencia de velocidad de *Weibull* mensuales para cada mes en el periodo estudiado.

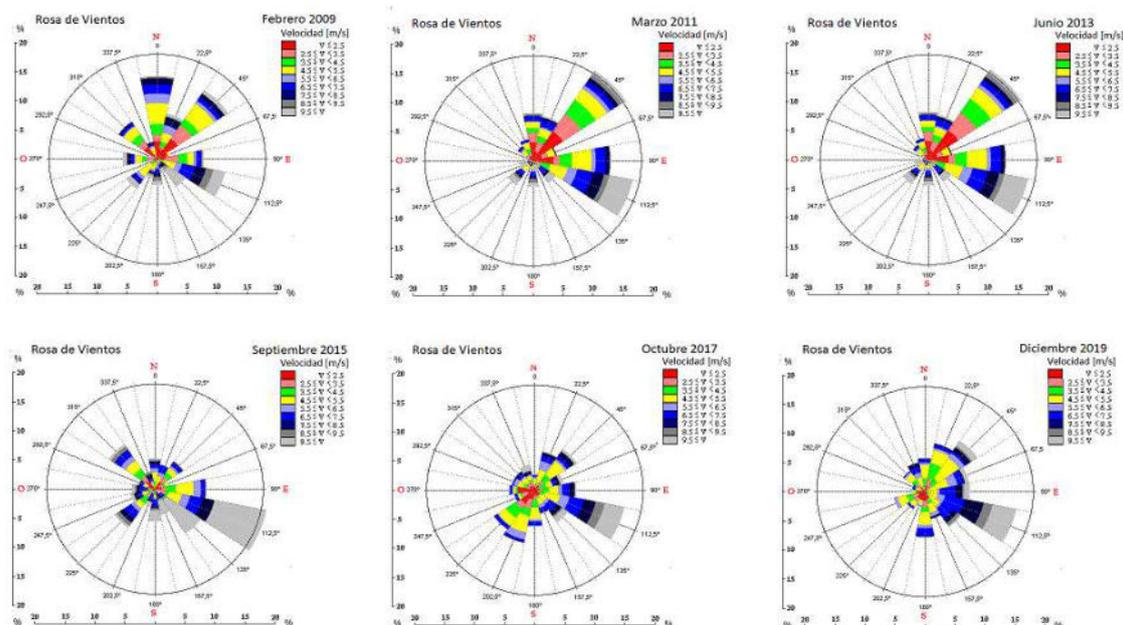
Se estimó, también para cada mes, el acumulado de energía obtenida desde la aeroturbina, aplicando un criterio similar. Se calculó, finalmente, la masa total de CO<sub>2</sub> que se evita emitir a la atmósfera mediante la explotación del recurso eólico aplicando el concepto de *factor de emisión*, parámetro que indica las toneladas de CO<sub>2</sub> por MWh generado. Este parámetro es, para la Argentina, del orden de 0,532 ton/MWh [11].

### 3. Resultados

Se exponen, seguidamente, los resultados obtenidos en el análisis de la calidad del viento y las posibilidades de generación eolieléctrica y de ahorro en emisión de CO<sub>2</sub> en el área geográfica estudiada.

#### 3.1 Características del recurso eólico

Las figuras 3 condensan el conjunto de los resultados obtenidos, volcados en tablas, diagramas de frecuencia y gráficas, que describen la fuente eólica en este sector del Plata. Se presentan en ellas al conjunto de variables eólicas analizadas (dirección y velocidad del viento) de forma integral.



Figuras 3: Rosas de los vientos, con distribución de frecuencias de velocidad por rangos, para cada punto cardinal de seis de los meses del periodo estudiado [8].

La bisectriz de cada sector circular de las rosas de viento indica cada una de las dieciséis direcciones de predominio. La intensidad de velocidades ha sido seccionada en intervalos de 1 m/s de rango, que se representan con distintos colores (escala en el cuadro superior derecho de cada rosa). Cada sector circular se divide en franjas de colores en el sentido radial, cuyo espesor indica la frecuencia de cada rango de velocidad sobre cada dirección de la rosa.

El estudio de la procedencia del viento ha revelado pluralidad de direcciones pero con predominio evidente del cuadrante este-sureste (ESE) y del noreste (NE), seguido por el cuadrante norte (N) solo en meses de verano y este (E) en otoño y primavera. Se encontró que en algunos de los meses estudiados los vientos que se proyectan desde el NE y del ESE llegan a constituir, respectivamente, entre una quinta parte y una sexta parte de los vientos totales.



Los vientos provenientes del cuadrante sur a suroeste (SO) se observan en los meses del otoño e invierno pero con una prevalencia marcadamente menor respecto a las direcciones antes mencionadas. Se extrae también una diferencia sustancial entre la calidad de los vientos de las direcciones de predominio: entre el 50 por ciento y el 80 por ciento de los vientos de las direcciones SE, SSE, ESE se encuentran entre los 6,5 m/s y los 11,0 m/s de velocidad (o mayor, franjas azul a gris claro de las rosas de vientos) mientras que en el cuadrante NE a N entre el 60 por ciento y el 85 por ciento de los vientos no superan los 5,5 m/s (franjas roja a gris azulado). Otra información, extraída de las campanas de distribución continua de probabilidades se refiere a las mayores frecuencias de velocidad que se dan en los meses de primavera y en segundo lugar, los meses del verano. Otoño, en cambio, ha mostrado una *performance* menos favorable en términos de velocidad del viento. Se extrajo también que todos los meses de cada año presentan vientos cuya velocidad ha igualado o superado los 7 m/s y hubo 9 años (de un total de 11) donde en primavera la frecuencia de vientos de velocidad 7 m/s y mayores ha superado el 30 por ciento, alcanzando en la primavera de los años 2011 al 2015 frecuencias superiores al 40 por ciento.

En la estación estival esta condición se presentó en 8 de los 11 años estudiados y en los años 2014 y 2016 la frecuencia superó también el 40 por ciento. La estación invernal ha presentado un rango de frecuencia para esas velocidades entre el 16 por ciento y el 36 por ciento, superando el 30 por ciento en 5 de los 11 años. Otoño, la estación de menor actividad eólica, ha presentado vientos en ese rango de velocidad en todos los años estando la frecuencia comprendida entre el 12 por ciento y el 25 por ciento.

### 3.2 Periodos de calmas

Se conoce por periodos de *calmas* o de inactividad de máquina a aquellos donde la velocidad del viento es menor a la velocidad con que comienza a entrar en revolución el rotor de la aeroturbina (a esa velocidad del viento se la denomina también *velocidad de arranque*). Se ha considerado el rango de velocidad entre 0 y 3 m/s como rango donde la máquina permanece inactiva. La cantidad de horas de *calmas* en los 11 años (4015 días) estudiados se indican en la tabla 2. La misma muestra el estudio realizado dividiendo cada año en 3 cuatrimestres y asignando las probabilidades halladas a cada cuatrimestre de cada uno de los años.

Tabla 2: Probabilidad (en términos absolutos) de periodos de inactividad o calmas en el periodo total estudiado (años 2008 a 2018) y total de días acumulados por cuatrimestres

Primeros cuatrimestres			Segundos cuatrimestres			Terceros cuatrimestres		
Altura: 100 m.			Altura: 100 m.			Altura: 100 m.		
Año	Cuatrimstre	CALMAS menor 3 m/s	Año	Cuatrimstre	CALMAS menor 3 m/s	Año	Cuatrimstre	CALMAS menor 3 m/s
2008	1	0,226	2008	2	0,315	2008	3	0,141
2009	1	0,211	2009	2	0,318	2009	3	0,151
2010	1	0,232	2010	2	0,253	2010	3	0,162
2011	1	0,189	2011	2	0,246	2011	3	0,146
2012	1	0,208	2012	2	0,213	2012	3	0,132
2013	1	0,171	2013	2	0,219	2013	3	0,094
2014	1	0,124	2014	2	0,183	2014	3	0,111
2015	1	0,122	2015	2	0,178	2015	3	0,082
2016	1	0,091	2016	2	0,278	2016	3	0,173
2017	1	0,199	2017	2	0,283	2017	3	0,144
2018	1	0,152	2018	2	0,229	2018	3	0,142
PROMEDIO		0,175	PROMEDIO		0,247	PROMEDIO		0,134
Acumulado		249d 5h 46 m	Acumulado		333d 22h 41m	Acumulado		180d 7h 35m
						TOTAL:		763d 12h 2m



### 3.3 Performance de la aeroturbina

Se presenta, a continuación, el estudio realizado sobre la *performance* de la aeroturbina *Hengfeng* modelo HF47 trabajando en las condiciones de viento descritas en el apartado 3.1. El esquema de estudio se basó en la división de cada uno de los 11 años analizados en tres cuatrimestres: el 1° cuatrimestre incluye los meses de enero a abril, el 2°, de mayo a agosto y el 3°, de septiembre a diciembre. Las tablas 3a, 3b y 3c muestran la potencia promedio desarrollada por la máquina (tercer columna de cada tabla) y la fracción de potencia que representa (cuarta columna). Cada una de las tablas 3 muestra la potencia para el mismo cuatrimestre de cada año obteniendo, de esta forma, información sobre las estaciones del año en que la generación presenta la mejor *performance* y donde ésta es menor. La tabla 4 expone la energía colectada sobre la base del mismo criterio de análisis empleado en las tablas 3.

Tabla 3a: Potencia promedio y fracción de potencia respecto a potencia nominal de la máquina para el 1° cuatrimestre (enero-abril) de cada año (2008-2018)

Año	Cuatrimestre	Potencia k[W]	Fracción
2008	1	98,59	0,2
2009	1	95,61	0,19
2010	1	86,55	0,17
2011	1	100,37	0,2
2012	1	90,28	0,18
2013	1	91,29	0,18
2014	1	120,31	0,24
2015	1	108,09	0,22
2016	1	125,66	0,25
2017	1	72,05	0,14
2018	1	73,2	0,15
Promedio		96,54	0,19

Tabla 3b: Potencia promedio y fracción de potencia respecto a potencia nominal de la máquina para el 2° cuatrimestre (mayo-agosto) de cada año (2008-2018)

Año	Cuatrimestre	Potencia k[W]	Fracción
2008	2	70,41	0,14
2009	2	64,17	0,13
2010	2	83,41	0,17
2011	2	78,47	0,16
2012	2	64,29	0,13
2013	2	74,56	0,15
2014	2	78,99	0,16
2015	2	85,41	0,17
2016	2	55,46	0,11
2017	2	57,86	0,11
2018	2	56,06	0,11
Promedio		69,92	0,14



Tabla 3c: Potencia promedio y fracción de potencia respecto a potencia nominal de la máquina para el 3°cuatrimestre (septiembre-diciembre) de cada año (2008-2018)

Año	Cuatrimestre	Potencia k[W]	Fracción
2008	3	116,18	0,23
2009	3	121,72	0,24
2010	3	114,08	0,23
2011	3	111,34	0,22
2012	3	131,96	0,26
2013	3	123,51	0,25
2014	3	129,43	0,26
2015	3	145,21	0,29
2016	3	89,79	0,18
2017	3	85,35	0,17
2018	3	106,07	0,21
Promedio		115,87	0,23

Tabla 4: Energía colectada al viento por cuatrimestre, total parcial expresado por clase de cuatrimestre (1°, 2°y3°) en el periodo (2008 2018) y energía total colectada en ese periodo por máquina

Año	Cuatrimestre	Energía [kWh]	Año	Cuatrimestre	Energía [kWh]	Año	Cuatrimestre	Energía [kWh]
2008	1	2,86E+05	2008	2	2,08E+05	2008	3	3,40E+05
2009	1	2,75E+05	2009	2	1,89E+05	2009	3	3,56E+05
2010	1	2,49E+05	2010	2	2,46E+05	2010	3	3,34E+05
2011	1	2,89E+05	2011	2	2,32E+05	2011	3	3,26E+05
2012	1	2,62E+05	2012	2	1,90E+05	2012	3	3,86E+05
2013	1	2,63E+05	2013	2	2,20E+05	2013	3	3,62E+05
2014	1	3,46E+05	2014	2	2,33E+05	2014	3	3,79E+05
2015	1	3,11E+05	2015	2	2,52E+05	2015	3	4,25E+05
2016	1	3,65E+05	2016	2	1,64E+05	2016	3	2,63E+05
2017	1	2,08E+05	2017	2	1,71E+05	2017	3	2,50E+05
2018	1	2,11E+05	2018	2	1,66E+05	2018	3	3,11E+05
Promedio		2,79E+05			2,06E+05			3,39E+05
TOTAL								9,07E+06

Los datos hallados para los 1°cuatrimestres de cada año presentan un rango entre 0,14 y 0,25, en términos de fracción de potencia, siendo el promedio 0,19. El aerogenerador estaría trabajando prácticamente a un 20 por ciento de su capacidad, en promedio, en tanto para los 2°cuatrimestres esta situación desmejora desplazándose el rango entre 0,11 y 0,17 y el promedio desciende a 0,14. El tercer cuatrimestre revela la mayor *performance*, trabajando la máquina en el rango de 0,17 a 0,29 y promedio de 0,24, prácticamente a una cuarta parte de su potencia nominal.

La tabla 2 agrega el periodo de inactividad del sistema eólico, con 763 días y 12 horas sobre un total de 4015 días, encontrándose, entonces, que el 19 por ciento de los días la máquina no entregará energía eoloelectrica a la red. El resto de los días (3251) el aerogenerador trabajará manifestando distinta *performance* de rendimiento, llegando en ocasiones a operar en el rango de potencia plena.

Se ha cuantificado, en la siguiente etapa y mediante la descripción realizada del recurso y el análisis de operatividad del aerogenerador modelo HF47 trabajando con el recurso de éste área geográfica, la energía captada del viento y transformada en energía eléctrica. La tabla 4 muestra los resultados obtenidos desde el mismo enfoque de parcializar cada año en tres cuatrimestres.



Se encontró que la energía obtenida mediante una aeroturbina es del orden de  $9,07 \cdot 10^3$  MWh en todo el período, ó  $0,824 \cdot 10^3$  MWh/año (en promedio). Un Parque eólico con una potencia instalada de 20 MW (unos 40 molinos del modelo HF47) generaría 32,98 Gwh/año. La real dimensión de estos valores hallados y expresados en las gráficas y tablas precedentes se tiene cuando se comparan con la energía demandada, por ejemplo, por planta industrial de una región. Los datos siguientes corresponden a España: La industria de ese país consume unos 500 kWh (en promedio) durante 16 hs y en 240 días de actividad en el año ese consumo asciende a 1920 MWh/año [13]. Un parque Eólico de 20 máquinas *Hengfeng* clase HF47 instalado en el Río de La Plata frente a las costas del AMBA podría suministrar la energía total demandada durante un año por 17 de esas plantas españolas.

Otra referencia de valor deriva del hecho que estas tecnologías, como también los desarrollos que captan energía solar, el aprovechamiento del recurso energético marino en todas sus formas, entre otros, no emiten gases de Efecto Invernadero. Un MWh de energía renovable generado evita dispersar a la atmósfera de 977 kg de CO<sub>2</sub> [13]. De esta forma, la contribución al saneamiento ambiental es notoria. En el caso de la granja eólica *off shore* de 20 MW de potencia instalada en aguas del Plata evitaría la emisión de 32202 ton CO<sub>2</sub> anuales. Esta cifra es equivalente a la emisión de 17821 automóviles con un consumo promedio de 2000 litros de nafta en el año [14]

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos corroboran, por una parte, nuestra hipótesis de ingreso irrestricto del recurso eólico proveniente del mar debido a su extensa conexión con el Océano Atlántico Sur y otras particularidades mencionadas, propias de este amplio corredor fluvial. Entre la quinta y sexta parte de los vientos en la primavera y el verano proceden del sector ESE y NE. Además, la calidad del recurso ha quedado constatada en el hecho que, en acuerdo con nuestros cálculos, en la estación de primavera la frecuencia los vientos cuya velocidad ha igualado o superado los 7 m/s (rango ideal para una colecta eólica ) alcanzó el 30 por ciento en 9 los 11 años estudiados, llegando en dos de esos años a superar el 40 por ciento. Se repitió una *performance* similar para la estación estival y en la estación invernal, tal frecuencia se confirmó en 5 de los 11 años.

El periodo de calmas hallado indica que la actividad de la mayoría de las aeroturbinas disponibles en el Mercado sería del orden del 80 por ciento del total de días, es decir en 3212 días de los 4015 días analizados. Este dato refuerza aún más la idea de *performance* eólica con fines de explotación.

Los resultados obtenidos en el estudio teórico de operatividad de una aeroturbina de 500 kW con el recurso del Río de La Plata, en el plano de 100 metros sobre cota de referencia confirman la característica positiva del potencial del cuadrante fluvial de Buenos Aires en relación a la eólica. Si bien la máquina trabajaría entregando entre el 14 por ciento y el 25 por ciento (en promedio) de su potencia nominal, la cuota de energía *limpia* generada alcanzaría los 824 MWh anuales por unidad instalada. Si se extiende este resultado a una granja eólica de 40 de estos molinos (20 MW instalados) operando en aguas del Plata, frente a la costa del AMBA, la colecta energética ascendería a 32,98 GWh anuales, capaces de abastecer en consumo de unas 17 plantas industriales promedio, que demandarían 1920 MWh en el año. La otra cuestión relevante es la contribución ambiental derivada de esta explotación *limpia*: esa misma cantidad de energía suministrada por centrales termoeléctricas dispersarían unas 32202 toneladas de CO<sub>2</sub> al medioambiente contribuyendo a alimentar el Efecto Invernadero local.



Esa cuota de CO<sub>2</sub> emitida al ambiente es equivalente a la cantidad de ese mismo gas emanado por 17821 automóviles con un consumo promedio de 2000 litros de combustible por unidad, en un año. Justamente éste volumen de CO<sub>2</sub> es el que se ahorra dispersar con tecnología eólica y con el recurso que ofrece este gran río. Sumando también otros beneficios mencionados como el introducido por la explotación realizada *in situ*, que permitiría el ahorro de ingentes cantidades de recursos financieros en tendido de cables de alta tensión, torres y logística y el ahorro del 15 por ciento en concepto de pérdidas por Efecto Corona y Corrientes Disruptivas, propios de la transmisión en *Alta Tensión* cuando se superan los 150 km desde el punto de generación hasta el de consumo, el abanico de ventajas concretas se amplía notablemente.

A modo de corolario, las ventajas son múltiples y apreciables, y en este camino de aunar esfuerzos en la mitigación del *Cambio Climático* y de virar nuestra matriz energética hacia la participación cada vez mayor de los aportes de las *Renovables*, el Río de La Plata, por sus características, se despliega como una oportunidad casi inmejorable. Por lo tanto no deberíamos, en absoluto, continuar *dando la espalda al Río*.

## 5. Referencias

- [1] Grupo de Trabajo II del IPCC (2022) '*Comunicado de Prensa del IPCC*' Grupo de Expertos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático – 2022/08/PR -Berlín ,Alemania.
- [2] Carlino, H. '*El Acuerdo de París y sus Implicaciones para América Latina y el Caribe*' - Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente – 2017
- [3] Díaz.J. (2021) '*Anuario Eólico 2021*'- Asociación Empresarial Eólica – Madrid- España. Pp.3-5.
- [4] Secretaría de Energía (2021) '*Informe Trimestral de Coyuntura*' – 1° Trimestre 2021 – Secretaría de Energía de La Nación- Buenos Aires.
- [5] Gabinete Nacional de Cambio Climático, Ministerio de Ambiente y Desarrollo sustentable (2017) '*Plan de Acción Nacional de Transporte y Cambio Climático*' Versión I – Presidencia de La Nación.
- [6] Volonté, A.; Gil, V. y col. (2012) '*Análisis del comportamiento del viento en el sector norte del periurbano de Bahía Blanca, Argentina*' – Revista Geográfica, Vol. 151. pp 89.
- [7] Organización de Naciones Unidas – Hábitat 2020 - '*Folleto de Datos Poblacionales*' Copyright Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos 2020 Nairobi, Kenia pp 3-5.
- [8] Provenzano, P., Fernández, L. (2022) '*Potencial eólico en el área del Río de La Plata y costa fluvial rioplatense*', Expo Viento & Energía 2022 - AAEE, Facultad de Ingeniería UBA. <https://argentinaeolica.org.ar/V&E2022>
- [9] Sathe, A.; Sven, E.; Peña, A. (2010) '*Atmospheric stability and wind profiles at two wind farm sites in the North Sea*'. Dutch Wind Workshops.
- [10] Carvente Muñoz, O.; Borges Pool, A.; Palmero Bohórquez, M. ; González Carrillo, B. y col.. (2015) '*Predicting wind speeds and potential for greater heights: study in Mérida, Yucatán, México*' -Ingeniería, Revista Académica Universidad Autónoma de México pp.85-90.
- [11] Cálculo del factor de emisiones de CO<sub>2</sub> de la red Argentina de energía eléctrica. Año 2015 Secretaría de Energía de la Nación.
- [12] Weringa, J.; Davenport, A.; Grimmond, S.; Oke, T. (2001) '*New revision of Davenport roughness classification*'. 3<sup>rd</sup> European and African Conference on Wind Energy – July 2001 – Eindhoven Netherlands.
- [13] Cuesta Valle, A. (2005) '*Instalación de un aerogenerador para el abastecimiento eléctrico de una industria*' Revista Técnica Industria N°259 –Eficiencia Energética- Madrid -pp 82-85.
- [14] Guillot, J.(2022) '*Emisiones de CO<sub>2</sub> de los coches: hechos y cifras (Infografía)*' Artículo 20190313ST031218 – Dirección General de Comunicación "Parlamento Europeo-
- [15] Fayos Alvarez, A. (2009) '*Líneas eléctricas y transporte de energía eléctrica*' - Ed. Universidad Politécnica de Valencia T



## SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIA RENOVÁVEL EM UMA REGIÃO ISOLADA DO BRASIL, AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS EM ÍNDICES DE EMPREGABILIDADE, IDH E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Amanda Klein <sup>1</sup>, Tarcísio de O. Klein <sup>2</sup>, Thais G. Xavier <sup>3</sup>, Werik K. S. Rodrigues <sup>2</sup>, Diego M. Y. Maya <sup>3</sup>, Angie L. E. Sarmiento <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo TIES (Tecnologias Integradas e Engenharia Sustentável), IMC, Universidade Federal de Itajubá, Brasil – [amandaklein@unifei.edu.br](mailto:amandaklein@unifei.edu.br)

<sup>2</sup> Grupo TIES (Tecnologias Integradas e Engenharia Sustentável), IRN, Universidade Federal de Itajubá, Brasil – [tarcisioklein@unifei.edu.br](mailto:tarcisioklein@unifei.edu.br), [werik\\_kaian@unifei.edu.br](mailto:werik_kaian@unifei.edu.br)

<sup>3</sup> Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída - NEST. Grupo TIES (Tecnologias Integradas e Engenharia Sustentável), IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil – [d2022100202@unifei.edu.br](mailto:d2022100202@unifei.edu.br), [diegoyepes@unifei.edu.br](mailto:diegoyepes@unifei.edu.br), [angieespinosa@unifei.edu.br](mailto:angieespinosa@unifei.edu.br)

### RESUMO

Buscando determinar um sistema híbrido com os melhores índices de impacto social e de eficiência energética para as comunidades brasileiras, a Reserva Extrativista Lago do Cuniã, localizada em Rondônia, foi estudada a partir de informações contidas na literatura científica e das ferramentas computacionais iHOGA e NASA POWER, para simulação e georreferenciamento, respectivamente, e foi projetado um sistema híbrido composto por painéis solares, geradores à diesel, baterias, eletrolisador, inversor e célula de combustível. Nesse sentido, foram feitas análises numéricas e discutidas a forma como os índices sociais, como empregabilidade e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), são afetados e como, com base nas simulações numéricas, pode-se otimizar a proporção da quantidade de energia gerada mediante os recursos naturais utilizados. Por fim, foi possível concluir que sistema composto pelo gerador a diesel obteve o aumento superior do número de empregos gerados, e a partir dos cenários estudados, com acréscimo de 75% da demanda houve um aumento de aproximadamente 0,06 do IDH, sendo alterado de 0,46 para 0,55. A partir disso, pode-se concluir que quanto maior a demanda, maior se mostra o índice de desenvolvimento humano. Ademais, em relação a eficiência energética, constata-se a possibilidade de substituição da energia obtida por combustíveis fósseis pela energia solar, o que tornaria o projeto ainda mais atrativo financeiramente e amplamente renovável. Assim, espera-se que o sistema favoreça o desenvolvimento dessas áreas de forma sustentável, reforçando os benefícios do uso de energias renováveis em comunidades isoladas.

**Palavras-chave:** Sistema Híbrido, Simulação, Energia Renovável, Comunidades Isoladas



## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são uma ameaça à redução da pobreza e fome mundial, e podem desfazer décadas de esforços em desenvolvimento dos países. Apesar de ser presente em todo o território do planeta, seus impactos são maiores na população de baixa renda e em localidades afastadas da rede elétrica [1]. Dito isso, essas alterações no clima aumentam a vulnerabilidade, principalmente, nas áreas rurais e isoladas, já que estas podem não possuir amplo acesso à recursos básicos devido suas vias de acesso ou mesmo por causa da distância geográfica, em relação aos grandes centros urbanos.

Assim, diversificar as formas de geração de energia elétrica, utilizando fontes renováveis, pode ser capaz de reverter a situação citada anteriormente e aumentar a resiliência das áreas remotas e vulneráveis [2]. Além disso, o uso de um meio de armazenamento sustentável, como células de combustível, não só contribui para a preservação do meio ambiente, como também favorece o desenvolvimento ecológico das comunidades isoladas [3].

Nesse sentido, um sistema híbrido de geração de energia elétrica, projetado a partir dos recursos disponíveis e das características da região onde será implantado, pode diminuir os custos provenientes da geração e evita perdas de energia causada por transporte ou infraestrutura. Também, os sistemas de geração híbrida são confiáveis, uma vez que são desenvolvidos levando em consideração a intermitência da natureza [4].

Ademais, no contexto de uma comunidade isolada, muitas vezes o sistema pode ser aprimorado visando atender condições específicas da localização. Portanto, explora-se a extinção da utilização dos geradores no sistema, possibilitando uma redução das emissões e anulando a necessidade do transporte do diesel até a reserva, logo, tornando a rede híbrida mais compatível com a região do Lago do Cuniã.

Pensando no contexto energético, ao verificar a maioria dos estudos realizados acerca de análises feitas com sistemas híbridos renováveis, pode-se observar que grande parte deles avaliam os impactos econômicos desses sistemas, como custo, e como otimizá-los. Contudo, há pouca preocupação em analisar os índices sociais que envolvem a implantação de um sistema híbrido em uma comunidade, como pode ser visto através da análise bibliométrica apresentada na Figura 1, deixando evidente a necessidade de pesquisas abordando este assunto.

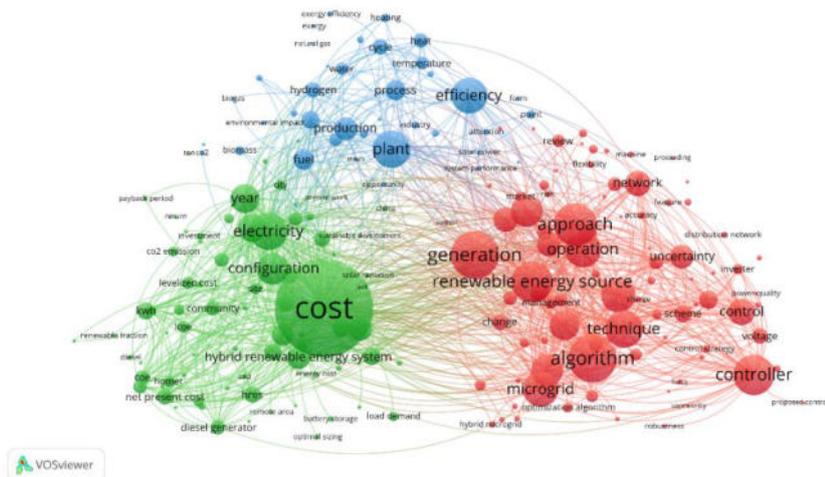


Figura 1: Análise bibliométrica realizada na data de 5 de junho de 2023, com as palavras chaves “renewable”, “hybrid”, “system”, “energy” e “analysis”.

Ainda, é importante ressaltar na Figura 1 que as principais análises realizadas nos estudos contemplados, até o momento da pesquisa, podem ser observadas em maior destaque pelo tamanho da fonte e tamanho das circunferências. Nesse sentido, em tradução livre, os termos “custo”, “geração” e “algoritmo”, por exemplo, estão mais em evidência, enquanto palavras relacionadas às análises sociais estão menores ou não estão entre os termos.

Em função disto, este estudo tem como objetivo analisar os impactos sociais da implantação de um sistema híbrido de energia renovável, de acordo com os cálculos dos índices de empregabilidade e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) na Reserva Extrativista do Lago do Cuniã, localizada no estado do Amazonas, partindo de simulações de sistemas híbridos de energia renovável feitas com o software iHOGA [5], que define o conjunto de componentes e a melhor estratégia operacional ao fornecer uma localização.

## 2. FERRAMENTAS E MÉTODOS

Em sequência, serão apresentados os métodos para a determinação da localização RESEX Lago do Cuniã, assim como suas características; a avaliação dos recursos energéticos disponíveis na região, com os valores de irradiação solar global e horizontal e velocidade do vento, que foram utilizadas nas simulações do sistema; os componentes do sistema híbrido ótimo composto por painéis fotovoltaicos, baterias, turbinas eólicas, geradores, células de combustível, eletrolisadores e inversores; a avaliação social acerca da geração de empregos de cada equipamento e o cálculo de IDH; os parâmetros econômicos utilizados nas simulações para gerar os custos do sistema e, por fim, a análise de eficiência energética reorganizando-se a configuração dos equipamentos e a criação e características dos cenários criados.

## 2.1 Determinação da localização de estudo

De acordo com a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), no Brasil, as comunidades isoladas do sistema interligado de energia se localizam, em maioria, na região Norte do país, como pode-se observar na Figura 2. Dessa forma, buscou-se instituições que atuassem na região com o objetivo de obter maiores informações acerca de cada comunidade para uma análise mais confiável e condizente com a realidade. Assim, no caso da Reserva Extrativista (RESEX) do Lago do Cuniã ( $8^{\circ} 18' S$ ,  $63^{\circ} 29' O$ ), citada anteriormente, há um diagnóstico socioambiental [7], do qual foram retiradas todas as informações necessárias, desenvolvido pela NAPRA (Núcleo de Apoio à População Ribeirinha da Amazônia), instituição responsável por incentivar o desenvolvimento sustentável em torno de comunidades rurais de Porto Velho, no estado da Rondônia.

Assim, de acordo com o diagnóstico citado anteriormente, a comunidade é composta por quatro núcleos habitacionais denominados Silva Lopes Araújo, Neves, Pupunhas lado esquerdo e Pupunhas lado direito, e outros dois núcleos menores denominados Araçá e Bela Palmeira, como pode-se observar, também, na Figura 2.



Figura 2: Áreas isoladas (em amarelo) localizadas no Brasil, de acordo com [6] e divisão dos núcleos (a direita) e localização da Reserva Extrativista Lago no Cuniã (em vermelho).

Além disso, dentro de cada núcleo vivem cerca de 400 pessoas que compõem um total de 83 famílias [8]. Estas, mantêm-se por meio de funcionalismo público, negócios próprios, pesca e extrativismo, sendo as duas últimas responsáveis por cerca de 70% das atividades econômicas. Em relação à educação, a reserva é atendida por apenas uma escola, no núcleo Silva Lopez Araújo, que se responsabiliza pela formação educacional até o nono ano. Por fim, no contexto



energético, a região é abastecida por uma usina de geradores à diesel, localizada em São Carlos do Jamari, uma comunidade próxima [7].

## 2.2 Avaliação dos recursos energéticos disponíveis

Em relação aos recursos disponíveis na comunidade, o clima é caracterizado como Tropical de Monções, variação do clima tropical úmido onde ocorrem grandes volumes de chuva que podem alcançar 1500mm de média anual. Assim, de acordo com [8], 55 a 64 dias por ano não chove no norte da reserva, e ao sul, as chuvas não ocorrem de 64 a 75 dias por ano, sendo que no mês mais frio, a temperatura pode chegar a 18 °C. Além disso, a temperatura anual da região alcança 26,5 °C, sendo de 0º a 13º a inclinação ideal para painéis fotovoltaicos. Além disso, a demanda estimada para a RESEX Lago do Cuniã possui valor de 88,377MWh/ano, sendo que, estão incluídos nesse valor um abatedouro, uma escola, o comércio e a utilização de energia por parte das residências para uma população de aproximadamente 400 pessoas.

Também, o sistema híbrido desenvolvido seria 95,65% renovável com capacidade de produção de energia solar, que seria a fonte geradora de maior relevância, de 112,997 MWh/ano. Por sua vez, os valores determinados visaram a maximização do VPL (Valor Presente Líquido) a fim de tornar o projeto atrativo em sua totalidade. Por fim, as simulações foram realizadas com os valores de 4,69kWh/m<sup>2</sup> para o parâmetro de média diária de irradiação em superfície horizontal, que equivalem a 1712,54kWh/m<sup>2</sup> de irradiação anual [9]. Além disso, no software, a inclinação dos painéis foi configurada para 0º (azimute 0º) [10] e o albedo do solo foi inserido como 20%, não considerando o rastreamento automatizado do Sol. Já no contexto do potencial eólico, verifica-se a ocorrência de ventos com velocidade média de 2,28m/s e potencial de geração de 20W/m<sup>2</sup>, na altitude de 50m [11], contudo, o software fornece os dados de velocidade média anual do vento de 1,86m/s, na altura de 50m [9].

## 2.3 Componentes do sistema híbrido ótimo

A simulação, através da aplicação de dois algoritmos genéticos SPEA-2 operando simultaneamente para determinar melhor configuração de operação/composição, gerou o conjunto de equipamentos mais adequados para a comunidade analisada, como se expõe na Tabela 1. Também, na Figura 3, pode-se ver os componentes discriminados segundo sua potência.



Tabela 1. Componentes simulados e suas potências.

Equipamentos	Modelo	Potência
Painéis Fotovoltaicos (PF)	PV100	100kWp
Baterias (BT)	Bat240kWh	0,24MWh
Turbinas Eólicas (TE)	-	-
Geradores Diesel (DG)	Diesel50kW	50KVA
Célula de Combustível (CdC)	FuelCell1kW	1kW
Eletrolisador (EZ)	Elyzer2kW	2kW
Inversor (INV)	Inv-Ch75kW	75kW

Nota-se que devido à alta irradiação solar, o painel fotovoltaico é o equipamento de maior potência, ademais, pelo baixo potencial eólico, as turbinas não foram consideradas.

#### 2.4 Avaliação social da implementação do sistema híbrido ótimo

Estabelecendo uma relação entre a geração de empregos e a potência dos equipamentos utilizados, elabora-se a Tabela 2.

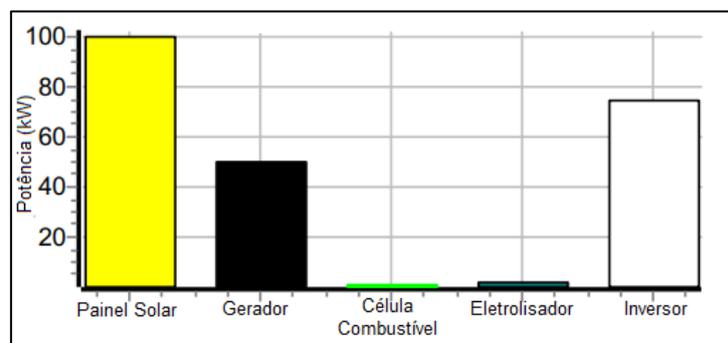


Figura 3: Representação gráfica do aumento da empregabilidade, segundo o aumento da demanda.

Tabela 2. Relação entre empregos gerados e a potência dos equipamentos.

Equipamentos	Empregos Gerados	Referências
Painéis Fotovoltaicos	2,7 empregos/MW	Cameron e Zwaan (2015)
Turbinas Eólicas	1,1 empregos/MW	Cameron e Zwaan (2015)
Geradores Diesel	0,14 empregos/(GWh/ano)	Rojas-Zerpa (2012)
Célula de Combustível	1,2 empregos/MW	Roy et al. (2022)



Apesar da tabela ser importante para os estudos realizados, é necessário compreender que essa forma de análise para determinar empregabilidade do sistema não aborda de maneira ampla a geração de empregos na localidade. Isso acontece, pois, equipes de segurança, transporte de combustíveis, analistas de dados e todo os novos postos criados, devido a uma tendência de desenvolvimento local graças a disponibilidade de energia, não estariam sendo englobados nos valores encontrados.

Também, para avaliar os efeitos da energia no IDH, adota-se a utilização da Equação 1, cuja, para uma população de 400 pessoas, é possível determinar o índice conhecendo a demanda [12].

$$IDH = 0,0978 \cdot \ln(E_{consumo\ anual\ per\ capita}) - 0,0319 \quad (1)$$

## 2.5 Parâmetros econômicos

Em relação a análise que foi feita para estudar os custos do sistema híbrido, foi estudado um período de 25 anos e utilizou-se a taxa de desconto real de 7,54%, com base na taxa de desconto nominal da SELIC (13,75% ao ano) [13]. Já a taxa anual de inflação foi fixada em 5,77% no mesmo período, de acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) [14].

Além disso, foram verificados os custos de instalação, representados por 25% do valor inicial, considerando que o projeto seria realizado juntamente com o Pronaf (Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar) na modalidade ABC+ Bioeconomia, o que financiaria 100% das despesas com juros de 5% ao ano com pagamentos distribuídos em parcelas iguais, no período de 25 anos, definido anteriormente [15].

## 2.6 Análise da eficiência energética

Analisando os dados obtidos do projeto ótimo determinado através do software de simulação da usina (iHOGA), identifica-se a presença dos geradores a diesel compondo o sistema. Os geradores são elementos que atribuem maior confiabilidade a rede híbrida devido ao seu potencial de produção de energia na ausência dos recursos naturais, todavia, há uma longa cadeia de transporte de combustível e manutenção associada a esse tipo de equipamento.

Desta maneira, reorganiza-se a configuração dos equipamentos de maneira que toda a energia esteja associada aos equipamentos produtores de energia renovável, sendo o principal, o painel fotovoltaico, verificando o impacto dessa modificação nas emissões de CO<sub>2</sub>.



## 2.7 Análise de cenários

Para se considerar os efeitos da demanda no IDH e nos índices de empregabilidade, optou-se por verificar como alterações percentuais influenciaria a transformação dos dados. Assim, de acordo com os dados da Tabela 3, considerou-se três cenários de influência para o sistema híbrido. Observa-se ainda que, nesse caso, que C0 seria o ponto de partida da análise.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Empregabilidade

Através dos resultados conhecidos a respeito da localidade isolada e aplicando variações do sistema para situação de baixa, média e alta expansão da rede híbrida de energia renovável (crescimento de 25, 50 e 75%), inicialmente verifica-se através da Figura 4, como cada equipamento impactaria na geração de empregos diretos associados a demanda.

Tabela 3. Variações da demanda projetando possível expansão energética.

Cenários	Variación Percentual da Demanda	Definição
C0	+0%	Demanda original
C1	+25%	Expansão do comércio e atividades econômicas em 3 vezes
C2	+50%	Expansão do comércio e atividades econômicas em 3 vezes e duplicação do número de moradias
C3	+75%	Expansão do comércio e atividades econômicas em 3 vezes, duplicação do número de moradias e modernização de procedimentos extrativistas.

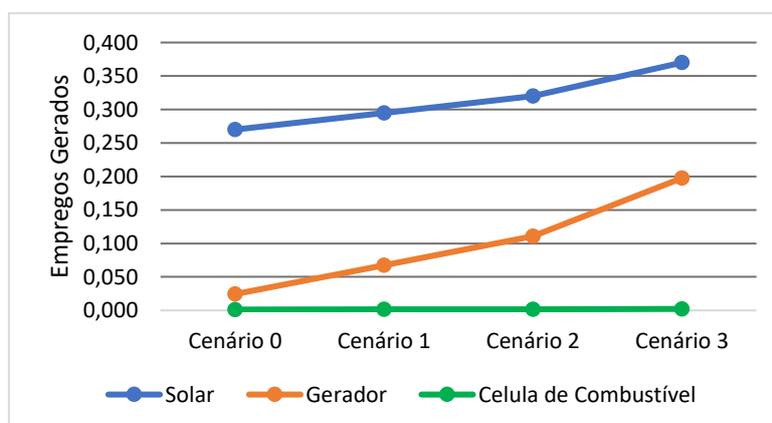




Figura 4: Representação gráfica do aumento da empregabilidade, segundo o aumento da demanda.

Verifica-se, desta maneira, que através da demanda crescente, há um aumento de 8 vezes nos empregos gerados para uma elevação de 75% da energia solicitada ao sistema híbrido no caso dos geradores a diesel, enquanto, a geração de empregos por energia solar apresentaria um acréscimo de apenas 1,37 vezes. Ou seja, a presença dos geradores a diesel no sistema causa um acréscimo na empregabilidade, apesar de não ser ambientalmente sustentável devido à alta emissão de poluentes. Enfim, observa-se que o potencial de geração de emprego das células de combustível com base na potência apresenta valores praticamente nulos.

### 3.2 Correlações empíricas entre demanda energética e IDH

Com base nos dados apresentados na Figura 5, é possível destacar a correlação entre a demanda energética e o IDH, onde em relação aos quatro cenários de demanda energética (Tabela 3), há a presença de uma tendência de aumento, de forma linear, no desenvolvimento humano em todos os cenários à medida que a demanda energética é acrescida. No primeiro cenário (C1), com um aumento da demanda de 25%, houve um acréscimo de aproximadamente 4,1%, devido a expansão das atividades econômicas em 3 vezes, seguido por um aumento de 7,7% e 10,7% em relação a demanda padrão do sistema, pelos cenários C2 e C3, respectivamente. Tal comportamento pode ser justificado pelo potencial de geração de empregos apontado pelos resultados demonstrados na Figura 4. As informações obtidas destacam a importância dos sistemas híbridos de energia para atender ao aumento da demanda de forma sustentável, o que como resultado, promove melhores índices de desenvolvimento humano e consequentemente reduz a desigualdade presente no local.

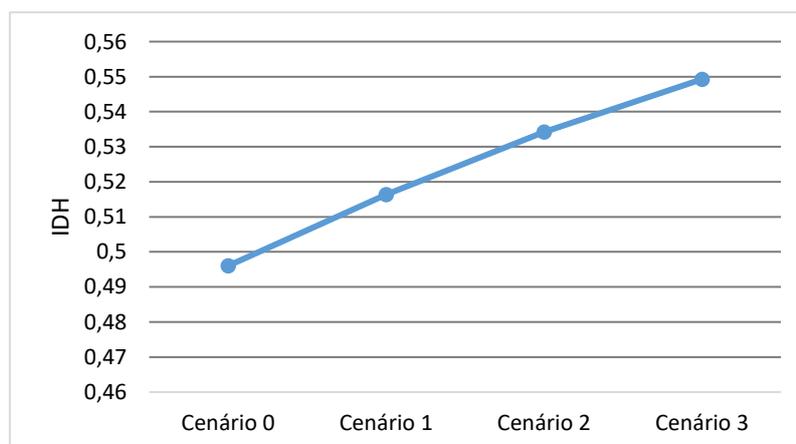


Figura 5: Representação gráfica da correlação entre demanda energética e IDH.



### 3.3 Aprimoramentos energéticos

Apesar do sistema ter sido otimizado visando o máximo interesse econômico, outras características poderiam torná-lo mais adequado a comunidade isolada analisada, sendo que, de um ponto de vista sustentável, a utilização dos geradores causa uma elevação nas emissões de poluentes. Desta maneira, é possível estabelecer um comparativo entre o CO<sub>2</sub> emitido ao se considerar o sistema ótimo, com a distribuição de energia gerada apresentada na Figura 6, e a anulação da queima de combustíveis fósseis em um modelo utilizando somente os painéis fotovoltaicos. Logo, optando-se por gerar 3,84MWh/ano através da irradiação solar, ao invés da utilização de geradores a diesel, permite-se ao sistema uma economia monetária e uma ampliação da sustentabilidade, visto que, a utilização do combustível extrapola o âmbito energético, envolvendo também seu manejo até os locais isolados.

Assim, com a alteração do sistema, haveria uma redução das emissões em 5,36tCO<sub>2</sub>/ano, cerca de 52,3%, considerando apenas o consumo de combustível para produção de energia, de maneira que, esse valor se elevaria ainda mais ao se considerar as rotas de manejo do diesel até a comunidade isolada, além disso, de uma outra perspectiva, haveria uma economia de aproximadamente \$39.223, aumentando o interesse de investimento no projeto.

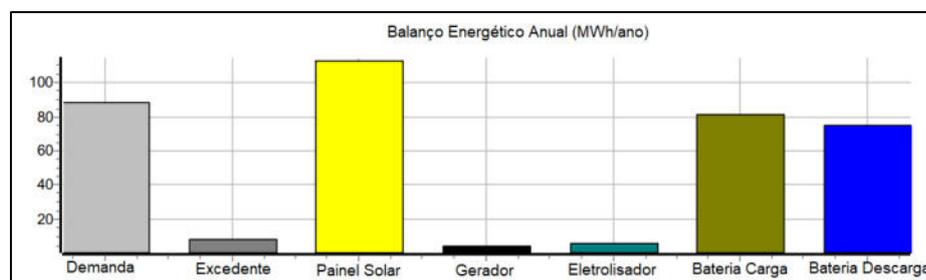


Figura 6: Energia produzida pelo sistema em um ano.

## 4. CONCLUSÕES

Por fim, com os resultados obtidos pode-se analisar que sistema composto pelo gerador a diesel obteve o aumento superior do número de empregos gerados. Contudo, com a célula de combustível não houve alteração do valor. Também, com os painéis solares, no sistema, o índice de empregabilidade apresentou um valor inferior quando comparado com os geradores, de acordo com a exploração dos diferentes cenários, porém deve-se levar em consideração a necessidade de técnicos especializados para supervisionamento dos sistemas ao longo de seu funcionamento e manutenção de seus equipamentos e componentes, uma vez que, uma análise de empregabilidade envolvendo somente a demanda é muito superficial para análises sociais.



Em sequência, analisando o cenário C3, com acréscimo de 75% da demanda houve um aumento de aproximadamente 0,06 do IDH, sendo alterado de 0,46 para 0,55. A partir disso, pode-se concluir que quanto maior a demanda, maior se mostra o índice de desenvolvimento humano, e destacar a importância do sistema em atender o crescimento da demanda de forma sustentável e o acesso à energia que de forma confiável, contribuindo, assim, para o desenvolvimento da comunidade estudada. Pode-se ressaltar, também, que o valor de IDH encontrado é semelhante ao de outras localidades de maior população da mesma região, tornando assim a comunidade lago do Cuniã compatível à área em que se localiza, nesse quesito.

Já em relação à eficiência energética, pode-se enfatizar que grande parte da geração é proveniente dos painéis solares, e que as turbinas eólicas foram desconsideradas através da otimização por haver baixos valores de velocidade do vento no local de estudo. Todavia, a fim de aprimorar a sustentabilidade da rede híbrida, constata-se a possibilidade de substituição da energia obtida por combustíveis fósseis pela energia solar, o que tornaria o projeto ainda mais atrativo financeiramente e amplamente renovável. Sendo assim, devido às atuais condições relacionadas ao acesso à energia elétrica na região, a implementação de um sistema híbrido com características semelhantes ao sistema simulado nesse estudo seria uma solução ecológica para a comunidade analisada e o sistema otimizado através da simulação é viável para a área escolhida, não gerando impactos negativos significativos à comunidade e atendendo a demanda de energia de forma sustentável, com ressalvas à utilização dos geradores a diesel.

## AGRADECIMIENTOS

A equipe de pesquisa agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, FAPEMIG; pelo financiamento do Projeto: “simulação e otimização de sistemas híbridos isolados de geração de energia elétrica com base em energias renováveis [PROCESSO APQ-01932-21] executado na Universidade Federal de Itajubá, registro DPI UNIFEI Nro: PVDI208-2021.

## REFERÊNCIAS

- [1] Adedeji, O., Reuben, O. and Olatoye, O. (2014) Global Climate Change. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2, 114-122. <https://doi.org/10.4236/gep.2014.22016>.
- [2] IPCC. (2022): Summary for Policymakers [Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdor, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>.



- [3] Malik, P., Awasthi, M., & Sinha, S. (2022). A techno-economic investigation of grid integrated hybrid renewable energy systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101976. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.101976>.
- [4] Tran Q, Davies KL. Isolation microgrid design for remote areas with the integration of renewable energy: A case study of Con Dao Island in Vietnam. *Clean Technol* 2021;3(4):804–20. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3040047>.
- [5] Software iHOGA. Software de simulación y optimización de suministro eléctrico basado en energías renovables. Versão PRO+ 3.4. Espanha. Universidad Zaragoza. Disponible em: <https://ihoga.unizar.es>.
- [6] EPE. “WebMap EPE”. Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro. Disponible em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>.
- [7] NAPRA. “Núcleo de apoio a população ribeirinha da Amazônia”. (2021). Um Retrato da Reserva Extrativista Lago de Cuniã. Disponible em: <https://napra.org.br/2021/12/02/pessoasmeio-ambiente-e-saude-diagnostico-socioambiental-m-retrato-de-comunidades-ribeirinhasdo-baixo-madeira-ro/>.
- [8] ICMBIO. “Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade”. (2018). Plano de Manejo da Reserva Extrativista Lago do Cuniã. Disponible em: <https://www.gov.br/icmbio/ptbr/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/amazonia/lista-deucs/resex-lago-%20do-cunia>.
- [9] NASA. (2021). Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER). Disponible em: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer/>.
- [10] Global Solar Atlas. (2023). Disponible em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=-8.092202,-63.304253,11&s=-8.092096,-63.304103&m=site>.
- [11] Global Wind Atlas. (2023). Disponible em: <https://globalwindatlas.info/en/>.
- [12] Rojas- Zerpa, JC (2012). Planejamento do fornecimento de eletricidade em áreas rurais de países em desenvolvimento: um quadro de referência para a tomada de decisões. Tese PhD, Universidade de Zaragoza.
- [13] BCB. “Banco Central do Brasil”. (2023). Taxas de juros básicas. Disponible em: <https://www.bcb.gov.br/controlinflacao/historicotaxasjuros>.
- [14] IBGE. “Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística”. (2023). Inflação. Disponible em: <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>.
- [15] BNDES. “Banco Nacional de Desenvolvimento”. (2023). Pronaf ABC+ Bioeconomia. Disponible em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento>.



## AGREGADO DE VALOR A RESIDUOS FITOSANITARIOS MEDIANTE PROCESOS TERMO-FISICOS

Mercedes Lozano Rus<sup>1</sup>, María Sol Gutierrez<sup>2</sup>, Norberto Canale<sup>1</sup>, Leonardo Molisani<sup>2</sup>,  
María Fernanda Gayol<sup>3</sup> y Leisa María Magallanes<sup>3</sup>

<sup>1</sup> División de I+D+i, Canale S.R.L - Pedro Patat Norte 1570, Colonia Caroya, Córdoba Colonia Caroya, Córdoba [mercedeslozanorus@gmail.com](mailto:mercedeslozanorus@gmail.com) [canale@canalesrl.com.ar](mailto:canale@canalesrl.com.ar)

<sup>2</sup> Grupo de Acustica y Vibraciones IDAS UNRC-CONICET - Ruta 36 Km 601, Río Cuarto, Córdoba [msgutierrez@ing.unrc.edu.ar](mailto:msgutierrez@ing.unrc.edu.ar) [lmolisani@vt.edu](mailto:lmolisani@vt.edu)

<sup>3</sup> Grupo SIMAP IDAS UNRC-CONICET - Ruta 36 Km 601, Río Cuarto, Córdoba [mgayol@ing.unrc.edu.ar](mailto:mgayol@ing.unrc.edu.ar) [lmagallanes@ing.unrc.edu.ar](mailto:lmagallanes@ing.unrc.edu.ar)

### RESUMEN

Actualmente en nuestro país, la producción de envases fitosanitarios ha aumentado dando lugar a una problemática ambiental (por ejemplo, el agro produce unas 17.000 toneladas por año). En busca de una solución a este inconveniente se han planteado diferentes técnicas para su tratamiento. Se propone una nueva utilidad; ser materia prima en un proceso de pirólisis. El objetivo de este trabajo es simular y diseñar los equipos utilizados en el desarrollo a escala prototipo de un pirolizador. El pirolizador consta de tres etapas principales: en primer lugar, un reactor, donde se produce la descomposición del plástico, materia prima, a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno, transformándola en gas. Este equipo es un cilindro giratorio de 30 L, el cual se encuentra apoyado en dos ejes que están acoplados a un motorreductor. Como segunda etapa se haya un ciclón, en el cual por efecto de fuerza centrífuga se separan las partículas del gas y finalmente un intercambiador de calor donde a distintas temperaturas se condensa, obteniéndose así, aceite de pirólisis. Se utilizaron diferentes esquemas de simulación numérica para obtener las condiciones de trabajo óptimo de los componentes y luego se realizó el diseño, dimensionamiento, simulación computacional y pruebas de flujos en los componentes; además del análisis estático y dinámico de cargas mecánicas de los equipos. Los diseños propuestos para el reactor y el ciclón demostraron ser eficientes y adecuados para el proceso. En relación al condensador, se logró una transferencia de calor eficiente. De esta forma se obtuvo un diseño de la planta de pirólisis capaz de procesar 5 kg de materia prima por batch con el objetivo de obtener un 60% de aceites pirolíticos, alrededor de 30% de compuestos carbonosos y 10% de gas de síntesis que es recirculado al quemador con el fin de aportar calor al proceso.

**Palabras clave:** Tratamiento de Residuos; Pirólisis; Simulación.



## 1. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del proceso de intensificación y tecnificación de la agricultura en los últimos 25 años, se ha producido un aumento en el uso de insumos y entre ellos los productos fitosanitarios. Se estima que alrededor de 20 millones de envases vacíos (aproximadamente 17.000 toneladas de plástico) se generan cada campaña (año). Una gran cantidad de estos envases no recibe el tratamiento apropiado, permaneciendo dispersos en el campo o vendidos ilegalmente, representando un riesgo de contaminación directa e indirecta tanto al ambiente como a la salud.

La problemática de los envases vacíos de fitosanitarios afecta a gran parte de la sociedad. Existen riesgos muy grandes asociados, principalmente, con la reutilización indebida de estos envases. Por ello, la Ley 27.279 de *Presupuestos Mínimos para la Protección Ambiental de los Envases Vacíos de Fitosanitarios*, tiene por objeto la regulación de la gestión de los envases vacíos de productos fitosanitarios generados en el territorio nacional, de modo que no implique riesgos para la salud humana o animal y el ambiente. Dicha Ley prohíbe expresamente:

- Abandono/vertido.
- Quema y/o enterramiento.
- La comercialización y/o entrega de envases vacíos a personas físicas o jurídicas por fuera del sistema de gestión.
- El uso del material recuperado para elaborar cualquier tipo de productos que, por su utilización o naturaleza, puedan implicar riesgos para la salud humana o animal, o tener efectos negativos sobre el ambiente.

Por lo tanto, los usuarios están obligados a realizar el procedimiento de reducción de residuos de los envases por medio del triple lavado o lavado a presión; proceso que compone de lavados sucesivos con agua limpia, el cual conlleva a un gran consumo de este recurso. Luego del triple lavado los envases se deben almacenar temporalmente en lugares apropiados de modo que no afecte al ambiente o la salud, y proceder a entregarlos en los Centro de Almacenamiento Transitorio (CAT) correspondientes dentro del plazo de un año de adquirido el producto. Además, se debe contemplar que el agua utilizada en el triple lavado de los envases debe ser tratada adecuadamente para eliminar o reducir los residuos de fitosanitarios que puedan estar presentes.

Como solución a dicha problemática se propone utilizar estos desechos como materia prima para el proceso de pirólisis. El cual consiste en la degradación térmica o volatilización de la materia prima en ausencia de oxígeno y aire. A través de la variación de los parámetros del proceso de pirólisis como del tipo de materia prima, la temperatura máxima, las condiciones de la atmosfera de reacción, la tasa de calentamiento y el tiempo de permanencia de los productos en el reactor,



es posible influir en la distribución y características de sus principales productos. El material sólido o carbonizado obtenido se puede utilizar como combustible en procesos industriales, en la cocción de alimentos o como materia prima para la producción de carbón activado. El gas producido se utiliza para la generación de energía mecánica y térmica o puede ser sinterizado para la producción de otros productos químicos. El producto líquido, también identificado como condensado o bioaceite, puede ser convertido en un combustible rico en hidrocarburos para su combustión en motores y en la generación de energía mecánica y térmica.

El principal objetivo de este trabajo es diseñar y verificar un prototipo de pirolizador capaz de procesar 5 kg de materia prima y convertirla en producto principal de valor como el aceite de pirólisis.

## 2. MARCO TEÓRICO

La pirólisis es una descomposición termoquímica de la biomasa en una gama de productos útiles, ya sea en ausencia total de agentes oxidantes o con un suministro limitado de ellos. Durante la pirólisis, las grandes moléculas de hidrocarburos de la materia prima se transforman en moléculas de hidrocarburos de biomasa que se descomponen en moléculas más pequeñas y más simples de gas, líquido y char. El rango de temperaturas en el que se produce la degradación de los sólidos es entre 300 y 650 °C [1].

Este proceso implica el calentamiento rápido de la materia prima en ausencia de aire u oxígeno a una temperatura máxima, conocida como temperatura de pirólisis, y mantenerla allí durante un tiempo específico para producir gases y carbón sólido.

Los parámetros que influyen en la composición y rendimiento de los productos químicos resultantes del proceso de pirólisis son:

- La *composición química* de la materia a pirolizar, tanto por la contribución de cada elemento al total, como por la estructura de la materia.
- La *temperatura*, que es una variable fundamental del proceso. Por un lado, favorece la rotura de moléculas complejas para dar lugar a otras más sencillas (craqueo térmico), lo que implica normalmente un aumento de la producción de gas frente a la disminución del rendimiento de líquidos y sólidos.
- La *humedad relativa* está indirectamente relacionada con la temperatura, puesto que el calor destinado a la evaporación del agua de la muestra provoca que la pirólisis se realice a una temperatura menor de la inicialmente considerada.
- La *velocidad* de calefacción es, junto a la temperatura, una de las variables primordiales del proceso, y marca la diferencia entre una pirólisis suave y una pirólisis flash.



- Un *tiempo de residencia* de los volátiles suficientemente alto permite que las reacciones de craqueo de los alquitranes primarios para dar lugar a gases.
- La *presión* tiene efecto tanto en el proceso de pirólisis como en la obtención de productos, se ha determinado que a presiones elevadas el rendimiento de gases no condensables incrementa, con la consecuente disminución de producto líquido.
- Otros factores importantes son el tamaño de la partícula y la cantidad (o caudal) de muestra, que influyen sobre la transmisión de calor al sólido; y el empleo de catalizadores, se puede clasificar en pirólisis catalítica o térmica, dependiendo del uso o no de catalizadores. La pirólisis catalítica, admite trabajar con rangos de temperatura más bajos, y en función de los catalizadores utilizados, es más selectivo en los productos obtenidos. Los catalizadores influyen en el mecanismo de reacción, pudiendo acelerar la descomposición en los compuestos [2, 3].

## 2.1. Tipo de pirólisis

El objetivo de la pirólisis es la optimización de los productos de alto valor de combustible de la materia prima por medios térmicos y catalíticos. Una temperatura de proceso menor que 400 °C y tiempos de residencia de incluso días favorece la producción de char (sólido residual de base carbonosa). Una alta temperatura y un elevado tiempo de residencia aumentan la producción de gas a partir de biomasa. Una temperatura moderada (~500 °C) y el tiempo de residencia corto del vapor (<2 s) son óptimos para producir líquidos.

Como se ha mencionado anteriormente, al variar el tiempo de residencia, la temperatura y la velocidad de calentamiento se obtiene un proceso pirolítico distinto que dará lugar a un producto diferente.

La pirólisis lenta y rápida se basan en la tasa de calentamiento mientras que la hidropirólisis y metano-pirólisis se basan en el ambiente o el medio en la que se lleva a cabo en las mismas. Estas últimas se utilizan principalmente para la producción de productos químicos. La pirólisis lenta y rápida se llevan a cabo generalmente en ausencia de un medio.

En la pirólisis lenta, el tiempo de residencia del vapor en la zona de pirólisis es del orden de minutos o más. Este proceso no se utiliza para la pirólisis convencional, donde la producción de líquido es el principal objetivo. La pirólisis lenta se utiliza principalmente para la producción de carbón.

En la pirólisis rápida, el tiempo de residencia del vapor es del orden de segundos o milisegundos. Este tipo de pirólisis, utilizada principalmente para la producción de bio-petróleo y gas.

En este trabajo, como el principal objetivo es la obtención de aceite pirolítico se implementa la pirólisis convencional rápida [4].

### 2.1.1 Consideraciones de diseño del pirolizador

En esta sección se analizan las consideraciones de diseño en la producción de combustible líquido. El rendimiento máximo del aceite pirolítico por la descomposición puede incrementarse hasta un 60%, si la materia prima se calienta rápidamente a una temperatura intermedia y una residencia corta, se permite que el tiempo en la zona de pirólisis reduzca las reacciones secundarias. Existe una temperatura de pirólisis óptima para obtener el máximo rendimiento de líquido. El rendimiento es más alto a 500 °C y cae bruscamente por encima y por debajo de esta temperatura. El tiempo de residencia es generalmente en el rango de 0,1 – 2,0 s. Estos valores dependen de varios factores, incluido el tipo de materia prima.

## 3. SIMULACIÓN Y DESARROLLO

La simulación se dividió en tres etapas, como primer componente se tiene el reactor el cual es un tambor giratorio, se planteó la simulación de los ejes que transmiten el giro del mismo. Como segunda etapa se encuentra el ciclón, una vez planteado el modelo a usar y las dimensiones del mismo se compara si la trayectoria que seguiría el fluido al pasar por este cumple con la generación de dos vórtices, uno exterior de entrada y otro interno de salida. Por último, se tiene el condensador, ya que su objetivo es el intercambio de temperaturas entre el fluido caliente y un cierto fluido frío para que el primero condense, se hará un análisis del perfil de temperaturas que se obtiene. En la Figura 1 se pueden apreciar los tres componentes recientemente mencionados.

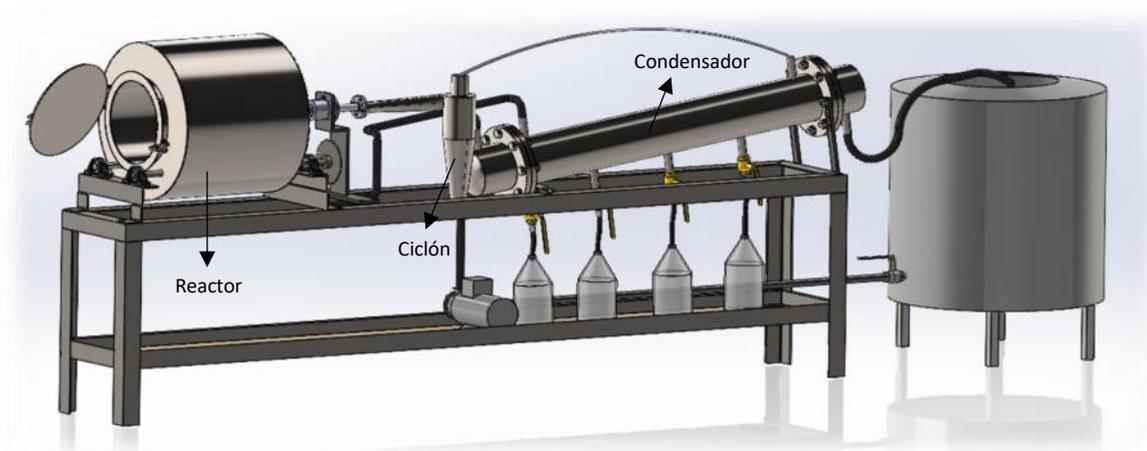


Figura 1. Ensamble completo del reactor, ciclón y condensador.

### 3.1. Reactor

Para la simulación del reactor se planteó que el mismo se apoye sobre cuatro guías, dos de las cuales están vinculadas mediante un eje y las otras dos mediante otro eje. Ambos ejes están sustentados sobre dos rodamientos. Uno de los ejes es impulsado por un engranaje el cual está acoplado a un motor eléctrico trifásico de 0,5 CV, que produce una velocidad de giro constante de 3 rpm. Mientras que el otro solo se implementa como apoyo.

Realizando las correspondientes sumatorias de fuerzas y momentos partiendo del diagrama de cuerpo libre de la Figura 2 se obtuvieron las fuerzas que ejercen sobre los rodamientos el peso propio del reactor y la carga máxima de material que se puede implementar obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla 1 [5].

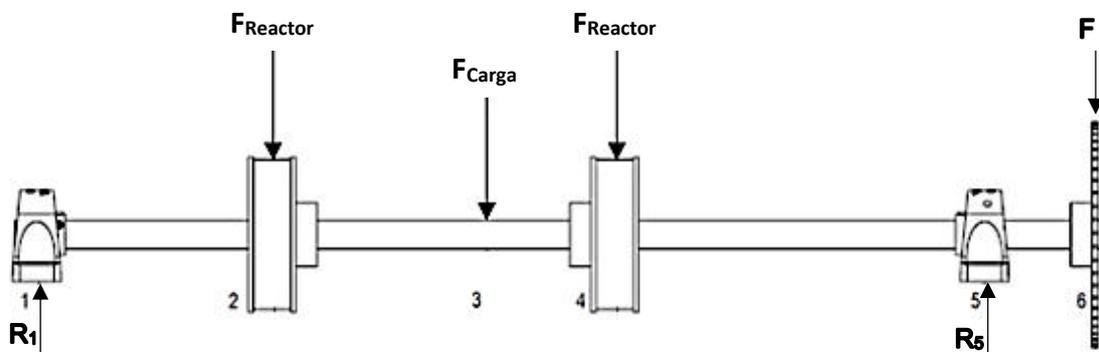


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que intervienen en el eje.

Tabla 1. Valores de las fuerzas en el eje

Fuerza	Valor [kg]
F	1530
$F_{Reactor}$	4,5
$F_{Carga}$	2,5
$R_1$	-8,9
$R_5$	577,2

El signo negativo de la reacción  $R_1$  significa que el sentido de la reacción es al revés de cómo se la planteó.

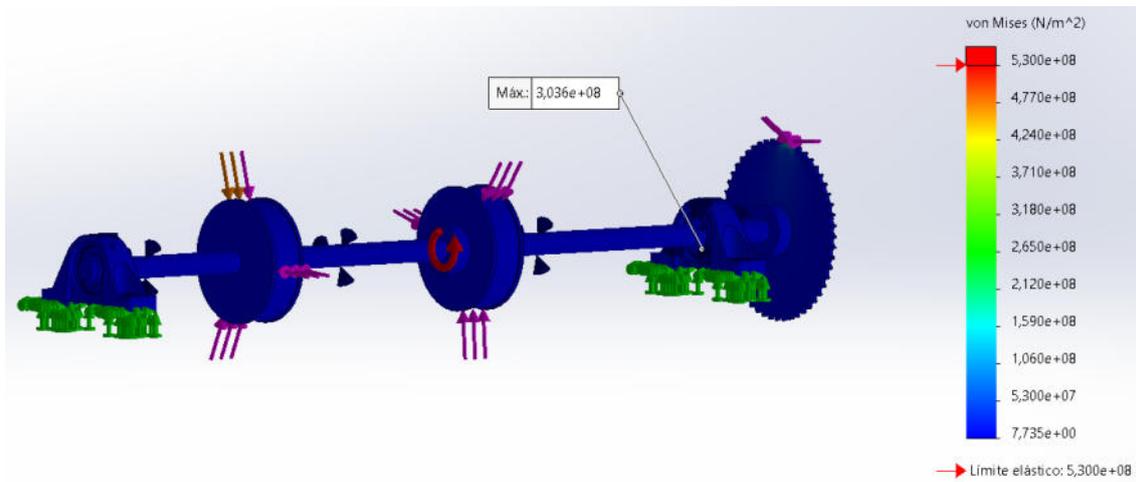


Figura 3. Perfil de tensiones por Von Mises.

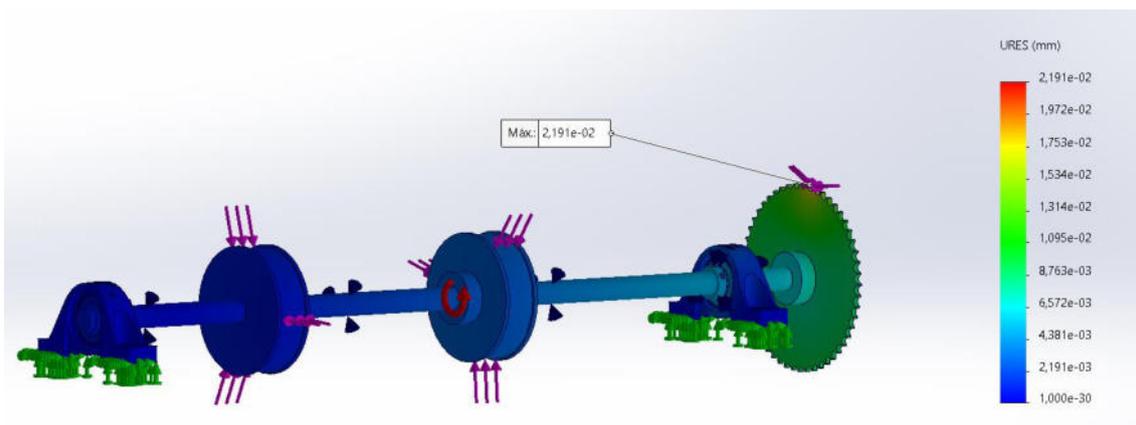


Figura 4. Perfil de desplazamiento.

Se puede observar en la Figura 3 que el valor máximo de tensión corresponde a un punto dentro del segundo rodamiento. Este se encuentra por debajo del límite elástico que para el caso del material implementado es de  $5,3 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ .

De la Figura 4 se puede concluir que los desplazamientos más elevados se producen en el diente del engranaje donde se analiza la fuerza que se aplica de manera estática. La cual se puede dividir como una fuerza tangencial que se ejerce sobre la circunferencia primitiva del engranaje es la que produce el giro del mismo, y como una fuerza normal al diente la cual produce una fuerza uniforme de compresión sobre cualquier sección del diente.



### 3.2. Ciclón

Al salir el gas con partículas del reactor pasan por una junta rotativa y luego al ciclón, al cual ingresa en forma tangencial al mismo. La función del ciclón consiste en separar las partículas sólidas del gas, haciendo que las mismas sedimenten en un recipiente, el cual se encuentra en la parte inferior; mientras que el gas sale del ciclón por la parte superior para continuar el recorrido e ingresar al intercambiador. De ser necesario se pueden combinar varios ciclones para formar un sistema de ciclones de múltiples etapas, no es este el caso.

Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son:

- Ciclones de alta eficiencia
  - Stairmand
  - Swift
  - Echeverri
- Ciclones convencionales
  - Lapple
  - Swift
  - Peterson-Whitby
  - Echeverri
- Ciclones de alta capacidad
  - Stairmand
  - Swift

Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de 5  $\mu\text{m}$  con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de 20  $\mu\text{m}$ , aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas [6].

El diámetro del ciclón es la dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones son una proporción de esta. Se implementó un ciclón de tipo Swift de alta eficiencia.

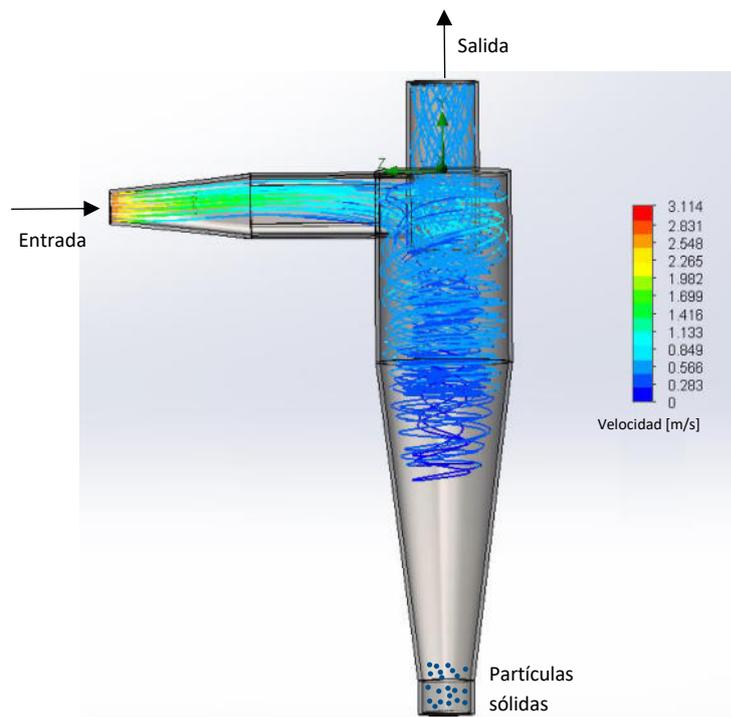


Figura 5. Trayectoria del flujo en el ciclón.

Se puede apreciar en la Figura 5 que la trayectoria del gas dentro del ciclón comprende un doble vórtice, en donde el gas se desplaza por una espiral descendente en el lado externo y ascendente en el lado interno. El gas entra en la cámara superior tangencialmente y desciende en espiral, luego asciende en un segundo espiral, con diámetro más pequeño, y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado. Por otra parte, las partículas sólidas se mueven radialmente hacia las paredes, se deslizan por las mismas, y quedan almacenadas en la parte inferior.

### 3.3. Condensador

Es un equipo que transfiere continuamente calor de un medio a otro. Hay dos tipos principales: directos e indirectos. En el caso de los primeros es donde ambos medios están en contacto directo entre sí. Se da por sentado que los medios no se mezclan. En el caso de los indirectos es donde ambos medios están separados por una pared a través de la cual se transfiere el calor. El diseño propuesto es del tipo indirecto por las características de los fluidos que circulan en su interior [7].

Se planteó un intercambiador tipo casco y tubos, también llamado de tubos y coraza, el cual tiene como ventaja generar grandes áreas de intercambio en espacios reducidos. El calor se transfiere entre el fluido que circula por el interior de la coraza en forma de gas y otro que circula por los tubos en forma de líquido. Otro parámetro a tener en cuenta es si ambos fluidos entran al equipo por el mismo extremo, fluyen en la misma dirección y salen por el otro extremo, es el caso del flujo paralelo. Lo cual termodinámicamente es una de las disposiciones más pobres, pero se



emplea cuando los materiales son muy sensibles a la temperatura ya que produce una temperatura más uniforme. Si los fluidos entran por lados opuestos y fluyen en direcciones contrarias, el flujo es en contracorriente. Esta disposición es termodinámicamente superior. Por lo cual se plantea este último tipo de flujo. Se propuso que el fluido frío sea agua y circule dentro de los tubos, mientras que el fluido caliente que circula por la coraza está compuesto por hidrocarburos de cadenas largas y cadenas cortas y aromáticos. Esta disposición se propuso de esta manera porque el objetivo del presente trabajo es que los hidrocarburos condensen a distintas temperaturas y se depositen en un recipiente conectado a la parte inferior del intercambiador (Figura 6), por lo tanto, es de mayor practicidad si este circula por la coraza.

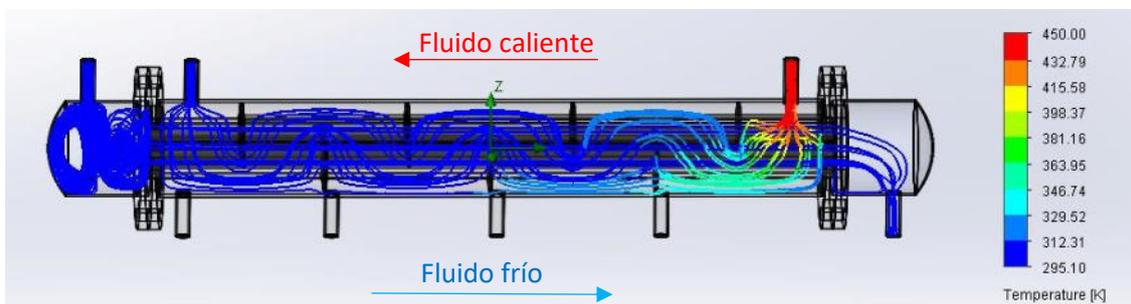


Figura 6. Perfil de temperaturas de ambos fluidos dentro del condensador.

En la Figura 6 se puede apreciar el perfil de temperaturas por las corazas y los tubos del fluido frío, en este caso es agua con un caudal de  $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , mientras que por la coraza circula el fluido caliente compuesto por hidrocarburos y aromáticos.

#### 4. CONCLUSIONES

En relación al reactor, se puede afirmar que la transmisión del mismo demuestra ser eficiente tanto en el diseño como en el material implementado. Esto se debe a que la transmisión no excede el límite de elasticidad y los desplazamientos son del orden de las centésimas de milímetros.

En cuanto al ciclón, el diseño propuesto ha comprobado ser el más adecuado con un rendimiento de 86%. Esto se logró mediante el análisis de las trayectorias de los vórtices a través de la simulación computacional de dinámica del fluido. Por lo tanto, la evidencia obtenida respalda la eficiencia y efectividad del diseño propuesto.

Por último, en relación al condensador, se ha logrado una transferencia de calor eficiente de 97% debido al modelo utilizado y a los caudales de fluidos establecidos. Esto implica que se ha conseguido una correcta regulación y control de los fluidos involucrados, lo cual contribuye a la eficiencia del sistema de condensación.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la empresa Canale S.R.L. por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] Gomez A., Klose W., Rincón S. *Pirolisis de biomasa. Cuesco de palma de aceite*. Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad de Kassel, Alemania, 2008.
- [2] Aracil Sáez, I. *Formación de contaminantes y estudio cinético en la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP)*. Universidad de Alicante, España, 2008.
- [3] Campoverde Jara X. M. *Obtención y valoración de combustible líquido por medio de pirolisis, a partir de residuos sólidos domésticos*. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador, 2016.
- [4] Basu P. *Biomass gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical Desing and Theory*. Academic Press, Massachusetts, Estados Unidos, 2010.
- [5] Faires V. M. *Diseño de Elementos de máquina*. Montaner y Simón S.A. Barcelona, España, 1999.
- [6] Bahamondes Santos J. L. *Diseño y construcción de un separador ciclónico para la industria naval*. Universidad Austral de Chile, Chile, 2008.
- [7] Kern, D. Q. *Procesos de transferencia de calor*. CECSA, México, 1965.



## ESTUDIO PARA CONTRIBUIR A REDUCIR LA CANTIDAD DE ENERGÍA CONSUMIDA EN SISTEMAS DE TRANSPORTE AUTOMOTOR

Horacio Mirassou, Gustavo Cazzola, Juan Dusau

Departamento Académico de Mecánica - UTN Facultad Regional General Pacheco  
Hipólito Yrigoyen 288, General Pacheco, Buenos Aires, Argentina  
hmirassou@docentes.frgp.utn.edu.ar, hmirassou@yahoo.com  
gcazzola@docentes.frgp.utn.edu.ar  
jdusau@docentes.frgp.utn.edu.ar

### RESUMEN

Este trabajo contiene una síntesis de conceptos y datos cuyo objetivo es contribuir a reducir la cantidad de energía consumida en sistemas de transporte automotor. Se plantean las ecuaciones que relacionan las variables que intervienen en cálculos de energía y potencia requeridas para el avance de un vehículo. Con velocidad constante en camino plano, la energía consumida depende principalmente de la resistencia por rodadura (función del peso del vehículo y del coeficiente de rodadura entre ruedas y piso) y la resistencia aerodinámica (función de la mayor área de sección transversal, del coeficiente aerodinámico  $C_D$ , de la velocidad de avance y de la densidad del aire). También se consume energía para vencer la resistencia causada por rozamientos internos del sistema de transmisión de potencia. Cuando un vehículo acelera en un camino plano, se deben vencer las inercias de la masa del vehículo y de sus componentes rotantes (ruedas, sistema de transmisión de potencia, piezas rotantes del motor). La energía requerida para eso se adiciona a la energía requerida por las resistencias por rodadura, aerodinámica, y por rozamientos internos. Con pendiente en ascenso se requiere energía adicional para vencer a la fuerza, componente del peso del vehículo, paralela al piso. De esas ecuaciones se puede deducir cuales cambios conviene realizar en los sistemas actuales para ahorrar energía. Al diseñar un vehículo, se puede reducir el consumo de energía reduciendo: su coeficiente aerodinámico  $C_D$ , la mayor área de sección transversal, su masa, las fuerzas de rozamiento internas, las inercias de sus componentes rotantes, la resistencia por rodadura. En el diseño de rutas, avenidas y calles, se puede reducir el consumo de energía reduciendo la existencia de cruces con semáforos, que obligan a los vehículos a detenerse y luego acelerar, reemplazándolos, en donde sea factible, por cruces con rotondas, puentes o túneles.

**Palabras Clave:** *eficiencia energética, transporte, desarrollo sostenible.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se expone una síntesis de conceptos y datos cuyo objetivo es contribuir a reducir la cantidad de energía consumida en sistemas de transporte automotor. En las secciones siguientes se desarrollan los temas descriptos en el Resumen. De [1] se obtuvieron datos y ecuaciones que relacionan variables que intervienen en cálculos de energía y potencia requeridas para el avance de un vehículo. De [2] se extractaron algunas figuras y datos. De [3] se obtuvieron datos para estimar el rendimiento mecánico de los sistemas de engranajes. De [4] se obtuvieron datos y ejemplos. En las publicaciones [5-9] (consultadas el 16/5/2023) se presenta información importante que contribuye con el objetivo planteado en este trabajo.

## 2. ECUACIONES BÁSICAS DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHÍCULO

En la Figura 1 se expone un esquema con las principales fuerzas que actúan sobre un vehículo (con tracción delantera) en movimiento, en un camino horizontal plano, cuando es acelerado en el sentido de avance con aceleración de módulo  $a$ , denominándose  $v$  al módulo de su velocidad,  $g$  a la aceleración de la gravedad nominal,  $P_1$  y  $P_2$  son las componentes del peso total que se descargan en los ejes delantero y trasero respectivamente,  $R_1$  y  $R_2$  son las fuerzas de reacción vertical del piso, iguales a  $P_1$  y  $P_2$  pero con sentido contrario. El módulo de la fuerza motriz  $F$  es igual al momento torsor  $M_t$  aplicado en el eje motriz, dividido por el radio bajo carga de las ruedas motrices.  $F_r$  es igual a  $F$ , y permite que el vehículo avance evitando que las ruedas motrices patinen, mientras que las dos ruedas no motrices giran en forma pasiva, arrastradas por el vehículo. Las  $F_e$  en ambos ejes siempre se oponen al movimiento y consumen energía, por eso no son deseables y deben ser minimizadas.  $F_r$  es deseable y de naturaleza diferente a las  $F_e$ .

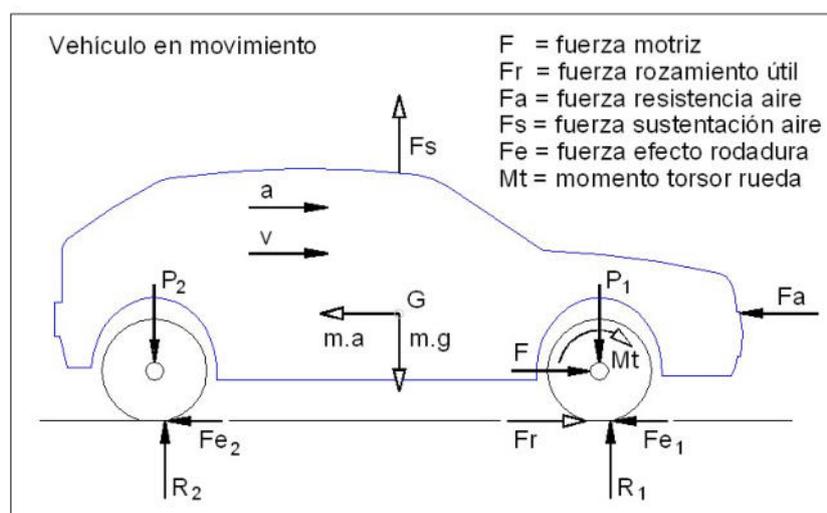


Figura 1: Fuerzas principales que actúan sobre un vehículo al desplazarse longitudinalmente.

## 2.1 Cálculos con ecuaciones según el autor Gillespie

En la Figura 2 (tomada de [1] pág. 11) se muestra un esquema de las fuerzas principales que actúan sobre un automóvil típico con tracción en las cuatro ruedas, cuando se desplaza longitudinalmente.  $F_{xf}$  y  $F_{xr}$  son las fuerzas impulsoras en los ejes delantero y trasero.

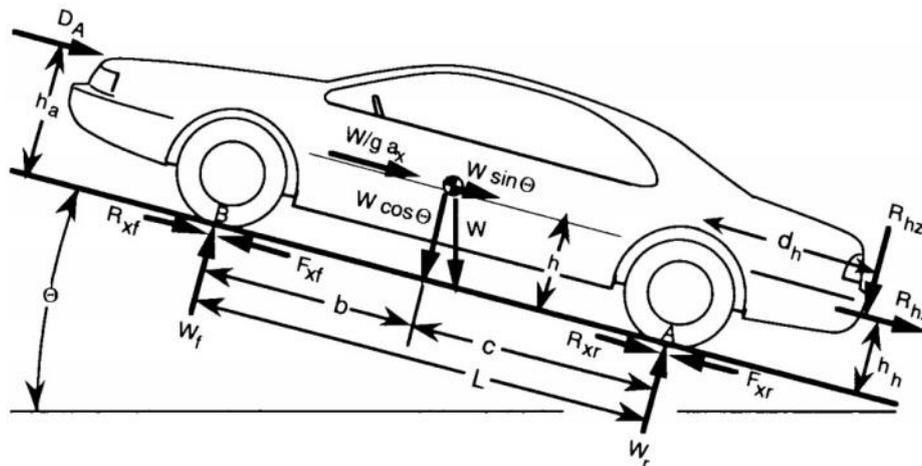


Figura 2: Fuerzas principales que actúan sobre un automóvil al desplazarse longitudinalmente

La fuerza impulsora total  $F_x$ , que actúa entre las ruedas motrices y el suelo, puede calcularse con la Ecuación (1), que es la ecuación (2-9b) de [1] pág. 26. Se utiliza la notación de [1], para facilitar la definición de las variables. El planteo original se hizo para un vehículo con motor de combustión interna, pero la Ecuación (1) es fácilmente adaptable para un vehículo eléctrico.

$$F_x = (T_e N_{tf} \eta_{tf} / r) - [(I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_d N_f^2 + I_w] a_x / r^2 \quad (1)$$

Donde:

$T_e$  = torque del motor a una frecuencia de giro dada (a partir de datos del dinamómetro)

$N_{tf}$  = relación de reducción total entre el eje de las ruedas motrices y el eje del motor

$\eta_{tf}$  = coeficiente de rendimiento total del sistema mecánico de transmisión de potencia

$r$  = radio bajo carga de una rueda motriz

$I_e$  = momento de inercia de componentes rotantes del motor respecto del eje del motor

$I_t$  = momento de inercia de la caja reductora (vista desde el lado del motor)

$I_d$  = momento de inercia del árbol de transmisión (incluyendo las uniones cardánicas)

$N_f$  = relación de reducción entre el eje de las ruedas y el árbol de transmisión (en el diferencial)

$I_w$  = momento de inercia de las 4 ruedas con sus semiejes y elementos directamente vinculados

$a_x$  = aceleración del automóvil en la dirección de avance longitudinal

La mayoría de los automóviles y camionetas tienen solamente dos ruedas motrices (delanteras o traseras), la Ecuación (1) se puede utilizar para esos casos o para vehículos con tracción en las cuatro ruedas, introduciendo los datos correspondientes.



Por otro lado se debe considerar a la Ecuación (2), que es la ecuación (2-10) de [1] pág. 26.

$$M a_x = F_x - R_x - D_A - R_{hx} - W \text{ sen } \theta \quad (2)$$

De la Ecuación (2) se deduce la Ecuación (3):

$$F_x = M a_x + R_x + D_A + R_{hx} + W \text{ sen } \theta \quad (3)$$

Donde:

$M$  = masa del automóvil (con sus ocupantes y carga si existe) en [kg]

$W$  = peso del automóvil (con sus ocupantes y carga si existe) =  $M g$

$g$  = aceleración de la gravedad convencional = 9,80665 [m/s<sup>2</sup>]

$\theta$  = ángulo de inclinación del camino, respecto a una recta horizontal

$R_{hx}$  = fuerza antagonista por acoplado remolcado (en la mayoría de los vehículos no existe  $R_{hx}$ )

$R_x$  = fuerza de resistencia por efecto de rodadura en [N]

$f_r$  = coeficiente de resistencia a la rodadura

La Ecuación (4) es la ecuación (4-12) de [1] pág.111.

$$R_x = W f_r \quad (4)$$

$D_A$  = fuerza de resistencia aerodinámica en [N]

$\rho$  = densidad del aire = 1,22 [kg/m<sup>3</sup>] a 16°C y  $p_{atm}$  (según ecuación (4-3b) de [1] pág.98)

$A$  = área de sección transversal del vehículo en [m<sup>2</sup>]

$C_D$  = coeficiente de resistencia aerodinámica (empírico en función de la forma de la carrocería)

$V$  = velocidad de desplazamiento longitudinal en [m/s]

La Ecuación (5) es la ecuación (4-2) de [1] pág.97.

$$D_A = (\rho/2) V^2 A C_D \quad (5)$$

$\rho$  varía poco en función de la temperatura y presión del ambiente. El coeficiente de resistencia a la rodadura  $f_r$  es empírico, es función de características del suelo y de la rueda (radio bajo carga, presión de inflado, clase de neumático, etc.) y de la velocidad de avance. En [1] págs. 110 a 118 se presentan datos y ecuaciones empíricas para determinar  $f_r$ . Eso corresponde a la tecnología de ruedas vehiculares vigente en la época de la redacción de [1], pero actualmente ocurrieron pocos cambios en ese tema. En futuros desarrollos de sistemas de ruedas es deseable reducir  $f_r$  tanto como sea posible, para reducir  $R_x$ , y con eso reducir  $F_x$  según la Ecuación (3), la cual permite calcular la fuerza impulsora total instantánea  $F_x$  necesaria para que el vehículo adquiera la aceleración instantánea  $a_x$  desplazándose con velocidad instantánea  $V$  en una pendiente con ángulo  $\theta$  y remolcando un acoplado que provoca la fuerza  $R_{hx}$ . En muchos casos puede ocurrir que  $\theta$ ,  $R_{hx}$  o  $a_x$  sean nulas (las tres o alguna/s de esas variables). El valor instantáneo de  $F_x$  calculado con la Ecuación (3) debe ser siempre menor o igual al valor instantáneo de  $F_x$  calculado con la Ecuación (1), que es el máximo valor que es capaz de entregar el sistema formado por el motor y la transmisión de potencia a los puntos de contacto entre las ruedas y el piso. Entonces es deseable minimizar a  $F_x$  calculada con la Ecuación (3), eso se explica a continuación.

La energía consumida cuando el vehículo se desplaza una distancia  $\Delta x$  es directamente proporcional a  $\Delta x$  y  $F_x$  calculada con la Ecuación (3). La potencia instantánea  $P$  consumida en las ruedas (en un instante) es igual al producto de  $V$  y  $F_x$  calculada con la Ecuación (3), ambas instantáneas. Un caso muy común es cuando  $\theta$ ,  $R_{hx}$  y  $a_x$  son nulas, esto es: un vehículo con desplazamiento longitudinal con velocidad  $V$  constante en un camino horizontal recto plano, la Ecuación (6) representa ese caso, se deduce de la Ecuación (3). Con las Ecuaciones (4) y (5) se calculan  $R_x$  y  $D_A$  instantáneas en función de  $V$  en [m/s] convenientemente. Un ejemplo con datos de un vehículo real se presenta en la Figura 3, tomada de [2] pág. 101, con  $V$  en [km/h].

$$F_x = R_x + D_A \quad (6)$$

$$P = F_x \cdot V = P_{R_x} + P_{D_a} = R_x \cdot V + D_A \cdot V \quad (7)$$

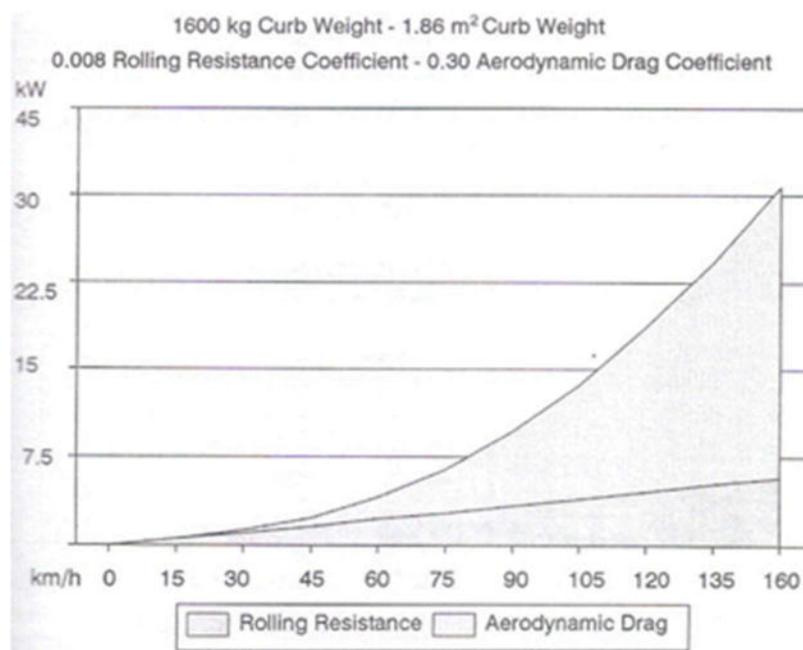


Figura 3: Potencias requeridas  $P$  [kW] en función de la velocidad de avance  $V$  [km/h]

En la Figura 3 se puede ver que  $P_{R_x}$  crece en forma aproximadamente lineal con  $V$ , pero  $P_{D_a}$  crece en proporción aproximadamente al cubo de  $V$ . Cuando  $V$  es nula también lo es  $D_A$ , en cambio  $R_x$  es siempre mayor a cero (aún con  $V$  nula), pero en la Figura 3 las potencias  $P_i$  valen cero cuando  $V$  es nula, todo eso es calculable con las Ecuaciones (4) a (7), de las cuales se deduce que es conveniente reducir el coeficiente  $f_r$  y la masa total  $M$  para reducir  $R_x$  y  $P_{R_x}$ . Luego se deduce que para reducir  $D_A$  y  $P_{D_a}$  es conveniente reducir  $A$  (área de sección transversal del vehículo) y reducir al coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_D$  todo lo que sea factible, dado que se puede ver su influencia en la Ecuación (5). Eso es conveniente sobre todo para los vehículos que se desplazan por rutas y autopistas con velocidades  $V$  mayores a 60 [km/h], como se puede observar en el ejemplo de la Figura 3.



En la Figura 4, tomada de [1] pág. 98, se muestran cuatro ejemplos de carrocerías con sus coeficientes empíricos  $C_D$ . El conocimiento actual de la aerodinámica puede permitir mejorar ese coeficiente en los vehículos que se rediseñan, o en los nuevos diseños. En décadas pasadas (siglo XX) algunos diseños priorizaban un aspecto que resultase atractivo para el comprador de esas épocas, y no era prioritario minimizar  $C_D$ , lo cual es importante para ahorrar energía.

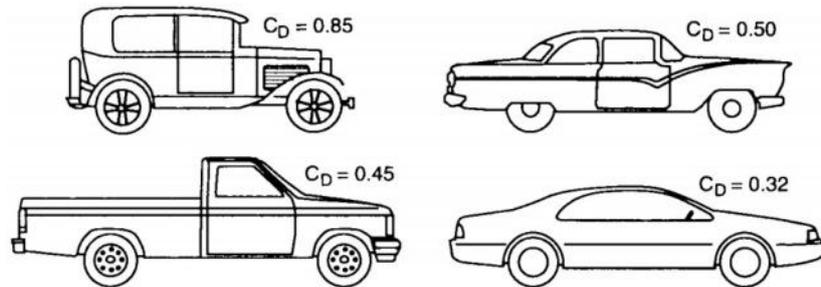


Figura 4: Coeficiente empírico de resistencia aerodinámica  $C_D$  de diferentes carrocerías

Otra situación muy común es cuando  $R_{hx}$  y  $\theta$  son nulos (camino horizontal plano) pero existe  $a_x$ , la Ecuación (8), deducida de la Ecuación (3), representa a ese caso.

$$F_x = M a_x + R_x + D_A \quad (8)$$

De las Ecuaciones (7) y (8) se deduce la Ecuación (9)

$$P = V F_x = V M a_x + V R_x + V D_A \quad (9)$$

En la Ecuación (9) se puede ver que con valores pequeños de  $V$  se puede aplicar gran parte de la potencia  $P$  disponible para lograr valores relativamente grandes de  $a_x$ , y eso puede ocurrir cuando un vehículo acelera desde el reposo hasta alcanzar su velocidad de crucero, por ejemplo, un vehículo que estuvo detenido en un semáforo y luego acelera. Luego a medida que crece  $V$ ,  $a_x$  debe reducirse, porque se alcanzó la  $P$  máxima disponible que el sistema de motor y transmisión de potencia puede entregar. También es frecuente acelerar de modo que la potencia  $P$  calculada con la Ecuación (9) sea bastante menor a la máxima potencia disponible. Pero la energía consumida depende principalmente del valor de la velocidad  $V$  máxima a la cual se llegue, cuando se acelera desde el reposo, o cuando se acelera desde cualquier velocidad inicial, la energía consumida será mayor según la diferencia de los cuadrados de las velocidades. Esto se refiere al cambio de la energía cinética del vehículo de masa total  $M$ , para simplificar el estudio se puede comenzar considerándolo un punto material, la Ecuación (10) permite calcular el gasto de energía  $\Delta E_C$  para incrementar la energía cinética al acelerar desde una velocidad  $V_1$  hasta adquirir una velocidad mayor  $V_2$ . La Ecuación (10) es clásica de la Mecánica y la Física.

$$\Delta E_C = E_{C2} - E_{C1} = (M/2) (V_2^2 - V_1^2) \quad (10)$$

En un vehículo real se debería tener en cuenta la inercia de los componentes rotantes, que en la Ecuación (1) están contemplados en el término entre corchetes que se resta al primer término.

Se consume energía para lograr las aceleraciones angulares de las ruedas, árboles, engranajes y componentes giratorios y móviles del motor. En los vehículos convencionales el efecto de esos componentes resulta equivalente a aproximadamente 5% de la masa total  $M$ . En la Ecuación (10) se puede introducir un valor de  $M$  multiplicado por 1,05. Al valor de  $\Delta E_C$  calculado con la Ecuación (10) se adiciona la energía consumida en ese tramo (con aceleración  $a_x$ ) por causa de las fuerzas de fricción  $R_x$  y  $D_A$ . El teorema de las fuerzas vivas para un punto material, expresa que el trabajo de la fuerza resultante ( $F_x$  menos  $R_x$  y  $D_A$ ) es igual al incremento de la energía cinética  $\Delta E_C$ . Cuando un vehículo convencional con motor de combustión interna frena hasta detenerse, por ejemplo en un semáforo, pierde toda su energía cinética, luego al acelerar se consume una energía  $\Delta E_C$  para volver a tener la energía cinética correspondiente a su velocidad de desplazamiento  $V$ . En muchos vehículos eléctricos con frenos regenerativos, una parte de la energía “negativa” del frenado se aprovecha para recargar las baterías.

## 2.2 Estudio para ahorrar energía en el tráfico urbano

La Figura 5, tomada de [10], muestra un ciclo de conducción urbano estandarizado UDDS de la Agencia EPA de USA, que se utiliza para estimar la autonomía homologada de un automóvil eléctrico. La definición de este ciclo posiblemente resultó de un estudio de estadísticas. Se puede ver que en la distancia recorrida de 7,45 millas (11,99 km) se consideran 18 veces en las que el vehículo se detiene totalmente y luego acelera hasta alcanzar velocidades máximas del orden de 30 mph (48 km/h = 13,4 m/s), aunque la máxima velocidad en el segundo avance es de 57 mph (92 km/h), y la velocidad media es 19,59 mph (31,53 km/h). El tiempo es 1369 s = 22 min. 49 s.

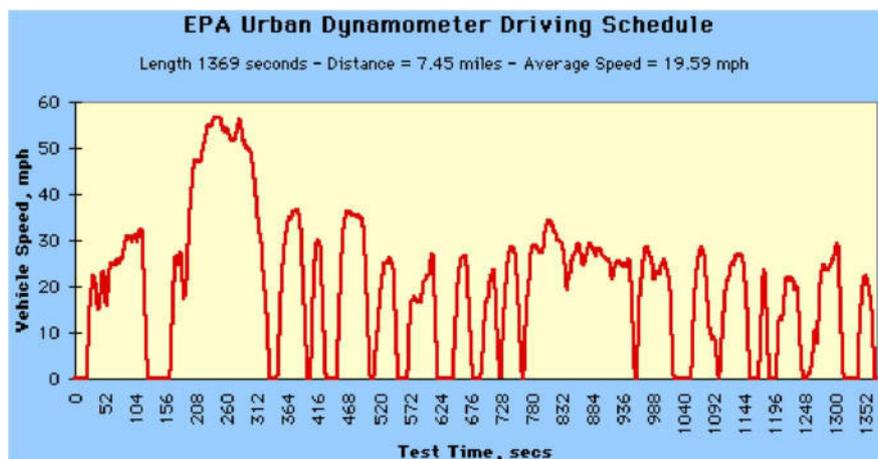


Figura 5: Ciclo de conducción urbano estandarizado UDDS de la Agencia EPA de USA

Suponiendo la velocidad máxima de 13 m/s y un vehículo mediano de masa total  $M$  de 1000 kg, utilizando la Ecuación (10) se obtiene:  $\Delta E_C = 84500 \text{ J}$ , cada vez que aceleró desde el reposo hasta alcanzar la velocidad de 13 m/s. En las 18 veces es:  $\Delta E_{CT} = 18 \times 84500 \text{ J} = 1521000 \text{ J}$   
 $\Delta E_{CT} = 1521000 \text{ [W.s]} \times 1 \text{ h} / (3600 \text{ s}) = 422,5 \text{ [W.h]} = 0,4225 \text{ [kWh]}$



A esta energía se debe sumar la consumida por causa de las fuerzas de fricción  $R_x$  y  $D_A$ .

Si ese vehículo se desplazase con velocidad constante, sin frenar, en ese recorrido de 11,99 km, se ahorraría la cantidad de energía:  $\Delta E_{CT} = 0,4225$  [kWh]

De esto se deduce que es posible ahorrar grandes cantidades de energía en el tráfico urbano, evitando los cruces con semáforos, reemplazándolos en donde sea factible por cruces con rotondas, túneles o puentes. Es sencillo realizar una comparación aproximada entre el cambio de energía cinética de un vehículo que pasa del reposo a su velocidad normal urbana, con el cambio de energía potencial que experimenta al bajar a un túnel o subir a un puente, recurriendo a las fórmulas clásicas de la Mecánica y la Física para un punto material. En la Ecuación (10) reemplazamos  $V_1$  por cero, y  $V_2$  por  $V$ , se obtiene la Ecuación (11).

$$\Delta E_C = E_{c2} - E_{c1} = (M/2) V^2 \quad (11)$$

$$\Delta E_P = M g h \quad (12)$$

La Ecuación (12) es otra clásica de la Mecánica y la Física, expresa el cambio  $\Delta E_P$  de la energía potencial de un punto material de masa  $M$  cuando se lo desplaza una distancia vertical  $h$ . Igualando  $\Delta E_C$  y  $\Delta E_P$  se obtiene la Ecuación (13), de la cual se deduce la Ecuación (14).

$$M g h = (M/2) V^2 \quad (13)$$

$$h = V^2 / (2g) \quad (14)$$

Con la Ecuación (14) se obtiene la altura  $h$  con la cual el incremento de energía potencial del punto material es igual al incremento de energía cinética cuando acelera desde el reposo hasta una velocidad  $V$ . Abajo se calculó  $h$  para 3 velocidades (90% de límites legales de  $V$ ).

$$V = 0,9 \times 40 \text{ km/h} = 36 \text{ km/h} = 10 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad h = 5,1 \text{ [m]}$$

$$V = 0,9 \times 60 \text{ km/h} = 54 \text{ km/h} = 15 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad h = 11,5 \text{ [m]}$$

$$V = 0,9 \times 90 \text{ km/h} = 81 \text{ km/h} = 22,5 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad h = 25,8 \text{ [m]}$$

Esto es: subir a esas alturas  $h$  con un vehículo o acelerarlo desde el reposo hasta alcanzar esas velocidades  $V$  en suelo plano requiere utilizar aproximadamente la misma cantidad de energía.

La hipótesis es simplificada, un cálculo más completo debe considerar las resistencias del aire y por rodadura en ambos casos: cuando acelera y cuando sube. Algunos túneles tienen una altura libre de 5,10 m, sumando a esto la altura de las vigas se puede estimar en 7 m a la altura  $h$  a introducir en la Ecuación (14) para obtener una velocidad  $V$  de 11,7 m/s = 42 km/h, si  $V$  final es mayor a ese valor el vehículo ahorrará energía circulando por ese túnel con velocidad  $V$  aproximadamente constante, en lugar de acelerar desde el reposo hasta obtener ese valor de  $V$ . Lo expresado es considerando motores de combustión interna, con vehículos eléctricos el aprovechamiento de la energía puede ser mejor. Incluso con vehículos con motores de combustión interna, según la habilidad del conductor para aprovechar la energía potencial adquirida cuando baja, y luego utilizarla cuando sube, el ahorro de energía puede ser mayor.



### 3. CARACTERÍSTICAS DE VEHÍCULOS CON MOTORES DE COMBUSTIÓN Y ELÉCTRICOS

En la Figura 6, tomada de [2] pág. 122, se muestran las pérdidas de energía por rozamientos internos, bombas y ciclo termodinámico, en un motor de ciclo Otto con encendido por chispa, en función del porcentaje de la potencia tomada en su eje de salida, con respecto a la potencia total que el motor puede entregar a un determinado régimen de frecuencia de giro. La potencia útil aprovechable se denomina en inglés Brake Horsepower, esto es, caballos de fuerza al freno, o potencia útil al freno. Los porcentajes de pérdidas de energía están tomados respecto de toda la energía que entrega el combustible quemado. La Figura 7, tomada de [11], muestra la eficiencia de un motor eléctrico vehicular expresada en porcentajes respecto de la energía eléctrica consumida, en función de la frecuencia de giro expresada en [r.p.m.], en un gráfico en el cual en el eje vertical se representa al torque en el eje de salida expresado en [Nm].

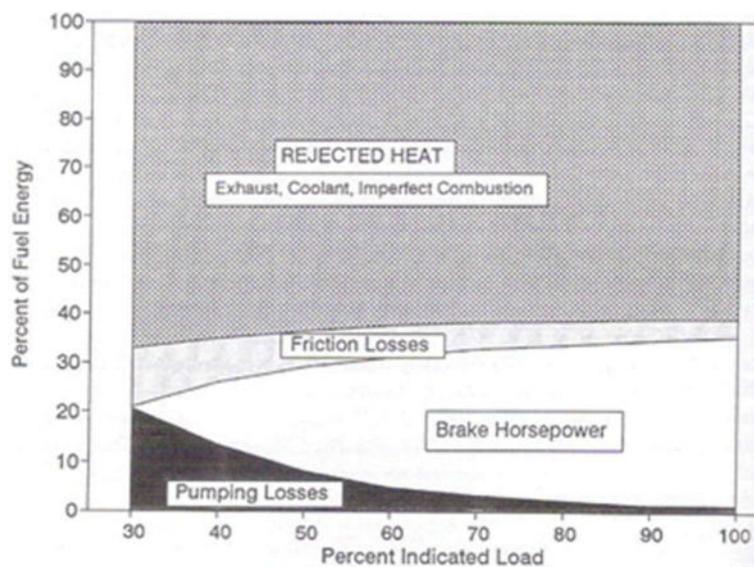


Figura 6: Pérdidas de energía en un motor de ciclo Otto

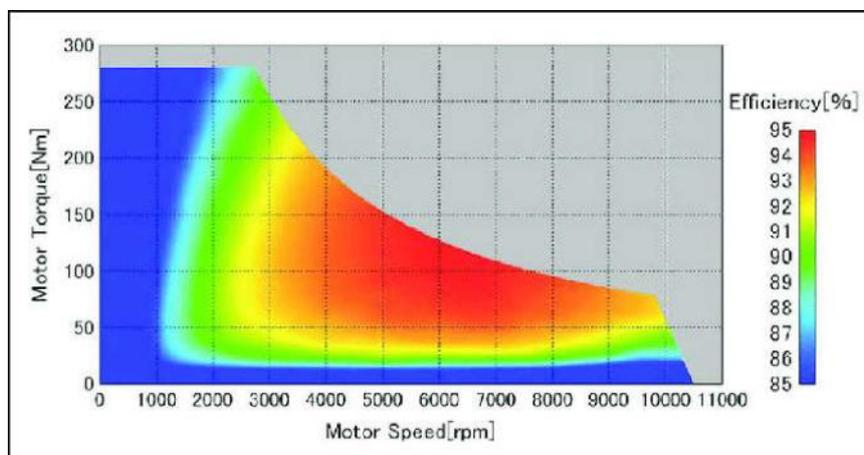


Figura 7: Eficiencia de un motor eléctrico vehicular



Entonces es evidente el mejor rendimiento de un motor eléctrico vehicular al compararlo con un motor de combustión interna de ciclo Otto. Los motores de ciclo Diésel presentan un rendimiento un poco superior a los de ciclo Otto, pero las diferencias son pequeñas.

Pero por ahora existe un problema con los vehículos eléctricos: los bajos valores de energía específica de las baterías en comparación con ese dato de los combustibles derivados del petróleo. Entonces para lograr autonomías que sean comparables a los vehículos con motores de combustión interna, los vehículos eléctricos deben incluir pesadas y voluminosas baterías, con lo cual se acrecienta la masa total  $M$  de esos vehículos, con las consecuencias no deseadas según lo expuesto en las páginas anteriores. En la Tabla 1 se comparan esos datos.

En el primer renglón se muestra la energía útil obtenible en el eje de un motor diésel, expresada en [Wh], cuando consume un  $\text{dm}^3$  de combustible (en la primera columna) y la energía útil obtenible cuando consume un kg de combustible (en la segunda columna). Estos datos son un promedio aproximadamente de valores publicados en folletos comerciales de motores diésel, en los cuales el consumo suele expresarse en gramos de combustible consumidos en una hora por cada CV de potencia útil obtenible, se realizaron los cálculos necesarios para obtener los datos en las unidades utilizadas en la Tabla 1. Lo mismo se hizo para el segundo renglón de Tabla 1, para motores de ciclo Otto. En los renglones 3 y 4 se calcularon esos valores en base a datos publicados de baterías de plomo ácido y de iones de litio. En la parte inferior de la Tabla 1 se exponen potencias útiles específicas de diferentes clases de motores, se calcularon dividiendo las potencias útiles por el volumen que ocupan esos motores, expresado en  $\text{dm}^3$ , y por su masa expresada en kg (esto es un promedio aproximado de valores publicados de esos motores). Se consideró el volumen ocupado por cada motor cuando está instalado en un vehículo. Se puede ver que los motores eléctricos vehiculares presentan buenos valores de potencia útil específica.

Tabla 1. Comparación de energía y potencia específicas

Energía útil específica de:	[Wh/ $\text{dm}^3$ ]	[Wh/kg]
Combustible gasoil en motor ciclo Diesel	3700	4350
Combustible nafta en motor ciclo Otto	2350	3450
Batería de plomo ácido (conjunto)	60	45
Batería de iones de litio (conjunto)	180 a 220	120 a 150
Potencia útil específica de:	[W/ $\text{dm}^3$ ]	[W/kg]
Motor Diesel con radiador (Scania DC 12 50 A)	260	275
Motor trifásico jaula ardilla 2975 rpm 75 kW nominal	310	118
Motor eléctrico inducción refrigerado por aire	400	150
Motor imanes permanentes refrigerado por aire	590	225
Motor imanes permanentes refrigerado por agua (10 a 200 kW)	1300 a 13000	500 a 5000



En los vehículos eléctricos actuales los motores utilizados son de corriente alterna con control de su frecuencia de giro, expresada en [r.p.m.], mediante el control de la frecuencia de la corriente, expresada en [1/s], con el sistema de control electrónico. Entre un motor eléctrico y las ruedas se utiliza una caja reductora de velocidad con engranajes, de relación de reducción fija. En cambio en los vehículos con motores de combustión interna convencionales, entre el motor y las ruedas se utiliza una caja reductora de velocidad con engranajes, de relación de reducción variable, con las denominadas marchas o cambios, que el conductor elige según la situación del vehículo, para acelerar o para frenar, o avanzar con velocidad constante. La Ecuación (1) fue planteada originalmente para esa clase de vehículos, como el mostrado en [1] pág. 24 figura 2.3. En la Ecuación (1) el término entre corchetes que se resta representa las inercias de los componentes de la transmisión de potencia, en los vehículos eléctricos en general estas inercias son menores a las de los vehículos convencionales, porque el sistema de transmisión de potencia mecánica tiende a ser más sencillo. También existen diferencias en los rendimientos mecánicos. Por ejemplo, un motor eléctrico que gira a 5000 r.p.m. se conecta al eje de las ruedas con una caja de engranajes de relación de reducción fija de 10:1, de modo que esas ruedas giran a 500 r.p.m., esta caja puede ser de dos etapas, su rendimiento mecánico puede valer 0,96, que es igual a  $0,98^2$ , considerando un rendimiento de cada etapa de 0,98 según [3] pág. 12.1.

En [1] pág. 26 se menciona a las pérdidas mecánicas y viscosas en los componentes de la línea de transmisión (caja reductora, árbol con cardanes, diferencial y ejes de ruedas). Éstas actúan para reducir el par motor en proporción al producto de las eficiencias de los componentes individuales. Las eficiencias varían ampliamente con el nivel de par en la línea de transmisión porque se producen pérdidas viscosas incluso cuando el par es cero. Como regla general, las eficiencias en la vecindad de 80% a 90% se utilizan típicamente para caracterizar la línea de transmisión de potencia de un vehículo convencional con motor de combustión interna.

Una solución interesante es la de algunos vehículos híbridos, en los que las ruedas son accionadas por el motor eléctrico, alimentado por las baterías con el sistema de control electrónico, esta parte es similar a la de los vehículos eléctricos puros. Pero para reducir el peso de las baterías, disponen de un pequeño motor de combustión interna, acoplado directamente a un generador que carga las baterías. Ese motor con una frecuencia de giro constante puede funcionar en la zona de su mejor rendimiento, eso permite lograr un consumo de combustible de aproximadamente la mitad con respecto a un vehículo convencional del mismo tamaño.

En los automóviles eléctricos puros los frenos regenerativos recargan las baterías cuando se frena, permitiendo recuperar una parte de la energía cinética que de otro modo se perdería, como ocurre actualmente en los vehículos convencionales con motores de combustión interna.

Por otro lado prosiguen las investigaciones para desarrollar nuevas clases de baterías que puedan presentar mejores valores de energía específica, como baterías de estado sólido o tecnologías de almacenamiento de energía alternativas.



#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se exponen algunos conceptos que ya son conocidos por la ciencia y la industria, se los ha organizado con el objetivo de poder contribuir al ahorro de energía en el Transporte Automotor. Las decisiones que se pueden tomar en el rediseño del sistema completo de transporte (vehículos y caminos) pueden permitir ahorrar grandes cantidades de energía. Incluso se pueden proponer muchas otras soluciones que no se incluyeron en este trabajo, por razones de la extensión del texto. Se podrán presentar en otros trabajos próximos.

Los sistemas que la sociedad actual heredó de los tomadores de decisiones de décadas pasadas tienden a derrochar grandes cantidades de energía, posiblemente en el siglo XX no era prioritario ahorrar energía y cuidar el medio ambiente, como lo es ahora con los riesgos que explica la ciencia con respecto al aumento de la temperatura promedio del planeta Tierra.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, al CIDIV y al Departamento de Ingeniería Mecánica de UTN FRGP por el apoyo brindado para realizarlo.

#### 6. REFERENCIAS

- [1] Gillespie T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE Inc., USA, 1992.
- [2] Riley R.Q. *Alternative Cars in the 21<sup>st</sup> Century*. SAE Inc., USA, 1994.
- [3] Townsend D.P. *Dudley's Gear Handbook, Second Edition*. McGraw Hill, USA, 1992.
- [4] Cascajosa M. *Ingeniería de vehículos, Sistemas y cálculos, Segunda edición*. Alfaomega, México, 2005.
- [5] [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/4.guia\\_gestion\\_eficiente\\_de\\_flotas\\_2019.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/4.guia_gestion_eficiente_de_flotas_2019.pdf)
- [6] [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36798/1/S1420695\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36798/1/S1420695_es.pdf)
- [7] [https://www.unsam.edu.ar/institutos/transporte/publicaciones/Lineamientos%20para%20EE%20en%20TAC%20\\_%20IT%20UNSAM.pdf](https://www.unsam.edu.ar/institutos/transporte/publicaciones/Lineamientos%20para%20EE%20en%20TAC%20_%20IT%20UNSAM.pdf)
- [8] <https://estrucplan.com.ar/uso-eficiente-de-la-energia-en-el-transporte-de-cargas-y-pasajeros-parte-1/>
- [9] <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/issue/view/38>
- [10] [https://www.hibridosyelectricos.com/coches/wltp-epa-diferencia-ciclos-homologacion-autonomia-coches-electricos\\_37575\\_102.html](https://www.hibridosyelectricos.com/coches/wltp-epa-diferencia-ciclos-homologacion-autonomia-coches-electricos_37575_102.html)
- [11] [https://www.researchgate.net/figure/Powertrain-efficiency-of-a-Nissan-Leaf-motor-14\\_fig5\\_346531149](https://www.researchgate.net/figure/Powertrain-efficiency-of-a-Nissan-Leaf-motor-14_fig5_346531149)



## EL RETROFIT COMO ACELERADOR DE LA TRANSICIÓN HACIA LA ELECTROMOVILIDAD

Javier L. Idzi<sup>1</sup>, Fernando Gutierrez<sup>1</sup>, Marcos E. Amado<sup>1</sup>, José Gialonardo<sup>1</sup>,

Maximiliano Ramseyer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UIDET – IAME, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería - UNLP  
Av.1 y calle 47, La Plata – Buenos Aires, Argentina – [javier.idzi@ing.unlp.edu.ar](mailto:javier.idzi@ing.unlp.edu.ar).

<sup>2</sup> Prisma Motion – Camacúá 461, Olivos - Buenos Aires, Argentina

### RESUMEN

La pregunta que nos hacemos es: ¿la transición hacia la electromovilidad es inevitable?; en ese escenario ¿cómo influyen las conversiones de vehículos con motores tradicionales en vehículos 100% eléctricos utilizando baterías de litio. Tomando en cuenta las predicciones de varios escenarios del calentamiento global; las regulaciones cada vez más estrictas en distintas ciudades del mundo respecto a emisiones de carbono, como así también el gran impulso a los vehículos eléctricos (VE) (ya no solo en países nórdicos, sino también en Europa, EEUU, China, Latinoamérica), considerando la emisiones globales por sector, poniendo su foco en el transporte y haciendo un análisis de la huella de carbono, desde la producción y la operación de vehículos para transporte, podemos decir que la transición es inevitable. Partiendo de esta premisa, haremos un análisis de los diferentes tipos de vehículos eléctricos actuales, junto con una revisión del estado de situación en nuestro país, analizando que ofrece el mercado en términos de vehículo OEM (de fabrica). Es allí donde podremos apreciar desde ese punto las bondades de las conversiones a 100% eléctrico. Describiremos qué es una conversión, cuáles son sus posibilidades, y cómo esta técnica funciona como acelerador en la transición hacia la electromovilidad, principalmente en Argentina y Latinoamérica.

**Palabras clave:** *Electromovilidad; Retrofit; Vehículos Eléctricos; Conversión de Vehículos en 100% Eléctricos; Emergencia climática.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Con la creciente preocupación por la crisis climática, la transición hacia una economía baja en carbono se ha convertido en una prioridad para muchos gobiernos, empresas y ciudadanos en todo el mundo. Una de las formas más efectivas de lograr este objetivo es mediante la adopción de vehículos eléctricos (VE) en lugar de los vehículos con motor de combustión interna (VCI). Sin embargo, esta transición presenta varios desafíos, como la infraestructura de carga, los altos costos iniciales y la vida útil de las baterías.

Es aquí donde el retrofit de vehículos existentes puede jugar un papel importante en acelerar la transición hacia la electromovilidad. El retrofit es la transformación de un vehículo de motor de combustión en uno eléctrico mediante la instalación de un sistema de propulsión eléctrico. Esto puede hacerse en vehículos de cualquier año y modelo, lo que significa que los vehículos existentes pueden convertirse en vehículos eléctricos en lugar de ser reemplazados por nuevos VE.

Además de ser una solución más sostenible que la compra de un nuevo vehículo eléctrico, el retrofit tiene otras ventajas. En primer lugar, el retrofit es una solución más económica, ya que el costo de la conversión es significativamente menor que el costo de un vehículo eléctrico nuevo. En nuestro país, es más evidente por la falta de oferta, ya no de vehículos más económicos, sino por la “no Oferta” por parte de las automotrices, a nuestro entender esto se profundizará en los próximos años, cuando estas compañías tengan que dar respuesta a los países donde más fuerte se sentirán las regulaciones y prohibiciones. Además, el retrofit puede mejorar la eficiencia y el rendimiento del vehículo, lo que resulta en un ahorro global del uso de combustibles y con una consecuente reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Otro beneficio importante del retrofit es que puede aumentar la disponibilidad de vehículos eléctricos en el mercado de usados, lo que hace que la electromovilidad sea más accesible para un público más amplio. Esto es particularmente importante en nuestro país, donde la edad media del parque automotor está por encima de los 15 años y estos no cumplen con los estándares de emisiones más recientes y cada vez más requeridos.

Sin embargo, a pesar de los beneficios del retrofit, aún existen desafíos importantes que deben superarse para que sea una opción viable a gran escala. Uno de los mayores desafíos es la falta de estándares y regulaciones para el retrofit de vehículos. Sin normas claras y consistentes, existe el riesgo de que se realicen conversiones deficientes que puedan poner en peligro la seguridad de los pasajeros y de terceros.

Por último, otro desafío importante es la falta de infraestructura de soporte, como talleres especializados y piezas de fabricación en seris, que aseguren la calidad, seguridad, trazabilidad, reposición e intercambiabilidad de piezas en las conversiones.



A pesar de las dificultades, creemos que es urgente actuar para superar los obstáculos y acelerar la transición hacia un transporte más seguro, sostenible y económico. El retrofit tiene el potencial de aportar beneficios significativos, por lo que es importante que trabajemos juntos para hacer que sea una realidad

## 2. EMERGENCIA CLIMATICA

Aunque es difícil obtener datos exactos, hoy en día ya hay cierto consenso sobre la emergencia climática observando la evolución de la temperatura media de la superficie de nuestro planeta en los últimos años y las previsiones para los próximos años. El cambio climático actual se suele cuantificar como un aumento de aproximadamente 1 grado centígrados en la temperatura media de la superficie del planeta durante el último siglo. Según el IPCC en su informe (Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.), organización no Gubernamental sobre Cambio Climático ya desde su informe de 2007, hace las predicciones que se pueden observar en la figura 1, donde el escenario para un crecimiento alto en las temperaturas sería muy grave para el planeta, con lo cual se busca que ese crecimiento se mantenga constante o bien se de un crecimiento bajo de emisiones.

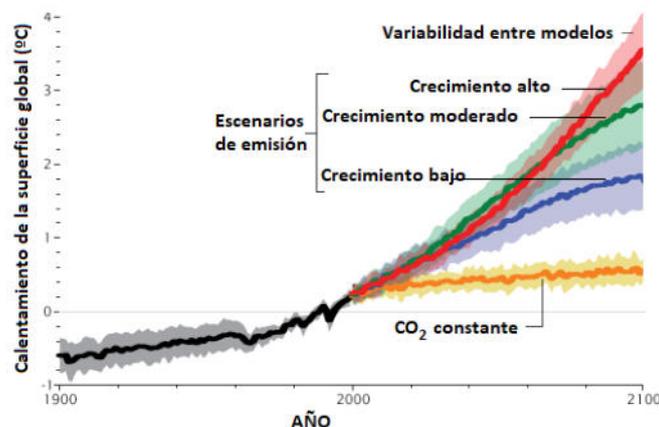


Figura 1: Previsiones de evolución de la temperatura media hasta el 2100 [1].

Por otro lado, y tomando en cuenta el impulso que se le da a la electromovilidad, ya sea a través de las regulaciones cada vez más estrictas en distintas ciudades del mundo respecto a las emisiones de carbono en diversas regiones, es evidente que la transición hacia la electromovilidad es inevitable.



Figura 2: Ejemplos del impulso a los VE en el mundo

Las regulaciones cada vez más estrictas, a nivel global, están enfocadas en reducir las emisiones de carbono y fomentar la adopción de tecnologías más limpias y sostenibles. Muchas ciudades están implementando restricciones de acceso para vehículos altamente contaminantes y estableciendo zonas de bajas emisiones, lo que impulsa a los conductores y empresas a considerar alternativas más limpias, como los vehículos eléctricos.

En los últimos 5 años, se han implementado una serie de restricciones e incentivos para impulsar la adopción de vehículos eléctricos. Estas medidas incluyen:

- Restricciones:
  - Prohibición de la venta de vehículos nuevos con motor de combustión interna en algunas ciudades.
  - Impuestos más altos a los vehículos con motor de combustión interna.
  - Restricciones de acceso a las zonas de bajas emisiones.
- Incentivos:
  - Subsidios para la compra de vehículos eléctricos.
  - Exenciones fiscales para los propietarios de vehículos eléctricos.
  - Acceso a carriles exclusivos para vehículos eléctricos.

Estas medidas han tenido un impacto positivo en la adopción de vehículos eléctricos. En la figura 3 se pueden ver las acciones más relevantes en el último periodo.

En los últimos 5 años, las ventas de vehículos eléctricos han crecido de manera constante en todo el mundo. En 2022, se vendieron más de 10 millones de vehículos eléctricos en todo el mundo, y se espera que esta cifra aumente a 20 millones en 2025.

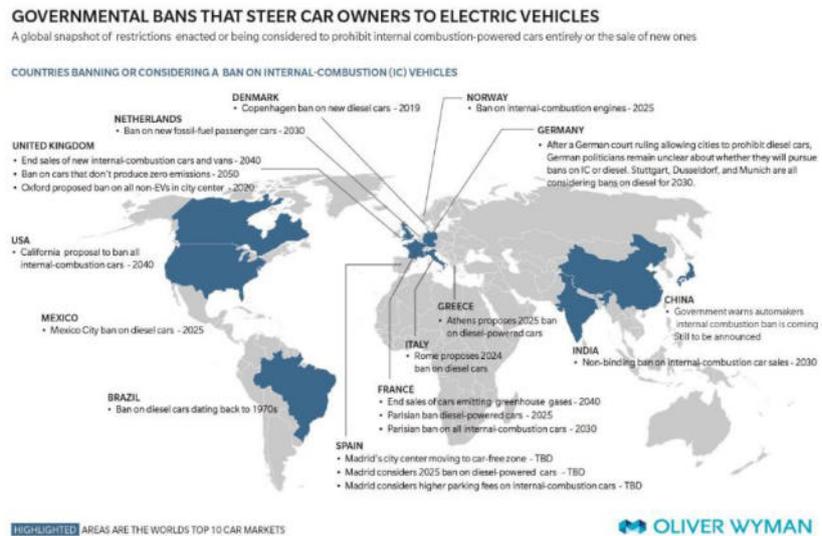


Figura 3: Ejemplos del impulso a los VE en el mundo

Hay una serie de ciudades en todo el mundo que han prohibido o están considerando prohibir la venta de vehículos nuevos con motor de combustión interna. Estas ciudades incluyen: Oslo, Noruega (2025), París, Francia (2030), Londres, Reino Unido (2030), Zúrich, Suiza (2030), Berlín, Alemania (2030), Los Ángeles, California (2035), Nueva York, Nueva York (2035), Chicago, Illinois (2040), Boston, Massachusetts (2040), Seattle, Washington (2040), Argentina (2040) en todo el país, según el último proyecto de ley ingresado en 2021 al congreso Nación.

Sin embargo, aún queda mucho por hacer para acelerar la transición hacia una movilidad más sostenible. Los gobiernos deben seguir implementando medidas para reducir el costo de los vehículos eléctricos y aumentar la disponibilidad de infraestructura de carga. También es importante convencer a los consumidores sobre los beneficios de los vehículos eléctricos y disipar los mitos que existen sobre ellos.

Con el apoyo del gobierno y la industria, los vehículos eléctricos tienen el potencial de convertirse en una parte importante de la solución al cambio climático y la contaminación.

Además, los avances en la tecnología de baterías y la disminución de los costos de producción están haciendo que los vehículos eléctricos sean cada vez más aceptados por los usuarios. Cada vez más fabricantes de automóviles están invirtiendo en el desarrollo y producción de vehículos eléctricos, lo que contribuye a una mayor disponibilidad y variedad en el mercado.

### 3. Impacto por la adopción de vehículos eléctricos.

El transporte es un importante contribuyente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En 2022, el transporte generó aproximadamente 7 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e, lo



que representa el 14% de las emisiones globales (figura 4). De estas emisiones, el 60% se atribuyeron al transporte de pasajeros y el 40% al transporte de carga. El transporte terrestre de vehículos livianos representa el 47% de las emisiones de transporte mientras que los medianos - pesados el 30%, seguido del transporte marítimo (10%), el transporte aéreo (10%) y el transporte férreo (3%) (figura 5).

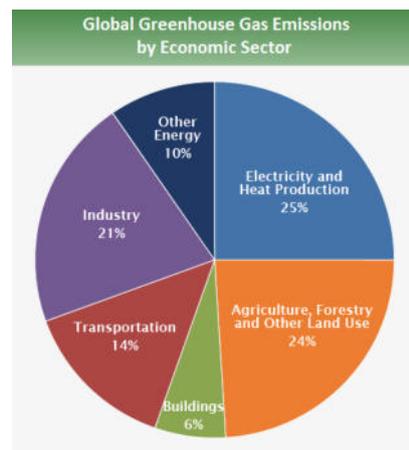


Figura 4: Emisiones globales por sector económico basada en emisiones del 2010 [2]

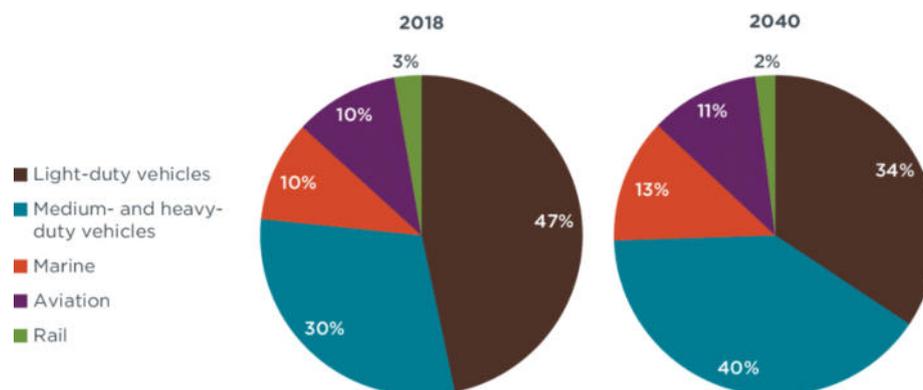


Figura 5: Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero del sector del transporte por modo y su predicción de cambio (2019) [3]

Hay diferentes opciones que pueden continuar a reducir las emisiones del transporte. Una de ellas es aumentar la eficiencia de los vehículos. Los vehículos más eficientes usan menos combustible y liberan menos gases de efecto invernadero. Otra consiste en cambiar a fuentes de energía más limpias, como la electricidad y el hidrógeno. También se puede reducir el tráfico y mejorar el diseño de las ciudades para hacer que las personas caminen, monten en bicicleta o tomen el transporte público en lugar de conducir.



Reducir las emisiones del transporte es importante para abordar el cambio climático. El transporte es un importante contribuyente a las emisiones de GEI y, por lo tanto, tiene el potencial de hacer una gran diferencia en la lucha contra el cambio climático.

Al analizar la huella de carbono de los vehículos para transporte de pasajeros, es importante considerar tanto la producción de este como la operación de ellos a lo largo de su vida útil. La producción de vehículos eléctricos puede generar más emisiones debido al consumo de energía y a los procesos industriales. Sin embargo, a medida que aumenta la demanda y se optimizan los procesos de producción, se espera una disminución en las emisiones asociadas.

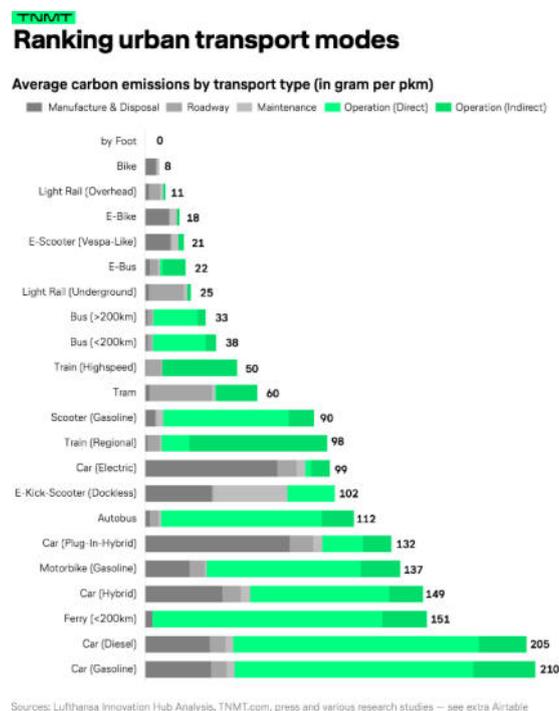


Figura 6: El impacto ambiental de los tipos de transporte actuales [4]

En cuanto a la operación de los vehículos eléctricos, su huella de carbono como se aprecia en la figura 6, es significativamente menor en comparación con los vehículos de combustión interna. A medida que se electrifica la matriz energética y se aumenta la participación de fuentes de energía renovable en la generación eléctrica, la huella de carbono de los vehículos eléctricos se reducirá aún más.

Según los autores de la figura 6, esta clasificación de emisiones de carbono por tipo de transporte no está respaldada por pruebas científicas. Los datos se basan en investigaciones de terceros con diferentes metodologías y suposiciones. Aunque han combinado los datos para una comparación directa, no es una comparación perfecta. Sin embargo, creemos que los beneficios de esta descripción general superan los inconvenientes. Esperamos que esta información



impulse debates y esfuerzos conjuntos entre los proveedores de vehículos y movilidad para reducir aún más las emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### **4. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**

En la actualidad, existen varios tipos de vehículos eléctricos (VE) disponibles en el mercado, cada uno con características y aplicaciones específicas. Estos son algunos de los tipos más comunes: Vehículos eléctricos de autonomía extendida, Vehículos eléctricos híbridos, Vehículos eléctricos híbridos enchufables, pero nosotros abordaremos solo el sistema de Vehículos eléctricos de batería (VEB), que son vehículos totalmente eléctricos que se alimentan exclusivamente de baterías recargables. No tienen motor de combustión interna y funcionan únicamente con electricidad. Los VBE ofrecen cero emisiones en su operación y su autonomía varía según el modelo y la capacidad de la batería.

En cuanto al estado de situación de los vehículos eléctricos en Argentina, es importante mencionar que el mercado aún se encuentra en etapas iniciales de desarrollo. Sin embargo, en los últimos años ha habido un creciente interés y avances en la adopción de vehículos eléctricos en el país.

En términos de vehículos OEM (de fábrica) disponibles en el mercado argentino, actualmente existen opciones limitadas, aunque la oferta está en constante crecimiento pero todavía es insuficiente y el precio de estos es demasiado alto comparado con un VCI.

El Estado Nacional, como también determinadas provincias, han implementado incentivos y medidas para fomentar la adopción de vehículos eléctricos, como exenciones fiscales y beneficios en la importación de vehículos eléctricos. También se han establecido programas de financiamiento para la instalación de infraestructura de carga en diferentes regiones del país.

Sin embargo, es importante destacar que aún existen desafíos en la adopción masiva de vehículos eléctricos en Argentina. Estos desafíos incluyen la falta de una infraestructura de carga suficiente y accesible, el costo inicial más alto en comparación con los vehículos de combustión interna y la necesidad de políticas y regulaciones más claras para impulsar el mercado de vehículos eléctricos.

#### **5. QUE ES Y QUE ALCANCE TIENE EL RETROFIT**

El Retrofit, también conocido como conversión o adaptación, se refiere a la acción de actualizar, modificar o mejorar algo existente para que cumpla con estándares más recientes o se ajuste a nuevas necesidades o tecnologías. En el contexto de la industria automotriz, el retrofit se refiere específicamente a la transformación de un vehículo de motor de combustión interna (VCI) en un vehículo eléctrico (VEB) mediante la instalación de un sistema de propulsión eléctrico.



El proceso de retrofit implica reemplazar el motor de combustión y otros componentes relacionados con el sistema de propulsión del vehículo por un sistema eléctrico que incluye baterías, motor eléctrico, controlador y otros dispositivos necesarios para la operación de un vehículo eléctrico.

El Retrofit de vehículos existentes ofrece una alternativa sostenible y rentable a la adquisición de vehículos eléctricos nuevos. En lugar de desechar un vehículo en buen estado y comprar uno nuevo, el retrofit permite aprovechar la vida útil restante del vehículo existente y convertirlo en un vehículo eléctrico, reduciendo así la cantidad de residuos generados y el impacto ambiental asociado con la producción de vehículos nuevos.

Además, el Retrofit puede ser una solución atractiva para propietarios de vehículos clásicos, vintage o de colección que desean mantener la apariencia y características de su vehículo original, pero con un sistema de propulsión más limpio y eficiente.

Si observamos la arquitectura de un vehículo producido industrialmente, por ejemplo por la empresa VW, se puede observar sus baterías incluidas en la carrocería, en la parte del piso del vehículo, un motor de inducción trifásico, un controlador por encima de él, que es el encargado de transformar la corriente continua proveniente de las baterías en corriente alterna de frecuencia variable, con el fin de controlar el requerimiento de torque del vehículo. También podemos ver otros sistemas auxiliares, como el DCDC, que se encarga de generar una tensión de 12V, para los sistemas auxiliares de vehículo, como ser las luces, la dirección, etc.

Si lo comparamos con un retrofit que realizamos en el IAME, unidad dependiente del Departamento de mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, podemos considerar una arquitectura similar a un vehículo producido industrialmente, constan de los mismos componentes que en un vehículo de producción industrial.

Es importante destacar que en el retrofit se aprovechan todos los componentes vitales del automóvil y se reemplazan aquellos asociados al motor de combustión. Por esto, el vehículo queda operando 100% eléctrico con cero emisiones y muy bajo ruido (figura 12).



Figura 12: Comparación entre un VCI y un vehículo VEB. [5]



Si analizamos el proceso de un retrofit, podemos identificar 5 aspectos en el proceso, la planificación, el desmontado, el desarrollo de componentes, el ensamble o armado, y las pruebas y verificación final.

En la planificación, hay una serie de factores a tener en cuenta para la conversión de un vehículo,

- El tipo de vehículo: Algunos vehículos son más adecuados para la conversión que otros. Los vehículos pequeños y ligeros con una buena relación peso-potencia son los mejores candidatos. Como decimos siempre, el peso es el enemigo de la autonomía, y esta la enemiga del costo.
- Que uso se pretende darle al vehículo, si va a ser de pasajeros, de carga, liviano o pesado, esto tiene que ver con la potencia, torque, especificaciones mecánicas, como eléctricas, ya que la potencia del motor tiene que poder ser abastecida por las baterías.
- La autonomía pretendida, esto tiene relación directa con la batería, la capacidad de ella, y con el costo casi excluyente de la conversión, pero es muy importante el peso que tiene ellas, y como se distribuyen en el nuevo vehículo, que por un lado pueden cambiar el desempeño del mismo, pero también aumentamos la energía necesaria para mover el sistema, y esto redundará en empobrecer el desempeño dinámica, como su eficiencia.

Una vez realizada la planificación, se procede a comenzar la conversión, el equipo mecánico verifica el estado general del vehículo, se desmontan los componentes que no se van a utilizar: motor, radiador, caño de escape, tanque de nafta, etc.

El desarrollo de los componentes y sistemas especiales para queca modelo, se necesita desarrollar una placa de acople entre el nuevo motor eléctrico y la caja de cambios, la caja de cambios es siempre recomendable mantener, ya que en general contiene 2 de los 3 anclajes de sistema motriz, y eso asegura el uso de los semiejes y la alineación de este con las ruedas y el sistema de suspensión.

Otra parte sustancial es el manguito de acople mecánico, entre la directa de la caja y el eje del motor, este dispositivo que parece ser simple tiene sus complejidades, ya que va a ser el encargado de transmitir el alto torque del motor eléctrico a la caja de cambios, nosotros luego de hacer varios modelos y pruebas, hemos decidido utilizar un manguito estría – estría, fabricado por mecanizado, en acero, con un tratamiento térmico para lograr mejores características mecánicas.

Estos son los sistemas mecánicos de más importancia, luego queda por definir, diseñar y construir los soportes del motor, y de los accesorios auxiliares, como ser la bomba de vacío, que permite que el servo freno siga funcionando sin perder eficiencia de frenado, el DCDC, como ya dijimos, permite generar la sistema de 12V necesaria para los servicios auxiliares, los soportes



del aire acondicionado, la calefacción, los sistemas electrónicos necesarios para emular los sistemas que pudieran ser necesarios para dar funcionalidad total al vehículo. Describir cada uno de los componentes sería extender mucho más el presente artículo, que solo pretende mostrar que es posible acelerar la transición hacia la electromovilidad a través del retrofit.

Pero después de todo, la batería es el componente más importante de un vehículo eléctrico. La batería es responsable de almacenar la energía que alimenta el motor eléctrico, y su rendimiento tiene un impacto significativo en la autonomía, el tiempo de carga y el costo del vehículo.

Hay varios factores que se deben considerar al diseñar una batería para un vehículo eléctrico, como la capacidad, la densidad de energía, la temperatura de funcionamiento, el costo y la seguridad. El diseño tiene fundamentalmente que ver con la capacidad de la batería, que es la cantidad de energía que puede almacenar, con la tensión nominal del sistema, la corriente de descarga máxima y nominal son aspectos fundamentales a la hora del diseño, la temperatura de funcionamiento de la batería es la temperatura a la que puede funcionar de manera segura y eficiente. El costo de la batería es un factor importante para considerar, ya que las baterías son uno de los componentes más costosos de un vehículo eléctrico. La seguridad de la batería es también un factor importante, y para ello hay que tener muy en cuenta la electrónica de control y la configuración determinada según la química que tengan las celdas utilizadas. Hoy en día somos capaces de fabricar cualquier tipo de baterías, ya sea para vehículos terrestres, náuticos, o de almacenamiento estático, para energías renovables.

## 6. CONCLUSIONES

- La transición hacia la electromovilidad es una estrategia importante para abordar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Si se implementan las políticas adecuadas y se fomenta la adopción de vehículos eléctricos, podemos avanzar hacia un futuro más sostenible y resiliente desde el punto de vista medioambiental.
- Teniendo en cuenta las regulaciones cada vez más estrictas, el impulso global a los vehículos eléctricos y la necesidad de reducir las emisiones de carbono en el sector del transporte, la transición hacia la electromovilidad es inevitable.
- Los avances tecnológicos, los incentivos gubernamentales y la conciencia creciente sobre la crisis climática están impulsando esta transición hacia vehículos más limpios y sostenibles.
- Este tipo de trabajos nos permite actualmente, ya no solo entender acabadamente el funcionamiento de los vehículos, sus diferentes configuraciones, sino también haber desarrollado electrónica de control para el vehículo, para el control de los motores y la interrelación entre los diferentes sistemas.



- Estos tópicos nos han permitido trabajar en la fabricación de diferentes baterías, lo que hoy en día nos permite realizar, a partir de celdas de litio, la fabricación de bancos para energías renovables, para almacenamiento de energía, y para todo tipo de vehículos, actualmente estamos trabajando en vehículos náuticos.
- El Retrofit, es sin duda un acelerador de las diferentes estrategias, para lograr la transición hacia la electromovilidad.

## REFERENCIAS

- [1] Climate Change 2007 - The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (ISBN 978 0521 88009-1 Hardback; 978 0521 70596-7 Paperback) Climate Change 2007.
- [2] AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, 2014.  
Autor H., Autor N. *Título del Artículo*. Nombre de la Revista, Volumen, Número, páginas, Año.
- [3] Hall, Dale & Lutsey, Nicholas. Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks. (2019)
- [4] El impacto ambiental de los tipos de transporte actuales, 2021  
<https://tnmt.com/infographics/carbonemissions-by-transport-type/>
- [5] ALR, Asociación Latinoamericana de Retrofit, discusión sobre vehículos convertidos, 2022



## EL PROYECTO CAREM, HISTORIA Y FUTURO DEL REACTOR NUCLEAR ÍNTegramENTE ARGENTINO

Oscar J. Ramírez <sup>1</sup>, Marcelo O. Fernández <sup>2</sup>, Marcelo B. Neuman <sup>2</sup> y María F. Ferreyra <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Industria – Universidad Nacional de General Sarmiento

J. Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Pcia Bs As, Argentina- oramirez@campus.ungs.edu.ar

<sup>2</sup> Instituto de Industria – Universidad Nacional de General Sarmiento

J. Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Pcia Bs As, Argentina- mfernandez@campus.ungs.edu.ar

<sup>3</sup> Instituto de Industria – Universidad Nacional de General Sarmiento

J. Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Pcia Bs As, Argentina- mneuman@campus.ungs.edu.ar

<sup>4</sup> Instituto de Industria – Universidad Nacional de General Sarmiento

J. Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Pcia Bs As, Argentina- fmferrey@campus.ungs.edu.ar

### RESUMEN

En este trabajo describimos uno de los desarrollos tecnológicos de mayor importancia realizados íntegramente en Argentina. El proyecto CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) involucra el diseño del reactor nuclear de baja potencia considerado internacionalmente como uno de los de mayor potencial de éxito comercial. Detallamos las etapas que atravesó todo el proceso de diseño hasta llegar a la realización de la central prototipo CAREM 25 y los desafíos tecnológicos que transitaron las empresas contratistas locales que se encargaron de su diseño y construcción. Por último, exponemos las expectativas comerciales que representa este proyecto en cuanto a la posibilidad de generar exportaciones de tecnología de alto valor agregado para Argentina.

**Palabras clave:** *Energía Nucleoeléctrica; Reactores Nucleares de Baja Potencia; Desarrollo Tecnológico Local.*



## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo describiremos todas las etapas del proyecto CAREM, el primer reactor nuclear modular de baja potencia realizado íntegramente en Argentina.

Detallaremos todas las instancias que atravesó el proceso de diseño, desde sus inicios conceptuales hasta la construcción del prototipo CAREM 25, haciendo hincapié en la descripción de las soluciones técnicas desarrolladas por las principales empresas argentinas involucradas en el proyecto.

Por último, exponemos las expectativas que brindará la versión comercial, con la consiguiente potencialidad de exportar dicha tecnología.

## 2. ETAPA INICIAL DEL PROYECTO CAREM

El proyecto CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) se propone desarrollar un reactor nuclear modular de baja potencia de diseño y construcción nacional de última generación.

El concepto CAREM se remonta a 1984 cuando se presenta la idea en una conferencia de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), en la ciudad de Lima en Perú sobre reactores de pequeño y mediano tamaño donde es presentada oficialmente la idea conceptual, considerada muy original. A esta presentación le siguió un largo período de investigación y desarrollo para probar diferentes tipos de innovaciones a escala de laboratorio.

En 1997 y a pedido de la CNEA, la empresa INVAP S.E. construye el reactor RA-8 con la única misión de testear el núcleo del reactor CAREM. El RA-8 se construyó en Pilcaniyeu y funcionó hasta el 2001. Ese tipo de reactores suele tener baja potencia y vida operativa breve, ya que sale de servicio una vez cumplida su función de probar la calidad de los elementos combustibles y el diseño del núcleo en un modelo físico a escala real [1].

El RA-8 era un reactor de pileta abierta y de potencia cero que generaba sólo 10 watts de potencia térmica, con un máximo de 100 W en plena operación. Con tan poco desprendimiento térmico, no necesita de un circuito complejo de refrigeración. La débil convección del agua de la pileta era suficiente para refrigerar el núcleo [2].

A partir del año 2000, el ritmo de trabajo en el proyecto disminuyó y, con la crisis del 2001, fue reducido al mínimo.

En el año 2006 se justificó ante las autoridades nacionales que el proyecto estaba en condiciones de pasar de la etapa de investigación al nivel de prototipo en escala real, lográndose que en agosto de 2006 el gobierno declare de interés nacional la construcción de un prototipo para generación nucleoelectrónica de energía mediante el Decreto PEN 1107/06 de agosto de 2006.



En noviembre de 2009 se lo vuelve a declarar de interés nacional y recién ahí se le asignan fondos para concretar el proyecto, procediendo entonces a realizarse la ingeniería de la planta que se instalaría, presentación de los papeles regulatorios y obtención de las aprobaciones de las autoridades nacionales y provinciales habilitantes para que la central pueda ser construida, de acuerdo a los estándares de seguridad entre otros requerimientos. Durante este período ocurrió el accidente de Fukushima por lo cual la autoridad regulatoria pidió se hicieran más controles lo que fue sorteado con demoras y más demostraciones para sortear esos pedidos adicionales. Cinco años después se obtuvo el permiso definitivo para iniciar la construcción del reactor.

El emplazamiento está ubicado en un predio vecino a las Centrales Nucleares de Atucha 1 y 2, donde estaba situada la antigua planta prototipo de agua pesada construida en los años 80.

### 3. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO, PROYECTO CAREM 25

Finalizado el proceso de diseño fue tomada la decisión de construir el prototipo al que se lo denominó CAREM 25 debido a que originalmente fue pensado para generar una potencia de 25 MWe, pero luego de un proceso de mejoras su potencia final se elevó a 32 MWe. El prototipo CAREM 25 fue diseñado para utilizar como combustible uranio de bajo enriquecimiento (en proporciones entre 1,8% y 3,1%), y será refrigerado y moderado con agua liviana.

El reactor CAREM presenta innovaciones tecnológicas que simplifican en gran medida su construcción, operación y mantenimiento. Por ejemplo, sus sistemas pasivos de seguridad se basan en la ley de la gravedad, y la integración del circuito primario, parte del circuito secundario y los mecanismos de control que se ubican en un solo recipiente auto presurizado. Esto elimina la necesidad de bombas y otras instalaciones externas, como así también reduce la cantidad y tamaño de las cañerías. Esta simplicidad conceptual es la base de su seguridad inherente que califica al sistema como de tercera generación plus [1].

El primer objetivo de este prototipo no es la generación tradicional de electricidad, sino el de verificar su diseño debido a que cuenta con soluciones nunca utilizadas en otros reactores hasta la actualidad. Con este fin se realizarán una serie de pruebas que alimentarán específicamente el diseño del futuro CAREM comercial [3].

La obra civil comenzó el 8 de febrero de 2014, está situada en Lima, Provincia de Buenos Aires, en un predio lindero a las Centrales Nucleares de Atucha 1 y 2, siendo el primer reactor SMR (por sus siglas en inglés, Small Modular Reactor) en estar en construcción a nivel mundial, encontrándose hacia fines del año 2022 en un 77% de avance de obra [4,5].

En el marco del proyecto CAREM 25, CNEA y el Ministerio de Planificación Federal convocaron a ADIMRA para participar en la gestión del suministro de los componentes convencionales y los servicios de montajes electromecánicos. El objetivo estratégico consistía en que las empresas



nacionales suministraran no menos del 70% de los equipos y la casi totalidad de los servicios de montajes [6].

Varias medidas favorecieron este objetivo de participación nacional en el proyecto, como la creación de la denominada “Comisión Nuclear Metalúrgica” (CNM), siendo una de sus funciones la de promover la vinculación entre la industria metalúrgica nacional representada por ADIMRA y la industria nuclear personificada en CNEA [7].

De esta manera se toma la decisión de impulsar la provisión de componentes y bienes nacionales en la construcción del CAREM, constituyéndose en un programa de Desarrollo de Proveedores nacionales de bienes con alto contenido tecnológico.

A continuación, describiremos los casos más relevantes de las empresas locales tanto mixtas como privadas en cuanto a sus aportes al proyecto CAREM 25.

### 3.1. Caso CONUAR S.A.

CONUAR S.A. creada en 1981 es una sociedad conformada entre CNEA (32,7%) y el Grupo Pérez Companc (67,3%) con el objetivo de fabricar elementos combustibles nucleares, actualmente cuenta con cuatro unidades de negocios: los Combustibles Nucleares (CONUAR – EC), las Soluciones de Manufactura y Servicios Especiales (SM&S – Fabricación de Componentes y SM&S – Montajes y Servicios Especiales), y la Fabricación de Aleaciones Especiales (FAE).

CONUAR fue la primera empresa argentina en alcanzar la certificación ASME Nuclear, este logro es fundamental ya que la actividad nuclear es la principal en base a sus clientes CNEA y NA-SA (Nucleoeléctrica Argentina S.A.).

CONUAR tiene a cargo en el proyecto CAREM 25 la fabricación de dos elementos críticos: los generadores de vapor y el liner de contención.

Uno de los ítems más complejos de fabricar de los generadores de vapor son los tubos que lo conforman. Estos tubos fueron fabricados por la división FAE de CONUAR y presentaron una enorme dificultad de fabricación no solo por su forma y extensión, tienen 33 metros de largo, sino también por el tipo de conexionado. En 6 metros van compactados los 33 metros de tubo, lo que significa conformar curvas, contra-curvas, descensos, retrocesos y avances para que puedan intercambiar calor en forma óptima y así generar vapor. El material con que se fabrican los tubos es INCONEL 690, es una aleación de Níquel que se importa con un formato de barra maciza o perforada y luego en Argentina se elabora el tubo que es un proceso más complejo y le agrega valor.

La elaboración del tubo de INCONEL 690 para el generador de vapor es dificultosa por los requerimientos que exige, primero se lo lleva a la condición de tubo básico y después se lamina, tiene varios procesos de deformación en frío hasta llevarlo a los 33 metros de largo. Cuando



llega a los 33 metros es sometido a dos tratamientos térmicos, uno habitual para esas aleaciones y otro que requiere la especificación de CNEA, que es un tratamiento térmico en alto vacío. Esto último, requiere poner el tubo en un horno de por lo menos 43 metros de largo con bombas de vacío administradas secuencialmente y por zonas, de manera que no haya un gradiente de temperatura en la extensión total del horno. Luego de este último tratamiento térmico el tubo está listo para ser conformado en frío mediante los procesos de curvado y compactado.

Este horno de tratamiento térmico de alto vacío requirió de una fuerte inversión económica por parte de CONUAR. Es el equipo más largo del mundo siendo un diseño exclusivo para este proyecto y puede tratar térmicamente tubos de hasta 37 metros de largo a temperaturas entre 500 y 850°C. Cuenta con una cámara de acero inoxidable, de 1275 mm de diámetro, rodeada por resistencias calefactoras que garantizan una distribución uniforme de la temperatura.

Los generadores de vapor en el caso del CAREM son de tamaño más pequeño y de características tecnológicas diferentes a los de las centrales clásicas. En este caso la tecnología a utilizar se adapta a la de fabricantes de mazos tubulares. Este proyecto no se llamó a licitación, pues como CNEA tiene participación accionaria en CONUAR y FAE se pudo realizar un acuerdo de contratación directa.

El diseño de los 12 generadores de vapor ubicados en el recipiente de presión es de tipo helicoidal y fue tomado de una transferencia de tecnología a través de una consultoría realizada con Rusia en la década del 90 y basada en la experiencia rusa en la fabricación de submarinos.

La primera contratación con CONUAR fue para desarrollar los métodos constructivos, luego se realizó la fabricación del preserie o sea un generador de vapor de tamaño real para comprobar que el proceso constructivo final esté verificado en cuanto a calidad y requerimientos necesarios para luego permitir fabricar los 12 generadores definitivos.

CONUAR también se está haciendo cargo de todas las etapas de fabricación del liner de contención.

El liner es básicamente la carcasa de contención del hormigón, es una pieza de acero fabricada en varios módulos y montada en etapas que garantiza la estanqueidad del recinto donde se ubica el reactor, los generadores de vapor y los principales equipos de seguridad. Actúa también como encofrado perdido para el hormigón armado. Este tipo de estructura es la primera vez que se hace en el país, el diseño lo realizó la empresa alemana Hochtief. Es un componente muy complejo porque es subterráneo y tiene varios niveles de contención, además de ser compacto. El liner debe ser una estructura que pueda deformarse y no lo haga el hormigón armado (la mayoría de los otros reactores utiliza hormigón pretensado). CONUAR para la fabricación del liner compra el acero en el exterior por la calificación y la certificación que se requiere para este reactor.



CONUAR a través de sus divisiones Combustibles Nucleares y FAE, también se encarga de la fabricación de los 61 elementos combustibles que se encuentran en el núcleo del reactor CAREM 25 que fueron diseñados por CNEA. Cada uno de estos elementos están conformados por 100 barras con pastillas de uranio de hasta un 3,1 % de enriquecimiento y otros materiales absorbentes que ayudan a controlar el proceso de fisión.

### 3.2. Caso IMPSA

IMPISA es una empresa mixta controlada por el gobierno nacional de alta tecnología, que brinda soluciones integrales para la generación de energía con recursos renovables, energía nuclear y diseño y fabricación de equipos para la industria de procesos. IMPISA es otro de los grandes proveedores del CAREM, siendo los elementos que suministra los siguientes:

- Recipiente de Presión del Reactor (RPR)
- Soporte del Reactor
- Soporte del Núcleo en el interior del recipiente de presión
- Blindaje térmico como barrera de protección adicional del recipiente de presión
- Sistema tensionador de espárragos para apertura y cierre de la tapa del reactor

En todos los componentes mencionados IMPISA realiza la ingeniería de detalle, fabricación, verificaciones estructurales, transporte y montaje. Dentro del proyecto CAREM 25, IMPISA también se encarga del montaje en obra de los generadores de vapor fabricados por CONUAR.

IMPISA debe realizar las soldaduras de los generadores a los “plenum” que es el lugar donde ingresa el condensado y sale el vapor, para ello también está acreditada por ASME para la certificación de soldaduras en campo.

Los proveedores de materias primas para la energía nuclear deben cumplir con el Programa de Certificación “ASME Nuclear Material Organization”, lo que permite asegurar una trazabilidad desde el inicio y recepción de la materia prima hasta poder garantizar su recepción final en obra. Así mismo tienen que tener la certificación nuclear exigida por ASME, son monitoreados cada tres años, debiendo cumplir además un sistema de calidad requerido por la norma ASME Nuclear Sección III.

Los procesos comerciales y contractuales, así como la logística y la gestión de materias primas como chapas, forjados y tubos constituyen procedimientos complejos ya que para la confección de las especificaciones técnicas de las materias primas no solo deben cumplir los requerimientos de ASME N sino también los requerimientos implícitos de CNEA, teniendo en cuenta que los componentes del CAREM son muy distintos a los de reactores convencionales de la industria nuclear.



El desafío tecnológico de abastecer los componentes mencionados requirió de IMPSA transitar las siguientes etapas:

- Diseño de procesos nucleares
- Diseño mecánico
- Ingeniería de fabricación
- Fabricación

En el diseño se utilizaron como herramientas simulaciones numéricas para analizar diferentes situaciones y fenómenos no habituales en un reactor convencional como:

- La existencia de gran cantidad de boquillas (153) con transitorios térmicos propios (variaciones de temperatura de fluido en un determinado lapso) y directamente insertadas en la pared del recipiente de presión del reactor.
- Un plenum formado por dos cámaras con alto gradiente térmico y con elevada presión externa como condición de diseño.
- Partes con cladding (revestimiento para asegurar resistencia a la corrosión).
- Comportamiento no lineal de la unión bridada.
- Riesgo de ratcheting (acumulación de deformación plástica incremental).

El plenum (componente no habitual en un reactor nuclear) posee dos cámaras separadas por un tabique con elevadas diferencias de temperatura y presiones, el proceso de diseño implicó cambios en la versión original de la geometría y de los materiales requeridos, con la utilización de simulaciones numéricas. IMPSA se basó en el código ASME que da lineamientos generales para el diseño de un reactor nuclear estándar, no siendo el caso del reactor CAREM, lo que implicó desafíos en la investigación y motivó sucesivos ensayos de manera de acceder a los márgenes de seguridad requeridos.

El recipiente del reactor es de acero al carbono y en determinadas zonas requiere protección a la corrosión de allí la utilización de una capa de acero inoxidable (cladding) que va soldada a la parte interna del recipiente de presión, variando su espesor según la zona. El cladding permite proteger también del denominado “stress corrosión cracking” o agrietamiento por corrosión bajo tensión.

Las uniones bridadas están sometidas a efectos no lineales y fue necesario estudiar su comportamiento con la utilización de modelos numéricos para analizar las tensiones producidas.

Un modo de falla no habitual que no se presenta en componentes tradicionales es el ratcheting, pero es de fundamental importancia en el reactor CAREM. Este modo de falla ocurre por tensiones térmicas fluctuantes no equilibradas y de magnitudes muy elevadas que provocan



deformaciones. Este modo de falla fue otro desafío para IMPSA ya que no se presentaban en instalaciones diseñadas por las áreas Hydro y Wind de la empresa.

IMPSA desarrolló variadas herramientas para el abordaje de los diferentes problemas, algunas propias y otras asociadas a herramientas de simulación por elementos finitos (FEA), para estos casos se utilizó el software ANSYS. Se siguieron estándares internacionales especialmente el código ASME que rige todo el proceso para un producto nuclear.

El conjunto de herramientas utilizadas por IMPSA se denomina ARNUC (Argentina Nuclear).

El modo de falla de fatiga es uno de los más exigentes para el diseño de un reactor nuclear, para ello la empresa desarrolló un programa que permite automatizar el procesamiento de los datos dentro de un software de elementos finitos. El programa patentado denominado "ARNUC Fatigue" permite vincular el procesamiento de datos a través de elementos finitos (ANSYS) con la interfase del usuario que enlaza al software de elementos finitos con un Código de Fatiga realizado por IMPSA. El programa permite procesar la historia de tensiones, identificar los picos y valles para realizar el algoritmo de fatiga, incorpora también una serie de parámetros que permite comunicarse con el código y analizar la fatiga multiaxial, considerando los términos del tensor de tensiones y las correcciones ambientales requeridas por la Comisión Regulatoria Nuclear de EE.UU. para aplicar al desarrollo de nuevos reactores, así como para las inspecciones a reactores en servicio. Incorpora también las correcciones por plasticidad que pide el código.

Las evaluaciones sísmicas tienen un grado de complejidad superior a las que habitualmente realiza IMPSA para sus divisiones Hydro y Wind, por esto se realiza un proceso de certificación de los reportes (memorias de cálculo) para cada una de las estructuras o componentes. El proceso comienza en IMPSA con la validación del software y con las revisiones de las memorias mediante un procedimiento documentado. Se confeccionan los reportes de diseño, se revisan según requisitos de ASME y se envían a CNEA para su aprobación. Posteriormente o simultáneamente se los envía a EE.UU. para su certificación.

### 3.3. Caso SECIN S.A.

SECIN S.A. es otra de las empresas locales relevantes proveedora del proyecto CAREM 25. La empresa SECIN en sus inicios se dedicó a fabricar equipos para la industria siderúrgica, puentes grúa, diversos tipos de equipos mecánicos e instalaciones relacionadas al área; posteriormente fue incorporando distintas áreas de trabajo en el rubro oil & gas, industria alimenticia, plantas de ácido sulfúrico, y finalmente ingresando a la industria nuclear.

El diseño y fabricación de las puertas esclusas para el reactor se adquirieron a la empresa alemana Bilfinger Noell GmbH (como referencia, esta empresa se encargó del diseño del liner



de la planta nuclear Olkiluoto 3 de Finlandia, planta de 1600 MW de potencia eléctrica). SECIN realizó, también con la ingeniería de la empresa Bilfinger Noell GMBH, la fabricación del marco de las puertas esclusas (elemento estático estructural). Esencialmente las empresas argentinas cuentan con capacidad de construir equipos estáticos y en cuanto a las calificaciones y certificaciones nucleares, que de hecho son muy costosas, jugó un papel importante la actuación de CNEA que debió realizar los controles de calidad exigiendo a las empresas proveedoras tener solo las calificaciones no nucleares industriales ASME, para así evitar que tuvieran que afrontar el costo de realizar certificaciones de grado nuclear. Este proyecto (la fabricación del marco de las puertas esclusas) se licitó y fue ganado por la empresa SECIN debido a la decisión de aplicar el “compre nacional”, aunque los alemanes habían realizado una mejor oferta y propuesto menos tiempo de construcción (se presentaron otras empresas nacionales además de SECIN).

SECIN actualmente está fabricando un puente grúa muy especial que es el que va a manejar todo el sistema de herramental que trabaja sobre el reactor (cambio de elementos combustibles y reparaciones). Este equipo está especificado según ASME NOG-1 que es la norma específica para equipos nucleares, esta es complementaria y superadora de la norma CMAA 70 que es la clásica utilizada en el diseño de puentes grúa, siendo esta la primera grúa que se fabrica en el país con dicha norma. Este proyecto cumple condiciones de seguridad muy exigentes, con redundancias en todos los sistemas que hacen que una falla sea muy improbable debido a los requerimientos de la zona en la que está trabajando que es clasificación 1 (zona radioactiva de máximo requerimiento). Actualmente se está próximo a concluir su fabricación, por otra parte, la obra civil está un poco demorada por lo que se estima que su montaje se va a realizar en el año 2023. SECIN cuenta con estampa ASME VIII div. 1, div. 2 y R, pero para la fabricación de esta grúa no necesitaron calificar con la estampa nuclear, solo cumplirla.

#### **3.4. Caso Tecna Estudios y Proyectos de Ingeniería S.A.**

Tecna Estudios y Proyectos de Ingeniería S.A. es una empresa dedicada a proyectos de ingeniería y construcciones que ha tenido su auge en los ´90. Hasta el día de hoy ha construido más de 150 plantas industriales y ha realizado más de 3.000 estudios de ingeniería.

En agosto de 2016 Tecna ganó la licitación con el formato “llave en mano” para realizar el Balance de Planta (BOP, por sus siglas en inglés) de la central CAREM 25, este contrato abarca todo el conjunto de instalaciones y equipos necesarios para la generación eléctrica de la central, incluyendo la provisión de la ingeniería, equipos, montaje, construcción y puesta en marcha de la isla convencional, los sistemas secundario y terciario, la turbina, el generador, el condensador, planta de desmineralización, la caldera, entre otros.

Tecna también es responsable de realizar la ingeniería de detalle de los sistemas encargados de la seguridad dentro del edificio del reactor.



Tecna se asoció a varios subcontratistas para la realización de las tareas asignadas en el contrato con CNEA, uno de los más importantes es la empresa alemana Siemens, que fue la encargada de suministrar la turbina para la generación eléctrica.

En el año 2019 Tecna paraliza las obras buscando una renegociación del contrato firmado en 2016, aduciendo un aumento desproporcionado de los costos a consecuencia del aumento de la cotización del dólar. Esta situación imprevista más la quiebra de Isolux Corsan, principal accionista de Tecna, provocó la rotura del contrato y la continuación de las obras a partir del año 2020 por parte de CNEA.

#### 4. EL CAREM COMERCIAL

La construcción del prototipo CAREM 25 resulta indispensable para generar la experiencia necesaria en vistas al diseño del CAREM escala comercial.

CNEA está diseñando la versión comercial en paralelo con la construcción del prototipo, con la finalidad de generar una plataforma para una central multi-reactor que permitirá alcanzar costos muy competitivos en el mercado internacional. CNEA estima que el mercado mundial de este tipo de reactores asciende a unos 400.000 millones de dólares y que Argentina podría acceder a un 15% de ese mercado, o sea 60.000 millones de dólares, esto representaría una cantidad de divisas muy importante para el país, al mismo tiempo que potenciaría enormemente la trama productiva nacional vinculada en la industria nuclear [1].

La variante comercial propuesta por CNEA plantea un diseño denominado CAREM 480, este se encuentra en una etapa de análisis con líneas conceptuales básicas. Esta versión está integrada por un total de cuatro módulos de entre 100 y 120 MWe.

La configuración del CAREM comercial presenta varios sistemas compartidos, esto permite una disminución importante de costos. El planteo de un diseño modular aporta entre otras la ventaja de poder comenzar a operar los módulos ya terminados mientras los restantes siguen en la etapa de construcción [8].

Respecto de este proceso de fabricación del prototipo y el diseño de la variante comercial Adriana Serquis, actual presidenta de CNEA, realizó las siguientes declaraciones: "Estamos en la etapa de construcción del CAREM de 32 MWe aspirando a poder mostrar todas las ventajas y posibilidades que tiene de poder construirse una central de potencia pequeña y modular, para poder satisfacer diferentes necesidades que puedan surgir tanto en la Argentina como en el exterior con la idea de poder tener un proyecto que pueda ser exportable en el futuro", "mejorar y cambiar su diseño y desarrollo, para poder entender otro tipo de situaciones que permitan brindar posibilidades desde el punto de vista tecnológico y tener un CAREM de 100 a 120 MWe, que sea un producto exportable" [9].



El desafío del desarrollo tecnológico para el diseño y fabricación de la central nuclear CAREM 25 está generando la formación y participación de equipos multidisciplinares de trabajo de las empresas involucradas para la aplicación de tecnologías de punta coordinadas por CNEA. El objetivo de las empresas comprometidas en el proyecto CAREM 25 es poder aplicar toda la investigación, desarrollo y la experiencia adquirida al futuro proyecto CAREM 480.

El desarrollo del proyecto comercial presentó demoras por la pandemia y la posterior designación de nuevas autoridades de CNEA.

Los reactores tipo CAREM brindan la posibilidad de abastecimiento eléctrico para zonas alejadas de los grandes centros urbanos y de población reducida, evitando que el transporte de energía eléctrica generada por grandes centrales para estas poblaciones encarezca el costo de la electricidad. El objetivo de usar estas centrales modulares de baja potencia es descentralizar la generación, permitiendo un diseño de redes independientes del sistema interconectado [10].

Para el CAREM se obtiene el óptimo económico para potencias mucho menores que los reactores de agua a presión tradicionales (PWR), en este caso se obtienen resultados eficientes para potencias entre 100 y 160 MW (10% de la potencia de los reactores para generación eléctrica convencionales actuales). Esta cuestión facilita la búsqueda de lugares donde instalar estos tipos de plantas de generación eléctrica facilitando el balance de red y evitando la concentración de potencias en determinadas regiones.

## 5. CONCLUSIONES

Todo el camino desarrollado en materia de energía nuclear desde la creación de CNEA, hace 72 años, permitió la consolidación de Argentina como un país relevante en el contexto mundial.

Estamos ante las puertas de la concreción de un hito sumamente importante como es la terminación del prototipo de la primera central nuclear para generación eléctrica íntegramente diseñada en Argentina. El diseño, construcción y futura puesta en funcionamiento del reactor CAREM 25 nos brindará la posibilidad de exportar en un futuro cercano esa tecnología al resto del mundo con el consecuente ingreso de divisas.

Otro factor de suma importancia es el efecto derrame provocado con las capacidades tecnológicas generadas con la construcción del CAREM 25. En este sentido, los proveedores nacionales del reactor tuvieron que resolver desafíos técnicos enormes que solo fue posible mediante actividades de investigación tecnológica e innovación productiva autónoma. Y justamente en virtud de estas actividades pueden incursionar en otros campos tecnológicos que sin la construcción del CAREM con proveedores nacionales no hubiera sido posible.

Desde los comienzos de la presentación de la idea original el desarrollo del CAREM sufrió los impactos de políticas económicas contrarias al desarrollo tecnológico nacional con sucesivos recortes presupuestarios que perjudicaron los tiempos de avance del proyecto. Es de esperar



que ante el contexto actual se sigan garantizando los presupuestos que permitan llegar a la puesta en funcionamiento del prototipo CAREM 25 y desarrollar los futuros proyectos comerciales asociados a este concepto de reactores modulares. En cuanto a capacidades tecnológicas, CNEA y las empresas proveedoras locales ya demostraron que están a la altura.

## REFERENCIAS

- [1] Ramírez O., Nicolini J., Neuman M., Fernández M., Malco J. *Panorama histórico del desarrollo de la energía nucleoelectrónica en Argentina*. Ciencia Tecnología y Política, Volumen 4, Número 7, páginas 118-127, 2021.
- [2] INVAP NUCLEAR <https://www.invap.com.ar/areas/nuclear/ra-8-de-argentina/>
- [3] Ministerio de Economía / Energía / CNEA / Reactor argentino CAREM <https://www.argentina.gob.ar/cnea/carem/el-proyecto-carem>
- [4] Agencia de noticias TSS, UNSAM, Entrevista a Sol Pedre: *El CAREM es un salto cualitativo para el sector nuclear argentino*. junio 2022 <https://www.unsam.edu.ar/tss/sol-pedre-el-carem-es-un-salto-cualitativo-para-el-sector-nuclear-argentino/>
- [5] Data Portuaria, Sección: Ambiente y Energía: *CAREM: la construcción de la "mini" central nuclear argentina supera el 75% de la obra*. Diciembre <https://dataportuaria.ar/carem-la-construccion-de-la-mini-central-nuclear-argentina-supero-el-75-de-la-obra/>
- [6] OETEC, Infraestructura para el desarrollo. Entrevista a las autoridades de ADIMRA por Ricardo De Dicco: *La importancia del Plan Nuclear para la industria metalúrgica nacional*, agosto 2014.
- [7] INAP, Cuadernos del INAP 104, por Jorge Zappino *Empresas públicas y privadas, tecnología y desarrollo: el rol del sector industrial en el complejo nuclear argentino* ISSN 2683-9644, 2022.
- [8] Delmastro, D., et al. *CAREM escala comercial*. Revista de la CNEA, Año XVII, Número 67-68, páginas 5-9, 2017.
- [9] FORBES Argentina, Entrevista a Adriana Serquis *Así es el proyecto CAREM, el reactor nuclear argentino que es uno de los tres prototipos que está en construcción en el mundo*. 14 de abril 2022. <https://www.forbesargentina.com/innovacion/asi-proyecto-carem-reactor-nuclear-argentino-uno-tres-prototipos-estan-construccion-mundo-n14836>
- [10] OETEC, Infraestructura para el desarrollo. Artículo por Cristina A. Paredes Navarro: *Primer reactor nuclear industria nacional*. septiembre 2022.



## MODELADO Y ANÁLISIS DE GENERADORES ELÉCTRICOS BASADOS EN EL APROVECHAMIENTO DE CALORES RESIDUALES CON CICLOS RANKINE ORGÁNICOS

Emmanuel Sangoi<sup>1</sup>; Jorge R. Vega<sup>1,2</sup>; Luis A. Clementi<sup>1,2</sup>; Lautaro D. Rossi<sup>1</sup>; Juan Fernandez<sup>1</sup>; Nicolás Pochettino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) – UTN Facultad Regional Santa Fe, Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina  
esangoi@frsf.utn.edu.ar; jrvega@frsf.utn.edu.ar; ldrossi@frsf.utn.edu.ar;  
jpfernan@frsf.utn.edu.ar; npochettino@frsf.utn.edu.ar

<sup>2</sup> CONICET (Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química) – Güemes 3450, Santa Fe, Argentina  
lacleменти@santafe-conicet.gov.ar

### RESUMEN

Una gran parte de la energía usada en el mundo se pierde como calor debido a la ineficiencia de los procesos de conversión entre un tipo de energía y otro. Esa energía suele caracterizarse por su baja calidad térmica, con temperaturas que en general son menores a ~230 °C. Los ciclos Rankine Orgánicos son una de las tecnologías más usadas actualmente para el aprovechamiento de estos calores. En este trabajo se describe un modelo numérico simplificado que permite simular el funcionamiento de un generador eléctrico basado en un ORC. El modelo permite considerar ciclos subcríticos y transcrito, con o sin recuperador de calor, lo cual abarca a la gran mayoría de las aplicaciones ORC en el campo de la generación distribuida. Con base en estos modelos, se desarrolla un algoritmo que permite evaluar de forma preliminar la potencialidad de distintas fuentes de calor con bajas temperaturas para producir energía eléctrica y convertirse en un potencial recurso energético distribuido de la red. El algoritmo también puede usarse para estudiar aspectos inherentes al diseño, control y optimización de un ORC en alguna aplicación específica. Con esta herramienta, se caracteriza el funcionamiento de un generador ORC subcrítico y la influencia que tienen las condiciones operativas del ciclo, el fluido de trabajo y las características de la fuente caliente.

**Palabras clave:** Ciclos Rankine Orgánicos; Calores Residuales en Industrias; Modelado; Análisis de Sensibilidad.

### 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existen varias formas de recuperar calores de baja temperatura. No obstante, para lograr potencias importantes resulta conveniente recurrir a los ciclos termodinámicos especiales, como los ciclos Rankine orgánicos (ORC – Organic Rankine Cycles). Los ORC funcionan de forma muy similar a un ciclo Rankine de vapor clásico. No obstante, el empleo de un fluido de trabajo orgánico les confiere ventajas importantes para este tipo de aplicaciones.

Las ventajas de los ORC para aprovechar calores de baja calidad son su rendimiento alto con relación a otras tecnologías, su sencillez, bajo mantenimiento y costo operativo, presentan facilidad para el control automático y poseen aplicabilidad en generación distribuida y cogeneración. El campo de aplicación de los ORC es amplio e incluye desde la generación distribuida renovable con biomasa, radiación solar, energía geotérmica y energía marina hasta la cogeneración y trigeneración en distintos sistemas industriales, comerciales e incluso



residenciales [1]–[3]. En la bibliografía se reporta el uso de ORC con fuentes de calor de distinta naturaleza y con temperaturas comprendidas generalmente entre 30 °C y 450 °C; las potencias eléctricas netas resultantes están entre unos pocos W y ~7 MW [4].

La potencia obtenida con el ORC no siempre se transforma en potencia eléctrica; en algunas aplicaciones también se emplea como potencia mecánica. En [1] se dan más detalles sobre aplicaciones en distintos aprovechamientos y el grado de madurez de cada tecnología. Una aplicación de particular interés para el sector industrial refiere a su empleo en aprovechamiento de calores residuales, es decir, calores de procesos que normalmente se liberan al medio. Las razones no solo incluyen cuestiones de eficiencia energética sino también cuestiones de impacto ambiental (reducción en la emisión de contaminantes y minimización de los diferenciales térmicos ocasionados en los ecosistemas aéreos y acuáticos circundantes). Dependiendo del caso, la potencia que puede obtenerse con estos calores residuales puede ser significativa y representa un importante nicho de investigación industrial. A modo de ejemplo, el potencial aprovechamiento de calores residuales en el sector industrial puede llegar a ser de 750 MW en EEUU, 500 MW en Alemania y de 3000 MW en toda Europa [5]. En la industria en general existen múltiples fuentes de calor residual con potencial explotable [6], pero hay determinados rubros en donde el potencial resulta mayor. Una de las industrias con mayor potencial es la industria del cemento, por ejemplo, en donde un 40 % de calor se desaprovecha liberándolo al medio ambiente [7]. Si bien los sistemas de generación basados en ORC están presentes en el mercado desde hace varias décadas, las publicaciones científicas e investigaciones sobre los mismos han tomado especial relevancia durante los últimos 13 años [8].

En este trabajo se presenta el modelo para un generador basado en un ORC. Contar con esta herramienta permite evaluar el potencial de recursos térmicos residuales para producir energía, analizar el funcionamiento del ORC en distintas condiciones operativas, realizar propuestas de diseño para alguna aplicación en particular, optimizar su desempeño, etc.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Modelo del ORC subcrítico con recuperador

En la Figura 1 se representan los componentes básicos de un ORC con etapa de recuperación y su correspondiente diagrama *Temperatura-Entropía* ( $T - s$ ). La diferencia funcional con respecto a un ciclo Rankine clásico radica solo en el fluido de trabajo empleado y en las características constructivas de sus componentes. A los fines del modelado, este esquema es válido tanto para un sistema subcrítico como para uno transcrito.

Para modelar este ciclo termodinámico se usaron ecuaciones clásicas de termodinámica. El modelo considera las siguientes hipótesis simplificativas: i) las caídas de presión y las pérdidas

de temperatura en cañerías y elementos auxiliares del ciclo son despreciables; ii) los intercambiadores de calor operan a presión constante; iii) tanto el expansor como la bomba operan adiabáticamente; iv) las variaciones en la energía potencial y cinética del fluido son despreciables en el ciclo; v) el fluido que sale del expansor está en estado de vapor. Por otro lado, el modelo requiere conocer las variables termodinámicas para distintos fluidos en los múltiples puntos del ciclo. Estas variables se calcularon mediante sus correspondientes ecuaciones de estado. Para ello, se empleó la librería Coolprop [9], que permite hallar una variable termodinámica cualquiera de un determinado fluido en función de otras dos variables conocidas.

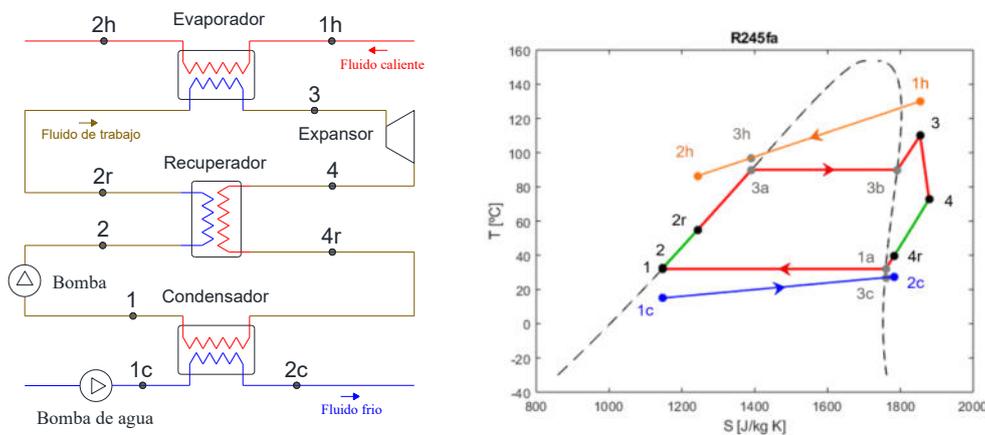


Figura 1: Arquitectura de un ORC básico con recuperador (izq.) y Diagrama  $T - s$  considerando sobrecalentamiento, fluido de trabajo R245fa y agua a  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  como fuente caliente (der.)

En consideración de la Figura 1, el balance térmico en el evaporador queda expresado con las ecuaciones (1) y (2).

$$G_r (h_{3a} - h_{2r}) = G_h (h_{3h} - h_{2h}) \eta_{E*} \quad (1)$$

$$G_r (h_3 - h_{3a}) = G_h (h_{1h} - h_{3h}) \eta_{E*} \quad (2)$$

donde  $h_i$  es la entalpía específica de los distintos puntos  $i$  marcados en la Figura 1,  $G_r$  es el flujo másico del fluido de trabajo,  $G_h$  es el flujo másico del fluido caliente y  $\eta_{E*}$  es el rendimiento térmico del evaporador. El calor extraído por el fluido de trabajo en el evaporador y el calor cedido por el mismo en el condensador se calculan con las ecuaciones (3) y (4), respectivamente.

$$QT_{in} = G_r (h_3 - h_{2r}) \quad (3)$$

$$QT_{sal} = G_r (h_{4r} - h_1) \quad (4)$$

Para calcular los estados de los puntos 2 y 4 se consideraron los rendimientos isoentrópicos de la bomba y del expansor. La entalpía para el fluido que sale de la bomba se calcula con la ecuación (5), mientras que para el fluido que sale del expansor se emplea la ecuación (6).



$$h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{iB}} + h_1 \quad (5)$$

$$h_4 = h_3 - \eta_{iT} (h_3 - h_{4s}) \quad (6)$$

donde  $h_{2s}$  y  $h_{4s}$  representan la entalpía del punto 2 y 4 para un proceso de compresión isoentrópico (con  $s_2 = s_1$  y  $s_4 = s_3$  respectivamente);  $\eta_{iB}$  y  $\eta_{iT}$  son los rendimientos isoentrópicos de la bomba y del expansor respectivamente. En caso de existir un recuperador en el ciclo, el balance térmico en dicho elemento se expresa con la ecuación (7).

$$h_{2r} - h_2 = \eta_R (h_4 - h_{4r}) \quad (7)$$

donde  $\eta_R$  es el rendimiento térmico del recuperador. Notar que si se considera  $\eta_R = 0$ , el intercambio de calor en el recuperador es nulo, lo cual es igual a considerar la ausencia del recuperador en el ciclo. La entalpía  $h_{4r}$  se calcula considerando que el vapor recalentado cede calor hasta llegar a la temperatura del punto 4r. En el recuperador, el fluido caliente se encuentra en estado de vapor recalentado, mientras que el fluido frío se encuentra en estado de líquido subenfriado. En este equipo, se asume que ninguno de los fluidos cambia de fase durante el intercambio calórico y que sus presiones se mantienen constantes. Luego, la temperatura del punto 4r se calcula con la ecuación (8).

$$T_{4r} = T_2 + \Delta T_{pR} \quad (8)$$

donde  $\Delta T_{pR}$  es la diferencia de temperatura entre los fluidos fríos y calientes a la entrada del recuperador (en el sentido del fluido de trabajo). Este parámetro posee un valor mínimo que depende de la transferencia de calor y de las características constructivas del equipo, de modo que si se considera este mínimo la transferencia de calor en el intercambiador es la máxima posible. Por otro lado, el balance térmico en el condensador está dado por las ecuaciones (9) y (10).

$$G_r (h_{1a} - h_1) \eta_{C*} = G_{C*} (h_{3c} - h_{1c}) \quad (9)$$

$$G_r (h_{4r} - h_{1a}) \eta_{C*} = G_{C*} (h_{2c} - h_{3c}) \quad (10)$$

donde  $\eta_{C*}$  es el rendimiento térmico del condensador y  $G_{C*}$  es el flujo de fluido frío (agua) requerido para extraer el calor del ciclo en el condensador. La presión de evaporación ( $p_{evap}$ ) y de condensación ( $p_{cond}$ ) en el ciclo se calculan con las ecuaciones de estado correspondiente al fluido de trabajo a la temperatura de evaporación ( $T_{evap}$ ) y de condensación ( $T_{cond}$ ).

Las variables termofísicas del fluido de trabajo en los distintos puntos del ciclo (entalpía específica, entropía específica, título de vapor, presión, temperatura, etc.) se determinaron con *Coolprop*. De igual forma, esta herramienta permitió determinar las variables correspondientes al fluido caliente en el evaporador y al fluido frío en el condensador. Luego, la potencia mecánica



neto del ciclo se determina con la ecuación (11), el rendimiento térmico del ciclo con la ecuación (12) y la relación de trabajo para el ciclo (BWR - Back Work Ratio) se calcula con la ecuación (13). La potencia eléctrica útil obtenida con el generador ORC está dada por la ecuación (14) y resulta de restar el consumo eléctrico de la bomba a la potencia producida por el generador eléctrico acoplado al expansor del ciclo.

$$W_{net} = G_r (h_3 - h_4) - G_r (h_2 - h_1) \quad (11)$$

$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_{2r})} \quad (12)$$

$$BWR = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_3 - h_4)} \quad (13)$$

$$P_e = \eta_{eG} G_r (h_3 - h_4) - \eta_{eB} G_r (h_2 - h_1) \quad (14)$$

donde  $\eta_{eG}$  y  $\eta_{eB}$  son los rendimientos del generador eléctrico acoplado al expansor y del motor eléctrico que acciona a la bomba. Dependiendo de la aplicación, el consumo de los equipos auxiliares (bombeo del fluido caliente y del fluido frío, ventiladores auxiliares, etc.) puede considerarse o no para calcular la potencia neta obtenida por el ciclo y su rendimiento. En este modelo, se considera como único consumo auxiliar a la potencia requerida para bombear agua en el condensador, pero el mismo se considera independiente de la potencia neta generada.

Si bien en el trabajo no se muestran todas las ecuaciones, el modelo resumido hasta aquí posee 36 ecuaciones y 40 variables incógnitas. Para dar consistencia al modelo, se usaron dos enfoques distintos en consideración de la diferencia de temperaturas en el *pinch point* del evaporador y del condensador ( $\Delta T_{pE^*}$  y  $\Delta T_{pC^*}$ , respectivamente). Ambas estrategias consisten en hacer manipulables a dos de las variables incógnitas y en función de ello agregar otras dos ecuaciones al modelo. Cada enfoque permite hacer evaluaciones distintas según la necesidad del estudio. En el enfoque 1, las variables  $\Delta T_{pE^*}$  y  $\Delta T_{pC^*}$  son manipulables y con un valor fijo. Luego, las variables  $G_r$  y  $G_{C^*}$  resultan variables incógnitas. Por el contrario, en el enfoque 2, las variables  $G_r$  y  $G_{C^*}$  son manipulables y las variables  $\Delta T_{pE^*}$  y  $\Delta T_{pC^*}$  son incógnitas. En líneas generales, el enfoque 1 puede usarse para hacer un prediseño del ORC, definir flujos máxicos requeridos para distintas condiciones operativas en condiciones óptimas de intercambio térmico con las fuentes caliente y fría y definir los límites del aprovechamiento. También puede usarse para modelar un ORC existente en el cual se conocen a priori los valores de  $\Delta T_{pE^*}$  y  $\Delta T_{pC^*}$  ante determinadas condiciones de trabajo. Con el enfoque 2 pueden evaluarse condiciones operativas y la sensibilidad del sistema a distintos regímenes de carga y restricciones en la capacidad volumétrica de los elementos del ciclo. Con ambos enfoques pueden plantearse restricciones operativas para las variables y optimizar el sistema utilizando diferentes funciones objetivo y métodos de optimización. En cualquiera de los casos, el modelo final del generador ORC posee

38 ecuaciones y 38 incógnitas, conformando un sistema consistente y resoluble de forma algebraica.

Los resultados del modelo se validaron comparando valores operativos de generadores ORC en funcionamiento informados en [10] con los resultados obtenidos con el modelo propuesto (configurado para condiciones operativas similares). La diferencia entre los valores reportados en las publicaciones y los obtenidos con el modelo mostrado anteriormente resultaron inferiores al 5,0 %.

## 2.2. Fluidos de trabajo empleados en ORC

Actualmente, existe una gran variedad de fluidos que pueden emplearse para aprovechar calores con diferentes temperaturas y en distintas condiciones de trabajo [7]. En la Figura 2 se comparan las curvas  $T - s$  para 13 de los fluidos de trabajo de mayor uso en ORC para aprovechamientos de baja/media temperatura. Puede verse que la mayoría de estos fluidos son termodinámicamente secos, lo cual les otorga ventajas importantes en aplicaciones ORC.

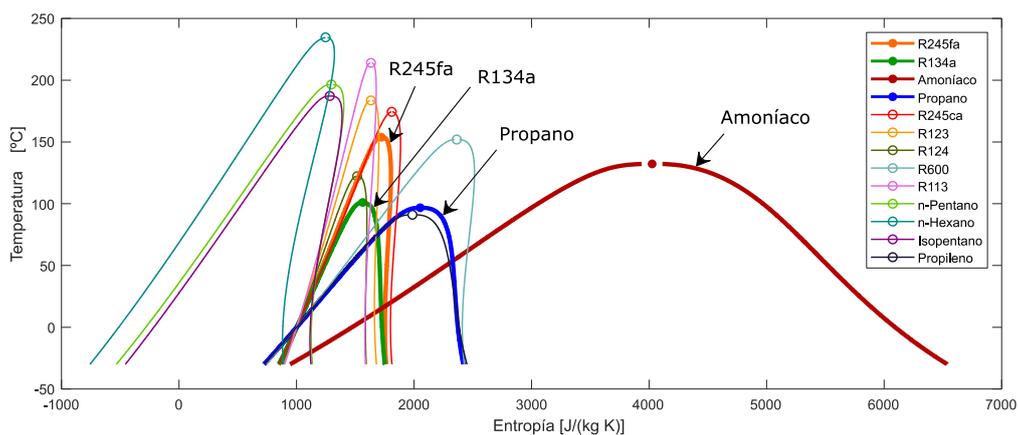


Figura 2: Diagrama  $T - s$  para los fluidos de trabajo de mayor uso en ORCs. Elaboración propia mediante librería de cálculo Coolprop.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Sensibilidad del generador ORC a las condiciones operativas

Se estudia el desempeño de un generador ORC y la producción de potencia eléctrica en función de las condiciones operativas del ciclo, del fluido de trabajo empleado y de las características de las fuentes fría y caliente. Se pretende mostrar la aplicación y potencialidad del modelo descrito y caracterizar el funcionamiento de un ORC subcrítico en su configuración básica para aprovechamientos de baja temperatura (caso genérico). Para ello, se hace un análisis de sensibilidad del generador ORC según varíe la temperatura de evaporación y el grado de



sobrecalentamiento que posea el ciclo. En todos los casos se consideran las condiciones operativas listadas a continuación (aplicación industrial tipo adaptada de [10]): i) la fuente caliente es agua proveniente de un subproceso industrial, con un caudal másico de 11 kg/s, una presión de 3,5 kg/cm<sup>2</sup> y una temperatura 130 °C; y ii) la fuente fría es agua tomada del río, impulsada por una bomba que eleva su presión a 2 kg/cm<sup>2</sup> y cuya temperatura inicial es de 10 °C en invierno o de 22 °C en verano. En consecuencia, las temperaturas de condensación consideradas para el ORC fueron de 25 °C (escenario de invierno) o de 32 °C (escenario de verano).

### 3.1.1. Variaciones en la temperatura de evaporación

La temperatura de evaporación es una de las variables más influyentes en la performance del ciclo y la elección de su valor posee mayor libertad en el diseño que la temperatura de condensación. En general, mientras mayor sea la temperatura de evaporación mejor es el desempeño del ORC. No obstante, dependiendo del fluido considerado, hay otras variables asociadas (como la presión de evaporación, por ejemplo) cuyas variaciones pueden afectar al ciclo. En este análisis se estudia la sensibilidad del ORC a la temperatura de evaporación. Los valores  $\Delta T_{pE*}$  y  $\Delta T_{pC*}$  se consideran constantes para este enfoque e iguales a su valor mínimo. Los resultados mostrados corresponden a un escenario de verano por ser éste el más desfavorable para la producción de potencia. La Figura 3 muestra la sensibilidad de las variables operativas más relevantes del ORC con distintos fluidos de trabajo según sea el valor de la temperatura de evaporación. En la Figura 4 se comparan los valores de potencia máxima obtenidos para cada fluido de trabajo y el respectivo flujo másico de refrigerante requerido para lograr tales condiciones.

Independientemente del fluido considerado, mayores temperaturas de evaporación implican mayores rendimientos térmicos en el ciclo (Figura 3 b-). No obstante, aunque el rendimiento del ciclo aumente, temperaturas de evaporación mayores que la óptima implican reducciones en la potencia entregada por el ciclo. Elevar la temperatura de evaporación eleva la presión de trabajo del fluido y, en consecuencia, aumenta el trabajo que debe realizar la bomba. Notar que la relación de trabajo del ciclo aumenta a mayores temperaturas de evaporación (Figura 3 d-). Por otro lado, al aumentar la temperatura de evaporación la temperatura de salida del fluido caliente también aumenta (considerar que  $\Delta T_{pE*}$  es constante), por lo cual el calor extraído de la fuente caliente resulta menor. Como consecuencia, se reduce el flujo másico requerido de refrigerante (Figura 3 c-) y con ello la potencia producida en el expansor. Luego, a partir de cierta temperatura de evaporación, el trabajo neto obtenido con el ciclo comienza a descender.

La reducción en el flujo másico del fluido de trabajo también implica una menor cantidad de calor cedida a la fuente fría en el condensador. En consecuencia, el flujo másico de agua requerido en este equipo se reduce (Figura 3 f-).

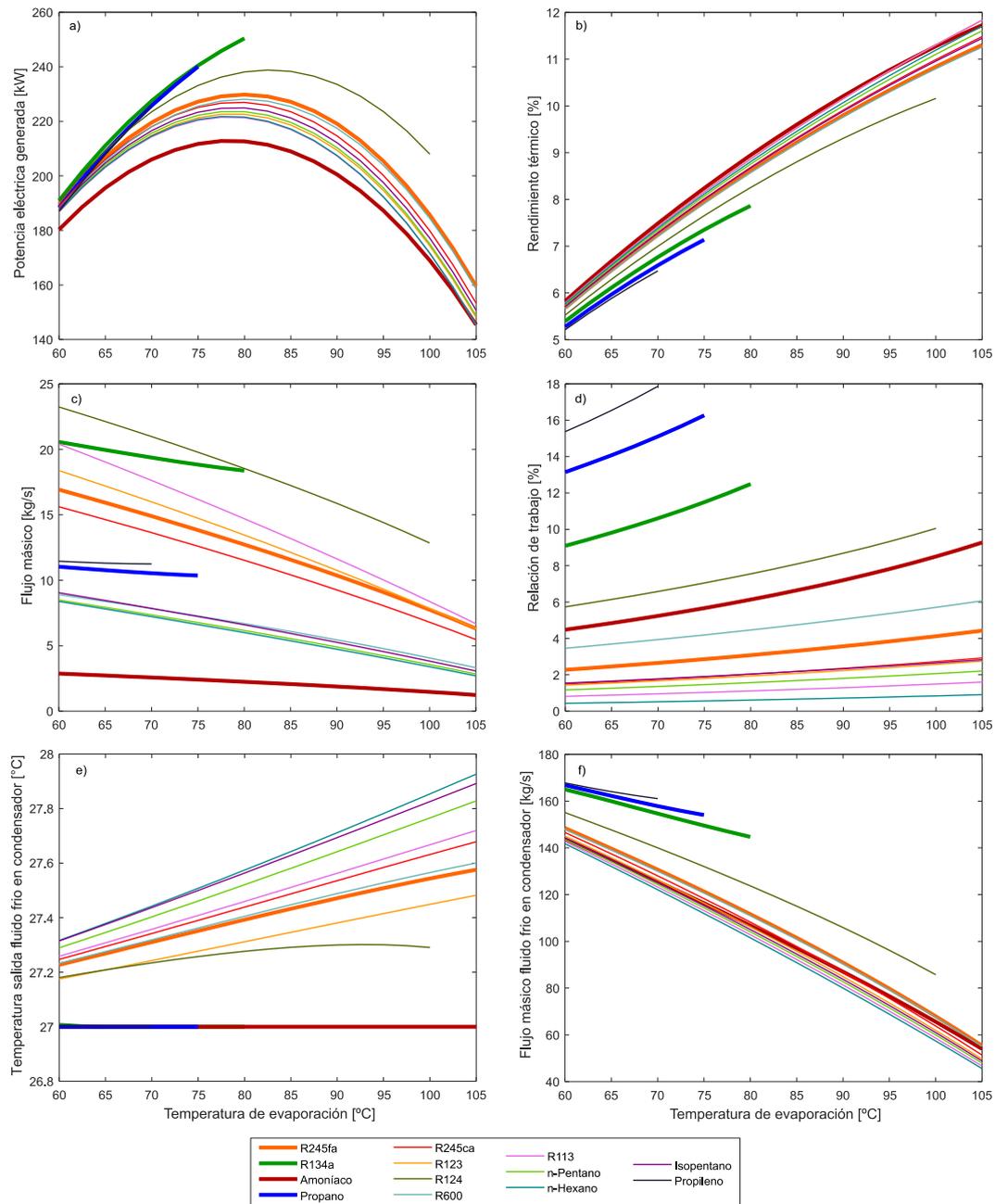


Figura 3: ORC subcrítico: sensibilidad a la temperatura de evaporación. a) Potencia eléctrica obtenida con el generador; b) rendimiento térmico del ciclo; c) flujo másico de fluido de trabajo; d) relación de trabajo; e) temperatura del agua a la salida del condensador; f) flujo másico de agua en el condensador.

Si la temperatura de evaporación aumenta, también aumenta la temperatura de entrada y de salida del vapor en el expansor. Luego, si bien el flujo másico de agua en el condensador se reduce, en la Figura 3 e- se observa que la temperatura con la que sale el agua aumenta levemente para casi todos los casos analizados (considerar que  $\Delta T_{pC^*}$  es fijo). En el caso

particular de los fluidos de trabajo húmedos (R134a, amoníaco, propano y propileno), el título del vapor a la salida del expansor es menor a 1 (considerar que el ciclo no tiene sobrecalentamiento), por lo que, independientemente del aumento en la temperatura de entrada al expansor, su temperatura de salida se mantiene constante (temperatura de condensación). En consecuencia, para estos fluidos la temperatura de salida del agua de los condensadores también resulta constante (Figura 3 e-).

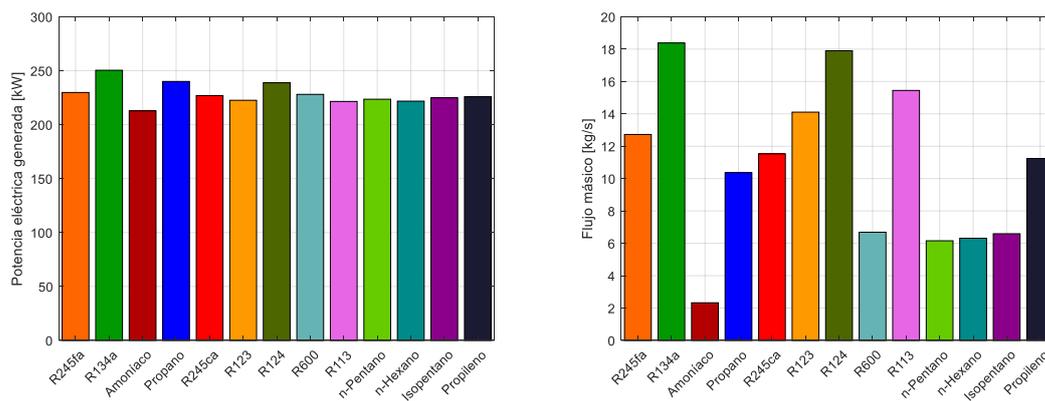


Figura 4: ORC subcrítico: Potencia máxima obtenida con cada fluido (izq.) y flujo másico requerido para cada caso (der.). Escenario de verano.

Si bien las variables operativas adoptan valores diferentes para los distintos fluidos de trabajo considerados, en líneas generales se observan tendencias similares para todos los casos. Las mayores potencias netas del ciclo se obtienen con los fluidos R134a, propano, R124 y R245fa, las cuales resultan ser de 250,4 kW, 240,0 kW, 238,8 kW y 229,8 kW respectivamente (Figura 3 a) y Figura 4). En el caso de los fluidos R134a y propano, debe destacarse que los mismos requieren de un sobrecalentamiento para evitar la formación de gotas líquidas a la salida del expansor. Comparando particularmente los fluidos R245fa y R134a (Figura 4), se observa que, si bien el fluido R134a permite obtener una mayor potencia neta del ciclo, el fluido R245fa es más ventajoso por requerir de un flujo másico sensiblemente menor. A su vez, notar que con R245fa el ciclo tiene una menor relación de trabajo (Figura 3 d-) y requiere menos flujo másico de agua en el condensador (Figura 3 f-).

### 3.1.2. Sobrecalentamiento en el evaporador

En este análisis se considera la posibilidad de sobrecalentar el fluido de trabajo antes de ingresar al expansor. Para este análisis, se consideró al flujo másico como una variable manipulable (los valores  $\Delta T_{pE^*}$  y  $\Delta T_{pC^*}$  son variables), asignándole un valor que se fijó en un 70 % del requerido a potencia máxima (Figura 4). Esto permite considerar un estado de carga intermedio en el ciclo y contar con calor excedente en la fuente caliente para analizar el impacto del

sobrecalentamiento en todos los casos. La máxima temperatura de sobrecalentamiento se limitó a 123 °C en consideración de la máxima temperatura de la fuente caliente (130 °C) y el  $\Delta T_{pE}^{\min}$  asumido en el evaporador. La temperatura de evaporación para cada fluido se fijó en aquel valor que logra la mayor potencia de salida (Figura 3 a-). El flujo másico, la temperatura de evaporación y la máxima temperatura de sobrecalentamiento posible para cada caso se muestran en la Figura 5. La Figura 6 muestra el impacto que tiene sobrecalentamiento sobre algunas variables operativas del ORC.

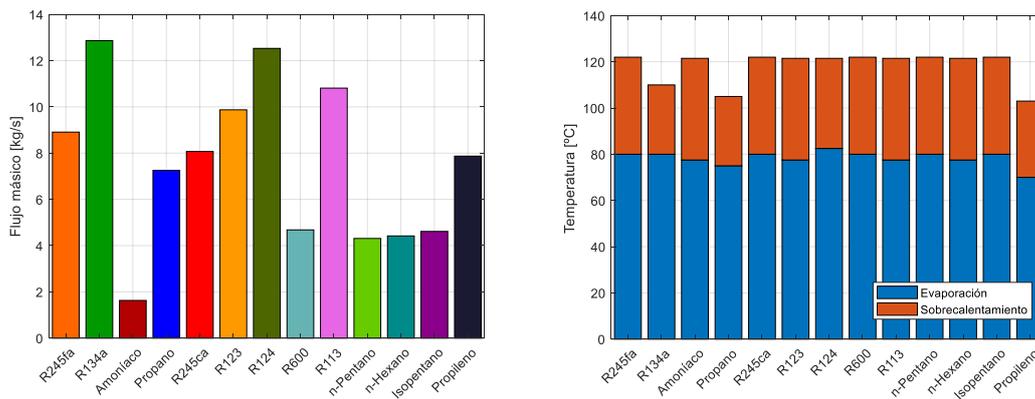


Figura 5: ORC subcrítico con sobrecalentamiento: flujo másico considerado para cada fluido (izq.) y temperatura de evaporación y sobrecalentamiento posible para cada caso (der). Escenario de verano.

Para un flujo másico constante, el sobrecalentamiento hace que la energía absorbida de la fuente caliente por cada unidad de masa del refrigerante sea mayor. En consecuencia, el calor aprovechado de la fuente caliente resulta también mayor (Figura 6 a-) y con ello la temperatura de salida del fluido caliente desciende (Figura 6 b-). Al aumentar la temperatura del vapor entrante en el expansor, el salto entálpico en este equipo también aumenta y con ello la potencia entregada. Como el trabajo de la bomba se mantiene constante ( $p_{cond}$  y  $p_{evap}$  no varían), el trabajo neto del ciclo aumenta. Luego, en términos de producción de potencia eléctrica, el sobrecalentamiento resulta beneficioso para todos los fluidos considerados (Figura 6 c-).

El sobrecalentamiento implica un costo adicional en equipamiento, por lo que su conveniencia es influenciada por las ventajas y desventajas obtenidas al usar uno u otro fluido. Por ejemplo, la potencia entregada por un ORC que emplea R245fa sin sobrecalentamiento es igual a la potencia entregada por un ORC con amoníaco y un sobrecalentamiento a 93 °C (Figura 6 c-). No obstante, a pesar de la necesidad de sobrecalentamiento en este último caso, se requeriría de un flujo másico de refrigerante 80 % menor (Figura 5). En general, el sobrecalentamiento también es beneficioso porque permite obtener la misma potencia en el ORC con un flujo másico de refrigerante menor, lo cual se traduce también en equipos menos voluminosos.

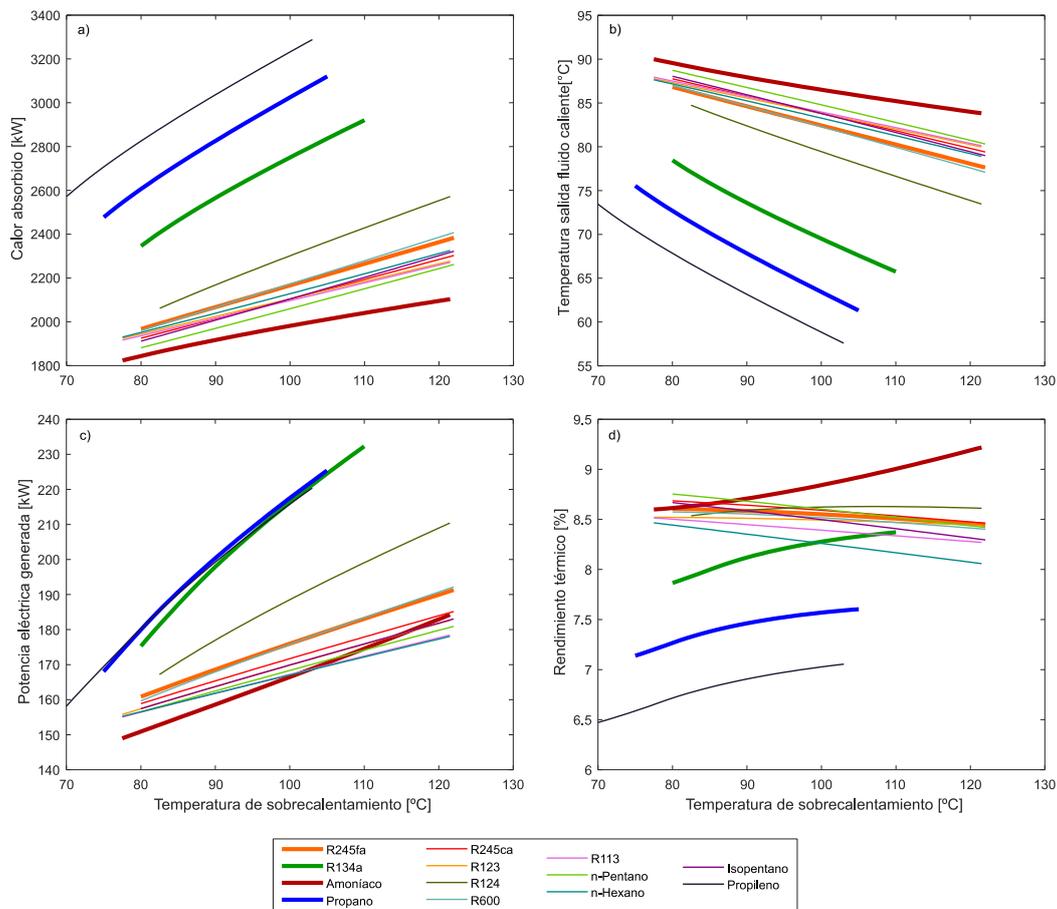


Figura 6: ORC subcrítico con sobrecalentamiento. a) Calor absorbido por el ORC; b) temperatura final del fluido caliente; c) potencia eléctrica obtenida con el generador; d) rendimiento térmico del ciclo.

Dependiendo de si el fluido es húmedo o no, el incremento de la potencia neta puede ser más rápido o más lento que el incremento en el calor extraído al fluido caliente. Esto se traduce en aumentos o reducciones en el rendimiento térmico del ciclo según el fluido considerado. Si bien la potencia eléctrica aumenta en todos los casos (Figura 6 c-), el sobrecalentamiento mejora el rendimiento de los ORC que emplean fluidos húmedos y desmejora el rendimiento para los otros fluidos (Figura 6 d-). Pese a lograr aumentos en la potencia entregada, en la gran mayoría de los casos, los ORC trabajan con fluidos secos y no tienen necesidad de sobrecalentamiento [7]. Esa es una de sus grandes ventajas en relación a los ciclos de vapor de agua.

#### 4. CONCLUSIONES

Los ORC pueden ser empleados en un gran número de aplicaciones, no solo en usos industriales. Para estudiar su viabilidad se requiere un análisis técnico - económico que, entre otras variables, considera a las características de la fuente caliente. En el sector industrial particularmente, los ORC constituyen una importante alternativa a considerar para generación



distribuida. El algoritmo implementado en ese trabajo resulta una herramienta importante para evaluar el potencial de fuentes térmicas con media-bajas temperaturas, que puede usarse no solo en el sector industrial como se mostró hasta aquí, sino también en la generación distribuida renovable. Algunos trabajos a futuro pretenden implementar este algoritmo para evaluar aplicaciones prácticas.

## REFERENCIAS

- [1] B. F. Tchanche, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, and G. Papadakis, "Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles - A review of various applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 3963–3979, 2011.
- [2] A. Landelle, N. Tauveron, P. Haberschill, R. Revellin, and S. Colasson, "Organic Rankine cycle design and performance comparison based on experimental database," *Appl. Energy*, vol. 204, pp. 1172–1187, 2017.
- [3] F. A. Al-Sulaiman, F. Hamdullahpur, and I. Dincer I, "Performance comparison of three trigeneration systems using organic rankine cycles," *Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 5741–5754, 2011.
- [4] S. Lecompte, H. Huisseune, M. Van Den Broek, B. Vanslambrouck, and M. De Paepe, "Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 448–461, 2015.
- [5] O. Bailey and E. Worrell, "Clean Energy Technologies: A Preliminary Inventory of the Potential for Electricity Generation," *Environ. Prot.*, no. April, 2005.
- [6] D. Sengupta, "Incorporating low grade energy recovery in process integrated systems," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 17, pp. 54–60, 2017.
- [7] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, "Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 168–186, 2013.
- [8] M. Imran, F. Haglind, M. Asim, and J. Zeb Alvi, "Recent research trends in organic Rankine cycle technology: A bibliometric approach," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. December 2016, pp. 552–562, 2018.
- [9] I. Bell, S. Quoilin, J. Wronski, and V. Lemort. (2013). Coolprop: An open-source reference quality thermophysical property library. ASME, no. 1.
- [10] Ö. Kaşka, "Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry," *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 108–117, 2014.



## EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LA PRIMERA CENTRAL ELÉCTRICA DE ENERGÍA POR BIOMASA FORESTAL DE LA PROVINCIA DE CORRIENTES

Luis Horacio Vera<sup>1</sup>, Emilio Sebastián Scozzina Unterholzner<sup>2</sup>, Gonzalo Carbajal<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas – UNNE – Facultad de Ingeniería Resistencia, Chaco, Argentina- [luis.horacio.vera@comunidad.unne.edu.ar](mailto:luis.horacio.vera@comunidad.unne.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas – UNNE – Facultad de Ingeniería Resistencia, Chaco, Argentina- [emilio\\_scozzina@hotmail.com](mailto:emilio_scozzina@hotmail.com).

<sup>3</sup> Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas – UNNE – Facultad de Ingeniería Resistencia, Chaco, Argentina- [carba.ga.634@gmail.com](mailto:carba.ga.634@gmail.com)

### RESUMEN

En el presente artículo se realiza el balance energético y masico de una central de generación de vapor que emplea biomasa como combustible. El balance se realiza utilizando los modelos matemáticos individuales de los componentes dentro del programa computacional *EES (Engineering Equation Solver)*.

Los datos de partida para realizar los balances fueron proporcionados por la empresa FRESA, ubicada la localidad de Gobernador Virasoro, provincia de Corrientes. La central térmica fue diseñada para una potencia de 40MW. Se alimenta con biomasa, principalmente, pino y eucalipto en forma de chip en un 65% y aserrín en un 35%, la humedad en base húmeda estimada es de 48%.

Mediciones realizadas en la central permitieron determinar el rendimiento de expansión en la turbina hasta llegar a la presión de condensación, las eficiencia en los diferentes equipos de intercambio de calor y se obtuvo que para el funcionamiento de la planta de generación de biomasa de 40 MW es necesario un aporte de 61 toneladas por hora de combustible con 1953.35 kcal por kilogramo y un consumo de combustible para la generación de 160 tn vapor/h.

En base a los resultados obtenidos mediante simulaciones en EES, se pudo caracterizar el ciclo termodinámico de la central térmica FRESA reproduciendo las condiciones estándar de funcionamiento de la central. Además, considerando la limitación de agua de enfriamiento y derretimiento del material del relleno de torres de enfriamiento, se evaluó como varia la eficiencia del ciclo considerando las condiciones climáticas para mantener su potencia. Se determinaron disminuciones de eficiencia del 1,5% del ciclo, considerando el aumento de temperatura del agua de ingreso al condensador (que aumenta su presión) debido a limitación de agua en las torres de enfriamiento.

**Palabras clave:** Biomasa; Central térmica; Rendimiento térmico; Torre de enfriamiento.



## 1. INTRODUCCION

El abastecimiento de potencia eléctrica en Argentina se realiza en mayor parte en las centrales térmicas que en total suma un 25.275 MW y que corresponde al 58,88% de la potencia instalada donde la mayoría son centrales de ciclo combinado (13.500 MW) y el restante son turbinas a gas (5.828 MW), turbinas a vapor (4.251 MW) y motores diesel (1.696 MW). [1] Todas estas centrales utilizan combustibles de origen fósil para obtener energía eléctrica. Al producir la combustión generan gases de efecto invernadero que a larga puede llegar a perjudicar el medio ambiente y la calidad de vida, es por ello que en la actualidad se busca disminuir el uso de energías de origen fósil mediante la utilización fuentes renovables de energía como la biomasa. Actualmente se está promocionando el uso de biomasa debido a que a pesar de su quema produce CO<sub>2</sub>, se considera que el CO<sub>2</sub> emitido durante su quema es equivalente al absorbido durante su crecimiento. [2]

La biomasa es la que se genera en cualquier tipo de actividad humana en que se utilice materia orgánica, principalmente en los procesos productivos agrícola, forestal o ganadero, así como los núcleos urbanos (residuos sólidos y aguas residuales, principalmente) [3], suele disponerse localmente y que si se maneja adecuadamente es renovable.

Argentina cuenta con una amplia variedad de recursos y residuos biomásicos que pueden ser aprovechados para la generación de energía, como el bioetanol, biodiesel, leña, residuos forestales, de la foresto-industria, agropecuarios y agrícolas.[4] En particular unas de sus provincias, Corrientes, se encuentra en una ubicación geográfica entre los 27° 15' y 30° 44' de latitud sur, y las longitudes de 55° 40' y 59° 37' oeste. Está dividida en 25 departamentos y 66 municipios. Destaca por tener la mayor superficie de bosques implantados en el país [5], con 434.360 hectáreas, siendo la mayoría de género Pinus (73%), seguido de Eucaliptus (25,17%) y otros variados (1,48%) [6]. Cada año, esta provincia ofrece un volumen considerable de biomasa disponible para su aprovechamiento energético, alcanzando las 2.129.580,7 toneladas. Además, los residuos provenientes de la foresto-industria, molinos arroceros y yerbateros suman otras 401.477 toneladas anuales [7]. Si solo consideramos los residuos de la foresto-industria y los aserraderos se podría generar hasta 200 MW de electricidad [8], lo cual representa aproximadamente el 80% de la demanda promedio de potencia eléctrica en la provincia [1].

La situación ventajosa, en relación con la cantidad de biomasa obtenida como subproducto del proceso industrial, junto a programas nacionales y provinciales de generación de energía renovable, creó una condición favorable para localización de centrales de generación de energía a base de biomasa forestal en la provincial. En vistas a lo expuesto, se construyó la central termoeléctrica a vapor 'FRESA', localizada en la localidad de Gobernador Virasoro - Corrientes (latitud: -27°56'46,24", longitud: -56°0'2,51"). La central fue diseñada para generar



40 MW de potencia eléctrica para inyectar directamente a la red (representa un 10% del consumo de la provincia de Corrientes) mediante la quema de: aserrín chips de madera.

La Figura 1 presenta una imagen aérea de la central de generación de FRESA, donde se destaca un gran silo que puede almacenar hasta 7.000 tn. Junto al silo hay una zona de 6 ha que sirve para guardar 22.000 tn de rollos que se pueden triturar y 12.000 tn de chip y aserrín. También se puede ver la caldera acuatubular de Gonella, modelo ERK 160 LG, que tiene una presión operativa de 68 bar, un caudal de vapor de 160 th/hr a 61 tn/hr de caudal másico de combustible. El agua que alimenta la caldera se desaliniza mediante un sistema de osmosis inversa y el agua que refrigera el condensador se obtiene del subsuelo, el agua proveniente del condensador ingresa por nueve torres de enfriamiento húmedo (TEH) para disminuir su temperatura mediante la evaporación del aire. Cerca de la caldera está la turbina de Siemens, modelo SST 300, que acciona un generador Toyo Denki, modelo TC 230. La turbina tiene una presión de diseño de 65 bar y una temperatura de 480 °C, y cuenta con tres extracciones (7 bar, 4 bar y 1 bar). Su velocidad es de 7090 rpm, pero se reduce a 1500 rpm por medio de una caja reductora. Finalmente, hay una zona para las operaciones eléctricas con un transformador que eleva el voltaje de 13,2 kV a 132 kV para conectarse al sistema interconectado. En estos momentos la central genera 40 MW y lo transmite a la red interconectada.



Figura 1: Vista aérea de la central termoeléctrica FRESA con detalle las diferentes etapas del proceso

La central térmica de 'FRESA' genera potencia eléctrica mediante un ciclo de Rankine regenerativo [9-10]. La evaluación de su funcionamiento se realiza por la cuantificación de potencia de salida de la turbina, consumo de combustible y su rendimiento térmico [12-13]. El método mayormente utilizado, para la evaluación de centrales, es el análisis energético que se basa en la primera ley de la termodinámica, en el cual se realizan modelos individuales de cada componente, que integra a la central, y a su vez se realizan balances de energía y de masa para obtener los estados que se encuentra el fluido de trabajo (agua) para establecer el



rendimiento térmico del proceso [14-15]. Siguiendo la metodología utilizada en la literatura se ha desarrollado similar procedimiento para el análisis energético de la central para evaluar su funcionamiento y caracterizar cada componente que la integra.

El empleo de softwares para realizar el análisis energético de centrales térmicas es utilizado por diversos autores. Ravinder [16], utiliza el software *MATLAB* para el modelado de una central térmica de carbón de 210 MW en el norte de India; Pattanayak et al. [17], evalúa el rendimiento de un ciclo combinado mediante *Epsilon Professional*; Varios autores [12,18-19] estudian los rendimientos de centrales térmicas mediante el software *Engineering Equation Solver* (EES). Este último software es el que se emplea en el presente estudio, del cual se aprovecha su principal característica que integra una base de datos de propiedades termodinámicas y de transporte de alta precisión [20] que se proporciona para cientos de sustancias de una manera que nos permitirá desarrollar un motor de cálculo para la evaluación del funcionamiento de la central térmica de biomasa mediante un análisis energético.

## 2. METODOLOGIA

Teniendo en cuenta los valores a los que opera la central (caudal de vapor, presión, temperatura de entrada de la turbina, potencia generada, etcétera) se prosigue a realizar el diagrama térmico de la central, tomando de referencia otras centrales térmicas [12,18-19], en dicho diagrama se plasman todos los componentes que la integran y los valores obtenidos. Luego se aplican las ecuaciones de balance de energía y masa a cada componente que integra la central, obteniendo así, consumo de las bombas, las necesidades de calor de la caldera, los flujos de energía de cada componente, etcétera. El análisis energético se desarrolló en base de las siguientes hipótesis: 1) Se evalúa la central en las condiciones de diseño; 2) Cada componente del esquema de la central se considera un volumen de control único. 3) Cada componente funciona en condiciones estacionarias. Por último, se emplea el software *EES* para programar el motor de cálculo para luego obtener los valores característicos de cada componente mediante la simulación. Teniendo en cuenta lo mencionado, anteriormente, se destacan los siguientes balances en los siguientes componentes:

### 2.1. Caldera

La caldera es de tipo acuotubular de tiro balanceado, en su interior produce la combustión del combustible el cual absorbe el agua a expensas de un estado llegando a vapor sobre calentado a 480°C y 65 bar, su balance de energía es el siguiente:

$$Q_c = m_v(h_{2c} - h_{1c}) \quad (1)$$

Siendo  $Q_c$ , el calor necesario llevar al agua al estado vapor sobrecalentado;  $m_v$  el caudal másico vapor;  $h_{2c}$ , la entalpia del vapor sobresaturado a la salida;  $h_{1c}$ , la entalpia del agua de ingreso a la caldera. El aporte de  $Q_c$  se realiza por la combustión del combustible biomásico,



compuesto por 65% chips y 35% aserrín de madera de pino y eucalipto, del cual se estimó su poder calorífico inferior (PCI) con la ecuación de Dulong.

$$PCI = 8.140 C + 29.000 (H - O 8^{-1}) + 2.220 S - 600 H_2O \quad (2)$$

Siendo C, carbono; H, hidrogeno; O, oxígeno; S, azufre; H<sub>2</sub>O, agua. Todos estos elementos son los que se encuentran en una muestra de un kilogramo de combustible húmedo. Al análisis elemental de los elementos químicos que integran un kilogramo de combustible se lo obtiene desde la bibliografía [21], el cual concuerda con valores de recientes investigaciones [22]: C= 26,1%; H= 3,64%; O=21,84%; N= 0%; S=0%; Ceniza= 0,42%; H<sub>2</sub>O= 48%. Aplicando la Ecuación (2) se obtiene el valor de 1953,35 kcal/kg.

## 2.2. Turbina

La turbina realiza una expansión adiabática irreversible y una manera de evaluar la irreversibilidad es mediante su rendimiento isoentrópico ( $\eta_{iso}$ ) que es la razón entre la diferencia de entalpía entre los estados inicial y final de la expansión irreversible sobre la diferencia entre entalpía de una expansión reversible. Para conocer la entalpía en el estado final de una expansión irreversible se utiliza la siguiente Ecuación (3):

$$h_{4a} = h_{3d} - ((h_{3d} - h_{4s}) \eta_{iso}) \quad (3)$$

Siendo,  $h_{4a}$ , la entalpía del vapor producto a la irreversibilidad en el estado final;  $h_{3d}$ , la entalpía del vapor en el estado inicial;  $h_{4s}$ , la entalpía del vapor en el estado final si hubiese ocurrido una expansión adiabática reversible. Teniendo en cuenta esto, se considera que el rendimiento del grupo turbina-reductor-generator es: 87,5%, 96% y 95%.

## 2.3. Condensador

El condensador es un intercambiador de calor que obedece la siguiente Ecuación (4):

$$Q_w = Q_{cond} = A U F (T_3 - T_4) (\ln((T_{cond} - T_3) (T_{cond} - T_4)^{-1}))^{-1} \quad (4)$$

Siendo,  $Q_{cond}$ , el calor necesario para lograr la condensación; A, área de intercambio; U, coeficiente de transmisión de calor; F, factor de efectividad del intercambio de calor;  $T_{cond}$ , temperatura de trabajo del condensador. Para hallar el valor de  $Q_{cond}$  se procede a realizar un balance de masa y energía en el condensador y se lo visualiza en Ecuación (5).

$$Q_w = Q_{cond} = (h_v m_v) - (h_l m_l) + (h_s m_s) + (h_i m_i) \quad (5)$$

Siendo,  $h_v$ , la entalpía del vapor de ingreso al condensador;  $h_l$ , la entalpía del vapor a la salida del condensador;  $h_s$ , la entalpía del vapor proveniente de los sellos para la turbina;  $h_i$ , la entalpía del vapor producto del intercambiador de baja y de alta presión;  $m_v$ , el caudal masico de vapor al ingreso del condensador;  $m_l$ , el caudal masico del vapor a la salida del



condensador;  $m_s$ , el caudal masico de vapor proveniente de los sellos;  $m_i$ , el caudal masico de vapor proveniente de los intercambiadores de calor de alta y de baja.

## 2.4. Torre de enfriamiento húmedo (TEH)

La central posee nueve TEH que tienen como objetivo refrigerar el agua del egreso del condensador mediante la evaporización de esta, sí se realiza un balance de masa y de energía se obtiene la Ecuación (6):

$$m_a((h_2-h_1)-(\omega_2-\omega_1)h_4) = m_w(h_3-h_4) = Q_w \quad (6)$$

Siendo  $h_1$ , la entalpia del aire de ingreso a la TEH;  $\omega_1$ , la humedad absoluta del aire de ingreso a la TEH;  $h_2$ , la entalpia del aire de salida a la TEH;  $\omega_2$ , la humedad absoluta del aire de salida de la TEH;  $h_4$ , la entalpia del agua de retorno al condensador;  $h_3$ , la entalpia del agua de egreso del condensador;  $m_a$ , el caudal másico de aire;  $m_w$  el caudal másico de agua que circula por el condensador;  $Q_w$ , es el calor necesario para producir el condesado.

## 2.5. Descripción ciclo térmico de la central de biomasa de 'FRESA'

Finalizando el análisis energético del apartado anterior se prosigue a comparar los parámetros principales de funcionamiento de las diferentes etapas del ciclo y los componentes del esquema térmico real que posee la central térmica de FRESA. En la Figura 3 se presenta el esquema del ciclo de FRESA con valores de presión, temperatura, entalpía y gasto másico en puntos característicos, parámetros informados por la propia empresa:

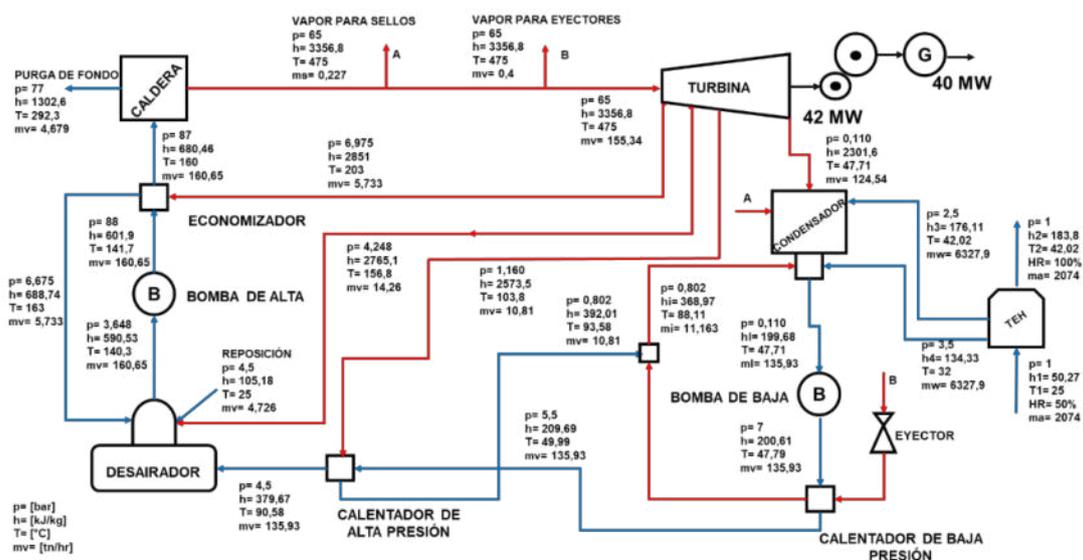


Figura 3: Central térmica de FRESA con valores reales de operación.

El funcionamiento de la central térmica se describe siguiendo el recorrido del agua desde la salida del economizador. En la caldera, ingresa 160 tn/hr de agua líquida a una presión de 87



bar y una temperatura de 160°C, proveniente del economizador. Allí se produce la combustión del combustible, que pasa del estado líquido a vapor sobrecalentado de 65 bar y 475 °C. Durante su trayecto hacia la turbina, se extraen cantidades de vapor para los sellos de la turbina y del eyector. El caudal másico de vapor sobrecalentado que ingresa a la turbina es 155,34 tn/hr, donde se expande y genera 42 MW de potencia eléctrica. Sin embargo, se pierde un 4,76% de esta energía en el proceso de transformación a energía eléctrica. A medida que ocurre la expansión, se extrae vapor de la turbina en tres puntos diferentes: a 6,975 bar, a 4,248 bar y a 1,160 bar. Por eso, al finalizar la expansión, la cantidad de vapor que ingresa al condensador es 124,54 tn/hr. El vapor se condensa en el condensador y se dirige a la bomba de baja presión, que eleva su presión e impulsa el agua al intercambiador de calor de baja presión. Allí intercambia calor con el caudal de vapor proveniente del eyector, lo que genera un aumento de temperatura del agua. El agua pasa al intercambiador de calor de alta presión y, de forma análoga al anterior, aumenta su temperatura al intercambiar calor con el vapor de la tercera extracción. Luego del intercambio de calor, el agua se dirige al desairador para eliminar los gases disueltos no condensables. Esto se logra mediante el ingreso del vapor de la segunda sangría y el agua proveniente del economizador. Esto genera un aumento de temperatura del agua a la salida del desairador. Finalmente, el agua eleva su presión, debido a la bomba de alta, a 88 bar e ingresa al economizador. Allí aumenta su temperatura debido al intercambio de calor con el vapor de la primera sangría. Luego vuelve a ingresar a la caldera para completar el ciclo.

### 2.5.1. Funcionamiento 'normal'

En primera instancia, se define este estado de generación, Figura 3, como 'normal', esto significa que cualquier otra condición de generación que afecten a los puntos de operación serán desviaciones del estado 'normal'. Una vez definido, se procede a analizar los valores de operación de cada componente que integra a la central con el propósito de identificar si algún componente se encuentra trabajando de manera inadecuada o hay un error de composición de los componentes. Seguidamente, se calcula el rendimiento térmico de la central con la siguiente Ecuación (5):

$$\eta_t = (P_t - P_{ba} - P_{bb}) (Q)^{-1} \quad (7)$$

Donde  $P_t$ , la potencia generada por la turbina;  $Q$ , calor aportado al fluido en la caldera;  $P_{ba}$  y  $P_{bb}$ , potencia de bomba de alta y de baja. En este caso no solamente consideramos el calor aportado, sino, también la potencia de las bombas de alta y de baja, pero no se toma en cuenta la potencia necesaria para el funcionamiento de los ventiladores axiales de las TEH por falta de datos.

Finalmente, se comparará los parámetros físicos de entrada y salida de cada componente que integran a los dos diagramas térmicos, el que se elaboró a partir de un análisis energético a

partir de ciertas variables como dato y el que nos proporcionó los operarios de la central (Figura 3).

### 3. RESULTADOS

Los resultados del análisis energético, simulados por el software *EES*, se observan en el esquema térmico de la Figura 4, a su vez, se prosigue a realizar una comparación con la Figura 3. La disposición de los elementos de la central es similar, el ciclo realizado no contempla el caudal de vapor de los sellos para la turbina y tampoco hay un intercambiador de calor de mezcla entre el vapor proveniente del intercambiador de calor de baja presión y del eyector. Respecto a los valores de operación son en su mayoría diferentes, la diferencia de temperatura de agua de condensación para la Figura 4 es de 4°C, en cambio, la Figura 3 es de ~10 °C, las presiones de extracción son similares, pero, no a las temperaturas (188,3°C, 143,6°C y 99,53°C) y sus caudales de vapor (10,55 tn/hr, 9,25 tn/hr y 13,18 tn/hr), los calentadores de baja y alta presión son 56,7% y 57,6% menor temperatura a salida con respecto a la central simulada

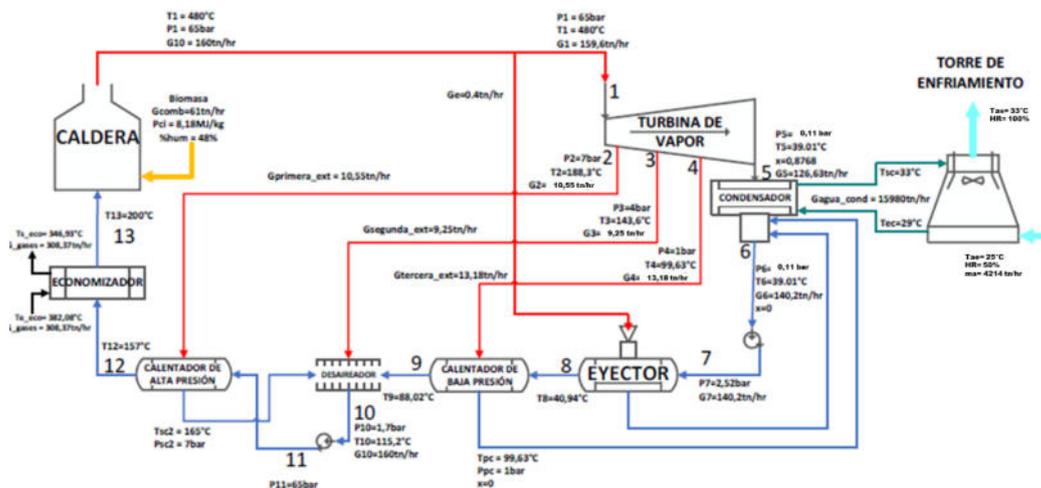


Figura 4: Esquema de la central térmica simulada.

Mediante la Ecuación (7) calculamos rendimiento térmico del esquema térmico de la Figura 4 obteniendo un valor de 39,03% comparado de los 35,48% de la Figura 3.

#### 3.1. Influencia de la humedad y temperatura del aire atmosférico

Se procede a evaluar el funcionamiento de las TEH debido al hallazgo de material de relleno derretido en su interior y su impacto en el rendimiento térmico de la central. El rendimiento térmico no es un valor único, sino que puede variar debido a factores externos. La central cuenta con nueve TEH para enfriar el agua que sale del condensador utilizando aire atmosférico. Con el fin de calcular el rendimiento térmico en diferentes condiciones de



temperatura y humedad del aire, estableceremos las siguientes hipótesis: 1) Se considera constante el caudal másico de aire ( $m_a$ ) requerido por las torres de enfriamiento húmedas, obtenido mediante la Ecuación (6) en la condición de operación 'normal'. 2) Se mantienen constantes el caudal, el poder calorífico inferior del combustible, el rendimiento isoentrópico ( $\eta_{iso}$ ) de la turbina, la potencia de las bombas de alta y baja, las presiones de extracción de las sangrías y el caudal másico de agua de refrigeración ( $m_w$ ), con los valores definidos en la condición de funcionamiento 'normal'. 3) El aire atmosférico se encuentra a una presión de 760 mmHg. 4) El análisis no considera los efectos de los cambios de densidad del aire atmosférico debido a las variaciones de temperatura y su impacto en el caudal de los ventiladores axiales de las TEH. 5) La temperatura del aire que sale de la TEH ( $T_2$ ) es igual a la temperatura del agua que sale del condensador ( $T_3$ ). 6) El agua de reposición de la torre de enfriamiento húmedo tiene la misma temperatura que el agua enfriada por la misma. 7) El coeficiente de transmisión de calor ( $U$ ) se mantiene constante y su valor se calcula mediante la Ecuación (4) en la condición 'normal'. Los operarios de la central nos proporcionaron el área de intercambio de calor del condensador, que tiene un valor de 2086 m<sup>2</sup>. 8) Para mantener la temperatura de ingreso a la turbina a 475°C, se utiliza un atemperador a medida que la temperatura del condensador aumenta.

El método de cálculo consiste en determinar la temperatura a la que operará el condensador cuando hay una variación de temperatura del aire. Una vez obtenida esta temperatura, se calcula el rendimiento térmico. A continuación, se describen los pasos a seguir: 1) Se define  $\omega_1$  y  $h_1$ . Se propone un valor inicial para la temperatura de salida de la TEH ( $T_2$ ). Con esta temperatura definida, se calculan  $h_3$  y  $h_2$ . Luego, utilizando la Ecuación (6), se determina  $h_4$ . 2) Se resuelve la Ecuación (5) para obtener el calor necesario para producir el condensado,  $Q_w$ . 3) Se despeja la temperatura del condensador ( $T_{cond}$ ) de la Ecuación (4). Sin embargo, antes de esto, se debe verificar si  $T_{cond}$  está dentro de los límites establecidos: no puede ser mayor que la temperatura de la última sangría (103,8°C) ni menor que la condición 'normal' (47,71°C). Si  $T_{cond}$  está fuera de estos límites, se recalcula  $T_2$ . 4) Si la temperatura del condensador se encuentra dentro de los límites establecidos, se procede a calcular el valor de entalpía en esa temperatura ( $T_{cond}$ ) para cumplir la hipótesis número 2. En otras palabras, la entalpía de entrada al condensador ( $h_v$ ) debe estar en la curva de expansión del último tramo de la turbina. Para verificarlo, se realiza un balance de masa y energía en el condensador para obtener la entalpía de entrada ( $h_v$ ) utilizando la Ecuación (5). Conocida la curva de expansión del último tramo de la turbina, se calcula la entalpía  $h_{4a}$  que corresponde a la temperatura  $T_{cond}$  mediante la Ecuación (3). 5) Se compara el valor de  $h_v$  y  $h_{4a}$ . Si son iguales, la temperatura del condensador obtenida es correcta. Si no coinciden, se ajusta el valor de  $T_2$  hasta que sean iguales.

Los resultados de la iteración se representan en un nomograma. El eje común será el de las abscisas que representará las diferentes temperaturas del aire atmosférico de entrada a la

TEH. Las curvas superiores tendrán en su eje de las ordenadas los rendimientos térmicos, mientras que las otras, inferiores, mostrará la temperatura del condensador. Estos gráficos representarán las diferentes condiciones en las que operará el condensador al mantener constante la humedad relativa y el caudal másico de aire, pero variando la temperatura del aire.

Se presenta en la Figura 5 el nomograma la variación del rendimiento térmico de la central, en la parte superior, y la variación de la temperatura del condensador, parte inferior, a temperaturas ambiente de 22°C a 41°C y variando su humedad relativa del 10% al 90%.

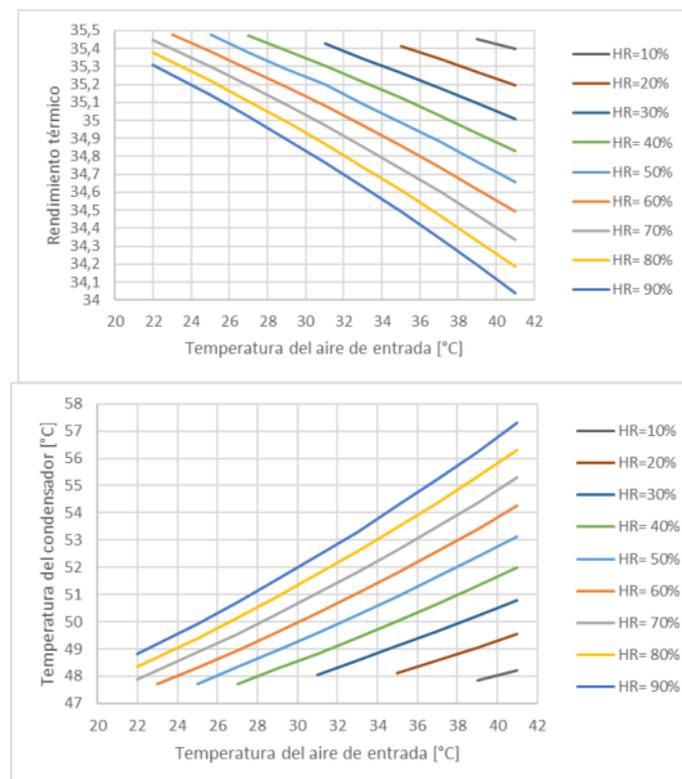


Figura 5: Nomograma. Superior: Variación del rendimiento térmico. Inferior: variación de la temperatura del condensador. Ambos graficados frente a cambios de temperatura del aire a diferentes humedades relativas (HR) para un  $m_a=576,2$  kg/sg,  $U=3,78$  kW/m<sup>2</sup>\*C,  $F=0,95$ .

Para utilizar el nomograma, se deben medir la temperatura del aire y estimar su humedad por un termómetro de bulbo húmedo. Por ejemplo, si tomamos una temperatura de 30°C y una humedad relativa del 50%, se obtiene que la temperatura de trabajo del condensador sería de aproximadamente 49,3°C, lo cual resulta en un rendimiento térmico de la central de alrededor del 35,24%.

Se observa que a medida que aumenta la temperatura del aire y la humedad relativa del ambiente, el rendimiento térmico de la central disminuye debido al incremento en la temperatura y presión del condensador. Además, a mayor humedad ambiental, la central requerirá una temperatura del aire atmosférico más baja para lograr el rendimiento térmico en



condiciones 'normales'. Por otro lado, si la humedad relativa del aire disminuye, el ingreso de aire a la torre de enfriamiento húmedo estará limitado. Esto se debe a que el aire más frío y seco provoca una mayor evaporación del agua del condensador, lo que resulta en una mayor refrigeración que obliga al condensador a trabajar a una temperatura de condensación menor que la de diseño (47,7°C), lo cual no es posible debido a las limitaciones del eyector.

El rendimiento térmico varió entre 35,48% y 34,07%, siendo este último valor alcanzado en condiciones de una humedad relativa del 90% y una temperatura de entrada de aire de 41°C. Sin embargo, estas condiciones no se presentan simultáneamente en la realidad. Por lo general, durante el verano, se obtienen valores máximos de temperatura de aire de 41°C con una humedad relativa del 20%, lo que resulta en un rendimiento térmico cercano al 35,2%.

#### 4. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante el software EES y el análisis energético del ciclo realizado en este estudio revelan diferencias significativas en comparación con el ciclo real de la central. En particular, se observa un aumento del 250% en el requerimiento de agua de refrigeración del condensador, mientras que las temperaturas de salida de los calentadores de baja y alta presión son un 56,7% y un 57,6% más bajas, respectivamente, en comparación con la central estudiada. Además, tanto los caudales como las temperaturas de extracción difieren de las suposiciones iniciales. Estas discrepancias se atribuyen al hecho de que el modelo de simulación considera caudales de extracción más altos en la turbina, lo que implica un área de intercambio menor en los calentadores. De la evaluación del rendimiento térmico a diferentes temperaturas y humedades relativas de aire se obtuvo que el rendimiento térmico de la central varía entre 35,48% y 35,2%, este último valor se da a una temperatura de 41°C y 20% humedad relativa. Se continúa trabajando en el ciclo simulado para ajustar los valores respecto a los medidos en la central y poder contar con una herramienta que represente al ciclo real con las diferentes condiciones de operación y permitir evaluarla globalmente.

#### REFERENCIAS

- [1] CAMMESA. *Informe anual*. 2.022. [www.cammesa.com/informes-y-estadisticas](http://www.cammesa.com/informes-y-estadisticas).
- [2] F. He, X. Liu, M. Wang, S. Zhou, D. Heydarian. *Energy, exergy, exergoeconomic, and environmental analyses and multi-objective optimization of a biomass-to-energy integrated thermal power plant*. Alexandria Engineering Journal, Volumen 61, 5629–5648, 2.022.
- [3] J. M<sup>a</sup> De Juana. *Energías Renovables para el desarrollo*. ITES - Paraninfo, Madrid, 2.003.
- [4] M. Trossero. *Análisis del Balance de Energía derivada de la Biomasa en Argentina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2.009.
- [5] Ministerio de Agroindustria de Argentina. *Característica de la región: Corrientes*. 2.010.



- [6] Dirección de Recursos Forestales. *Actualización Del Inventario De Plantaciones Forestales De La Provincia De Corrientes. Informe Técnico*. 2.015.
- [7] E.Cutro, R. Perucca, F. Miño, L. Suarez, F. Caniza, J. Aparicio, J. Bertollo, F. Schiro. *Análisis Espacial del Balance Energético derivado de Biomasa en la Provincia de Corrientes*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2.018.
- [8] L. Vera, H. Lorenzo, M. Cáseres, A. Firman, A. Busso. *Generación de energía eléctrica con biomasa residual de procesos productivos: provincia de Corrientes – Argentina*. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. 01 a 05 de junio del 2.020, Fortaleza – Brasil.
- [9] Y. Cengel, M. Boles. *Termodinámica*. McGraw-Hill Interamericana. España. 2.012.
- [10] M. Moran, H. Shapiro. *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Reverté. México. 2.015.
- [12] H. Erdema, A. Akkaya, B. Cetin, A. Dagdas, S. Sevilgen, B. Sahin, I. Teke, C.Gungor, S. Atas. *Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey*. International Journal of Thermal Sciences, Volumen 48, 2179–2186, 2.009.
- [13] O. Khaleel, F. Ismail, T. Ibrahim, S. Hassan. *Energy and exergy analysis of the steam power plants: a comprehensive review on the classification, development, improvements, and configurations*. Ain Shams Engineering Journal, Volumen 13, Número 10160, 2.022.
- [14] K. Uzuneanu, M. Dragan, G. Coman. *Thermodynamic modelling of a steam power plant using biomass*. TERMOTEHNICA. Volumen 1, 2.017.
- [15] V. Costa, L. Tarelho, A. Sobrinho. *Mass, energy and exergy analysis of a biomass boiler: a portuguese representative case of the pulp and paper industry*. Applied Thermal Engineering. 2.019.
- [16] R. Kumar. *Thermodynamic Modeling and Validation of a 210-MW Capacity Coal-Fired Power Plant*. Iran Journal of Science, Technology, Transfer, Mechanical Engineering. 2.016.
- [17] L. Pattanayak, J. Sahu, P. Mohanty. *Combined Cycle Power Plant Performance Evaluation Using Exergy and Energy Analysis*. Environmental Progress & Sustainable Energy. 2.017.
- [18] R. Kumar, R. Jilte, B. Mayank, M. Singh. *Steady-State Modelling and Validation of a Thermal Power Plant*. Advances in Fluid and Thermal Engineering. 511 – 519, 2.019.
- [19] G. Ahmadi, D. Toghraie. *Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen 56, 454–463, 2.016.
- [20] F-ChartSoftware. *EngineeringEquationSolver(EES)*. 2010 [www.fchartsoftware.com/ees/](http://www.fchartsoftware.com/ees/)
- [21] R. Torreguitar, A. Weiss. *Combustión y Generación de Vapor*. Mellor – Goodwin S.A.C. Buenos – Aires. 1.968.
- [22] S. Vassilev, C. Vassileva, V. Vassilev. *Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview*. Fuel. 2.015.



## ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS EN CUENCAS HÍDRICAS DE LA PROVINCIA DE SANTA FE

Ángel Gallo <sup>1</sup>, Marcos Cea <sup>1</sup>, Ulises Manassero <sup>1</sup>, Rodrigo Furlani <sup>1</sup>, Javier Acosta <sup>1</sup> y Ariel Loyarte Autor <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) -  
UTN Facultad Regional Santa Fe, Lavaise 610, Santa Fe, Argentina -  
[marcos.cea@live.com.ar](mailto:marcos.cea@live.com.ar)

### RESUMEN

La matriz energética Argentina posee una fuerte dependencia de las energías fósiles, recursos limitados, no renovables, contaminantes y costosos, por lo tanto, y teniendo en cuenta el impulso que se le ha dado a las fuentes renovables de energía a partir del año 2006, sumado a los pocos proyectos de generación renovable propuestos en la región del Litoral, se propone por objetivo analizar la posible inserción de pequeños aprovechamientos hidrocinéticos en la Provincia de Santa Fe a fin de determinar el lugar óptimo de inserción de potencia en la red de media tensión, tal que se produzca una mejora en la calidad del producto técnico. Considerando que la provincia posee un potencial hidráulico medio debido a sus cuencas caudalosas, se realiza una estimación probabilística de las velocidades de estas a partir del intervalo de confianza, para diferentes emplazamientos seleccionados a partir de la altura y caudal de los ríos de la región. Este procedimiento permite la selección de las turbinas hidrocinéticas más adecuadas y el cálculo de la energía anual probable para cada posible emplazamiento. Los resultados dejan entrever que, las velocidades máximas probables de las cuencas se encuentran en el rango de 2,13 a 5,06 m/s, posibilitando módulos de inyección de potencia entre 21 y 28,5 MW, permitiendo esto un aporte de energía al subsistema de 31.472 a 86.461 MWh, con mejoras marginales en perfiles de tensión de la red.

**Palabras Clave:** *Energía renovable, Aprovechamiento Hidrocinético, Intervalo de Confianza, Potencial Energético.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La matriz energética Argentina posee una fuerte dependencia de las energías fósiles, recursos limitados, no renovables, contaminantes y costosos, por lo tanto, y teniendo en cuenta el impulso que se le ha dado a las fuentes renovables de energía a partir del “Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica” [1]-[2], sumado a los pocos proyectos de energía renovable (ER) propuestos en la provincia de Santa Fe, es imprescindible fomentar la utilización de energías limpias como base para la generación de energía eléctrica. Actualmente la potencia instalada de ER en la zona del litoral presenta valores reducidos respecto a las regiones eléctricas circundantes, como se observa en la Figura 1.

Dentro de las ER existen los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PAHs), que de acuerdo con la clasificación de CAMMESA corresponden a centrales de hasta 50 MW de potencia instalada [3]. En este marco, se vislumbra que la provincia de Santa Fe tiene un gran potencial hidroeléctrico, puesto que dentro del territorio provincial se presentan cuencas con valores promedio de caudales anuales de hasta 25.000 m<sup>3</sup>/s [4], las cuales podrían ser aprovechadas para la ejecución de proyectos de PAH. Como consecuencia de las características del recurso primario de energía y la flexibilidad que presenta la tecnología de las turbinas hidrocínéticas, se presenta una oportunidad de mejora en las condiciones de operación de la red provincial, ya que la inyección de energía en puntos conflictivos de la misma podría contribuir en la disminución de la cargabilidad de líneas de media tensión (MT) y/o alta tensión (AT), mejorando a su vez, los perfiles de tensión en corredores comprometidos.

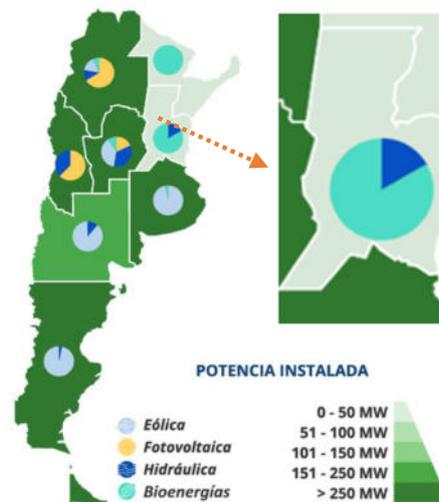


Figura 1. Potencia instalada de energías renovables en Argentina, detalle Santa Fe.

Teniendo en cuenta el potencial hídrico de la provincia de Santa Fe, se propone por objetivo desarrollar una metodología que permita analizar la posible inserción de pequeños aprovechamientos hidrocínéticos en la provincia a fin de determinar el lugar óptimo de inserción de potencia en la red de media tensión, tal que produzca una mejora en la calidad del producto técnico.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Estimación de energía anual probable en cuencas de la provincia de Santa Fe

En la Figura 2, se presenta un flujograma de las actividades contempladas para el cálculo de la energía anual probable para cada una de las posibles ubicaciones de los PAHs.

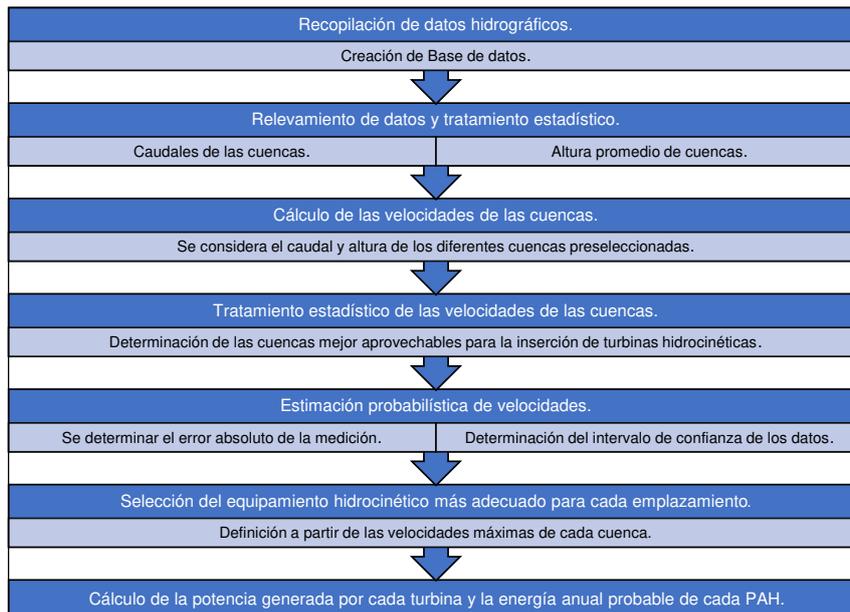


Figura 2. Flujo de actividades para la elección de las turbinas hidrocínéticas más adecuadas y el cálculo de la energía anual probable generada por cada PAH.

## 2.2. Recopilación de datos hidrográficos

De todas las cuencas disponibles en la provincia de Santa Fe se escogen aquellas con los mayores caudales, y que a su vez presenten una cercanía a redes de 33 kV, para la posible inyección de energía una vez instalado el PAH (ver ejemplo de selección en Figura 3).

La ubicación de las cinco cuencas potencialmente aprovechables se muestra en la Figura 4. Las denominaciones expresadas corresponden al Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH) - Estaciones: 3249, 3339, 3223, 3316 y 3260-. Es de destacar que los datos se obtienen del SNIH disponible en [4], y corresponden a caudales y alturas de la cuenca hídrica en el período 2010-2020. De esta forma se genera una base de datos (BD) para poder realizar el análisis.

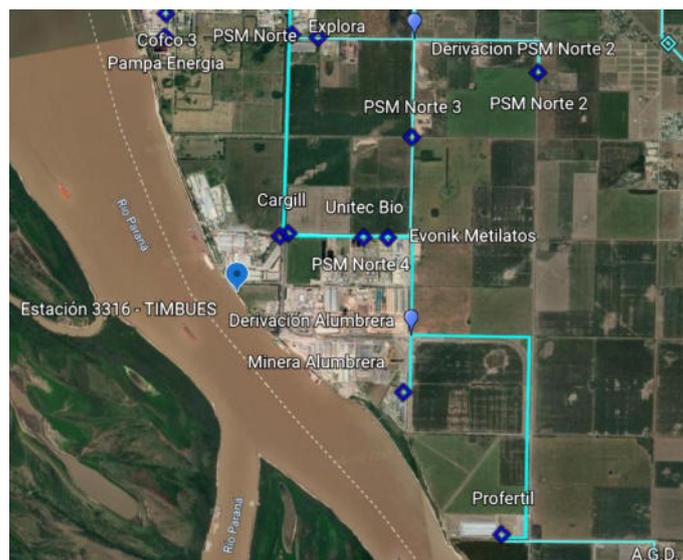


Figura 3. Ejemplificación de la ubicación del punto de análisis hídrico respecto de la red de 33 kV – Referencias: red de 33 kV color cian, nodos de MT rombos azules.



Figura 4. Ubicación geográfica de las cuencas seleccionadas para el estudio.

### 2.3. Relevamiento y tratamiento estadístico de datos de caudales y alturas

Para la preselección de las cuencas potencialmente aprovechables se calculan medidas de tendencia central, a partir de los datos de caudal y altura de los distintos emplazamientos preseleccionados (ver Figura 4). Estas medidas estadísticas aplicadas a los datos hidrográficos resumen en un solo valor al conjunto de valores de una muestra y se calculan a partir de las ecuaciones (1) a (3) [5].

Media de la población ( $\bar{x}$ ): número que se obtiene al dividir la suma de todas las muestras ( $x_i$ ), por la cantidad de muestras de la población ( $n$ ) -ecuación (1)-.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1)$$

Desviación estándar probabilística ( $\sigma$ ): es una medida que se utiliza para cuantificar la variación o la dispersión de un conjunto de datos numéricos -ecuación (2)-.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

Coefficiente de variación (CV): cociente entre la desviación estándar y la media aritmética. Indica la homogeneidad o heterogeneidad de los valores de una muestra -ecuación (3)-.

- Si  $CV > 30\%$ : población heterogénea. La media aritmética no es representativa del conjunto de datos.
- Si  $CV < 30\%$ : población homogénea. La media aritmética es representativa del conjunto de datos.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (3)$$

### 2.4. Cálculo y tratamiento estadístico de las velocidades de las cuencas

Para poder realizar un análisis energético de las diferentes cuencas de la provincia de Santa Fe, se debe hacer énfasis en encontrar las velocidades de cauces más altas, dado que la potencia activa del equipamiento hidrocínético que se pretende seleccionar, depende específicamente de



la velocidad. Por lo tanto, resulta necesario determinar los parámetros que se detallan a continuación [6], a fin de realizar un ordenamiento de las cuencas de mayor a menor potencial.

El Caudal: se define como la cantidad de fluido que circula a través de una sección por unidad de tiempo y se calcula a partir de la ecuación (4):

$$Q[m^3/s] = A [m^2] \cdot v [m/s] \quad (4)$$

Donde:

- Q: Caudal medio diario de la cuenca en m<sup>3</sup>/s
- A: Área transversal de la cuenca en m<sup>2</sup>
- v: velocidad media diaria de la cuenca en m/s

Se utilizan valores históricos de altura de cada cuenca extraídos de la BD, y se mide el ancho del cauce en estudio, el cual se adopta constante por simplicidad, puesto que los anchos de los cauces son irregulares. Es común realizar esta aproximación, por ser un cálculo pesimista, dado que cuanto más alto sea el valor del área, menor será la velocidad promedio del cauce [7]. En base a ello, se calcula el área transversal del cauce a partir de la expresión matemática (5).

$$A[m^2] = h[m] \cdot a[m] \quad (5)$$

Donde:

- h: altura diaria en m
- a: ancho de la cuenca en m

Al extraer los datos de caudal de la BD y despejando la velocidad de la ecuación (3), se calcula la velocidad media diaria a partir de la expresión matemática (6).

$$v [m/s] = \frac{Q[m^3/s]}{A [m^2]} \quad (6)$$

## 2.5. Estimación probabilística de velocidad de las cuencas

Los PAHs necesitan de turbinas que aprovechen la energía cinética que la cuenca puede proporcionar para el movimiento de sus álabes. Por otro lado, se consideran las curvas del tipo Potencia pu-Velocidad m/s proporcionadas por el fabricante, es por ello, que es imperioso determinar la velocidad probable de las cuencas, en función a valores diarios de velocidad, para estimar la potencia teórica que se podría aprovechar en cada cuenca. Para ello, se deben tener en cuenta los siguientes conceptos [5]:

Error estándar (e): representa la tolerancia positiva o negativa, determinada a partir de la ecuación (7).

$$e = Z \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

Donde:

- $Z \frac{\alpha}{2}$ : constante de tabla de distribución normal de probabilidad o de Gauss
- $\sigma$ : desviación estándar probabilística
- N: cantidad total de datos

Es de destacar que se adopta un nivel de confianza de los datos contenidos en la BD del 99%. Con esta suposición se obtiene el parámetro Z de la ecuación (7) a partir de la expresión (8):

$$Z = \frac{1 + \text{confianza [pu]}}{2} \quad (8)$$



Intervalo de confianza (IC): es un procedimiento utilizado para determinar un intervalo que comprenda a un parámetro de población  $\Theta$ , con cierta probabilidad  $1-\alpha$  -ecuación (8)-. Esta probabilidad indica la confianza que se tiene de que la estimación por intervalo comprenda al parámetro de la población.

$$IC = [\bar{x} - e; \bar{x} + e] \quad (9)$$

Donde:

- $\bar{x}$ : media aritmética
- $e$ : error estándar

Se debe tener en cuenta que existen distintos tipos de distribuciones de probabilidad y tendencias en función a las variables de los estudios a realizar. Sin embargo, se debe considerar que, independientemente de la distribución de probabilidades que tenga una población, si se extraen muestras aleatorias y se determina la distribución muestral de los estadísticos, muchos de ellos serán normales. Por ejemplo, se sabe que la  $\bar{x}$  tiene una distribución aproximadamente normal si el tamaño de la muestra es lo suficientemente grande, según lo establecido en el teorema central del límite [5].

## 2.6. Cálculo de potencia y energía anual probable de los PAHs

Hay que tener en cuenta que la energía generada por las turbinas hidrocinéticas depende de la velocidad del fluido que las atraviesa, por lo cual, a partir de los valores probables de velocidad de las cuencas y teniendo en cuenta las curvas potencia-velocidad de la turbina, se determina la potencia probable generada en los puntos seleccionados. Obtenida la potencia probable en base al equipamiento seleccionado, se calcula la energía anual a partir de la ecuación (10).

$$\text{Energía Anual probable [kWh]} = P[p_u] \cdot P_n[kW] \cdot N[\text{turbinas}] \cdot 8760[\text{hs}] \cdot K_r \quad (10)$$

Donde:

- $P$ : potencia de salida de la turbina
- $P_n$ : potencia nominal de la turbina
- $N$ : número de turbinas
- $K_r$ : factor de mantenimiento.

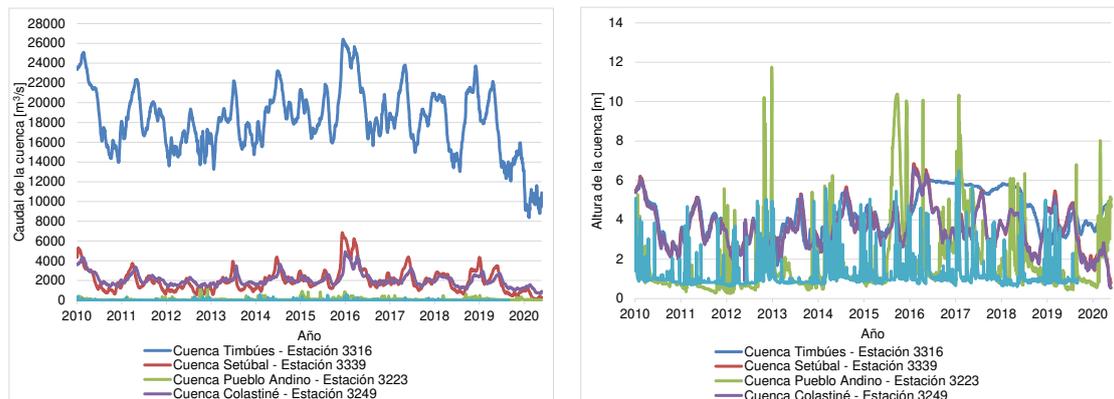
Se adopta un factor  $K_r = 0,987$  correspondiente a 113 horas anuales de indisponibilidad de las turbinas debido a mantenimiento preventivo [8].

Otro indicador de funcionamiento que permite caracterizar el comportamiento de las turbinas hidrocinéticas en el lugar de explotación del recurso es el factor de carga (FC), definido como la relación entre la energía eléctrica producida durante un período de tiempo  $T$  ( $E_a$ ) y la que hubiera producido si, durante ese período de tiempo hubiese estado funcionando continuamente a potencia nominal.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Resultados del análisis estadístico de la base de datos

A partir de la información disponible en el SNIH, se obtienen caudales y alturas en el período 2010-2020, de las cuencas presentadas en la Figura 4, a fin de conformar la BD. Es de destacar que, los datos de ambas variables corresponden a valores promedio diarios. En la Figura 5a y Figura 5b se presentan los caudales y alturas medias diarios para las cinco cuencas preseleccionadas para el estudio.



a) Caudales medios diarios

b) Alturas medias diarias

Figura 5. Variables obtenidas para las BD de las diferentes cuencas bajo estudio

Del análisis de la Figura 5a, se puede observar que los mayores caudales aprovechables se dan para las cuencas de Timbúes, Setúbal y Colastiné.

En la Tabla 1 se presentan las medidas de tendencia central de caudal, altura y desviación estándar para las cinco cuencas bajo análisis.

Tabla 1. Resumen de medidas de tendencia central para las cinco cuencas

Variable	Media	Mediana	Desviación Estándar	CV [%]
<b>Cuenca Timbúes – Estación 3316</b>				
Altura [m]	4,19	4,00	1,11	26,5
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	18177,20	18177,24	3268,98	17,9
<b>Cuenca Setúbal – Estación 3339</b>				
Altura [m]	3,53	3,45	1,10	31,1
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	1980,85	1778,76	1164,21	58,9
<b>Cuenca Pueblo Andino – Estación 3223</b>				
Altura [m]	1,91	1,19	1,81	94,7
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	126,36	70,96	148,49	117,5
<b>Cuenca Colastiné – Estación 3249</b>				
Altura [m]	3,46	3,40	1,12	32,3
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	2049,08	1920,20	698,97	34,1
<b>Cuenca Villa Constitución – Estación 2360</b>				
Altura [m]	1,18	0,95	0,75	63,5
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	13,94	3,90	43,21	309,9

Del análisis de los datos presentados en la Tabla 1, se puede inferir que:

- ✓ Para la cuenca Timbúes la cercanía entre las medias y mediana de ambas variables indica simetría de los datos. Mientras que los valores del CV son menores al 30%, lo cual



representa una baja dispersión de los datos y por ende una homogeneidad de los mismos.

- ✓ En lo referente a la cuenca Setúbal, la cercanía entre las medias y medianas de ambas variables indica simetría de los datos. Mientras que, si bien el CV de las alturas es ligeramente mayor al 30%, el conjunto se considera homogéneo y con baja dispersión. En lo que respecta a los caudales, el CV es mayor al 30%, por lo tanto, los datos se consideran no homogéneos y poseen cierta dispersión.
- ✓ Para la cuenca Pueblo Andino, la baja cercanía entre las medias y medianas de las dos variables indica asimetría en ambas, aunque más marcada para el caudal. En lo que respecta al CV posee un valor alto en ambos casos (mayor a 30%), lo que denota una alta dispersión de datos y falta de homogeneidad.
- ✓ En lo que respecta a la cuenca Colastiné, la cercanía entre las medias y mediana de ambas variables indica simetría de los datos. Por otro lado, los CV exhiben valores ligeramente mayores al 30%, tanto para la altura como el caudal, lo cual representa una baja dispersión de los datos y por ende homogeneidad.
- ✓ Finalmente, para la cuenca Villa Constitución, la baja cercanía entre las medias y medianas de las dos variables indica asimetría en ambas, aunque más marcada en el caudal. En lo que respecta al CV posee un valor alto en ambos casos (mayor a 30%), lo que denota una alta dispersión de datos y falta de homogeneidad de estos.

En base a los resultados obtenidos del análisis estadístico de caudales y alturas de las cuencas, como primer indicio para la preselección de las cuencas con mayor potencial, se determina un orden de mérito según dispersión de los datos:

1. Estación 3316: Cuenca Timbúes
2. Estación 3339: Cuenca Setúbal
3. Estación 3249: Cuenca Colastiné
4. Estación 3223: Cuenca Pueblo Andino
5. Estación 3260: Cuenca Villa Constitución

### 3.2. Resultados del tratamiento estadístico de las velocidades de las cuencas

Como segundo indicador para la preselección de las cuencas potencialmente aprovechables, se calculan nuevamente medidas de tendencia central como la media y mediana, a partir de los datos de velocidad media diaria calculados por implementación de la ecuación (6). Es de destacar que, las medidas estadísticas aplicadas a los datos hidrográficos, calculados desde la velocidad de las cuencas, resumen en un solo valor al conjunto de valores que existe como muestra.

En la Figura 6, se presentan los resultados obtenidos del cálculo de velocidad media diaria para las diferentes cuencas seleccionadas para el período de 10 años de estudio. Se destaca que la menor dispersión y mayor valor medio de velocidades pertenece a la estación 3316 ubicada en la cuenca del río Timbúes.

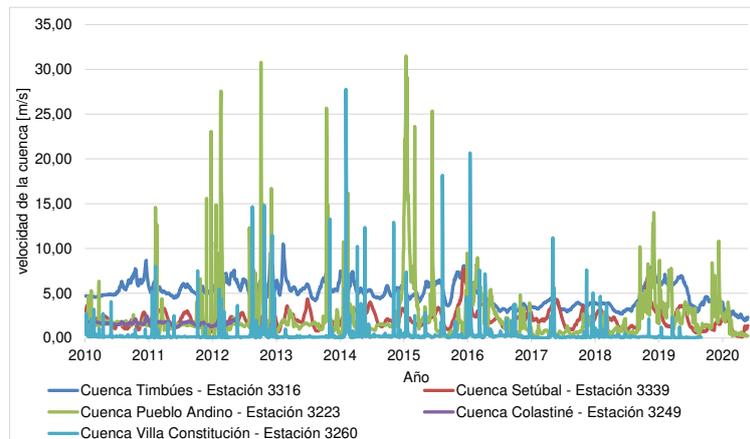


Figura 6. Velocidad media diaria para las cinco cuencas seleccionadas para el análisis.

Los resultados del cálculo de los indicadores de velocidades medias diarias se presentan ordenados de mayor a menor en la Tabla 2. Si bien en un primer orden de mérito, las estaciones Timbúes, Setúbal y Colastiné son las que poseen la dispersión de datos más aceptable en cuanto a caudales y alturas, la estación Pueblo Andino exhibe una velocidad media mayor, lo que permite inferir que Timbúes, Pueblo Andino, y Setúbal, son energéticamente las cuencas más aptas para posibles aprovechamientos hidrocéntricos, por sobre las otras cuencas (ver Tabla 2 y Figura 6). Es por ello que se seleccionan estas tres cuencas para el análisis de los intervalos de confianza.

Tabla 2. Resumen de medidas de tendencia para el indicador de velocidad de cada cuenca

Estación	Ubicación PAH	Media Aritmética [m/s]	Mediana [m/s]
3316	Timbúes	5,00	5,02
3223	Pueblo Andino	2,47	1,55
3339	Setúbal	2,09	1,97
3249	Colastiné	1,60	1,58
3260	Villa Constitución	0,47	0,14

### 3.3. Resultados de la estimación probabilística de velocidad de las cuencas

Considerando un nivel de confianza de la BD del 99%, se determina en primera instancia la desviación estándar y la media aritmética. Luego a partir de la ecuación (8) se obtiene el parámetro Z de la expresión (7), para ingresar posteriormente a la tabla de distribución de Gauss y así obtener el valor de  $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ , el cual permite determinar el error estándar a través de (7).

Los resultados de los IC para las tres cuencas que presentan mayores velocidades medias diarias se presentan en la Tabla 3. Se puede observar que la velocidad de la cuenca Timbúes supera en promedio un 103% a la de Pueblo Andino y un 139% a la de Setúbal, destacándose su potencial energético por sobre las otras. A ello se debe adicionar la baja dispersión de los datos analizados en la estación 3316, como se puede observar en la Tabla 1 y Figura 6.



Tabla 3. Intervalos de confianza de velocidades obtenidos para las cuencas seleccionadas

Estación	Intervalo de confianza Velocidad [m/s]	
Timbúes	4,943	5,056
Pueblo Andino	2,338	2,603
Setúbal	2,047	2,130

### 3.4. Resultados de la determinación de la potencia y energía anual probable para los PAHs

Es de destacar que las turbinas hidrocinéticas para ríos y canales, son una solución de ER con una buena relación costo-beneficio. Esta tecnología posee la ventaja de ser fácilmente ampliable, presentando una solución que contribuye a la conservación del medio ambiente, al no requerir la construcción de grandes represas, dado que su funcionamiento no está limitado a alturas o caídas de agua, sino a la velocidad del cauce que las atraviesa, siendo una de las principales características diferenciadoras con relación a las centrales hidroeléctricas de pasada.

Para el estudio energético se selecciona la turbina hidrocinética de la serie EnCurrent 250H (ver Figura 7), dada su alta potencia nominal en comparación con las restantes opciones presentes en el mercado, a igualdad de velocidad nominal [9]. Cabe aclarar, que si bien la velocidad calculada por IC de la cuenca de Timbúes, supera la velocidad de 3 m/s a la cual la máquina funciona a potencia nominal, la misma continúa generando a potencia nominal hasta los 5,1 m/s. Por lo cual verifica el correcto funcionamiento para el límite superior del IC (ver Figura 7).

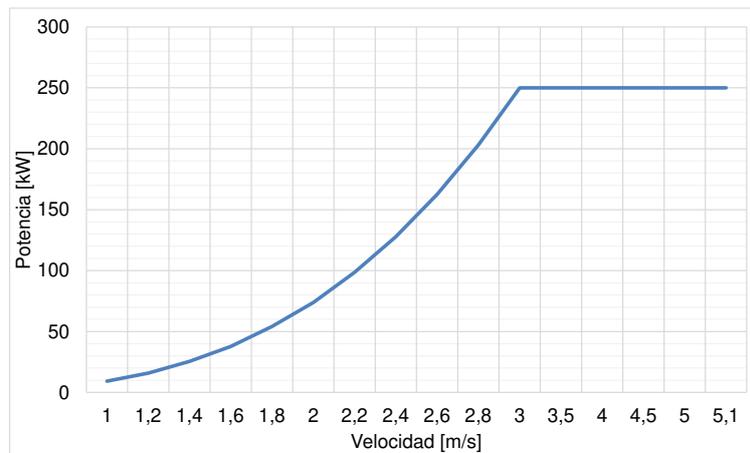


Figura 7. Curva Potencia-Velocidad para la turbina ENC-250H.

A modo de ejemplo, en la Figura 8 se presenta la metodología para obtener la potencia erogada por la turbina a partir de la característica potencia-velocidad. Se ingresa a la curva a partir del valor de velocidad obtenido del análisis estadístico de las misma -2,34 m/s por ejemplo- dando como resultado una potencia de 121 kW. Del análisis de los resultados, se destaca que las cuencas de Colastiné y Villa Constitución presentan velocidades muy bajas (ver Tabla 2), por lo cual no resultan favorables para la instalación de turbinas hidrocinéticas. En cambio, las cuencas de Timbúes, Pueblo Andino y Setúbal poseen velocidades más adecuadas para el equipamiento seleccionado.

Los resultados obtenidos del análisis energético se presentan en la Tabla 4, donde se observa que la cuenca Timbúes presenta los mayores valores de energía anual generada -entre 50,4% y 107% respecto de la cuenca Pueblo Andino, ubicada en segundo lugar- y valores cercanos de la



unidad del FC, demostrando esto que se constituye como el mejor lugar para el emplazamiento de un PAH.

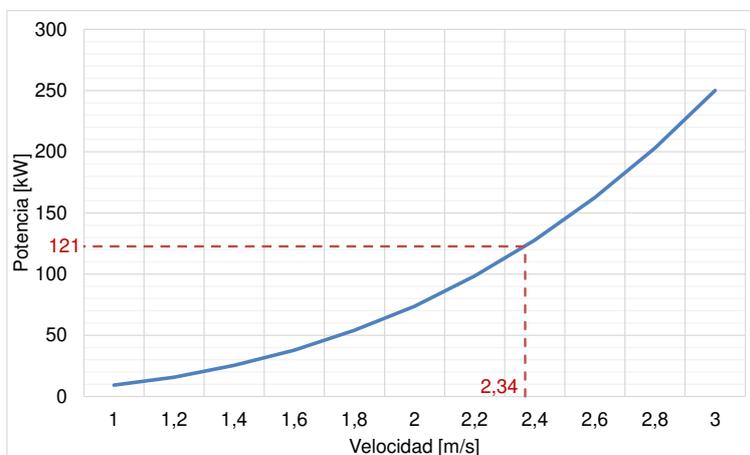


Figura 8. Obtención de potencia generada a partir de la velocidad media de la cuenca

Tabla 4. Resumen de energía anual probable para las tres mejores cuencas

Variable	Límite Inferior del IC	Límite Superior del IC
<b>Cuenca Timbúes – Estación 3316</b>		
Velocidad [m/s]	4,943	5,056
Potencia nom. turbina [kW]	250	
N [turbinas]	40	
Energía anual [MWh]	86461	86461
Factor de carga	0,987	0,987
<b>Cuenca Pueblo Andino – Estación 3223</b>		
Velocidad [m/s]	2,338	2,603
Potencia nom. turbina [kW]	250	
N [turbinas]	40	
Energía anual [MWh]	41847	57497
Factor de carga	0,478	0,656
<b>Cuenca Setúbal – Estación 3339</b>		
Velocidad [m/s]	2,047	2,130
Potencia nom. turbina [kW]	250	
N [turbinas]	40	
Energía anual [MWh]	27754	31472
Factor de carga	0,317	0,359



#### 4. CONCLUSIONES

El estudio del potencial hidráulico en la Provincia de Santa Fe demuestra que las velocidades presentes en algunas cuencas posibilitan la inserción de determinado equipamiento hidrocínético, destacándose entre todas, la cuenca Timbúes la cual presenta velocidades que en promedio superan en más del 100% a las cuencas Pueblo Andino y Setúbal. Esto demuestra que es posible la inserción de PAHs en la provincia, siempre y cuando se cumplan las condiciones de velocidad y variabilidad del recurso que posibiliten la implementación de la tecnología seleccionada.

En lo referente a la energía anual erogada por los posibles PAHs, se demuestra que la variabilidad del caudal a lo largo del año impacta significativamente en la generación. Destacándose que aquellas cuencas que presentan coeficientes de variación superiores a 30 en sus medidas estadísticas presentan los menores factores de utilización, por caso Pueblo Andino y Setúbal. Se destaca nuevamente la cuenca Timbúes que presenta la mayor homogeneidad en sus perfiles de velocidad, dando como resultado un factor de utilización cercano a la unidad.

#### REFERENCIAS

- [1] Gobierno de la Nación. Ley 26.190: Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/120000-124999/123565/norma.htm>
- [2] Gobierno de la Nación. Ley 27.191: Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/250000-254999/253626/norma.htm>.
- [3] Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. [CAMMESA]. Potencia instalada por región y tecnología. Disponible en: <https://cammesaweb.cammesa.com/potencia-instalada/>
- [4] Sistema Nacional de Información Hídrica [SNIH] (2021). Filtrado: Tipo de parámetro/Hidrométrico-Provincia/Santa Fe. Recuperado de <https://snih.hidricosargentina.gob.ar/Filtros.aspx#>.
- [5] Spagni B., Bergagna D., Roldan G., López M. Probabilidad y estadística: Estadística Básica. Editorial: Ediciones UNL, Santa Fe, Argentina, 2012.
- [6] Serway R., Vuille C. Fundamentos de Física- Novena edición. Editorial Cengage Learning, Col. Cruz Manca, Santa Fe, Mexico DF, 2010.
- [7] Pedro Villegas. Análisis Morfométrico de una cuenca. Octubre de 2013. Disponible en: <https://aguaysig.com/analisis-morfometrico-de-una-cuenca/>.
- [8] Arriaga Bayo. Trabajo de fin de grado: Sistema de Captación Energética Fluvial. Universidad
- [9] Envirogen New Energy Corporation. Water-To-Wire Solutions. 2020. Disponible en: <https://www.newenergycorp.ca/products>



## Aplicação da Análise de Vibração para Determinar o Atraso de Ignição em um Motor Diesel que Funciona a Diesel / Biodiesel em Proporções Variadas

Márcio Rocha<sup>1</sup>, Lesso Santos<sup>2</sup>, Carlos Cabral<sup>3</sup>, Jefferson Mendonça<sup>4</sup>, Roberto Alécio<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal da Bahia-IFBA/Jequié, Brasil. Email: [marcioandrade@ifba.edu.br](mailto:marcioandrade@ifba.edu.br)

<sup>2</sup>Instituto Federal de Alagoas-IFAL/Maceió, Brasil. Email: [lesso@ifal.edu.br](mailto:lesso@ifal.edu.br)

<sup>3</sup>Universidade Federal da Paraíba-UFPB/João Pessoa, Brasil. Email: [carloscabral santos@yahoo.com.br](mailto:carloscabral santos@yahoo.com.br)

<sup>4</sup>Universidade Federal da Paraíba-UFPB/João Pessoa, Brasil. Email: [mendonca11@gmail.com](mailto:mendonca11@gmail.com)

<sup>5</sup>Instituto Federal de Alagoas-IFAL/Maceió, Brasil. Email: [ralecio@gmail.com](mailto:ralecio@gmail.com)

### RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar o tempo de retardo de ignição em um motor de combustão interna do ciclo Diesel trabalhando com Diesel/biodiesel em proporções variadas. Foi utilizado um motor MWM 4.07 TCE onde foi acoplado um sensor de detonação tipo sensor piezoelétrico utilizado em motor do ciclo Otto equipado com injeção eletrônica de combustível. Um circuito eletrônico com microprocessador, amplificador, filtro e comparador foi construído e instalado para condicionamento de sinal. O sinal do sensor piezoelétrico foi comparado com o sinal de abertura do injetor de combustível para a determinação do retardo de ignição. O estudo foi realizado no Laboratório de Ensaios de Motores e Emissões-LEME da Universidade Federal da Paraíba-UFPB. Trata-se de uma técnica não invasiva e de baixo custo baseada em equipamentos simples e de fácil aquisição sem alterar a originalidade do motor. A determinação do retardo de ignição impacta no ajuste do avanço de ignição para alcançar a combustão o mais próximo possível do ideal, melhorando a eficiência térmica do motor e reduzindo a emissão de poluentes.

**Palavras Chave:** Atraso de Ignição; Biodiesel; Vibração; Sensor Piezoelétrico.

## 1. INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna por compressão admitem ar e, em um instante predeterminado e preciso, injetam o combustível na câmara de combustão. O processo de injeção começa imediatamente antes do pistão atingir o ponto morto superior e se estende até após o início da descida do pistão. No entanto, o combustível não se inflama instantaneamente desde o início da injeção, levando assim uma fração de segundos desde a abertura do injetor até o começo da ignição da mistura. Neste trabalho, propomos usar a análise de vibração a partir do uso de um sensor piezoelétrico do tipo sensor de detonação utilizado em motores do ciclo Otto equipados com injeção eletrônica de combustível para a determinação do atraso de ignição em um motor do ciclo Diesel.

O "atraso de ignição" em um motor a diesel foi definido [6] como o intervalo de tempo (ou ângulo de manivela) entre o início da injeção e o início da combustão. O início da injeção é geralmente considerado como o momento em que a agulha do injetor sai do assento. No entanto, como afirmado por [7], o início da combustão é mais difícil de detectar.

Segundo descreve [8], o atraso de ignição se decompõe em "atraso físico" (transferência de calor, vaporização das gotículas e difusão) e "retardamento químico" (reações químicas de oxidação lenta). Vários fatores físicos e químicos influenciam no atraso de ignição. De acordo com [16], aspectos relacionados com a qualidade do combustível utilizado como tamanho da cadeia do hidrocarboneto, número de cetano do combustível, propriedades característica do ar local como densidade, pressão, temperatura e concentração de oxigênio, atomização das moléculas do combustível, tamanho das gotas formadas, velocidade de injeção do combustível, geometria da câmara de combustão, avanço de ignição, taxa de swirl, taxa de compressão do motor e recirculação dos gases de exaustão (EGR).

Segundo [16], em termos físicos, o atraso na ignição depende em grande parte do jato de combustível e da preparação da mistura. A Figura 1 obtida de [13] ilustra os diferentes estágios de combustão em uma máquina de compressão.

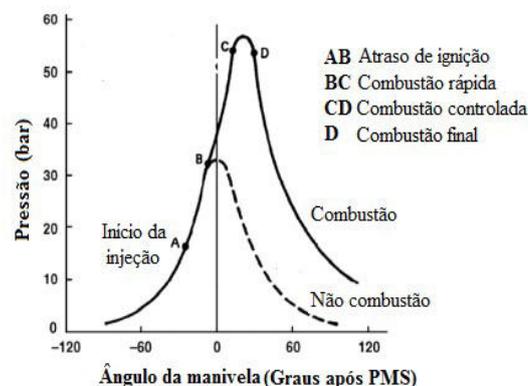


Figura 1. Diferentes estágios da combustão em motores de ignição por compressão (ICO)



## 2. Técnicas aplicadas na determinação do atraso da ignição

Geralmente as técnicas utilizadas para determinar o atraso de ignição são complexas e exigem equipamentos sofisticados de alto custo e requerem intervenções invasivas no motor que alterem sua originalidade. De acordo com [6], o uso de sensores ópticos de luz instalados dentro da câmara de combustão ou o uso de curvas experimentais de pressão são duas maneiras de determinar o atraso da ignição. Vale ressaltar que em ambos os casos é necessário intervir no motor para a instalação do sensor óptico ou do sensor de pressão. Nestes casos, o custo envolvido é bastante alto tanto para a aquisição do sensor quanto para sua instalação. Ainda é preciso mão de obra específica e qualificada para realizar das modificações necessárias no cabeçote do motor. A Figura 2, extraída [1], ilustra uma vista em corte da instalação de um sensor de pressão na câmara de combustão de um motor.



Figura 2. Sensor de pressão montado na câmara de combustão de um motor.

Outra técnica que pode ser utilizada são as correlações empíricas para prever processos como transferência de calor, o atraso da ignição e a taxa de queima conforme descreve [14]. Neste caso específico, o método utilizado deixa de ser experimental e passa a ser simulação computacional.

### 2.1 Alguns estudos sobre o atraso da ignição

Estudos conduzidos por [12] determinaram os atrasos de ignição de um motor marítimo Diesel operando com óleo marítimo Diesel. Os testes foram realizados com variação de carga e utilizando dados experimentais da pressão da câmara de combustão e levantamento da agulha do bico injetor. Quatro diferentes critérios disponíveis na literatura foram utilizados para identificar o ponto de partida da combustão de forma comparativa. Análise do atraso da ignição de um motor diesel “dual fuel” trabalhando com Diesel e variações de hidrogênio e GLP como combustíveis secundários foi objeto de estudo de [7]. Nesse estudo observou-se que o atraso na ignição depende não apenas do tipo de gás combustíveis e suas concentrações, mas também da temperatura, da carga, pressão e concentração de oxigênio.



O Tempo de Atraso da Ignição e o Estudo Cinético Químico de Misturas de Óxido Nitroso e Metano a Altas Temperaturas foi o assunto de um estudo de [2]. Nesta investigação, a reatividade do metano é promovida pela adição de  $N_2O$ , resultando em uma redução óbvia do tempo de retardamento da ignição, e este efeito torna-se mais pronunciado na condição rica em combustível e alta pressão. O aumento da concentração de etanol causou um aumento no atraso de ignição, diminuiu a duração da combustão e reduziu a temperatura dos gases de escape. Estes dados foram confirmados em estudos realizados por [10] sobre os efeitos de misturas de combustíveis contendo 5, 10 e 15% em peso de etanol anidro em óleo diesel com 7% de biodiesel (B7) em desempenho, emissões e características de combustão em um gerador de potência a Diesel.

Estudo Experimental sobre o Impacto do Etanol em Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol em Motores de Ignição por Compressão foram realizados por [4]. Verificou-se que os atrasos de ignição das misturas em testes com avanços otimizados mostraram evidências de que a tendência de redução do intervalo de atraso da ignição sugere a viabilidade de condições mais adequadas à autoignição da carga no interior da câmara através das investigações do avanços ideais.

O atraso na ignição, características de combustão e emissão do motor diesel abastecido com biodiesel foram objetos de estudo de [13]. Nesse estudo os autores apresentam uma revisão literária acerca de pesquisas desenvolvidas sobre o tema descrito. Como resultados significativos descrevem as características de combustão do motor com biocombustível são ligeiramente diferentes do motor funcionando com diesel puro. A combustão do biodiesel tem início precoce e apresenta menor atraso de ignição.

A investigação a qual nos propomos tem sua importância residindo no aprimoramento de uma técnica de baixo custo, não requer intervenções invasivas no motor, mantém a sua originalidade e que pode ser utilizada posteriormente para avaliar os processos de combustão envolvendo outros ciclos com uso de combustíveis variados. Além disso, um estudo de otimização de avanço de injeção no processo de combustão poderá ser implementado de forma a se obter maior rendimento do motor e menor emissão de gases nocivos ao meio ambiente.

### **3. Materiais e métodos**

Trata-se de um trabalho de caráter experimental realizado no Laboratório de Ensaio de Motores e Emissões-LEME da Universidade Federal da Paraíba-UFPB onde foram utilizados: um motor MWM 4.07 TCE Diesel, turbo alimentado com quatro cilindros e sistema de injeção common rail; sensor de detonação automotiva tipo piezoelétrico utilizado em motores do ciclo Otto com injeção eletrônica; osciloscópio de dois canais modelo Tektronix MDO 4054-6, 6 GHz



e 2,5 GS/s; circuito para o condicionamento dos sinais dos sensores contendo amplificador, filtro, comparador e micro controlador.

A vibração produzida pela combustão da mistura ar/combustível dentro da câmara de combustão do motor se espalha por toda a sua massa numa variação temporal que implicou, em uma primeira etapa do desenvolvimento do trabalho, na escolha do sensor ideal para a medição dessa vibração considerando o princípio de operação, custo envolvido, complexidade de aquisição e frequência de vibração do motor. Dessa forma, os sensores que trabalham com o efeito piezoelétrico [9] foram considerados. O sensor de detonação é um sensor de vibrações mecânicas que tem como função transformar as vibrações mecânicas do motor em oscilações elétricas. É constituído de um cristal piezoelétrico que, quando submetido a deformações mecânicas, emitem sinais de tensão variáveis capazes de serem interpretados pela unidade de comando do motor. A Figura 3 ilustra a instalação do sensor de detonação na lateral do bloco motor conforme recomendação do fabricante sem instalação de arruela e com torque apropriado.

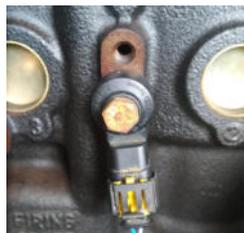


Figura 3. Instalação do sensor de detonação

O sinal gerado pelo sensor de detonação foi analisado e percebeu-se que necessitava de amplificação, pois sua amplitude era baixa demais para ser detectada pelo conversor analógico-digital de 10 bits do micro controlador sendo amplificador com ganho de 100, que apresentou sinais com picos em torno de 50 mV. Após a seleção do primeiro amplificador de alto ganho, notou-se que o sinal estava perdendo definição da borda, como mostra a Figura 4.



Figura 4. Aspecto do sinal sem definição de borda

Ao investigar a causa possível, considerou-se a possibilidade de o ganho ser muito alto e o amplificador estar saturado. Depois de adquirir um amplificador de baixo ruído, o sinal com o

motor de baixa velocidade ficou novamente abaixo da resolução do conversor analógico-digital do micro controlador. Considerando as amostras obtidas dos testes, observou-se que houve aumento na amplitude do sinal juntamente com o aumento da rotação do motor, e que o amplificador apresentou o comportamento esperado quando a tensão do sinal de saída estava abaixo de 1,5V menor que tensão de alimentação. Com isso, o amplificador foi alimentado com 12V e o ganho foi ajustado para 15. Devido a alterações nos amplificadores operacionais, incluindo ajuste de ganho, tensão de alimentação e topologia do amplificador, o sinal estava dentro dos níveis de tensão necessários e esperava-se que funcionassem perfeitamente com o micro controlador. A Figura 5 ilustra o sinal obtido após essas modificações.

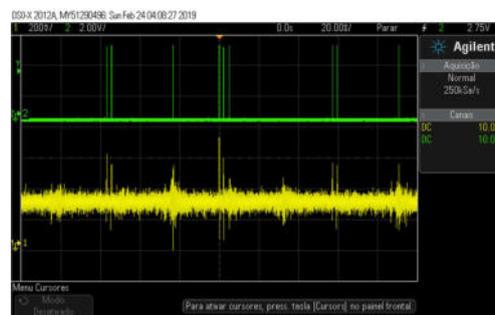


Figure 5. Aparência do sinal do sensor piezoelétrico (em cor amarela) após tratamento.

Observamos que houve melhora no sinal do sensor piezoelétrico, porém seria necessário limpar ainda mais o sinal. Decidimos então adicionar um comparador para que o sinal se tornasse binário, contendo apenas os níveis alto e baixo. Um comparador funciona da seguinte maneira: se o nível do sinal de entrada exceder o nível de um sinal de referência, a saída do comparador se tornará 5V, caso contrário, a saída será 0V. A Figura 6 mostra os sinais do sensor piezoelétrico em cor amarela após o tratamento e o do bico em verde, sendo a diferença de tempo entre eles o atraso de ignição.



Figure 6. Aparência dos sinais do sensor piezoelétrico e abertura do injetor .

Todos esses testes serviram de base para elaboração do projeto e construção de um circuito de condicionamento contendo filtragem, amplificação, comparação e processamento [15]. Vários circuitos foram montados e testados até se chegar ao sinal apropriado mostrado na Figura 6. A Figura 7. mostra o fluxograma de todo o processo de condicionamento realizado.

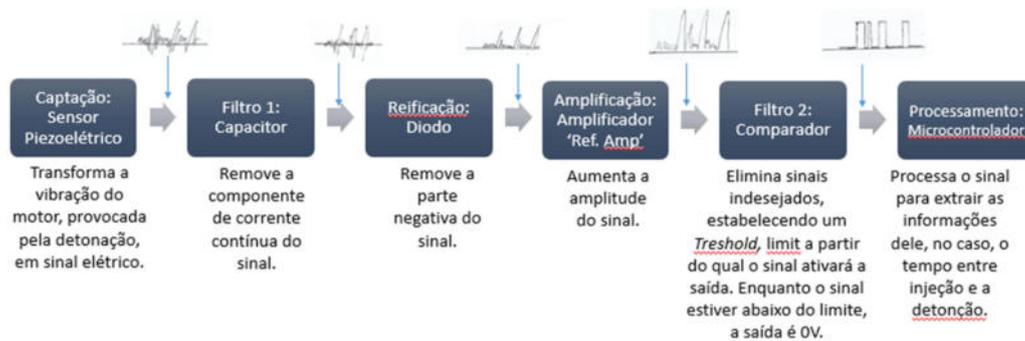


Figura 7. Fluxograma das etapas do procedimento de condicionamento do sinal .

O passo seguinte foi a realização do projeto do circuito, sua construção e instalação. A Figura 8 mostra o projeto elaborado e o circuito construído.

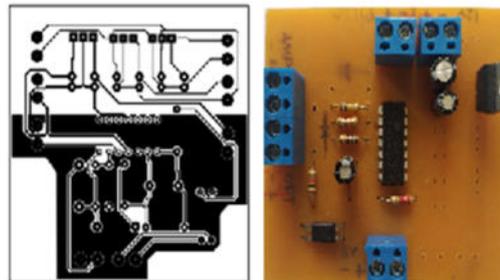


Figura 8. Circuito para condicionamento de sinal

Na etapa final foi construído um código em C/C++ para o microcontrolador Atmega328p para o aferimento dos sinais do piezoelétrico, da injeção do combustível e da fase dos pistões em tempo real. Um trabalho semelhante de monitoramento em tempo real utilizando sensor piezoelétrico foi descrito por [3] em seu trabalho de pesquisa. O código consiste em capturar o tempo da última injeção antes da explosão no pistão e as amostras do piezo durante a mesma.

O sinal provindo do piezoelétrico de frequência aproximadamente 15kHz não estava sendo reconstituído perfeitamente pela taxa de amostragem de 50kHz do Atmega328p que apesar de cumprir o teorema de Nyquist ou teorema da amostragem [11] não possuía memória flash suficiente. O Teorema de Nyquist afirma que para um sinal poder ser reconstituído com o mínimo de perda de informação, a frequência de amostragem deve ser igual ou maior que o dobro da maior frequência do sinal. Sendo assim, para melhorar o desempenho a Atmega foi substituída pela placa Tiva C Series TM4C1294 que com a taxa de amostragem de 120kHz cumpre o teorema de Nyquist e armazena as 600 amostras necessárias para o sistema de bolha com os valores do piezo.

Paralelo a Tiva C foi utilizado o mesmo Arduino para o aferimento das rotações por minuto devido ao atraso que o Serial.print causa na programação. Para validação usamos o osciloscópio Tektronix MDO 4054-6 que se aproximou do valor capturado pela placa em torno dos 90%. Pela não idealidade dos materiais e sensores utilizados foram encontrados ruídos



que para disminuir seu efeito foi feita uma média dos valores obtidos em 10 segundos de amostras enquanto o motor se encontrava na temperatura estabelecida de 77C°.

#### 4. Análise de erros envolvidos

Para o cálculo do atraso de ignição, foram usados 3 sinais provindos do motor, a saber: o sinal do sensor de fase; abertura do bico injetor e o do sensor piezoelétrico. O código elaborado detecta o sinal do sensor de fase, em seguida detecta o sinal da pré-injeção e, logo após, o da injeção principal, sendo o tempo de ocorrência da injeção principal armazenado. A partir desse instante, inicia-se o processo de armazenamento de todos os valores de amplitude e tempo das amostras vindas do piezoelétrico com uma frequência de amostragem em torno de 120kHz que é a frequência de amostragem do microcontrolador Tiva C. Após a placa armazenar 1000 valores ela faz o comparativo entre esses valores para ver qual deles possui maior amplitude. Ao achar o valor máximo ele vai estar atribuído a um tempo e a partir disso é calculado a diferença de tempo entre ele e o instante de ocorrência da injeção principal.

O tempo em que o microcontrolador Tiva C faz esses cálculos e escreve na tela é irrelevante no processamento dos dados pois ele só calcula a diferença após receber todos os valores necessários para fazer o cálculo. Também foi implementado no programa uma rotina que impede que o microcontrolador calcule erroneamente a diferença entre o tempo de injeção e o sinal de máxima amplitude do piezo fora de ordem.

Um dos erros que ocorre é do tempo de propagação da onda de vibração ocasionada pelo início da explosão da mistura no interior do cilindro até a sua chegada ao sensor piezoelétrico. Essa vibração deve atravessar as espessuras do cilindro, do fluido de arrefecimento existente entre a camisa e o bloco e do próprio bloco até atingir o sensor piezoelétrico.

Outro erro observado é a interferência de vibrações de componentes do motor sendo detectado pelo piezoelétrico. Esse tipo de problema afetava bastante as medidas em rotações elevadas e, por isto, os experimentos foram limitados à máxima rotação de 2000 rpm. O que poderia ajudar na hora de utilizar o sinal proveniente do piezo era analisar o sinal no espectro da frequência e ver se a componente que aparecia tinha natureza de alta frequência ou baixa frequência para ser projetado um filtro seletivo em frequência que, segundo [11], deixa passar exponenciais complexas em um conjunto de frequências sem qualquer distorção e rejeita completamente os sinais em todas as outras frequências. O problema desse filtro é que ele tem que abranger desde a frequência mínima de operação do motor até a frequência máxima, pois a frequência de explosão do pistão aumenta de acordo com a velocidade do motor. Um filtro físico seria mais apropriado pois um filtro digital iria requerer bastante do processador utilizado ao usar a transformada rápida de Fourier a cada ciclo da placa.

Por fim pode ser mencionado ainda o erro da propagação do sinal via os fios condutores utilizados que seria recomendado substituí-los cabo coaxiais pela sua propriedade de imunizar o sinal transmitido de sinais externos de alta frequência.

## 5. Resultados e discussão

### 5.1 Análise testes iniciais

Os testes foram realizados utilizando, a princípio, apenas um tipo de combustível o Diesel com 10% de biodiesel (B10) comercializado no Brasil. O motor funcionou sem carga em rotações variadas. Para a determinação do início da combustão consideramos exatamente o primeiro pico detectado pelo sensor piezoelétrico. A Figura 9 mostra a detecção dos sinais de abertura do bico e do sensor piezoelétrico e os valores do atraso de ignição e rotação do motor durante a realização do ensaio.

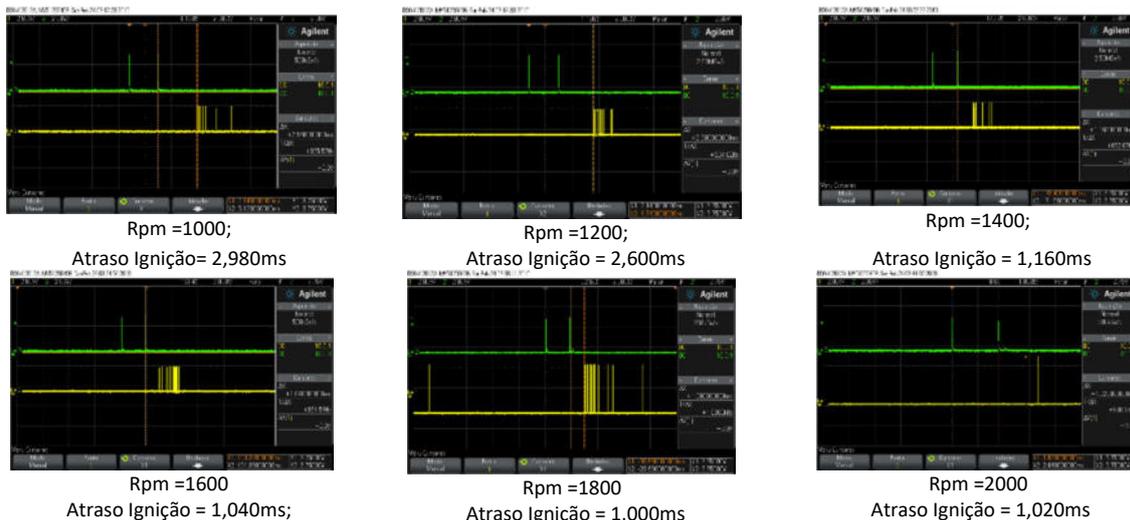


Figura 9. Valores encontrados do atraso de ignição

A Figura 10 ilustra os resultados obtidos e expressos em forma de gráfico relacionando os valores da rotação do motor com os atrasos de ignição durante o ensaio realizado.

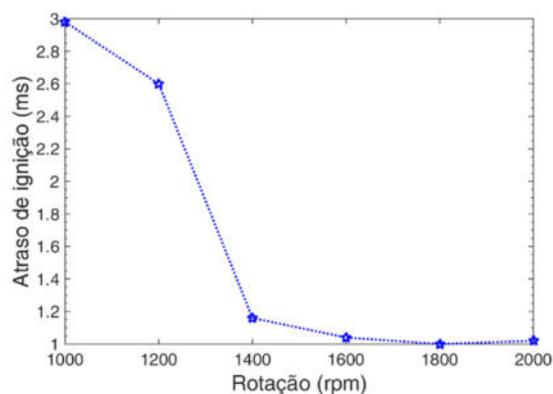


Figura 10. Gráfico rotação do motor x atraso de ignição.



## 5.2 Análise dos testes com proporções variadas

Seguindo o mesmo princípio, foram realizados testes utilizando Diesel com três proporções distintas de biodiesel, ou seja, 10% (B10), 20% (B20) e 50% (B50). Os resultados obtidos são mostrados em dois gráficos. Na Figura 11, a temperatura de funcionamento do motor estava abaixo do seu valor ideal, principalmente quanto ao B10 que foi o primeiro a ser utilizado.

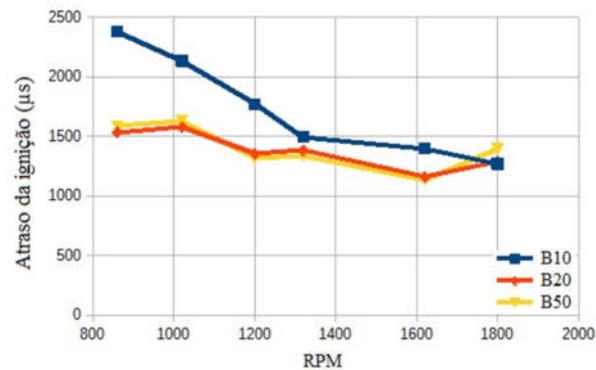


Figura 11. Gráfico rotação x atraso de ignição comparativo realizado em temperatura de funcionamento do motor abaixo do ideal.

Os testes realizados na sequencia onde os valores obtidos são mostrados no gráfico da Figura 12 diferenciaram do anterior apenas pelo fato do motor funcionar na temperatura ideal, em torno de 77 °C, para cada combustível utilizado.

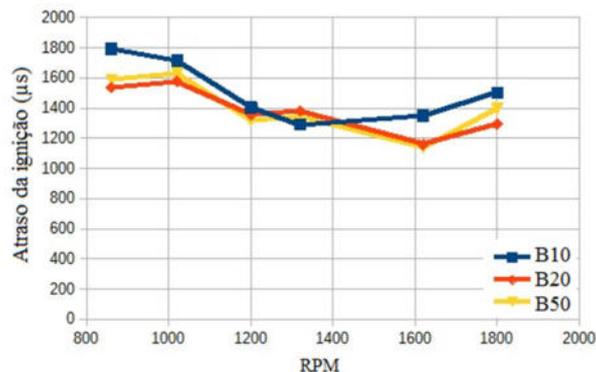


Figura 12. Gráfico rotação x atraso de ignição comparativo realizado em temperatura de funcionamento ideal do motor em torno de 77 °C.

Analisando ambos os gráficos, três fatos nos chamou a atenção de imediato: o primeiro deles é que os resultados obtidos em específico para o B10 mostram que o atraso da ignição se reduz com o aumento da temperatura do motor, fato que pode ser visto ao compararmos as curvas obtidas com B10 nas Figuras 11 e 12, respectivamente; o segundo é que houve um comportamento das curvas bem parecidos principalmente ao compararmos o B20 com o B50, geralmente seguindo uma redução no atraso com o aumento da rotação; terceiro fato é que



não houve uma variação crescente ou decrescente no atraso da ignição quando comparamos os três combustíveis utilizados em ordem crescente de proporção, ou seja, esperávamos que o B10 descrevesse um curva acima, o B20 uma curva intermediária e o B50 uma curva abaixo ou então ocorresse o inverso.

## 6. Conclusão

A técnica utilizada aqui ainda está em aprimoramento e requer um maior número de testes seguidos de comparação com outros resultados já conhecidos na literatura. No entanto, o uso da técnica de análise de vibração a partir do uso do sensor piezoelétrico mostrou-se viável para o estudo do retardamento de ignição em motores de combustão interna do ciclo Diesel tendo estes um ou mais cilindros.

De acordo com [6], um aumento na velocidade do motor com carga constante resulta em uma leve diminuição no atraso de ignição quando medido em milissegundos. Este fato pode ser observado nos resultados encontrados expressos nos gráficos. Um aumento na temperatura de funcionamento do motor também reduz o atraso da ignição. Quanto aos demais fatores que influenciam o atraso de ignição de acordo com [5, 6] não puderam ser avaliados neste estudo e, portanto, poderão ser objeto de análise em futuras investigações.

O custo envolvido no experimento é muito baixo. O sensor de detonação é fabricado em grande escala e utilizado em motores do ciclo Otto. Possui baixo custo, fácil aquisição e simples de ser instalado. Os componentes eletrônicos utilizados na construção dos circuitos de condicionamento dos sinais envolvendo filtragem, amplificação, comparação e processamento seguem os aspectos acima citados.

Outra questão importante que deve ser mencionada é que os testes não são invasivos e não interferem no projeto original do motor seja de ordem mecânica, elétrica ou eletrônica e em sua integridade física.

Esperamos que nossa contribuição neste estudo sirva de base para melhorar ainda mais a técnica aqui desenvolvida. As vantagens que podemos ver são o fato de ser uma técnica não invasiva, de fácil execução, baixo custo e que poderá contribuir em pesquisas futuras.

## 7. Agradecimentos

Prestamos nossos agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES, Universidade Federal da Paraíba-UFPB e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia-IFBA e também de Alagoas-IFAL.

## REFERÊNCIAS

[1] Dentom, T. Advanced Automotive Fault Diagnosis. Automotive Technology: vehicle maintenance and repair. 4th Ed. Routledge, Taylor & Francis Group – London and New York, 2017.



- [2] Deng, F., et al. Ignition Delay Time and Chemical Kinetic Study of Methane and Nitrous Oxide Mixtures at High Temperatures. *Energy Fuels*, 2016;30: 1415-1427.
- [3] Freitas, V. and SILVA, J.. Sensor de Vibração Mecânica Utilizando Plataforma Arduino e Material Piezoelétrico. Mossoró-RN, 2017.
- [4] Guedes, A. D. M.. Experimental Study on the Impact of Ethanol on Diesel-Biodiesel-Ethanol Blends on Compression Ignition Engines [Dissertation]. Rio de Janeiro, Brazil: Pontifical Catholic University-PUC-RJ, 2017.
- [5] Gupta, H. N.. Fundamentals of Internal Combustion Engines. 2<sup>a</sup>. ed. India: Prentice-Hall, 2009.
- [6] Heywood, J.B.. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill; 1988.
- [7] Lata, D.B. and Misra, A.. Analysis of ignition delay period of a dual fuel Diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. *International journal of hydrogen energy* v. 36 (2011), p. 3746 a 3756.
- [8] Martins, J.. Motores de Combustão Interna. Porto-Portugal: Publindústria, 2016.
- [9] Nusc, Technology Monograph, Handbook for the Analysis of Piezoelectric Transducers, 1978.
- [10] Oliveira, A., et al. Combustion characteristics, performance and emissions from a Diesel power generator fuelled by B7-ethanol blends. *Fuel Processing Technology*, 2015;139: 67–72
- [11] Oppenheim, A. V. & Willsky, A. S.. Sinais e sistemas. 2<sup>a</sup> Ed. Perarson: São Paulo, 2010.
- [12] Pasqualette, M. A., et al. Methods for the determination of ignition delay in a marine Diesel engine operating with marine Diesel oil. Proceedings of the 8th National Congress of Mechanical Engineering-CONEM 2014, Ago 10-15; Uberlândia, Brazil.
- [13] Shahabuddin, M., et al. Ignition delay, combustion and emission characteristics of Diesel engine fueled with biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013; 21: 623–632.
- [14] Stone, R. Introduction to Internal Combustion Engines. 3th ed. Macmillan Press LTD – London, 1999.
- [15] Texas Instruments, Handbook of Operational Amplifiers Applications. Outubro de 2001. Revisado em Outubro de 2016.
- [16] Zhao, H.. Advanced direct injection combustion engine technologies and development. New York: CRC Press, v. 2: Diesel engines, 2009.



## CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL: UM ESTUDO PRELIMINAR SOBRE CORRELAÇÕES ENTRE DADOS DE ANÁLISE ELEMENTAR E TEOR DE CELULOSE, HEMICELULOSE E LIGNINA

Stella Borges de Melo <sup>1</sup>, Isabele de Farias Barros <sup>2</sup>, Enio Oliveira de Souza <sup>2</sup>, Diego M. Yepes Maya <sup>2</sup>, Diego Carneiro de Oliveira <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturais (IRN), Universidade Federal de Itajubá, Brasil – [d2022010150@unifei.edu.br](mailto:d2022010150@unifei.edu.br).

<sup>2</sup> Instituto de Engenharia Mecânica (IEM), Universidade Federal de Itajubá, Brasil – [d2021001827@unifei.edu.br](mailto:d2021001827@unifei.edu.br); [d2020007890@unifei.edu.br](mailto:d2020007890@unifei.edu.br); [diegoyepes@unifei.edu.br](mailto:diegoyepes@unifei.edu.br); [diego.oliveira@unifei.edu.br](mailto:diego.oliveira@unifei.edu.br)

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo identificar possíveis correlações entre propriedades obtidas durante o processo de caracterização de biomassa, de modo que a partir da análise elementar de uma amostra (C, H, N, S, O) se possa determinar os seus respectivos teores de celulose, hemicelulose e lignina. O trabalho consistiu no levantamento de dados de caracterização extraídos da plataforma Phyllis e da literatura, bem como no processamento destes com o auxílio de um software estatístico. Os dados foram separados por tipos de biomassa: gramíneas, cascas, resíduos e lenhas, e uma análise de significância da correlação entre os dados da análise elementar e suas relações foi feita com os valores de celulose, hemicelulose e lignina, sendo aqueles mais significantes: C/(O+H), C/(H+O+N) para celulose, C/(O+H) e (C+H)/O para a lignina e (C+H)/O e O/(C+H+N) para hemicelulose. Um comportamento linear significativo foi identificado entre os valores de celulose hemicelulose. O tipo de biomassa se mostrou um parâmetro irrelevante quanto ao seu impacto nos teores de celulose, hemicelulose e lignina. Após a análise de correlação, funções foram geradas para estimar os valores da análise composicional a partir das relações identificadas. Por fim, entende-se que a correlação almejada neste trabalho se trata de um problema de natureza multifatorial. Deste modo, os valores de R<sup>2</sup> encontrados não apresentaram valores satisfatórios (próximos a 1). Entretanto, os valores desejados foram calculados de forma preliminar, tendo como resposta os seguintes desvios: 6.68 para celulose, 7.75 para lignina e 5.88 para hemicelulose.

**Palavras-Chave:** *Análise Elementar; Análise Composicional; Metodologia de Correlação; Correlação de Dados.*

### 1. INTRODUÇÃO

A caracterização de biomassa é um passo importante na avaliação de propriedades físicas e químicas de diferentes fontes, o que é fundamental para determinar sua aplicação para propósitos energéticos através do aprimoramento de processos de conversão independentemente da rota escolhida (termoquímica, bioquímica ou química), auxiliando por exemplo na predição dos produtos que serão gerados. Nesse contexto, existem diversas técnicas que podem ser empregadas no processo de caracterização de biomassas, de acordo com as propriedades que se deseja avaliar, sejam estas físicas (e.g. tamanho de partícula, friabilidade, fluidez, etc.) ou químicas (composição elementar, composição imediata, teor energético, etc.) [1]. A análise composicional das frações celulose, hemicelulose e lignina



desempenha um papel crucial na escolha de rotas específicas de conversão energética da biomassa. Esses componentes são os principais constituintes da biomassa lignocelulósica e têm características químicas distintas que afetam diretamente a eficiência e os produtos resultantes dos processos de conversão [2].

Em termos morfológicos, a composição de biomassas lignocelulósicas é caracterizada pela presença predominante de três componentes principais: celulose, hemicelulose e lignina. A celulose é um polímero linear abundante em vegetais uma vez que constitui a estrutura básica das paredes celulares das plantas. Esta é composta por cadeias de glicose organizadas de modo a conferir resistência e rigidez ao material vegetal [3]. Por ser um polissacarídeo composto por cadeias de glicose, a celulose se torna uma fonte valiosa de açúcares fermentáveis. A análise da composição da celulose na biomassa ajuda a determinar a disponibilidade desta para a hidrólise enzimática, um processo que transforma a celulose em açúcares simples que podem ser fermentados para a produção de biocombustíveis, como etanol [4].

A hemicelulose, por sua vez, é uma mistura de polissacarídeos mais complexa, que inclui xilanos, arabinoxilanos, mananos, galactanos e outros. Ela preenche os espaços entre as fibrilas de celulose, conferindo flexibilidade e coesão à biomassa [5]. A análise da composição da hemicelulose permite identificar as proporções relativas desses açúcares na biomassa e avaliar a facilidade com a qual estes podem se degradar. Essas informações são essenciais para a escolha adequada das enzimas e condições de reação para a hidrólise da hemicelulose, bem como para a otimização de processos de fermentação [4,6].

Por fim, a lignina é um composto fenólico que confere rigidez e impermeabilidade às células vegetais. Sua presença é essencial para a sustentação das plantas, mas pode representar um desafio na produção de biocombustíveis e outros produtos a partir de biomassa, devido à sua resistência à degradação [7]. A proporção relativa desses componentes varia entre diferentes espécies vegetais e partes da planta, impactando sua composição química e influenciando seu comportamento durante processos de conversão energética [8,9]. A análise da composição da lignina auxilia na compreensão da estrutura e reatividade da biomassa, sendo crucial para a escolha de rotas de conversão específicas como a pirólise [10]. Durante processos de conversão termoquímica, as biomassas com alta proporção de lignina são desejáveis, enquanto a hidrólise enzimática é mais eficaz em materiais com baixos teores de lignina [11].

É possível afirmar, portanto, que a análise composicional das frações celulose, hemicelulose e lignina de biomassas fornece informações cruciais para a seleção de rotas específicas de



conversión energética. Comprender a composição desses componentes permite otimizar os processos de hidrólise, fermentação e termoquímicos, direcionando os esforços para a produção eficiente de biocombustíveis, bioenergia e produtos químicos renováveis, contribuindo assim para uma abordagem mais sustentável no aproveitamento da biomassa. Entretanto os métodos para se obter a análise composicional da biomassa podem ser custosos e complexos.

Como exemplo, nos procedimentos descritos por Foster, Martin e Pauly [12,13], as paredes celulares (lignocelulósicas) da biomassa são isoladas a partir da amostra seca e então divididas em pequenas amostras para diferentes testes. O material da parede é tratado com brometo de acetila e a lignina solubilizada é quantificada por espectroscopia UV. Para a determinação da composição da lignina, o material da parede é submetido à tratamento com ácido. Os compostos fenólicos solubilizados passam por um processo cromatográfico chamado de derivatização TMS (trimetilsilila), uma reação química que modifica os compostos originais, gerando produtos que são mais bem detectados na cromatografia. Assim os compostos podem ser separados e quantificados por análise de GC-MS. A composição de polissacarídeos da matriz celular é estabelecida através do tratamento do material com ácido fraco, no qual os monossacarídeos são solubilizados e posteriormente analisados por GC-MS. A celulose insolúvel é separada após lavagem com um reagente específico, e em seguida, solubilizada em ácido sulfúrico e quantificada através de um ensaio colorimétrico para determinar o teor de glicose.

Entretanto, existem na literatura alguns estudos de correlações entre outras propriedades da biomassa, que possuem potencial correlação com a análise composicional, como por exemplo a composição elementar (C,H,N,S,O). Ferramentas como essa são criadas para minimizar o consumo de tempo e recursos durante a execução da análise composicional de um número grande de biomassas. Como exemplo, Parikh, Channiwala e Ghosal [14] desenvolveram uma correlação entre análise imediata e análise elementar para a produção de um modelo simplificado para a previsão da composição elementar a partir da análise imediata simples. Os mesmos autores desenvolveram anteriormente uma correlação para o cálculo de poder calorífico de biomassas através da análise imediata [15]. De forma similar, um modelo matemático foi desenvolvido para prever a análise composicional da biomassa a partir de dados de análise elementar/imediata, utilizando mapas auto-organizados (SOMs) [6]. Outros trabalhos utilizam redes neurais para prever a análise composicional de biomassas a partir dos dados de análise imediata [16]. Os mapas auto-organizáveis diferem de outras redes neurais artificiais, pois aplicam aprendizado competitivo em vez de aprendizado por correção de erro, e no sentido de que utilizam uma função de vizinhança para preservar as propriedades topológicas do espaço



de entrada [17]. O uso de uma ou outra ferramenta depende de uma série de fatores como as entradas e saídas de informações, bem como a modelagem [18].

O presente trabalho tem como objetivo identificar de forma preliminar possíveis correlações entre propriedades medidas durante o processo de caracterização de biomassa, de modo que a partir da análise elementar de uma amostra (C, H, N, S, O) se possa determinar os seus respectivos teores de celulose, hemicelulose e lignina através de funções de correlação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo utilizou dados de biomassas extraídos da plataforma *Phyllis®* [19] e outros dados da literatura [6], para analisar propriedades como carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio das amostras.

Os dados foram classificados de acordo com os tipos de biomassa e uma análise estatística foi realizada para identificar correlações com celulose, hemicelulose e lignina. As correlações encontradas foram registradas no Anexo I e os dados foram exportados para o software estatístico Jamovi®. Foram aplicados testes estatísticos, como o coeficiente de correlação de determinação, de Pearson e o p-valor, para avaliar a significância das correlações encontradas. O software estatístico também permitiu a geração de gráficos para visualização das relações.

### 2.1. Obtenção de dados para Análise Elementar e Lignocelulósica

Foram coletados dados de caracterização de biomassa reportados na literatura [6,19]. As propriedades obtidas durante o processo de caracterização incluíram os teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O) presentes na biomassa. A classificação é um método importante para avaliar as características das biomassas, uma vez que uma biomassa que pertence a um determinado grupo tem comportamento semelhante, independentemente do seu tipo. Os dados foram separados de acordo com os tipos de biomassa, como gramíneas, cascas, resíduos e lenhas, sendo identificadas como 1,2,3 e 4, respectivamente. Em seguida, foi realizada uma análise estatística para identificar a significância de correlações entre as propriedades medidas e os teores de celulose, hemicelulose e lignina. A Tabela 1 apresenta os dados das amostras de biomassa coletadas da plataforma *Phyllis®* [19].



Tabela 1. Biomassas extraídas da plataforma *Phyllis@* [19] e seus códigos de referência, respectivamente.

<i>Biomassa</i>	Código	<i>Biomassa</i>	Código	<i>Biomassa</i>	Código
<i>Banagrass</i>	1299	<i>Hazelnut seedcoat</i>	976	<i>Corn stover</i>	889
<i>Timothy grass</i>	2911	<i>Olive husk</i>	2316	<i>Corn stover</i>	981
<i>Bamboo</i>	2065	<i>Olive husk</i>	2071	<i>Corn stover</i>	890
<i>Bamboo Sawdust</i>	2822	<i>Macadamia nut shell</i>	2073	<i>Wood, alder</i>	2063
<i>Tobacco leaf</i>	984	<i>Oat hull</i>	2075	<i>Wood, birch</i>	2066
<i>Tobacco stalk</i>	985	<i>Rice hulls</i>	2078	<i>Wood, pine</i>	2077
<i>Switchgrass</i>	2426	<i>Sunflower shell</i>	2317	<i>Wood, spruce</i>	2079
<i>Switchgrass</i>	2428	<i>Sunflower seed hull</i>	2080	<i>Wood, douglas fir</i>	2842
<i>Switchgrass</i>	2436	<i>Walnut shell</i>	2081	<i>Wood, oriental spruce</i>	982
<i>Flax straw</i>	2910	<i>Walnut shell</i>	2318	<i>Wood, oak</i>	2074
<i>Rice straw</i>	2818	<i>Tea waste</i>	2909	<i>Wood, pyrenean oak &lt;20mm</i>	2852
<i>Wheat straw</i>	2908	<i>Garlic waste</i>	2070	<i>Wood, pyrenean oak &gt;70mm</i>	2854
<i>Bark</i>	978	<i>Sugarcane bagasse</i>	2278	<i>Wood, pyrenean oak 20-70 mm</i>	2853
<i>Almond shell</i>	1109	<i>Sugarcane bagasse</i>	2342	<i>Wood, eucalyptus</i>	2069
<i>Almond shell</i>	2064	<i>Spent coffee</i>	1788	<i>Wood, ailanthus</i>	986
<i>Almond shell</i>	2314	<i>Oil palm</i>	2897	<i>Wood, catalpa</i>	1443
<i>Coconut shell</i>	2067	<i>Tea waste</i>	980	<i>Wood, poplar</i>	1790
<i>Hazelnut shell</i>	975	<i>Corn cob</i>	979		
<i>Hazelnut shell</i>	2315	<i>Corn cob</i>	2068		

A fim de estabelecer correlações entre as composições elementares e estruturais, a fórmula molecular da celulose, hemicelulose e lignina ( $C_6H_{10}O_5$ ) foi analisada. Os valores percentuais de cada elemento estrutural, C, H, O e N, foram convertidos para mols, uma unidade mais adequada para análises estatísticas. Essa conversão permitiu uma comparação direta entre diferentes propriedades e estabeleceu uma base uniforme para a busca de correlações. As correlações resultantes foram registradas no Anexo I, onde é possível analisar as relações entre os teores de celulose, hemicelulose e lignina com os elementos C, H, O e N. Em seguida, os dados foram exportados para uma ferramenta de análise estatística (Jamovi®) ideal para explorar as relações entre as variáveis, que pode ser utilizado para dados obtidos arbitrariamente ou para dados agrupados, que possuem características específicas. Foi utilizada a regressão linear durante a análise dos dados, por se apresentar como um método confiável e rápido em termos de recursos computacionais, sendo ideal para o processamento de dados que não possuem um padrão de



comportamento. Por fim, foram realizadas análises utilizando as correlações encontradas com o objetivo de identificar sua significância em relação aos teores de celulose, hemicelulose e lignina. O *software* possibilitou a aplicação de testes estatísticos apropriados, como o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson e o p-valor, além da geração de gráficos para visualizar as relações.

## 2.2. Metodologia de Análise das Propriedades da Biomassa

O coeficiente de correlação de Pearson, denominado como R, visa obter a associação entre duas variáveis distintas, de tal forma que se torna possível a determinação da relação entre as variáveis, avaliando a influência de uma variável com relação a outra. O valor de R varia de -1 a 1, onde valores próximos a 1 indicam uma relação linear positiva, valores próximos a -1 indicam uma relação linear negativa, e valores próximos a 0 indicam a ausência de correlação linear entre as variáveis [20].

Durante a análise dos dados da correlação, foi empregado o uso do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que indica a proporção da variância da variável dependente, sendo atribuída estatisticamente ao conhecimento de outras variáveis independentes [21]. De tal forma, a utilização do coeficiente se torna indispensável na determinação da quantidade de variação dos dados, indicando a porcentagem de variação das variáveis dependentes (y) em relação às variáveis independentes (x).

O p-valor, também utilizado durante as correlações, se torna importante durante a análise da compatibilidade entre as variáveis observadas. Isso é considerado como uma probabilidade, onde, quanto maior o seu valor, maior será a incompatibilidade encontrada entre as variáveis observadas e a sua hipótese nula [22].

Além das correlações propostas pelo trabalho, há outro método descrito previamente por Nimmanterdwong, Chalermisinsuwan e Piumsomboon [6] que consiste na utilização de mapas auto-organizáveis (SOMs), utiliza inteligência artificial capaz de fazer relações entre as composições elementares de diversas biomassas por meio das razões de VM/C (*volatile matter/carbon*), VM/H (*volatile matter/hydrogen*), VM/O (*volatile matter/oxygen*), FC/C (*fixed carbon/carbon*), FC/H (*fixed carbon/hydrogen*), FC/O (*fixed carbon/oxygen*) e ASH/O (*ashes/oxygen*) e, posteriormente, integrá-los a um modelo de regressão (MLR), com o objetivo de se obter a conexão entre os parâmetros inseridos para a análise aproximada e os parâmetros de saída obtidos para os teores de celulose, hemicelulose e lignina.

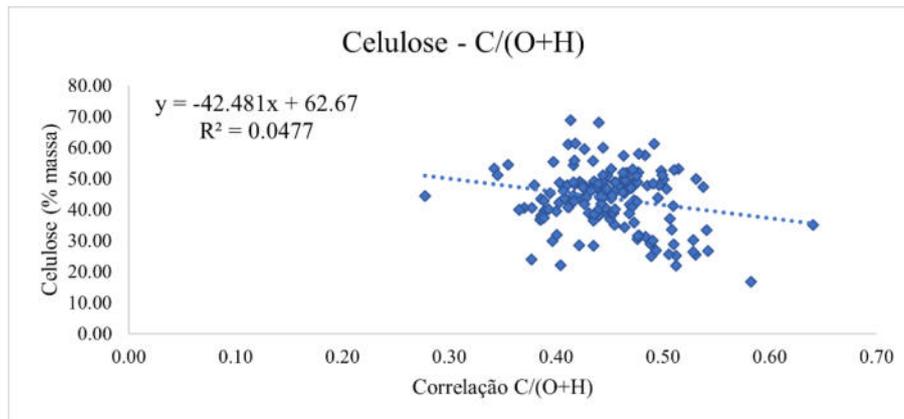


### 3. RESULTADOS

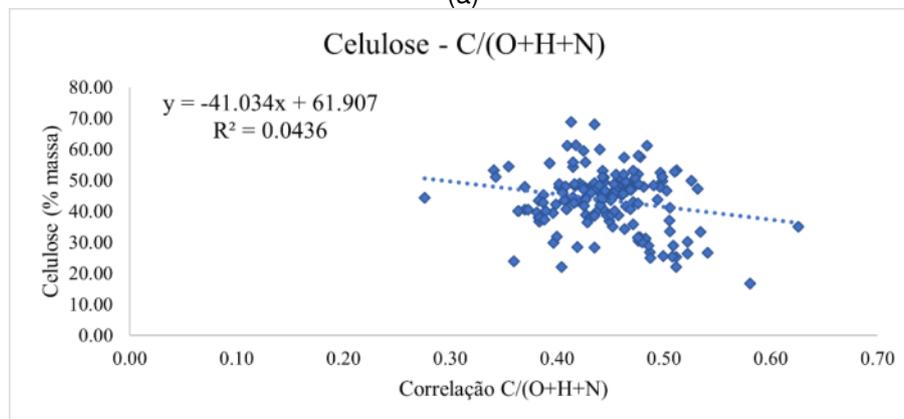
Na Tabela 1, são apresentadas as composições elementares e lignocelulósicas das amostras de biomassa coletadas da plataforma *Phyllis@* [19]. Os valores foram padronizados e as biomassas foram agrupadas em categorias diferentes de acordo com suas características morfológicas, sendo elas gramíneas, cascas, resíduos e lenhas. Esses resultados evidenciaram que as biomassas dentro de cada grupo compartilham teores semelhantes de celulose, hemicelulose e lignina, devido às suas propriedades e estruturas semelhantes.

De acordo com o Anexo I, para a celulose, as correlações mais significativas foram encontradas em  $C/(O+H)$ , apresentando um coeficiente de Pearson de -0.222, e  $C/(O+H+N)$ , apresentando um coeficiente de Pearson de -0.209. Em relação à lignina, as correlações mais significativas foram observadas em  $C/(O+H)$  e  $(C+H)/O$ , ambas apresentando um coeficiente de Pearson de 0.269. Da mesma forma, considerando o Anexo I, a hemicelulose demonstrou uma significância menor em comparação à celulose e lignina. As correlações mais relevantes foram identificadas em  $(C+H)/O$ , com um coeficiente de Pearson de -0.183, e  $O/(C+H+N)$ , com um coeficiente de Pearson de 0.155. Pelos dados coletados, amostras de biomassa das mesmas famílias, mas coletadas em localizações distintas ou que receberam tratamentos diferentes, podem possuir variações em suas propriedades. Em contraste, biomassas de diferentes famílias podem possuir composições semelhantes. Portanto, é difícil interpretar as correlações entre a biomassa, componentes estruturais e análise elemental/imediata sem classificação de dados. Essa constatação indica que as correlações identificadas são aplicáveis a diferentes tipos de biomassa. A análise do coeficiente de Pearson permitiu identificar as melhores correlações para cada um dos componentes presentes nas estruturas da biomassa.

As Figuras 1,2 e 3 ilustram o comportamento linear dos gráficos de correlação com os teores de celulose, lignina e hemicelulose. Entretanto, devido à natureza multifatorial das correlações envolvidas, as funções utilizadas não apresentam valores satisfatórios de  $R^2$  próximos a 1. Esses resultados indicam que os teores de celulose, hemicelulose e lignina no diagrama de dispersão estão distantes da reta de regressão, evidenciando a ausência de uma estrutura linear clara entre essas variáveis. Isso sugere a presença de outros fatores ou interações complexas que influenciam esses teores, além dos relacionamentos lineares simples.

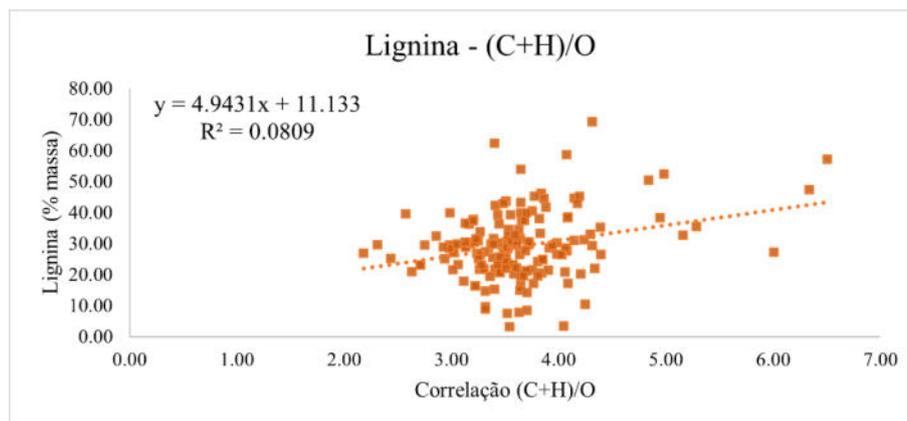


(a)



(b)

Figura 1: (a) Correlação entre C/(O+H) e Celulose e (b) C/(O+H+N) e Celulose.



(a)

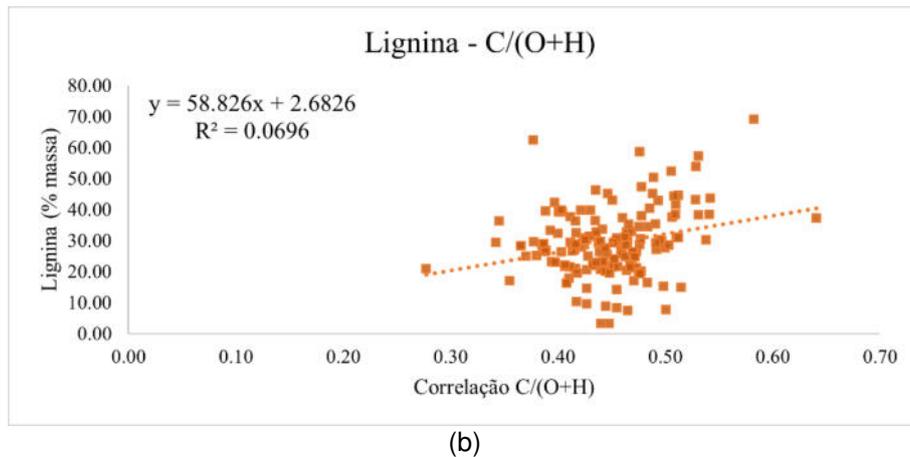


Figura 2: (a) Correlação entre (C+H)/O e Lignina e (b) C/(O+H) e Lignina.

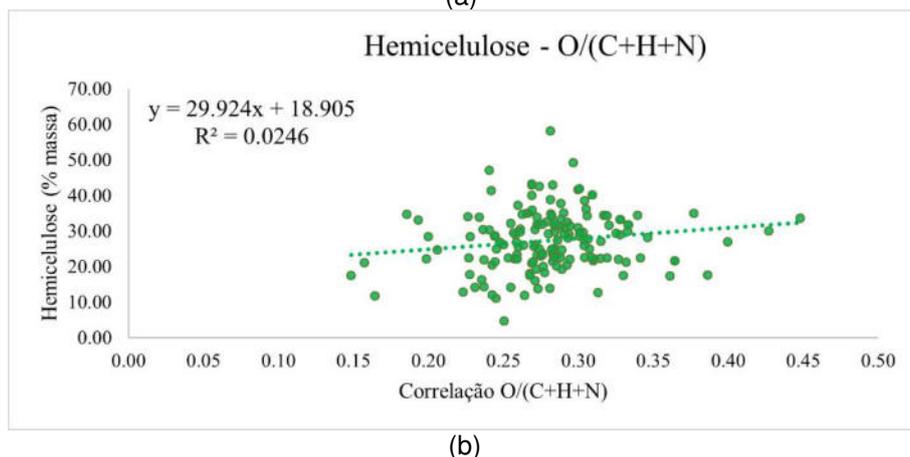
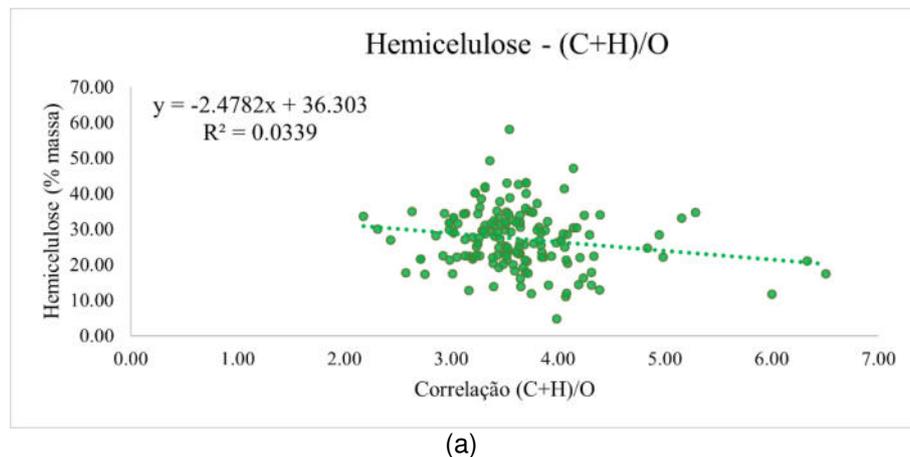


Figura 3: (a) Correlação entre (C+H)/O e Hemicelulose e (b) O/(C+H+N) e Hemicelulose.

As correlações utilizadas para a estimativa preliminar dos teores de celulose, lignina e hemicelulose foram obtidas a partir das dispersões de dados nos gráficos apresentados. Essas



correlações foram aplicadas substituindo os valores de  $x$  pelas correlações específicas correspondentes, conforme indicado no Anexo I. Ao realizar os cálculos, foram obtidos desvios em relação aos valores esperados. Para a celulose, o desvio foi de 6.68; para a lignina, o desvio foi de 7.75; e para a hemicelulose, o desvio foi de 5.88. Esses desvios representam as diferenças entre os valores estimados por meio das funções obtidas e os valores reais dos teores de celulose, lignina e hemicelulose. As correlações específicas  $(C+H)/O$ ,  $O/(C+H+N)$ ,  $C/(O+H)$  e  $C/(O+H+N)$  desempenham um papel fundamental na análise da composição química e estrutural da biomassa, fornecendo informações sobre a presença e a relação entre carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, bem como sobre grupos funcionais específicos, composição nutricional e capacidade de decomposição da biomassa.

Em resumo, essas correlações específicas desempenham um papel crucial na caracterização e compreensão da biomassa, permitindo estimativas preliminares de seus componentes celulose, lignina e hemicelulose, e contribuindo para uma melhor compreensão de suas propriedades e usos potenciais.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo identificar correlações entre propriedades medidas durante o processo de caracterização de biomassa, a fim de determinar os teores de celulose, hemicelulose e lignina com base na análise elementar. No entanto, ao realizar uma análise preliminar das correlações, os resultados obtidos revelaram valores baixos para os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e de Pearson, o que indica que as correlações identificadas até o momento não são satisfatórias para explicar plenamente a relação entre a análise elementar e os teores dos componentes da biomassa. No entanto, foram observadas significâncias estatísticas no  $p$ -valor, o que indica que os resultados são estatisticamente significativos e, portanto, rejeita-se a hipótese nula. Essa constatação é de extrema importância, pois evidencia a necessidade de realizar uma investigação mais detalhada sobre o assunto, estimulando a realização de pesquisas adicionais. Portanto, para estabelecer uma correlação mais precisa e confiável entre a análise elementar e os teores de celulose, hemicelulose e lignina, são necessárias investigações adicionais. Seria pertinente explorar possíveis fatores de correção ou variáveis adicionais que possam influenciar a relação entre as propriedades medidas e os componentes da biomassa. Por fim, é importante ressaltar que a correlação desejada neste estudo é de natureza multifatorial e, portanto, complexa. Os resultados preliminares, embora insatisfatórios em termos de valores dos coeficientes de determinação e de Pearson, fornecem uma base para futuras pesquisas e refinamentos na busca por uma correlação mais precisa e confiável. Esses



esforços adicionais podem contribuir para um melhor entendimento das propriedades da biomassa e auxiliar no desenvolvimento de modelos preditivos mais robustos para estimar os teores de celulose, hemicelulose e lignina com base na análise elementar.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq., Brasil pelo apoio financeiro do projeto No. 403582/2021-0; Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 18/2021 - Faixa A - Grupos Emergentes.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Cai, Y. He, X. Yu, S.W. Banks, Y. Yang, X. Zhang, Y. Yu, R. Liu, A. V Bridgwater, Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass, *76* (2017) 309–322.
- [2] Z. Anwar, M. Gulfranz, M. Irshad, Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* *7* (2014) 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003>.
- [3] T. Huber, J. Müssig, O. Curnow, S. Pang, S. Bickerton, M.P. Staiger, A critical review of all-cellulose composites, *J. Mater. Sci.* *47* (2012) 1171–1186. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5774-3>.
- [4] H. Zabed, J.N. Sahu, A.N. Boyce, G. Faruq, Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass : An overview on feedstocks and technological approaches, *Renew. Sustain. Energy Rev.* *66* (2016) 751–774. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.038>.
- [5] X. Zhou, W. Li, R. Mabon, L.J. Broadbelt, A critical review on hemicellulose pyrolysis, *Energy Technol.* *5* (2017) 52–79. <https://doi.org/10.1002/ente.201600327>.
- [6] P. Nimmanterdwong, B. Chalermstinsuwan, P. Piumsomboon, Prediction of lignocellulosic biomass structural components from ultimate/proximate analysis, *Energy.* *222* (2021) 119945. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119945>.
- [7] C. Chio, M. Sain, W. Qin, Lignin utilization: A review of lignin depolymerization from various aspects, *Renew. Sustain. Energy Rev.* *107* (2019) 232–249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.008>.
- [8] L. Zhu, Z. Zhong, Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on biomass pyrolysis kinetics, *Korean J. Chem. Eng.* *37* (2020) 1660–1668. <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0553-y>.
- [9] S. V. Vassilev, C.G. Vassileva, Y.C. Song, W.Y. Li, J. Feng, Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion, *Fuel.* *208* (2017) 377–409. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.036>.
- [10] S. Wang, G. Dai, H. Yang, Z. Luo, Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review, *Prog. Energy Combust. Sci.* *62* (2017) 33–86.



- <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>.
- [11] R.A. Lee, J.M. Lavoie, From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity, *Anim. Front.* 3 (2013) 6–11. <https://doi.org/10.2527/af.2013-0010>.
- [12] C.E. Foster, T.M. Martin, M. Pauly, Comprehensive Compositional Analysis of Plant Cell Walls ( Lignocellulosic biomass ) Part II : Carbohydrates, (2010) 10–13. <https://doi.org/10.3791/1837>.
- [13] C.E. Foster, T.M. Martin, M. Pauly, Comprehensive compositional analysis of plant cell walls (Lignocellulosic biomass) part I: Lignin, *J. Vis. Exp.* (2010). <https://doi.org/10.3791/1745>.
- [14] J. Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal, A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials, *Fuel.* 86 (2007) 1710–1719. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.029>.
- [15] J. Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal, A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, *Fuel.* 84 (2005) 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>.
- [16] F. Kartal, U. Özveren, An improved machine learning approach to estimate hemicellulose, cellulose, and lignin in biomass, *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.* 2 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100148>.
- [17] A. Ralhan, *Self Organizing Maps*, (2018).
- [18] V. Gholami, M.R. Khaleghi, S. Pirasteh, M.J. Booij, Comparison of Self-Organizing Map, Artificial Neural Network, and Co-Active Neuro-Fuzzy Inference System Methods in Simulating Groundwater Quality: Geospatial Artificial Intelligence, *Water Resour. Manag.* 36 (2022) 451–469. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02969-2>.
- [19] E. 7th F. Programme, *Phyllis2*, (2023). <https://phyllis.nl/> (accessed June 1, 2023).
- [20] P. Schober, C. Boer, L.A. Schwarte, Correlation Coefficients, *Anesth. Analg.* 126 (2018) 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>.
- [21] A. Shaw, X. Zhang, S. Jia, J. Fu, L. Lang, R.C. Brown, Mechanistic investigation of char growth from lignin monomers during biomass utilisation, *Fuel Process. Technol.* 239 (2023) 107556. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107556>.
- [22] S.R. Práticas, Saúde e Ambiente A SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA E O USO DO P-VALOR EM PESQUISAS NA SAÚDE : STATISTICAL SIGNIFICANCE AND THE USE OF P-VALUE IN Palavras-chave, (2022). <https://doi.org/10.17564/2316-3798.2022v9n1p230-239>.



ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Correlações. Fonte: Jamovi®.

Matriz de Correlações

		Cel	Hemi	Lig	Tipo	C/(O+H)	C/(O+H+N)	(C+H)/O	O/(C+H)	O/(C+H+N)	(C+H)/(C+H+O+N)
Celulose	Pearson's r	-									
	p-value	-									
Hemicelulose	Pearson's r	-0.260***	-								
	p-value	< .001	-								
Lignina	Pearson's r	-0.678***	-0.534***	-							
	p-value	< .001	< .001	-							
Tipo	Pearson's r	0.130	-0.143	-0.005	-						
	p-value	0.098	0.063	0.953	-						
C/(O+H)	Pearson's r	-0.222**	-0.099	0.269***	0.246**	-					
	p-value	0.004	0.208	< .001	0.001	-					
C/(O+H+N)	Pearson's r	-0.209**	-0.089	0.251**	0.266***	0.995***	-				
	p-value	0.007	0.256	0.001	< .001	< .001	-				
(C+H)/O	Pearson's r	-0.148	-0.183*	0.269***	0.213**	0.519***	0.512***	-			
	p-value	0.059	0.019	< .001	0.006	< .001	< .001	-			
O/(C+H)	Pearson's r	0.118	0.149	-0.217**	-0.272***	-0.576***	-0.580***	-0.944***	-		
	p-value	0.132	0.057	0.005	< .001	< .001	< .001	< .001	-		
O/(C+H+N)	Pearson's r	0.101	0.155*	-0.207**	-0.259***	-0.570***	-0.572***	-0.947***	0.997***	-	
	p-value	0.196	0.048	0.008	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	-	
(C+H)/(C+H+O+N)	Pearson's r	-0.084	-0.130	0.172*	0.276***	0.556***	0.565***	0.936***	-0.983***	-0.979***	-
	p-value	0.287	0.097	0.027	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	-



## MEJORA EN LA HUELLA DE CARBONO MEDIANTE EL USO DE ENERGIA GEOTERMICA PARA CONFORT DE AMBIENTES

Julian Torres<sup>1</sup>, Miguel Benegas<sup>2</sup>, Jorge Camblong<sup>3</sup>, Enrique Modai<sup>4</sup> e Ignacio Luis Bisso<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) - Gutiérrez 1150  
Los Polvorines, Pcia de Bs.As., Argentina - [jtorres@campus.ungs.edu.ar](mailto:jtorres@campus.ungs.edu.ar)

<sup>2</sup> Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) - Gutiérrez 1150  
Los Polvorines, Pcia de Bs.As., Argentina - [mbenegas@campus.ungs.edu.ar](mailto:mbenegas@campus.ungs.edu.ar)

<sup>3</sup> Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) - Gutiérrez 1150  
Los Polvorines, Pcia de Bs.As., Argentina - [jcamblong@campus.ungs.edu.ar](mailto:jcamblong@campus.ungs.edu.ar)

<sup>4</sup> Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) - Gutiérrez 1150  
Los Polvorines, Pcia de Bs.As., Argentina - [emodai@campus.ungs.edu.ar](mailto:emodai@campus.ungs.edu.ar)

<sup>5</sup> Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) - Gutiérrez 1150  
Los Polvorines, Pcia de Bs.As., Argentina - [ibisso@campus.ungs.edu.ar](mailto:ibisso@campus.ungs.edu.ar)

### RESUMEN

Hace varios años que el mundo pone foco en la eficiencia energética. Automóviles que consumen menos combustible con mayor autonomía, luminarias LED que superan incluso a las lámparas tradicionales, electrodomésticos significativamente más silenciosos y eficientes, son solo algunos ejemplos.

Sin embargo, existen otras tecnologías, que si bien son conocidas hace muchos años, su aplicación aún no ha sido lo suficientemente difundida, dejando así un potencial espacio para su aplicación. Tal es el caso de la geotermia: Esta energía se explora e investiga hace años, pero la baja relación costo/beneficio que implicaba su uso, mantuvo su uso y aplicación mayormente dentro de los laboratorios. Gracias al avance de las tecnologías y equipamientos técnicos, sumado a la imperiosa necesidad de explotar nuevas fuentes de energías renovables, es que la energía geotérmica se ha convertido en una opción real, comenzando a aparecer en el radar del mundo científico, industrial y político.

La energía geotérmica puede ser utilizada de dos formas principalmente. La primera opción es para generación en energía eléctrica. Este caso requiere realizar pozos muy profundos con ciertas complicaciones sísmicas.

La segunda opción es su aplicación para climatización de espacios. Para esto, los pozos son menos profundos y puede solo realizarse un intercambio de calor sin invadir el medio, lo cual lo hace más seguro y ecológico.

En nuestro país existen numerosos espacios públicos y privados, que cuentan con sistemas de climatización central o distribuida (hospitales, comercios, centros educativos y gubernamentales). La sustitución de tecnologías de climatización, por energía geotérmica es posible, pero su aplicación requiere acciones legislativas, políticas, económicas y de medio ambiente. Este trabajo propone demostrar que "El reemplazo de tecnologías existentes para confort de ambientes en espacios públicos (privados o estatales) es factible tecnológica y económicamente, y la relación consecuente de costo económico-beneficio ecológico es superadora".

**Palabras clave:** Geotermia; Energía Geotérmica; Eficiencia Energética, Huella de Carbono.



## 1. INTRODUCCIÓN

Willis H. Carrier es considerado, al menos parcialmente, responsable del auge económico del sudoeste norteamericano, pues su invención significó que la gente pudiera habitar ciertas zonas del país que previamente eran consideradas inhabitables, especialmente en los meses de verano. Carrier pensó y desarrolló el primer Aire Acondicionado a principios del siglo XX. Hoy un siglo después, seguimos utilizando prácticamente la misma tecnología [1].

Este trabajo se gestó a partir de la experiencia e impronta del grupo de investigación en el rubro de la climatización de espacios, sumado al deseo de migrar hacia tecnologías más limpias y responsables con el medio ambiente, como motivo de interés en la investigación de este trabajo. Hace muchos años que se escucha de forma peyorativa y utópica que es posible utilizar energía de la tierra. Los avances tecnológicos, nuevas experiencias aportadas a la técnica y la implementación de nuevas normas de regulación ecológicas, hicieron que hoy se empiece a pensar en forma más real y menos inalcanzable su implantación en el uso diario. Cabe destacar que la Energía Geotérmica como tal, plantea la utilización de la energía de la tierra desde la generación eléctrica hasta su intercambio de calor para procesos y sistemas.

Hace varios años se encuentra en las mesas de debates de todas las naciones el concepto de ahorro energético, impacto ambiental y cuidado del planeta. Ninguno de nosotros se encuentra ajeno al tema. Incluso cada vez más nos planteamos, como sociedad, esta problemática ambiental preocupados por el estado del planeta donde vivirán nuestras futuras generaciones. Según [2], en el año 2021 “la cantidad de recursos y servicios del ecosistema requeridos para abastecer nuestras necesidades equivalen a 1.7 planetas Tierra”, esto significa que estamos usando un 70% más de recursos de lo que los ecosistemas de nuestro planeta pueden regenerar en un año. En otras palabras, estamos en default ambiental: la humanidad está en números rojos y tiene en su cuenta lo que se conoce como “deuda ecológica”. Lo más alarmante es que, a nivel global, las cifras de este año son un 16% más altas y se anticiparon un mes en comparación a las del 2020”.

Es sabido que a este ritmo no llegaremos muy lejos. Es obligación de todos y cada uno de nosotros trabajar en poder reducir el consumo y usos de recursos del planeta. Si bien el hecho de que cada persona individualmente tome conciencia de esta situación es muy positivo, también sabemos que las acciones individuales solo generan pequeños cambios. Son las corporaciones privadas y estatales quienes poseen una gran capacidad para lograr cambios y por eso también estas organizaciones tienen un alto grado de responsabilidad para impulsar dichos cambios. Por otro lado, estos cambios tendrán una mayor probabilidad de éxito, si estas ideas son tomadas como políticas de estado.



Nuestro enfoque y campo de estudio se concentrará en analizar el estado del arte actual de la Energía Geotérmica, y su posible implementación a mediano plazo en el ámbito local. Específicamente en su uso para confort de ambientes y agua sanitaria en espacios públicos y privados, tanto en sectores para uso de esparcimiento como industrial. Al igual que la electro movilidad, la Energía Geotérmica no es algo nuevo. Los primeros ensayos y proyectos fueron realizados a comienzos del siglo XX, sin embargo su uso e implementación se vieron retrasados y demorados por tres factores claves:

- Económico: No se justificaba siquiera su planificación, dado que los costos de implementación nunca serían amortizados.
- Tecnológico: La implementación de estas tecnologías se vieron beneficiadas por el avance y estudios de nuevos materiales y nanotecnologías, que hacen mucho más viable su implementación real.
- Ecológico: El avance de legislación Ecológica como política de estado en ciertos países, vuelca la responsabilidad de un cambio de estructura a todos los demás países, haciendo más forzada la implementación de estas tecnologías, más allá de su eficiencia económica.

Según [3] Las concentraciones de gases de efecto invernadero se encuentran en su nivel más elevado en 2 millones de años y las emisiones siguen aumentando. Como resultado, la temperatura de la Tierra es ahora 1,1°C más elevada que a finales del siglo XIX. La última década (2011-2020) fue la más cálida registrada. Esto es necesario plantearlo seriamente como en [4]

Mucha gente piensa que el cambio climático significa principalmente temperaturas más cálidas. Pero el aumento de la temperatura es sólo el principio. Como la Tierra es un sistema, en el que todo está conectado, los cambios de una zona pueden influir en los cambios de todas las demás (como ejemplo cercano podemos mencionar en que unos pocos grados de diferencia en la temperatura del océano pacífico frente a las costas de Ecuador y Perú puede generar un año de grandes sequías en nuestra región pampeana). Esto último nos hace reflexionar en la necesidad de implementar políticas ecológicas a nivel mundial, no solo regional. Dado que somos un conjunto de naciones, ningún país o región del planeta podrá subsistir sin la influencia de los demás países circundantes. Esto mismo llevado a menor escala, pensando en un campo de acción local, es lo que se debería plantear entre los gobiernos municipales, provinciales y nacional.

Ya existe en nuestro país legislación y normas al respecto en [5]. No obstante, como siempre, la implementación de estas leyes y normas se ve demorada por la implementación de la tecnología.



Uno de los objetivos de este trabajo es dejar un plan estratégico de implementación de Tecnologías Geotérmicas a escala local.

Otro tema importante a desarrollar se basa en el análisis de la Huella de Carbono. El cambio climático, provocado por la emisión de Gases de Efecto Invernadero y en especial del CO<sub>2</sub>, es el azote de nuestro tiempo y existen evidencias considerables de que la mayor parte del calentamiento global ha sido causado por las actividades humanas. Hoy en día, casi todas las actividades que realizamos (movilidad, alimentación, etc) y bienes que poseemos y utilizamos (bienes de consumo, hogar, etc) implican un consumo de energía, lo que significa contribuir a las emisiones a la atmósfera. Bajo este prisma, la Huella de Carbono, representa una medida para la contribución de las organizaciones a ser entidades socialmente responsables y un elemento más de concientización para la asunción entre los ciudadanos de prácticas más sostenibles. En la actualidad existen diversos entes y normas que regulan este indicador.

La Huella de Carbono de Organización [6] según ISO 14064 es una ecoetiqueta identificativa de la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de una organización. Para la medición de la Huella de Carbono de una Organización, se utiliza la norma ISO 14064. A su vez, ISO 14064, se subdivide en ISO 14064-1 ISO 14064-2 e ISO 14064-3.

ISO 14064 se centra, por tanto, en cuantificar la cantidad de GEI que genera una organización, así como en generar un plan de reducción.

La implementación de estas normas, como mejoras e implementaciones propuestas a las mismas, serán otro de los objetivos y alcances de este trabajo de investigación.

La humanidad se encontró en varias ocasiones con puntos de inflexión que lograron cambiar el rumbo de la historia. El nacimiento de Cristo, las revoluciones industriales, las guerras mundiales, son algunos ejemplos claros.

El COVID – 19 fue sin duda uno de estos puntos de inflexión que seguramente dejarán su marca a lo largo del tiempo.

Durante las primeras semanas del confinamiento global y entre tantas noticias sobre la crisis sanitaria, se comenzaron a filtrar las primeras noticias acerca del impacto positivo que se estaba viendo en el medio ambiente. Cielos más claros, aire más puro, y por sobre todo una fuerte caída de las emisiones de carbono. El motivo era evidente, sin vuelos comerciales y casi sin vehículos en las calles y con la actividad fabril detenida la naturaleza recuperaba su lugar.

Ahora que el mundo retoma de a poco la actividad, el estado y las empresas deben tomar el compromiso de comenzar con un proceso de descarbonización a la par del relanzamiento de nuestras actividades. Desde ya que es un proceso que llevará tiempo, y por ello la política estatal



y corporativa debe ser a largo plazo, pero con la firme convicción de realizar un cambio a favor del medio ambiente.

El presente trabajo de investigación se enfocará en un conjunto de parques industriales y edificios comerciales dentro de la zona norte de la provincia de Buenos Aires, proponiendo lograr resultados basados en datos e información real que representan la media de la población de esa zona.

La meta planteada en este trabajo de investigación es el aporte al campo local en la implementación y ejecución de la migración de los sistemas de climatización de ambientes y aguas sanitarias, al uso de la Energía Geotérmica, realizando un trabajo de campo que permita reflejar datos empíricos satisfactorios a mediano plazo sobre sus resultados en reemplazo de los sistemas actuales.

Por otro lado, se intentará realizar un aporte significativo para la regulación y dictado de normas que apoyen su implementación.

Por consiguiente, se espera llegar a puerto y poder alimentar a base de los resultados obtenidos y los datos cuantificados al avance científico en este tema, como un aporte de valor en la disciplina de la Ingeniería Industrial.

## 2. LA HIPOTESIS

El trabajo que se realizó, centró los esfuerzos en la contaminación que el confort de ambientes genera como consecuencia de procesos industriales no eficientes<sup>6</sup>. (Niebels 2004)

A fin de unificar criterios y vocabulario, se presentan algunas definiciones que forman parte del entendimiento de esta tesis.

<sup>6</sup>Si bien el concepto de eficiencia industrial se centra en conceptos de costos, como veremos en el desarrollo del trabajo, el concepto que aquí refiere es a una eficiencia relacionada con costos de contaminación y por lo tanto una mejora en costos podría (y eso pretende) implicar una mejora en términos de contaminación, lo cual genera un sistema virtuoso para todos los actores del sistema.

Externalidades en el ámbito ecológico son, dicho en forma simple, todos aquellos costos que no se tienen en cuenta en la generación del bien o servicio y que se delegan a la sociedad. Por ejemplo, si en un proceso dado se utiliza algún recurso natural y la utilización de este conlleva a la desaparición de una especie o contaminación de un río, o cualquier otro tipo de problema, eso es denominado externalidad o externalización del costo.

Desacople, este concepto está asociado con el comportamiento de dos variables, en este caso las variables contaminación y bienestar social. Hoy estas dos variables siguen el mismo patrón,



una sigue a la otra. Concretamente la curva que representa al bienestar es representada por el PBI, ya que de alguna manera es esta variable macroeconómica la que mide el bienestar de la población; y la curva de contaminación se ve representada por el impacto ambiental ya que, a mayor impacto, mayor contaminación y viceversa. Estos conceptos son fruto del análisis de dos ciencias, la economía y la ecología.

Lograr el denominado Desacople, (objetivo que se propone para mejorar la contaminación o pretender que al menos no aumente con la misma velocidad) es romper ese “paralelismo”.

Considerando estas ideas, nuestra hipótesis de trabajo será:

“El reemplazo de tecnologías existentes para confort de ambientes en espacios públicos (privados o estatales) es factible tecnológica y económicamente, y la relación consecuente de costo económico – beneficio ecológico es superadora”.

La Hipótesis plantea la incorporación de las externalidades a las teorías de costos industriales que hoy es universalmente aceptada, y su correlación directa con el beneficio ecológico al que conlleva. Por estas razones y según el análisis de [66] su implementación será cada vez más beneficiosa en términos de eficiencia energética.

### 3. LAS PREGUNTAS A RESPONDER

Como todo trabajo de investigación, esta tesis, tendrá como meta el poder responder consignas que manifiestan el problema expuesto y permitirá también la expansión de la investigación a nuevas tareas a resolver. Algunas de las preguntas que marcaron el hilo de investigación de este trabajo son:

- a. ¿El gasto en climatización de ambientes, es o será significativo a corto plazo en la estructura de costos industriales?
- b. ¿El impacto ecológico al reemplazar las tecnologías actuales con Energía Geotérmica será mucho menor?
- c. ¿Es técnicamente factible el reemplazo de tecnologías en nuestro país?

Enfocándonos en los marcos teóricos, pudimos también ir respondiendo interrogantes de índole cualitativos y cuantitativos, que nos permitieron armar la estructura y dar forma al trabajo desarrollado. Estas fueron:

- d. ¿Cuánto influirá la promulgación de leyes a favor de este tipo de tecnologías?
- e. ¿De qué modo afectará a la eficiencia energética el reemplazo de los sistemas actuales por el propuesto?
- f. ¿Qué tan importante es la relación socio-político-empresarial en la toma de decisiones de esta naturaleza?



## 4. LOS OBJETIVOS

### 4.1. Los Objetivos Primarios

Los objetivos principales de esta tesis son:

- a. Dejar un plan estratégico de implementación de Tecnologías Geotérmicas a escala local.
- b. Visualizar el estado actual de la implementación de las normas de calidad que regulan la huella de carbono.

Con el afán de responder estas consignas, nuestro trabajo se hará con un enfoque de un recorte de los espacios a considerar. Se tomará una muestra de edificios públicos y privados (shoppings, oficinas, centros educativos, etc.) en un ámbito geográfico determinado. De aquí surgirán indicadores, parámetros y variables que permitirán modelizar y discretizar el sistema a analizar, convergiendo como resultado contrastar las hipótesis planteadas y el alcance de conclusiones finales.

### 4.2. Los Objetivos Secundarios

Los objetivos secundarios a estudiar son:

- a. Resolver la factibilidad de reemplazo de los sistemas actuales.
- b. Implementar un “Plan de Etapas de Reversión a corto/mediano plazo”.
- c. Acentuar la importancia del uso de indicadores LEEDs en el mercado inmobiliario local.
- d. Explicitar la incidencia del gasto energético en las estructuras de costos industriales.

El fomento de los objetivos propuestos aplicados a los sectores de interés de estudio propuestos, permitirán seguramente que el sistema medioambiental comience a contrarrestar la contaminación. A su vez, los actores industriales podrán contar con indicadores fehacientes de ahorro energético y mejorar así los costos de sus gastos.

## 5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Sea cual sea el enfoque que elijamos en algún trabajo de investigación (cualitativo o cuantitativo), siempre emplearemos procesos que serán cuidadosos, sistemáticos y empíricos en pos de generar conocimiento.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se utilizó un proceso cualitativo. El proceso Cualitativo es siempre en “espiral” o “círculos”, y no sigue pasos determinados, sino que en todo momento las etapas interactúan entre sí.

Para dicho proceso, se utilizó un método de 3 etapas principales, compuesto a su vez de fases internas siguiendo lo expresado por [7] y que puede apreciarse en el siguiente gráfico:



Figura 1. El proceso de la investigación cualitativa según [8]

En nuestro trabajo en particular comenzaremos en la etapa inicial (Definición de la situación – Problema) proponiendo a base de estudios previos y experiencia personal, un marco teórico que nos permita avanzar con la investigación sobre el estado actual de la Energía Geotérmica aplicada en la climatización. En correlación al marco teórico, se propuso un diseño de investigación que nos permitirá desarrollar las actividades de las fases posteriores, definiendo previamente un grupo o zona de estudio. Este enfoque se realizó sobre un área de fomento de la industria (desarrollada en parques industriales) cercana al campus universitario de la UNGS, sede de nuestro laboratorio de investigación (GBA, zona norte).

El diseño de investigación propuesto para este trabajo será del tipo: NO EXPERIMENTAL – LONGITUDINAL – DE EVOLUCION DE GRUPO, según lo explica [9].

Este diseño fue elegido según la siguiente justificación:

- NO EXPERIMENTAL: Porque se analizará el fenómeno en su contexto.
- LONGITUDINAL: Se estudiará la evolución del fenómeno, las causas y efectos del mismo.
- DE EVOLUCION DE GRUPO: Se hará un recorte de la población acotada al interés del grupo de investigación integrado en la universidad.

Aquí el autor del libro, esboza una idea de interacción entre el fenómeno central y los conceptos vinculados:



Figura 2. Correlación entre fenómeno central y conceptos vinculados.

Para nuestro caso de estudio el fenómeno central es el uso de la energía geotérmica para la climatización. Mientras que los conceptos vinculados serán:

- A. Implementaciones nuevas.
- B. Implementación en edificaciones ya establecidas.
- C. Eficiencia energética.
- D. Impacto ambiental.

Retomando al gráfico de la figura 1, continuaremos con la fase de trabajo de campo. Para esta tarea será prioritario explorar y registrar datos reales del recorte territorial y poblacional, a fin de contar con la información necesaria para organizar y delinear nuestra investigación.

Por último, procederemos a la fase de identificación de patrones culturales, ejemplificada en el gráfico anterior. En esta última etapa, empezaremos realizando un análisis exhaustivo de la información recopilada. De aquí es que donde surge la interpretación totalmente subjetiva al análisis y al autor de este trabajo, con el objetivo final de lograr conceptualizar y alcanzar los objetivos propuestos aplicando la inducción como herramienta fundamental y necesaria.

## 6. EL RECORTE

Para este trabajo se realizará un recorte espacial, actividad industrial y temporal siendo estos parámetros:

- a. **Ámbito espacial:** Este ámbito fue determinado en el área de Promoción industrial de Malvinas Argentinas, Buenos Aires, denominada Parque el Triángulo o San Eduardo, con 5,56 km<sup>2</sup> de superficie, delimitado por las Rutas Panamericana Ramal Campana (RN9), Panamericana Ramal Pilar (RN8) y la Avenida Otto Krause, Venezuela y Olivos (Figura 3)

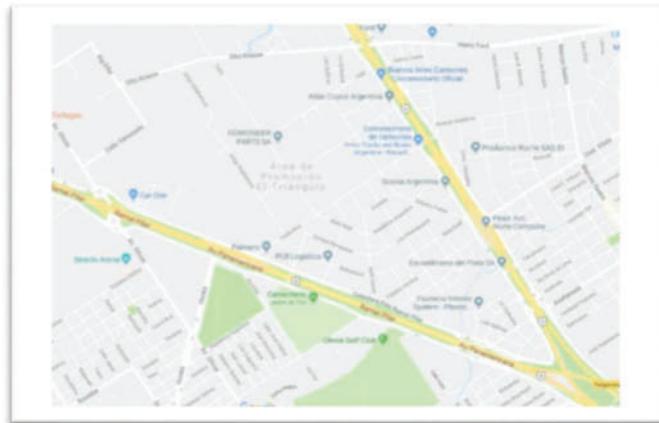


Figura 3 – Área de promoción “El Triángulo de Malvinas Argentinas” Fuente: Google-maps.

- b. Actividad Industrial: La distribución industrial en el partido y por ramas (Figura 4), dónde la industria metalmeccánica autopartista ocupa la segunda posición en desarrollo con el 26% del total de industrias, detrás de la industria alimenticia que ocupa el 39% de las industrias.

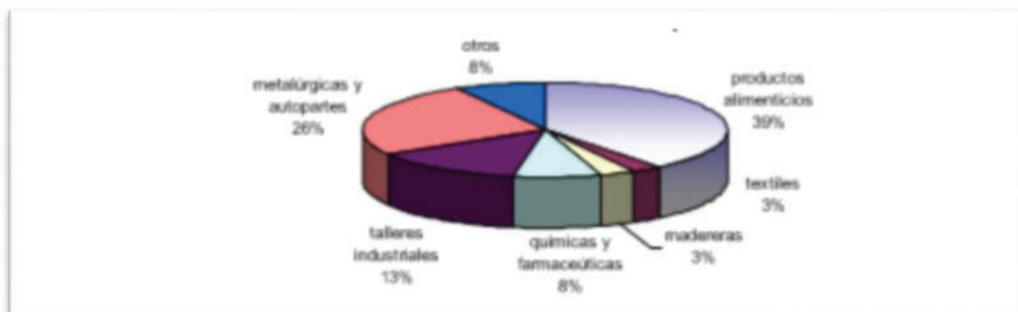


Figura 4 Distribución de las industrias del partido de Malvinas Argentinas al año 2008.

Fuente: Alsina y Borello, 2008

- c. **Ámbito temporal:** En relación al ámbito temporal del estudio, el mismo abarca desde 02-2022 hasta la corriente fecha, esperando finalizar dicho trabajo en un lapso de 2 años cumplimentando así el trabajo dentro del marco del proyecto de investigación y tesis Doctoral.

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados esperados de este trabajo serán, en primer lugar, demostrar a partir de la información recopilada y los análisis expuestos, que el reemplazo de tecnologías aplicadas a la climatización de grandes espacios es factible y en gran manera beneficiosas para las empresas y/o locales de gran tamaño, como también se desprende de la investigación [10]. Logrando una



reconversión de sistemas de climatización convencional por uno de energía geotérmica, no solo se podrá reducir costos producto del consumo de energía eléctrica, sino que también se evitarán potenciales contaminaciones debido a la ausencia de uso de gases contaminantes para la capa de ozono.

A su vez, cada gobierno (nacional, provincial o municipal) tendrá herramientas para diagnosticar, identificar y conocer el estado actual de la matriz de consumo energético de cada locación de gran tamaño, y de esta manera poder dictaminar leyes, ordenanzas y normas que permitan un nuevo balance entre eficiencia energética y responsabilidad ecológica por cada institución.

Lo mencionado en el párrafo anterior, provoca directamente el desacople buscado, ya que ahora la generación de bienes atiende fuertemente a la disminución de costos ambientales y en consecuencia su impacto al medioambiente.

Con tales implementaciones se podrá avanzar también a nivel gubernamental en la implementación radical y eficiente de normas LEEDs, permitiendo certificar todos los edificios con el fin de mejorar/empeorar su valor de venta en el mercado inmobiliario. Esto también será un motor de intensificación para motivar al cambio de tecnología propuesto, que menciona también [11].

## REFERENCIAS

- [1] Enciclopedia Universal. *Williams Haviland Carrier*, año 2012. [https://enciclopedia\\_universal.es-academic.com/50202/Willis\\_Haviland\\_Carrier](https://enciclopedia_universal.es-academic.com/50202/Willis_Haviland_Carrier).
- [2] Fundació Vida Silvestre. Hoy Argentina ingresa una vez más en el default ambiental, 26 de junio del 2021. <https://www.vidasilvestre.org.ar/?22100/2021defaultambiental#:~:text=Al%20ritmo%20que%20consumimos%2C%20la,pueden%20regenerar%20en%20un%20a%C3%B1o>.
- [3] Naciones Unidas. ¿Qué es el cambio climático?, año 2020. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change#:~:text=La%20temperatura%20media%20de%20la,fue%20la%20m%C3%A1s%20c%C3%A1lida%20registrada>.
- [4] Sáez Blázquez, C.; Farfán Martín, A.; Martín Nieto, I.; González-Aguilera, D.J.E. Economic and environmental analysis of different district heating systems aided by geothermal energy. *Energies* 2018, 11, 1265. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- [5] Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética. *Energía Geotérmica*. 2019
- [6] Norma ISO 14064. Gases de Efecto Invernadero. International Standard Organization. 2018.



- [7] Carlos Arturo Monje Álvarez. Metodología de la investigación Cuantitativa y Cualitativa – Colombia 2011,
- [8] Bonilla Castro, E. y Rodriguez Sehk, P. Más allá del dilema de los métodos. La investigación en ciencias sociales. Bogotá 1997.
- [9] R. H. Sampieri. Metodología de la Investigación Científica. Mc Graw Hill. España. 2014.
- [10] Hepbasli, A.; Keçebaş, A. Un estudio comparativo sobre análisis exergéticos convencionales y avanzados de sistemas geotérmicos de calefacción urbana basados en datos operativos reales. Construcción de energía. 2013
- [11] Carotenuto, A.; Figaj, RD; Vanoli, L. Un nuevo sistema solar-geotérmico de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria: simulación dinámica y análisis energético-económico. Energía 2017.



## ANÁLISIS DE GRANDES TURBINAS EÓLICAS EN UN ENTORNO DE COSIMULACIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA Y MECANISMOS FLEXIBLES

Sabrina Montaña<sup>1</sup>, Alberto Cardona<sup>1</sup> y Juan M. Gimenez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC UNL-CONICET), Colectora  
Ruta Nac. Nro. 168, Km 0, Paraje El Pozo, 3000 Santa Fe, Argentina,  
[msabrina@cimec.santafe-conicet.gov.ar](mailto:msabrina@cimec.santafe-conicet.gov.ar), <https://cimec.org.ar/>

### RESUMEN

El presente trabajo se enmarca en la participación de los autores en el proyecto europeo UPWARDS, que tiene por objetivo el desarrollo de aerogeneradores de mayor envergadura y mejor diseño. En este contexto, se presentan los resultados obtenidos mediante co-simulación de alta fidelidad de la interacción fluido-estructura (FSI) en grandes aerogeneradores. Para ello, se utiliza el prototipo virtual de la turbina eólica de referencia de 2.3 MW Siemens, mientras que la simulación se lleva a cabo mediante la integración de dos códigos comerciales, StarCCM+ para la simulación fluidodinámica y Samcef-Mecano para la descripción del mecanismo flexible. El enfoque de co-simulación permite el modelado simultáneo y acoplado del flujo de viento turbulento en condiciones no estacionarias, y los movimientos mecánicos y de control de la turbina. La simulación dinámica de alta fidelidad realizada en este estudio proporciona una predicción detallada del comportamiento de la turbina, verificando los valores nominales de potencia y torque, y analizando la respuesta del cabeceo y deformaciones estructurales. Se destaca la disminución en el par aerodinámico cuando las palas de la turbina interactúan con la torre. Estos resultados demuestran el avance en la comprensión y el diseño de aerogeneradores más eficientes y confiables, impulsando así el progreso hacia una mayor integración de la energía eólica en el panorama energético global.

**Palabras Clave:** *Co-simulación, Fluidodinámica computacional, Mecanismos flexibles, Aerogeneradores.*



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Contexto

La energía eólica ha experimentado un crecimiento significativo y se ha convertido en la principal fuente de generación de electricidad renovable. Actualmente, el Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética (Plan SET) se centra en el desarrollo de turbinas a gran escala en el rango de 10 a 20 MW. Esto demuestra el compromiso de Europa en la mejora continua de la competitividad y eficiencia de la energía eólica, con el objetivo de alcanzar los objetivos climáticos establecidos. En este contexto, y para impulsar aún más el desarrollo de la energía eólica, entidades gubernamentales están financiando grandes proyectos de investigación, tal como el proyecto Upwards, del cual se desprende este trabajo [1]. Upwards tiene por objetivo el desarrollo de aerogeneradores más grandes y mejor diseñados, aumentando así la capacidad de aprovechamiento de la energía eólica en Europa y el resto del mundo. Para lograr este objetivo, se trabaja en el desarrollo de capacidades de simulación multifísica especializadas en el flujo del viento, la mecánica de los aerogeneradores y su interacción. Estas herramientas de simulación desempeñarán un papel fundamental al permitir un desarrollo más rápido y rentable de prototipos de aerogeneradores. A medida que los aerogeneradores se vuelven más grandes, la creación de prototipos físicos se vuelve económicamente inviable, lo que dificulta el avance de la energía eólica. El proyecto Upwards aborda esta limitación y se considera de importancia estratégica para el desarrollo sostenible en Europa. El consorcio está compuesto por 11 socios, que incluyen empresas, institutos de investigación y universidades, distribuidos en 8 países y 2 continentes, siendo nuestro grupo de investigación el representante local. Esta colaboración entre diferentes actores de la industria y la academia es crucial para lograr avances significativos en el diseño y tamaño de los aerogeneradores.

### 1.2 Desafío Técnico

Las turbinas eólicas son sistemas mecánicos muy complejos, ver Figura 1.

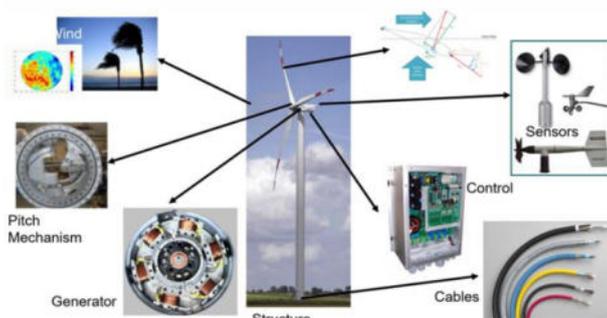


Figura 1: Sistemas que componen una turbina eólica



El incremento del tamaño y flexibilidad de las palas conduce a un acoplamiento fuerte entre la aerodinámica y la dinámica estructural; por lo tanto la aeroelasticidad se ha convertido en uno de los problemas críticos en el diseño de las turbinas eólicas modernas.

El aumento del tamaño del rotor impone nuevos fenómenos físicos que deben entenderse mejor en el proceso de diseño [2-3]. Las palas experimentan grandes deformaciones que introducen no-linealidades geométricas de importancia las cuales pueden producir fallas catastróficas, por lo cual es muy importante mejorar la capacidad de calcular todos los mecanismos físicos relevantes [4-5], La escala y la complejidad hacen que la investigación experimental de estos fenómenos sea muy desafiante, costosa y lenta. Una forma alternativa de generar conocimiento sobre la física y mecánica complejas de las grandes turbinas eólicas es a través de simulaciones numéricas de alta fidelidad.

El objetivo principal de este trabajo es presentar el análisis de los resultados obtenidos del proceso de validación de una plataforma computacional de alto rendimiento (HPC), denominada "SCORE", para la co-simulación (en simultáneo y vinculada) en alta fidelidad de la interacción entre el viento, el sistema mecánico estructural de grandes turbinas eólicas de eje horizontal (palas compuestas, rotor, tren de transmisión, bancada, torre, base fija o flotante) y los dispositivos inteligentes de control de la máquina. Esta herramienta, es desarrollada específicamente para acoplar los softwares StarCCM+ [6], para la simulación fluidodinámica, y Samcef Mecano [7], para resolución de las respuestas elásticas y mecánicas del aerogenerador. Se analiza el prototipo virtual extensivo de la turbina eólica de eje horizontal, Siemens de 2.3 MW (SWT 2.3). El resto del trabajo se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2, se presentan la metodología de modelado y co-simulación. En la Sección 3 se presentan los resultados y finalmente en la Sección 4 se presentan las conclusiones.

## 2. METODOLOGÍA

Por un lado se resuelve con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) el flujo de viento y su interacción con la turbina a analizar. Se supone que la turbina Siemens 2.3 MW, se encuentra inmersa en un parque eólico, por lo que las condiciones de viento incidente son variables en el tiempo. Por otro lado, a partir de las cargas ejercidas por el viento, se estudia el modelado aeroelástico, las fuerzas y aceleraciones que se generan en el rotor, junto con el control de cabeceo y guiñada de las palas y la góndola para controlar la carga y la producción de energía. El acople entre ambos componentes es bidireccional y se gestiona por medio de la herramienta de co-simulación SCORE.



### 2.1. Características SWT 2.3 MW

La turbina SWT 2.3 MW tiene una configuración de 3 palas, es de eje horizontal. La potencia mecánica nominal de 2.3 MW. El torque generado es de 15727 N.m, La velocidad nominal de entrada del rotor es de 16 RPM. El diámetro del rotor es de 93 m. La torre tiene una altura de 92 m. La distancia rotor-torre es de 5 m, la inclinación del eje es de 6° y el precono es de 2.5°. La velocidad para la generación mínima es de 11,4 m/s.

### 2.2. Estrategia para resolver la dinámica multicuerpo flexible

Una turbina es un sistema multicuerpo muy complejo. Por un lado, se tienen grandes desplazamientos y rotaciones finitas (no linealidades geométricas) y por otro lado, las leyes constitutivas de los elementos deformables son no lineales (no linealidades del material). Se resuelve un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que gobiernan el comportamiento del sistema multicuerpo. El sistema que se resuelve está formado por el sistema de equilibrio de momento igualado al vector de fuerzas generalizadas, que incluye las fuerzas externas y vectores de restricciones bilaterales. Se las discretiza utilizando elementos finitos (FEA) y se obtiene un sistema algebraico equivalente, del cual se obtiene la solución, el campo de desplazamientos, en los nodos de la discretización. La evolución temporal del sistema se resuelve utilizando un esquema de integración temporal de segundo orden.

### 2.3. Estrategia para resolver la dinámica de fluidos

El flujo en las turbinas eólicas puede ser considerado incompresible. Solo en la punta de las palas se alcanzan números de Mach de 0.25 para las condiciones estudiadas.

Para resolver el fluido se resuelven ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en ensambles (URANS). Las ecuaciones se resuelven utilizando el método de los volúmenes finitos donde el acople velocidad-presión de las ecuaciones segregadas se resuelve por medio del esquema iterativo SIMPLE. Para la discretización espacial se utilizan esquemas de segundo orden, mientras que para la integración temporal se utiliza el integrador implícito de Euler de primer orden. Para el cierre de las ecuaciones RANS se utiliza el modelo de turbulencia realizable k- $\epsilon$ .

### 2.4. Co – simulación

Cuando se resuelven problemas no lineales de estructura y dinámica de fluidos acoplados, deben utilizarse técnicas especiales para resolver la parte estructural y la parte de fluidos. Existen varios códigos especializados para resolver la parte estructural, mientras que lo mismo ocurre para calcular la solución de la parte del fluido. Un aspecto importante a tener en cuenta



es el hecho de que, por lo general, las ecuaciones estructurales se calculan con un enfoque Lagrangiano, mientras que las ecuaciones de los fluidos se expresan con un enfoque Euleriano. Por estas razones, la forma más conveniente de proceder es haciendo una co-simulación, en la que se ejecutan en paralelo ambos códigos especializados. En la herramienta desarrollada se utiliza StarCCM+ para simular el comportamiento de la dinámica de fluidos, y Samcef-Mecano para modelar la estructura de la turbina. Durante la simulación, los simuladores intercambian datos de forma síncrona a través de la implementación in-house del grupo de trabajo denominada SCORE, acrónimo de [S]AMCEF | STAR-CCM+ [CO]-simulation [R]unning [E]nvironment. El algoritmo de interacción es del tipo Gauss-Seidel. A partir del instante  $t$  el simulador del fluido avanza un paso de cálculo; con los datos en el instante  $t+\Delta t$  (cargas de viento sobre la superficie de las palas) se alimenta el simulador aerolástico que aún está en el instante anterior. A continuación lo avanza temporalmente y con los datos de este en el instante  $t+\Delta t$  (deformaciones) se realimenta el fluido donde se procede a deformar la geometría. El proceso puede iterarse (iteraciones de acoplamiento) o avanzar al siguiente paso de tiempo, ver Figura 2.

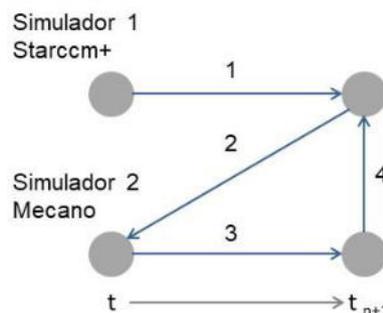


Figura 2: Esquema de co-simulación – SCORE

#### 2.4.1 Archivo de configuración

Para establecer la co-simulación es necesario introducir datos de entrada en varios archivos e instancias. Algunos de estos datos son utilizados por ambos resolvedores, como por ejemplo, el tiempo final de simulación o el paso de tiempo. Estos parámetros deben configurarse en un único archivo de configuración y la herramienta de co-simulación debe establecerlos de manera automática. SCORE utiliza un archivo de configuración principal en formato JSON para establecer los valores de estos parámetros compartidos. Además, SCORE lleva a cabo otras tareas de gestión y control durante todo el proceso de co-simulación, paralelismo, etc, las cuales requieren otros parámetros dentro del archivo de configuración.

Cada caso de estudio debe disponer de un archivo de configuración adecuado en su carpeta raíz. Para garantizar la integridad de este archivo, SCORE proporciona una herramienta

denominada *score-check-config* que verifica si el archivo JSON dispone de todos los campos de entrada y si su contenido es correcto. En caso negativo, la propia herramienta genera un nuevo archivo con la estructura revisada y valores predeterminados para aquellos campos que no estaban originalmente o que contenían tipos incorrectos.

## 2.5. Estrategia del modelado estructural

Un aerogenerador puede considerarse un complejo sistema mecánico flexible, que está compuesto por una torre, una góndola y un rotor, en cuyo extremo se colocan 3 palas, ver Figura 3. Para modelar la parte estructural y el sistema de control de la turbina, se ha utilizado un programa llamado Bnrel, en el cual se introducen los datos del aerogenerador (propiedades estructurales, parámetros de control) y se obtiene un modelo estructural completo y un nodo de rotación vinculado al rotor. Este nodo permite inicialmente a la turbina rotar y luego es el nodo que recibe la rotación que viene del cálculo del fluido. Del modelo obtenido, se obtienen las geometrías (STL) para generar el volumen de control que utiliza el simulador del fluido, ver Figura 3.

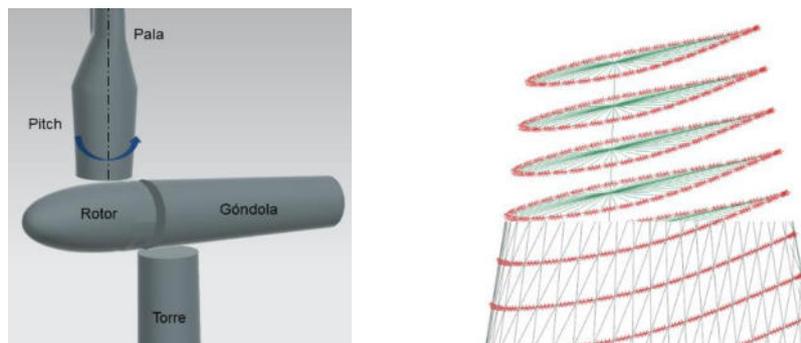


Figura 3: Modelo estructural de la turbina eólica SWT 2,3 MW

Para el modelo de la turbina a estudiar se tomaron las siguientes consideraciones: las palas se modelan con vigas flexibles y pieles deformables, apoyadas en las vigas. El rotor, góndola, y la torre se consideran rígidos. La rotación del disco, resulta del cálculo del equilibrio entre el par generado por la presión del viento y la resistencia del generador (acoplamiento bidireccional). Finalmente, las bisagras del control de cabeceo (pitch) están situadas entre el rotor y las palas, para controlar el cabeceo según las directrices del controlador.

## 2.6. Estrategia de control

La implementación numérica del sistema de control está incorporada en el modelo estructural. Requiere de parámetros de configuración para las variables de control como es el torque



generado, la potencia, la velocidad de rotación. Estas deben ser modificadas según los requerimientos de funcionamiento de la turbina. El elemento de control, está compuesto por dos subsistemas principales. Por un lado, el subsistema de mando del ángulo de paso colectivo, que controla el pitch para mantener los valores de referencia. Por otro lado, el subsistema de mando del par del generador, que mantiene fijo el par del generador para cualquier condición de entrada. Cuando la condición de viento es muy baja o muy alta y no se puede obtener el torque de referencia, el control activa el elemento de freno, la turbina en ese momento comienza a transitar lo que se conoce como parada de emergencia en un tiempo total de 2 s la turbina se frena completamente.

## 2.7. Estrategia del modelado aerodinámico

Debido a los movimientos propios de la turbina (rotación y deformaciones) por un lado, se debe utilizar un esquema de mallado que involucra una malla deslizante, para realizar un disco - cono alrededor del rotor y seguir su rotación, ver Figura 4.

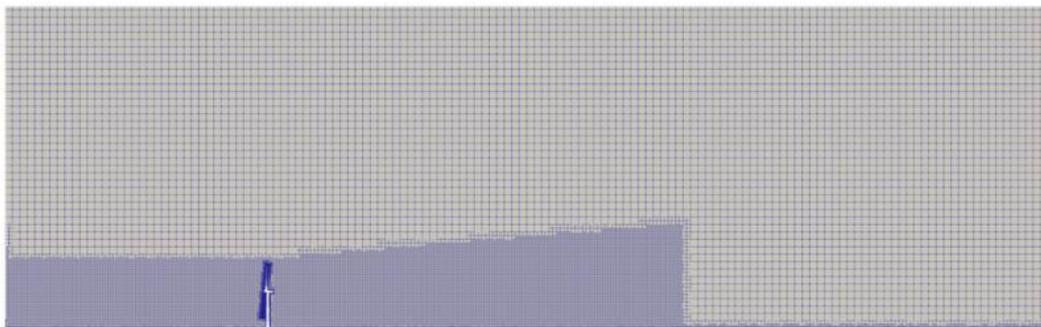


Figura 4: Malla de volúmenes finitos utilizada para el fluido

En el interior del disco se utiliza una malla deformable para adaptar la malla del fluido a la deformación y el cabeceo de las palas. Por otro lado, para el resto del dominio se utiliza una malla fija que contiene la torre y la góndola. Sobre las palas, el tamaño de celdas es de 0.05 m. Esta dimensión fue adoptada luego de realizar un análisis de convergencia de malla. En el resto del disco móvil las celdas tienden a un tamaño de 0.8 m. El volumen de control adoptado respeta las dimensiones recomendadas: 5 diámetros hacia la condición de entrada, donde el tamaño de celda es de 0.8 m (Refinamiento 1), 15 diámetros hacia el contorno de salida donde se refinan los primeros 5 diámetros con celdas de 1.2 m (Refinamiento 2) y el resto con 1.8 m (Refinamiento 3), 5 diámetros al contorno superior y 5 diámetros a los laterales. Para generar la malla 3D de 21585857 elementos del fluido se utilizó el programa StarCCM+, se tomaron de base las mallas de superficie (STL) obtenidas en el modelado de la estructura, ver Figura 4.



## 2.8. Condiciones iniciales y condiciones de borde

La simulación se realiza en dos etapas. En la primera etapa se realiza co-simulación fluido/estructural con la velocidad de rotación impuesta en el rotor y el disco; la presión del viento sobre la estructura es aplicada progresivamente desde cero hasta el valor real. La rotación, se impone en un nodo central vinculado al rotor. La rotación se controla mediante una función lineal hasta los 2.5 s iniciales de la simulación, luego esta condición se anula. En la segunda etapa, se realiza co-simulación fluido-estructural con la rotación calculada a partir del equilibrio entre la presión del viento sobre las palas y el par del rotor. Esta estrategia es adoptada debido a que las condiciones iniciales son muy aproximadas y el campo de fluido debe adecuarse previo a realizar el acoplamiento completo. Distintas pruebas numéricas permitieron definir una función temporal para el intercambio de fuerzas entre el fluido y la estructura que mitiga problemas numéricos en el transitorio inicial. En el fluido, para modelar correctamente la física sobre la región de la turbina y el piso del volumen de control se emplea una condición de borde tipo pared (no deslizamiento). Sobre las superficies laterales se impone una condición de simetría. Sobre superficie de salida se establece una condición de presión de salida nula. Sobre la superficie de entrada se utilizó una condición de viento variable, cuyos datos fueron generados mediante simulación mesoescala RANS por parte de otro grupo perteneciente al proyecto Upwards. Dicha simulación se centró en investigar los efectos de la disposición de los aerogeneradores en el flujo de estelas y la turbulencia, y cómo esto influye en la productividad. Se utilizó la disposición de turbinas del Parque Eólico Høg-Jæren (<https://www.vindenergi.no/projects/hog-jaeren>). Este parque consta de 32 aerogeneradores con una capacidad total de 73 MW y una producción anual de 230 GWh. El aerogenerador que se estudia en este trabajo, el número 4 en el parque eólico, se encuentra en la segunda fila en la dirección del viento. La velocidad media del viento en la entrada se ve afectada por los aerogeneradores precedentes y es de 7 m/s. Se colocan sondas que muestrean el campo de velocidades cada 0.02 s. La grilla de intercambio, ubicada 5 diámetros delante de la turbina, tiene espaciado mínimo en el área central orientada al rotor, y espaciado máximo en ancho y altura de 0.2d. Se realizan interpolaciones espaciales y temporales de bajo orden (vecino más cercano y lineal, respectivamente). Finalmente esta información del campo de viento se impone en el contorno de entrada de nuestro modelo fluidodinámico mediante una biblioteca de usuario desarrollada por los autores. Para generar la condición inicial el perfil de velocidad es convectado en el dominio. Estos datos se introducen en Star-CCM+ también mediante una librería de usuario. En la parte estructural, inicialmente el ángulo de control de pitch se inicia en un valor cero. El tiempo total de simulación para ambas corridas es de 60 s, con un paso de tiempo de 0.005 s, se utiliza 1 iteración de acoplamiento, se utilizan 5 iteraciones del fluido por paso de tiempo y se resuelve en paralelo, destinando un proceso para el cómputo estructural y 64 para el análisis del fluido.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Sensibilidad al paso de tiempo y cambio en la función de presión

Para verificar la automatización de estas variables se estudió un caso de una turbina simple, formada por un disco giratorio y tres placas rectangulares flexibles. Se estudió la automatización de dos variables. La primera variable de estudio es el paso de tiempo, se analizaron resultados para pasos de tiempo de 0.005 s, 0.01 s y 0.02 s ver Figura 5.

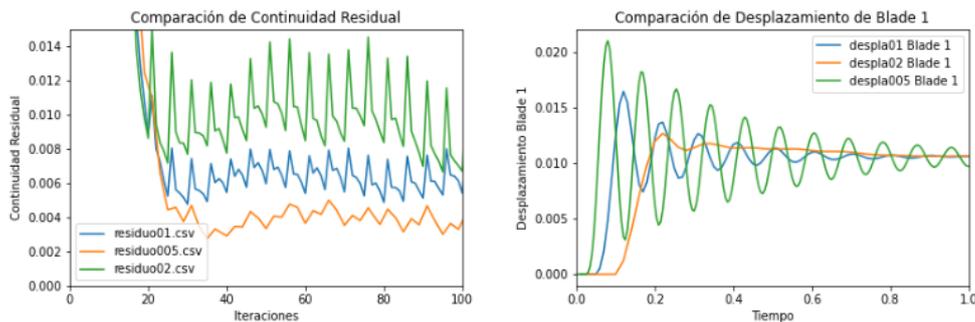


Figura 5: Comparación desplazamientos pala 1 y residuo de continuidad para distintos pasos temporales

Para el paso temporal 0.2 s los desplazamientos se amortiguan considerablemente respecto de los que se obtienen con el paso 0.005 s, esto se verifica que la respuesta inicial transitoria es menos representativa a mayor paso temporal. En la gráfica de los residuos se observa mayor convergencia temporal a medida que se disminuye el paso de tiempo. La segunda variable estudiada es la función de presión sobre las palas. Se realizaron dos pruebas, en la primera prueba se aplicó la presión desde 0,1 s al 0% a 1 s al 100%. Luego se simuló el segundo caso, donde la transición abarca desde 0,025 a 0,05 s

En la Figura 6 se puede observar que para una transición más rápida en la aplicación de la presión, los resultados presentan mayor transitorio inicial, sin que esto represente una menor convergencia de residuos.

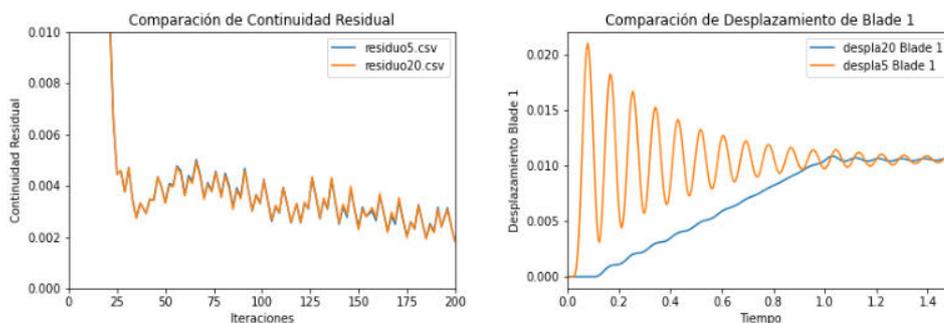


Figura 6: Comparación desplazamiento pala 1 y residuo de continuidad para distintas funciones de presiones

### 3.2 Resultados simulación turbina SWT 2.3 MW

Se realizó un modelado de la interacción fluido estructura (FSI) para una turbina eólica Siemens de 2.3MW. Se llevó a cabo una simulación de 60 segundos. En la Figura 7 se observa el perfil de viento en la entrada del dominio de estudio para el tiempo final de simulación.

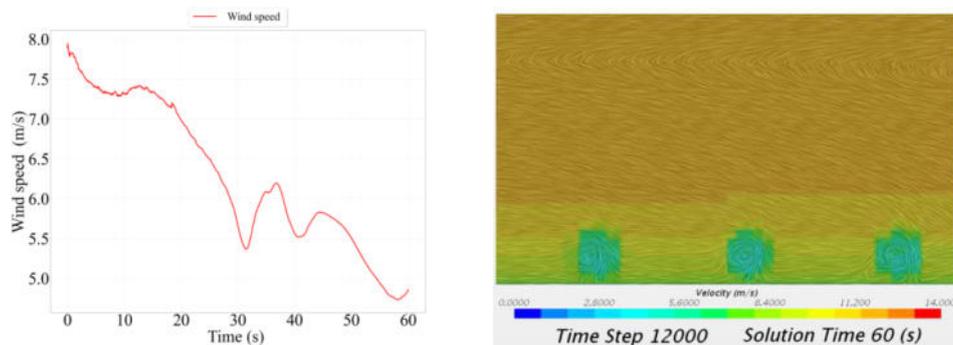


Figura 7: Instantánea del campo de velocidad de entrada a 60s (vista frontal) y sensor de velocidad ubicado en la entrada del dominio.

Se registra que la velocidad de entrada se ve afectada por las turbinas precedentes. La simulación del parque eólico estima una velocidad media del viento de 7 m/s a la altura del eje de la turbina. Se coloca un sensor de velocidad en la entrada del dominio y se observa que la velocidad promedio es menor a la indicada por las simulaciones del parque eólico. La Figura 8 presenta el campo de velocidad sobre el plano  $z=0$ . De aquí se observa la alta transitoriedad del viento incidente y la estela turbulenta que genera la turbina

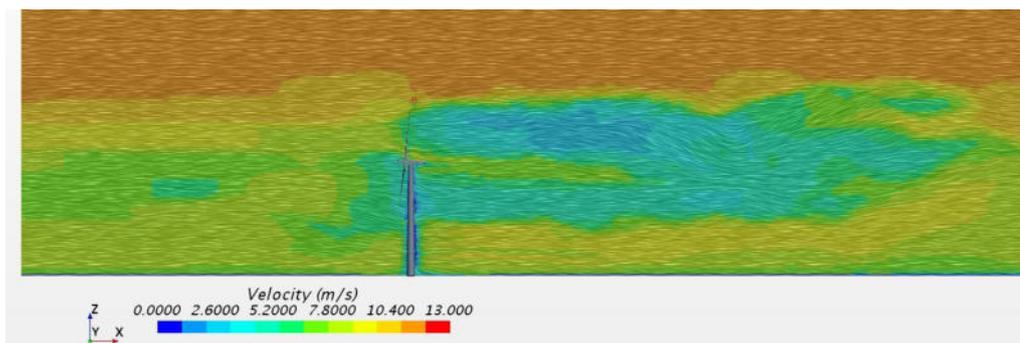


Figura 8: Instantánea del campo de velocidad a 60 s (vista lateral).

El sistema de control reduce el paso de las palas (ángulo de pitch) al mínimo disponible, siendo este 0.5 rad. Sin embargo, no puede mantener las condiciones de funcionamiento previstas ya

que la velocidad del viento es demasiado baja. Esto se puede observar en los valores de velocidad de rotación y potencia, ver Figura 9.

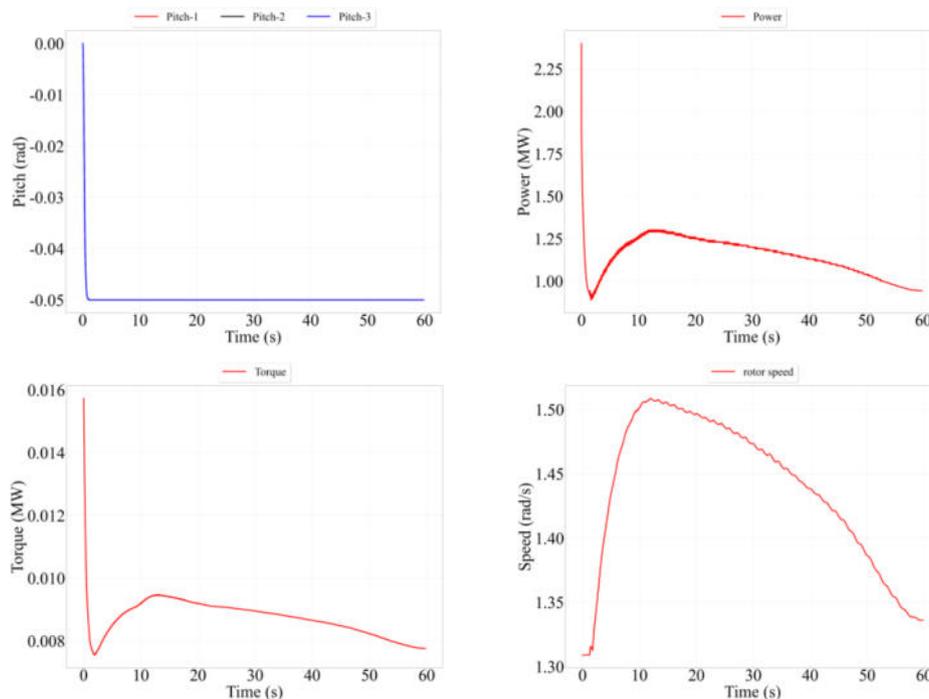


Figura 9: Evolución ángulo de pitch, velocidad de rotación, torque y potencia.

La Figura 10 presenta la evolución desplazamiento de las palas a lo largo de los 60 s de simulación y la evolución del empuje para el mismo tiempo.

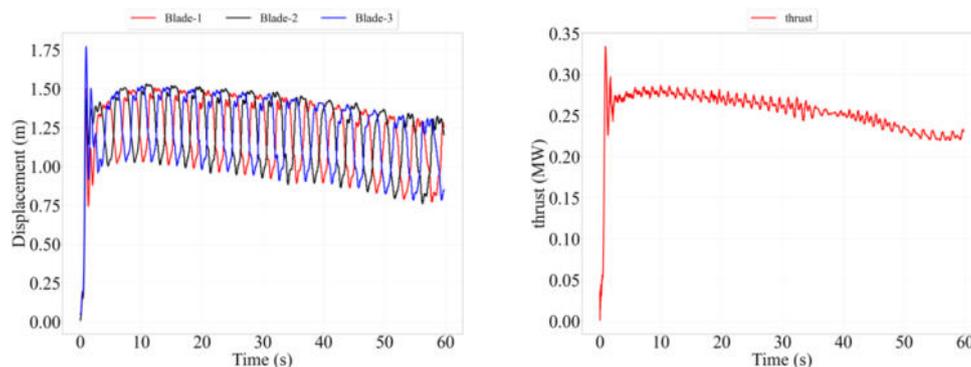


Figura 10: Evolución desplazamiento de las palas y empuje.

Las palas se deforman debido a la acción del viento y de la gravedad. Se calculó un desplazamiento máximo de la punta de 1.5 m. Debido a las condiciones iniciales, se observa un rebasamiento inicial. Después de esa etapa, los desplazamientos medios varían en función de la velocidad del rotor. La amplitud de la vibración del desplazamiento es de aproximadamente 0.4 m. Las oscilaciones de alta frecuencia son perceptibles cuando las palas



alcanzan la posición superior. El desplazamiento es mínimo cuando pasa por delante de la torre. Se puede ver también una caída en el empuje cuando las palas pasan por la torre.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados analizados permiten verificar las capacidades de la herramienta de co-simulación desarrollada. Por otro lado, se identificaron patrones en los desplazamientos de las palas al pasar por la torre. Este efecto es muy interesante ya que el mismo genera una caída en el empuje para la misma frecuencia de paso. Estas cargas son importante para el estudio de fatiga de las palas. En futuros trabajos se va a estudiar la implementación de un controlador que responda de manera más conveniente.

#### AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha recibido financiamiento del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) PIP11220200101688CO

#### REFERENCIAS.

- [1] Upwards. Understanding of the Physics of Wind Turbine and Rotor Dynamics through an Integrated Simulation Framework. Website. 2022.
- [2] Bazilevs Y., Hsu M.C., Akkerman I., Wright S., Takizawa K., Henicke B., Spielman T., y Tezduyar T. 3d simulation of wind turbine rotors at full scale. part i: Geometry modeling and aerodynamics. *International journal for numerical methods in fluids*, 65(1-3):207–235, 2011.
- [3] Lago L.I., Ponta F.L., y Otero A.D. Analysis of alternative adaptive geometrical Configurations for the nrel-5 mw wind turbine blade. *Renewable Energy*, 59:13–22, 2013.
- [4] Löhner R., Haug E., Michalski A., Muhammad B., Drego A., Nanjundaiah R., y Zarfam R. Recent advances in computational wind engineering and fluid–structure interaction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144:14–23, 2015.
- [5] Wang L., Liu X., y Kolios A. State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: Aeroelastic modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64:195–210, 2016.
- [6] Starccm+. Users Manual. 2004.
- [7] Mecano S. Samcef Mecano. 1999.



## CENTRAL ELECTRICA Y SUBESTACIÓN MT/BT CON FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA

MSc. Carlos Labriola, Ing. Daniel Colón, Ing. Mario de la Canal, Ing. Marcelo Ávila, Ing. Benjamín Campigoto, Ing. Rubén Pérez

<sup>1</sup> Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue  
Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina  
correo-e: carloslabriola54@yahoo.com.ar.

### RESUMEN

Este proyecto que se viene desarrollando en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue (FIUNCo) en las dos últimas décadas es adaptado ahora a las nuevas tecnologías y ampliado para la enseñanza tecnológica. Dentro de los antecedentes esta la Central Escuela del Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de México utilizada para probar nuevos diseños y materiales en termo-centrales con combustibles fósiles. Aquí hay diferentes instalaciones en universidades nacionales y privadas particularmente de generación fotovoltaica y, además cooperativas eléctricas que disponen parques de entrenamiento para instalaciones de líneas de BT y MT. Pero ningún caso concentra generación con Energía Renovable y además entrenamiento en generación, estaciones y líneas de BT y MT. Para esto se está solicitando un predio en el asentamiento de la UNCo en Neuquén capital para la generación renovable (Eólica, Solar y Biogás) y unas líneas de BT y MT con cargas R, L, y C. Paralelamente se está realizando un diseño conceptual de la Central y Estación Transformadora con carga para poder disponer de un listado de equipamiento requerido del cual ya se disponen algunos. Con el equipamiento faltante, se hará un llamado a las empresas que puedan donar equipos por medio del sistema de Responsabilidad Social Empresaria (RSE). Los ejes del proyecto son: Gestión administrativa-técnica, Equipamiento (generación, Estaciones Transformadoras, Luminotecnia e Instalaciones eléctricas), Control y Supervisión, Riesgo y Aceptabilidad y CO<sub>2</sub> evitado y Medio Ambiente. Dado que los tiempos académicos son más lentos que los tiempos en la Industria privada, esta propuesta pretende disponer dentro de 4 años: el terreno asignado, cercado y un galpón para disponer el equipamiento.

**Palabras clave:** Eólica, Solar, Biogás, Central Escuela.



## 1. INTRODUCCIÓN

En el año 2000 se concibió la necesidad de disponer energía eléctrica por medio de Cogeneración en la FIUNCo. Esto es a raíz de tener varias donaciones de equipamiento de generación y transformación de energía luego de las privatizaciones iniciadas en los 1990s. Paralelamente desde el 2000 se fue creando la necesidad desde la FIUNCo sobre la conciencia de la situación climática y las formas de mitigar este flagelo producido por la actividad humana [1].

Desde el punto de vista del uso de la energía hay dos formas de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI):

- Uso Racional de la Energía (URE): reduciendo los gastos de energía en stand by, usando equipos electromecánicos-electrónicos más eficientes, por ejemplo ahora en nuestro país: cambio actual a luces LED y conciencia del cuidado del gasto de combustibles y energía eléctrica con la actualización de tarifas.
- Aplicación de Fuentes de Energía Renovable (FER) [2]: promoviendo la transición energética, los usuarios-generadores y las redes de BT/MT inteligentes.

En el 2010 se comienza a concretar la etapa inicial de disponer en la FIUNCo y para toda la UNCo Generación Renovable. Se sucedieron varios Proyectos de Investigación: FAIN 4/160: “Central Eléctrica Escuela a partir de Combustibles renovables combinados” (2010-2014) [3] y FAIN 4/199 “Central Eléctrica Escuela- Implementación” (2015-2019) [4], [5]. Actualmente en 2023 se presenta el proyecto “Central Eléctrica y Subestación MT/BT Escuelas” (2023-2026).

En el FAIN 4/160: se construyen una turbina microhidráulica Turgo (THT) a cargo del LAMHI (Laboratorio de Microcentrales Hidráulicas) y una Turbina de Eje Vertical Darrieus-Troposkien (TEVDT) a cargo del GES y GIV. Luego el Proyecto FAIN 4/199: “Central Eléctrica Escuela – Implementación” [5], se dedica a tratar de instrumentar la instalación de dicho equipamiento desarrollado y el donado solicitando un lugar no solo para la generación sino también una Subestación MT/BT (SE) con el equipamiento donado y otro a adquirir. Pero se vio frustrada la implementación práctica ya que los espacios previstos fueron denegados por la implementación de un Plan Maestro Edificio en la UNCo que llevo al PI 4 años de trámites en las justificaciones y detalles técnicos requeridos. Al final del PI que coincidió con el final de las autoridades de turno de la UNCo, se nos aceptaron las justificaciones, pero no se definió el lugar. Por otro lado en el FAIN 4/199 se llegó a una implementación a nivel de Ingeniería de detalle del sistema de generación y SE, estimándose que no solo sería necesario esto, sino también una serie de líneas de BT y MT y carga que podrían ser luminarias o calentadores de aceite para tener agua caliente. Se descartó la generación microhidráulica ya que se fue complejizando la aducción del agua de riego y la salida de la misma. Por ello se propone la Central Eléctrica Escuela con generación renovable en 2023 anexándole la SE con líneas y cargas [6].

## 2. Organización del proyecto actual:

El proyecto actual abarca cuatro ejes temáticos de trabajo. Estos incluyen lo realizado en los proyectos anteriores, y lo mejoran ampliando sus aplicaciones según la nueva tecnología existente, y aquella de viabilidad más inmediata dentro de la FIUNCo. Los ejes y sus etapas son:

- *Gestión del proyecto:* se dedica a gestionar en primera instancia el lugar a instalar ante la secretaría de servicios y la dirección de arquitectura de la UNCo. También gestiona el equipamiento faltante, cercado y seguridad del predio a disponer.
- *Equipamiento:* de generación, S.E y líneas MT/BT con carga: ayudan a la gestión de equipamiento y define el equipamiento faltante en base al existente.
- *Control y supervisión:* se dedica al sistema de control de generación, supervisión de protecciones y estados, adquisidor de datos y SCADA. También analiza los reguladores de velocidad (Control Frecuencia-Potencia) y los reguladores de Tensión (tensión-Potencia Reactiva), para cada equipo de generación según lo requiera.



- *Riesgo y Aceptabilidad:* analiza el comportamiento humano ante la transición energética y micro redes inteligentes, aceptación del concepto usuario-generador, aceptación o no del incremento de 2,5°C hacia el 2100, aceptación de las nuevas tecnologías (transporte eléctrico y/o híbrido, aceptación por parte de la industria de mejoras en el equipamiento según condicionamientos regionales (por ej.: rediseño de aspas ante las turbulencias del viento en la Patagonia, etc.)
- *CO2 evitado y Medio Ambiente:* se calcula el CO2 evitado según el tipo de generación en un período anual en base a un despacho estacional de las FERs. Esto lo realiza mediante el cálculo propuesto por Mecanismo de Desarrollo Limpio de la ONU. Además se estiman los impactos de las nuevas tecnologías de energía renovable respecto de las tradicionales aplicadas en este proyecto.

Se puede apreciar que por las temáticas de los ejes, es un proyecto multidisciplinario, interdisciplinario e intradisciplinario. Decimos que es interdisciplinario en el ciclo superior de Ingeniería, según las asignaturas asociadas. Es intradisciplinario, ya que para un mismo eje abarca diferentes aspectos relacionados al mismo.

También el proyecto abarca todas las tareas de una unidad académica desde lo administrativo, la gestión de recursos y activos, enseñanza (según competencias, según conocimientos previos, según tareas que se desarrollan en empresas, etc.), en tecnologías duras (selección, adecuación e instalación de equipamiento) y blandas (uso de programas de aplicación para diseño y simulación), generación de RRHH mediante becas y cursos de grado y postgrado y por último y no menos importante, análisis y ética en la conducta profesional en ingeniería.

Cabe aclarar que las tareas de gestión dentro de la UNCo tienen aspectos particulares no solo de las disposiciones internas de la misma sino también de las características personales de cada funcionario de dicha casa de altos estudios. Por ello los márgenes de acción tienen particularidades y diferencias con lo que normalmente se estudia en asignaturas como Organización de la Producción o Dirección y gestión de Empresas.

La Tabla 1 resume los objetivos de cada eje, las asignaturas asociadas a cada uno, y los responsables de llevar a cabo los objetivos y tareas propuestos para el proyecto.



Tabla 1: Ejes temáticos y actividades del Proyecto Central Eléctrica y Subestación Escuelas

Aspecto	Eje	Gestión	Equipamiento	Control y Supervisión	Riesgo y Aceptabilidad	CO2 Evitado y Medio Ambiente	Observaciones
<b>Responsables</b>		Ing. de la Canal - Ing. Colón	Ings. Campigoto – Pérez – Ávila – Asesor: Ing. Maduri.	Ing. Colón	Ing. de la Canal	Ing. Palavecino (*)	Titulares de cátedra *: Asesor externo
<b>Asignaturas</b>		(*)	Máquinas Eléctricas Instalaciones Eléctricas Estaciones Transformadoras Luminotecnia.	Sistemas de control Sistemas controlados por computadora	Cursos de extensión y postgrado para motivación de alumnos de grado y por recibirse (**).	Energía Renovable y Medio Ambiente (***)	*: Tareas administrativas en FIUNCo. UNCo y RSE. **: Generación de RRHH dictado futuro de asignatura optativa a futuro. ***: Seminario dictado por MSc. Labriola.
<b>Tareas</b>		Solicitud de predio. Solicitud de cercado. Solicitud de seguridad de bienes y personas. Gestión de equipamiento disponible. Solicitud y gestión de equipamiento faltante.	Diseño de la planta de generación (layout, dimensionamiento de los equipos a instalar, etc.). Diseño de la SE y su equipamiento asociado. (*) Diseño del campo de líneas de MT/BT. Determinación de estado e inventario del equipamiento disponible: Generación, Se, líneas y carga. Determinación del equipamiento faltante para ser gestionado por RSE (**). Determinación del tipo de carga a disponer al final de líneas de BT/MT (luminarias, resistencias en aceite, capacitores, reactores, etc.). (***)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SCADA</li> <li>• Determinación de señales de alarma y actuación de protecciones y definición de software y hardware a usar en SCADA (****)</li> <li>• Control de V-Q y de P-F en los grupos electrógenos a gas.</li> <li>• Control de Potencia y frenado de turbinas eólicas. (*****)</li> <li>• Sistema de seguimiento solar para paneles fotovoltaicos</li> </ul> Control de acidez, temperatura y volumen de biogás en biodigestores	Aceptabilidad de las FERs por los usuarios y por los estamentos políticos de decisión para la transición energética en la matriz de obtención de energía. Riesgos técnicos en la implementación de las FER. Aceptabilidad en el país de los fabricantes y armadores de equipos de FERs a las condiciones climáticas, orográficas, sociales y ambientales de la Argentina.	Cálculo del CO2 evitado por la generación Eólica y Fotovoltaica según la potencia instalada por mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Cálculo del Biogás necesario para la potencia instalada térmica que se define. Ventajas del biogás frente a los hidrocarburos disponibles.	*: Se dispone una tesis de grado de un primer diseño de la SE en MT/BT. **: Se harán compañías de solicitud de equipamiento a empresas por Responsabilidad Social Empresarial. (RSE). ***: se está en tratativas para conseguir las luminarias de Sodio de alta presión que se descartan ante el cambio por luminarias LED. ****: hay una tesis de grado que comenzó en 2022 asociada a esta temática. *****: hay una tesis de Doctorado asociada a esta temática.
<b>Asesoramiento y supervisión del proyecto</b>				MSc. Carlos V. M. Labriola			Fue el director de los proyectos FAIN 4/160 y 199



Como se ha hecho en los proyectos anteriores, se incorporan los objetivos del proyecto a las tareas académicas de las asignaturas de los responsables de cada eje. Básicamente se promueven trabajos de final de asignatura (criterio por competencias) y en caso de que la motivación de los alumnos continúe más allá de la asignatura se les propone un tema de tesis de grado asociado a los temas del proyecto.

### 3. Característica de la Ubicación en solicitud:

Habiendo tenido la experiencia del cambio rotundo de la finalidad de terrenos lindantes al actual edificio de la FIUNCo durante el proyecto FAIN 4/199 por el Plan Maestro Edificio de la UNCo, se busca un lugar dentro del extenso égido de la UNCo en la ciudad de Neuquén (Figura 1), que no interfiera con el plan de desarrollo edilicio actual (pero le brinde servicios) por las siguientes razones:

- Estéticas – arquitectónicas: dado que las formas de lo propuesto en el proyecto son más de instalaciones industriales que de oficinas y aulas académicas, por ejemplo líneas aéreas, equipamiento al aire libre, etc.
- Lugar definitivo para los fines propuestos por el proyecto: ya que hay varias edificaciones transitorias para finalidades diversas (depósitos, guarda de muestras, gamelas, etc.) a las cuales a veces no se les hace mantenimiento y luego se deben desmantelar. Mediante tareas académicas y de escuela, la Central y SE (CSEE) se supervisarán, controlarán y se hará el mantenimiento de las mismas, las que se programarán con antelación para que su funcionamiento se mantenga en el tiempo.
- Comunicaciones inalámbricas (desde el predio hasta la oficina de supervisión) y mediante fibra óptica en la SE [7].
- Que la Central-SE Escuelas (CSEE) brinden un servicio de Cogeneración con FERs al UNCo reduciendo los gastos de energía eléctrica de la misma.

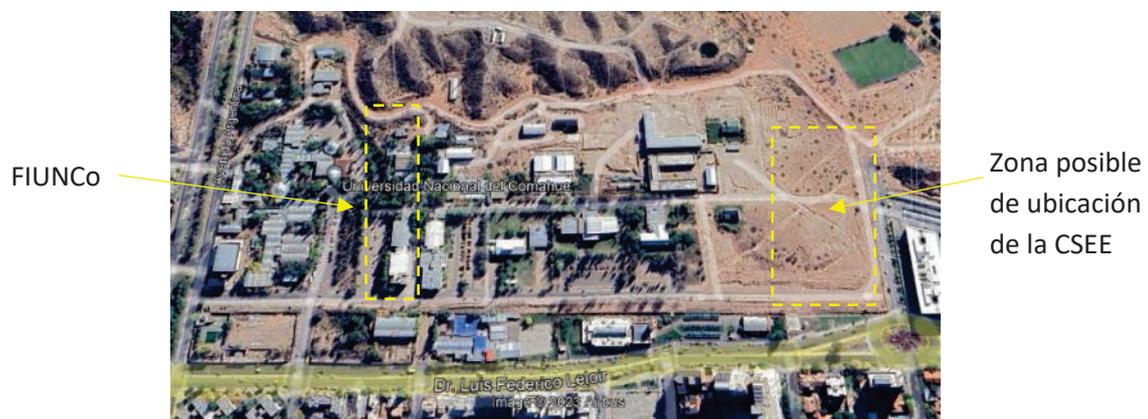


Figura 1: Ubicación en solicitud de la Central y SE escuela.



La superficie estimada inicial necesaria para lo propuesto es de 200m x 100m donde en 50x100 estarían las aulas taller, casa de máquinas de generación térmica y depósitos con área incluida para generación Eólica y Solar. A continuación 150mx100m para el campo de líneas de MT/BT con seccionadores e interruptores a carga.

#### 4. Equipamiento de Generación:

##### 4.1. Recursos Renovables en Neuquén capital:

Se analizaron los recursos renovables disponibles en el predio de la UNCo en Neuquén capital y se concluyeron en los siguientes:

- Eólico: Lo analizaron el Grupo de Energía y Sustentabilidad (GES) y el Grupo de Ingeniería del Viento (GIV) de la FIUNCo [8] y se obtuvieron los siguientes valores:
  - Vmedia a campo abierto : 5m/s(10m de altura).
  - Vmedia en terraza de edificio: 7 m/s (a 3m de terraza).
- Solar: ya hay paneles FVs para carga de celulares y PC, iluminación y control de acceso. La provincia de Neuquén dispone una radiación similar a la Puna desde primavera hasta mitad de otoño lo que permite una complementación relevante en ese período con otras renovables.
- Biogás: a partir de biomasa generada en las distintas unidades académicas y complementando con MO animal de las chacras aledañas a la ciudad para la generación de baterías carbolíticas, lipóticas, acidogénicas y metanogénicas.

##### 4.2. Equipamiento:

Se dispone de equipamiento para la SE existente (transformadores MT/BT, transformadores de medición y protecciones, seccionadores y accesorios) y de un diseño previo de la SE [9]. También se ajironará dicho diseño según nueva tecnología electromecánica, de medición, de comunicaciones e información para supervisión y control para pensar todo como mini red inteligente. Se adquirirá por mecanismo de RSE lo faltante.

En la parte de Generación se dispone de una máquina síncrona de 30kW, dos máquinas Asíncronas de 30kW de posición vertical (para turbina de eje vertical), un generador de IP (Nd-Fe-Bo) de diseño y construcción en la FIUNCo de 5kW.

**4.2.1. Generación Eólica:** Se dispone una turbina eólica tipo Darrieus Troposkien de rotor 3mx2m (Figura 2 izq.), arranque con aspas Savonius en los vértices del rotor. Este rotor sirve para acoplar con el generador de 5kW.



También se ha desarrollado junto con el Grupo Electrical Machines and Drives (GEMD), del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), un modelo de una turbina H-Darrieus (300W) (Figura 2 der.), con diseño de perfil de aspas a patentar, con autoarranque. Éste servirá para escalar a potencias mayores para instalar en la Isla de San Andrés (2024) y en Neuquén.

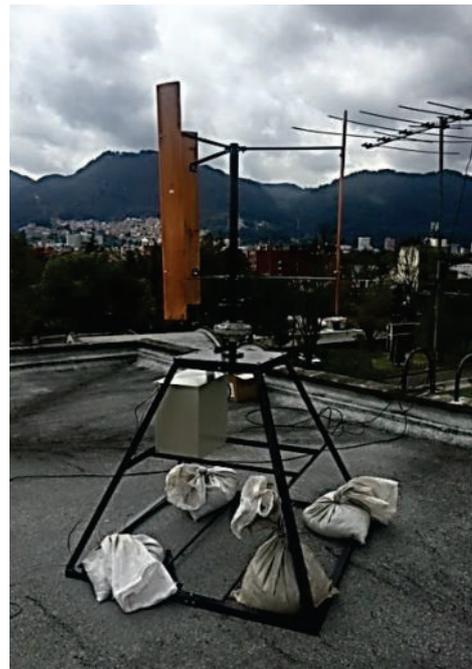
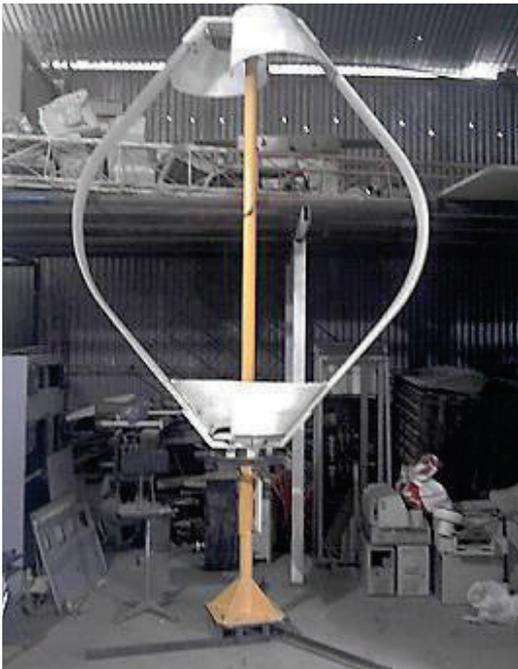
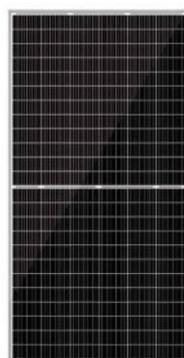


Figura 2: Turbina Eólica Darrieus Troposkien (5kW) (Izq) – Modelo H Darrieus (300w) (der.)

**4.2.2. Generación Fotovoltaica:** Se solicitará por RSE paneles de la mayor potencia disponible en el mercado. La superficie disponible sería la del techo de la casa de máquinas térmicas, aulas taller y depósitos, estimados en 2500m<sup>2</sup>. La potencia instalada FV sería hasta 500kW teniendo en cuenta la superficie estimada disponible y espacios para transitar entre hileras de paneles par inspección y mantenimiento.



Panel Fotovoltaico  
Monocrystalino de 550W (144  
celdas)- Rendimiento 21,3%-  
113cmx228cm – 29kg

Figura 3: Tecnología de Paneles disponibles en el mercado

**4.2.3. Generación Térmica a Biogás:** Se disponen en el mercado grupos electrógenos polivalentes a partir de equipos diésel DEUTZ [10]. Se piensa en 2 grupos electrógenos de hasta 500kW, funcionando uno por vez y el otro en stan by, con despacho de carga media de la UNCo (diurna) y ambos en alta carga (nocturna). Como son polivalentes pueden utilizar gas, gas oil o nafta o biocombustibles como Biodiesel [11], Alconaftas o Bionaftas, Biogás. La Fiunco dispondría de biogás a partir de 5 Biodigestores de carga semanal y obtención de abono orgánico a partir de los barros finales del primer digestor con tiempo de retención de 40 días y de los subsiguientes días semanalmente.

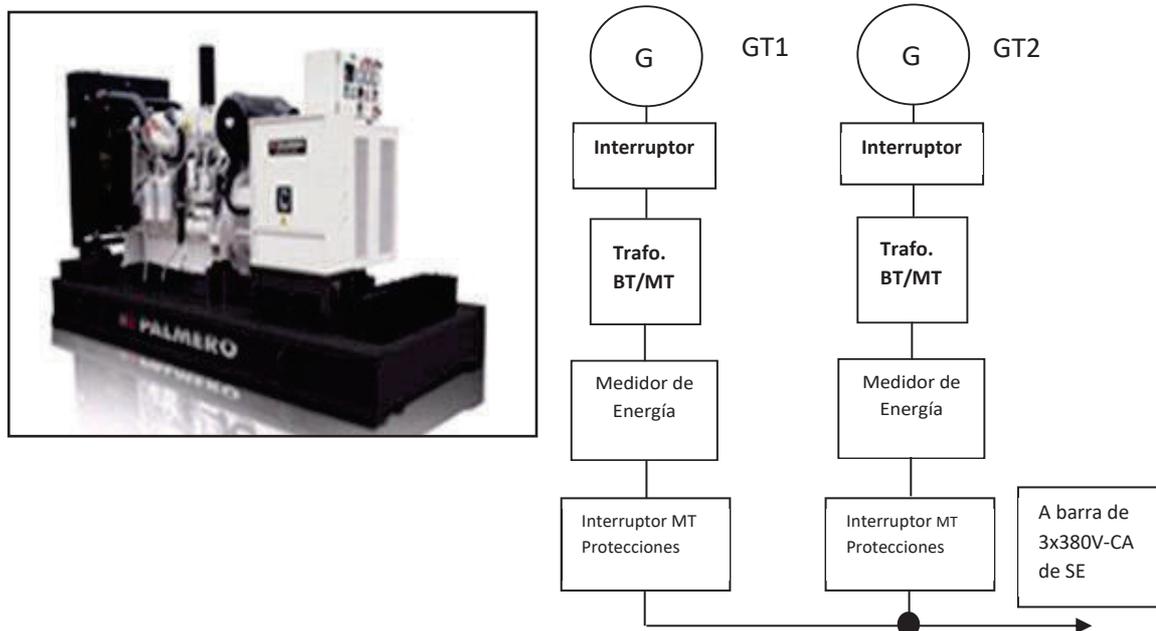


Figura 4: Grupo Electrónico (figura indicativa no de equipamiento definitivo) (izq.) y esquema de conexión de dos grupos de hasta 500kW (der.)

Los grupos electrógenos del tipo polivalente basados en equipos DEUTZ disponen de triple sistema de inyección de combustible sobre un diseño de motor Diesel. Estos usarán en nuestro caso Biogás proveniente de los digestores mencionados inicialmente y la alternativa sería gas de red. Además la polivalencia en el uso de Biocombustibles en estos grupos electrógenos especiales, es para tener una amplitud de enseñanza de las bondades de esos biocombustibles (líquidos y gaseosos) frente a los hidrocarburos existentes.

#### 4.3. Subestación MT/BT, líneas y carga:

La subestación [9] será para enseñanza y para uso de distribución de la universidad. Eso lo definirá la gestión técnica administrativa. Puede haber líneas de MT que salgan de la misma para alimentar circuitos de Unidades Académicas en crecimiento (que no sean servicios esenciales).



En baja tensión se pueden alimentar instalaciones cercanas como ser iluminación de caminos senderos, perimetral, zonas de actividades deportivas, zonas de estacionamiento, riego estacional, etc.

#### 4.4 Perspectivas a futuro

En el proyecto FAIN 4/199 se desarrolló el proceso a nivel laboratorio de engorde de bacterias *Squerichia Coli*, con agua de lavado de tanques de juguera [12]. Falta cerrar continuar con extracción de los lípidos y su conversión a biodiesel. Es una alternativa de combustible a futuro a estudiar y desarrollar. Desde el punto de vista ambiental es una forma de utilizar una bacteria de las redes cloacales siendo alimentada con agua que se descarta y acumula en piletones reduciendo el impacto de las jugueras en el agua de descarte.

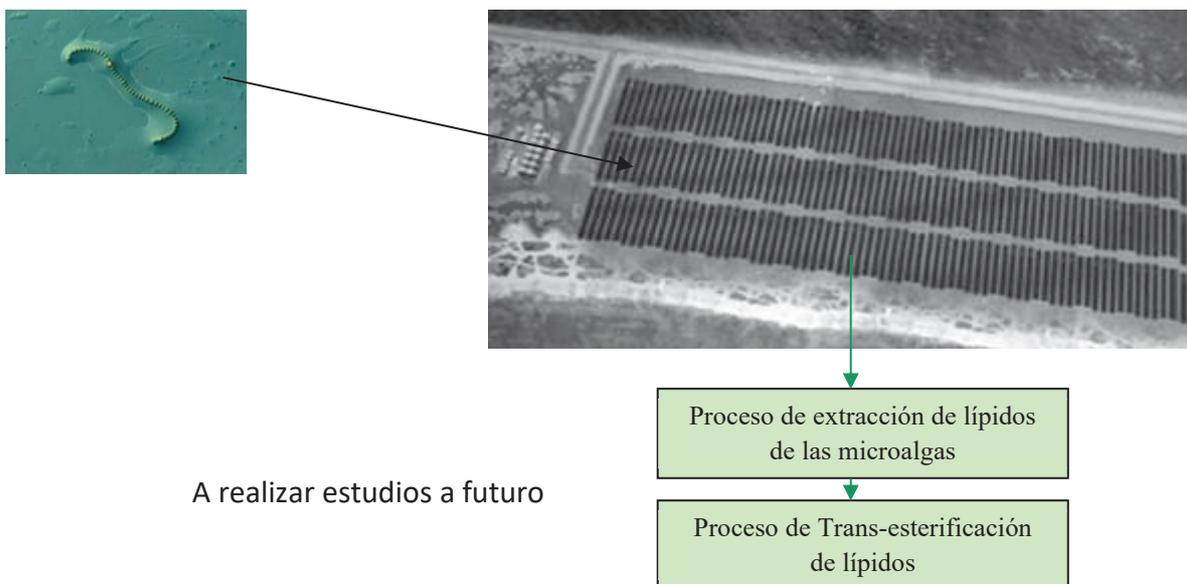


Figura 5: Microalgas (microfotografía arriba) en recintos plásticos (der.) [11].

La demanda de la UNCo en Neuquén Capital, ronda los 2MW según crecimiento estimado (último relevamiento de carga 2010 [8]) y URE a luminarias LED que se está realizando. Por ello se proponen como topes de Potencia a generar tres módulos térmicos de 500kW y un módulo que suma 500kW de eólica y solar. En la medida del avance del proyecto, incremento de la demanda y disponibilidad de equipamiento a adquirir estos valores podrán variar.

Respecto de la subestación MT/BT hay una tesis de grado [9] a adaptar al nuevo lugar a solicitar y al crecimiento de la demanda.



No necesariamente un equipo debe ser de una potencia de 500kW, sino que dicho valor es el objetivo a llegar por tipo de combustible renovable en esta propuesta a mediano plazo. O sea la suma del equipamiento gestionado y en funcionamiento deberá ser dicho valor en el proyecto propuesto.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones:

Esta propuesta es el producto de la generación de RRHH en docentes, ayudantes de cátedra y alumnos en último año de carrera a partir de los proyectos anteriores FAIN 4/160 y 4/199. En definitiva es continuar el trasvasamiento generacional según las conclusiones de similar trabajo en el CAIM 2016.

Se analizan ampliamente factores técnicos de distintas especialidades de ingeniería y también factores no técnicos que pueden inducir a un error o sobredimensionar desmesuradamente un diseño (Riesgo) y también cuál es el límite que la sociedad o usuario es capaz de aceptar en un desarrollo con cierto riesgo.

Este es un proyecto que por sus ejes temáticos y los condicionamientos en la gestión que van más allá del grupo de trabajo, pueden crecer en forma dispar (unos más, otros menos). Lo que se logrará por lo menos, como se ha hecho en proyectos anteriores, es agotar los desarrollos “en papel” al culminar el período del presente proyecto, así como también la generación de RRHH como para continuar otro período.

Somos optimistas ya que hay un cambio generacional en la UNCo que puede permitir mirar más allá de los condicionamientos políticos mediáticos.

Estamos en el inicio del ciclo de vida a pesar de que desde el nacimiento de la idea han pasado 23 años. Esto muestra el hecho de que los tiempos Académicos no son iguales a los tiempos de las empresas y el mercado. Esto es así porque la prioridad en la Universidad es enseñar, luego será la generación de conocimiento y RRHH mediante investigación y hacer extensión universitaria.

### 5.2. Recomendaciones:

Hay que tener en cuenta que las ideas deben comenzarse a partir de lo más simple y sencillo, y luego complejizarla en la medida de los éxitos en el funcionamiento en las etapas previas. No hay que implementar ideas complejas en el inicio porque un fracaso aunque sea parcial puede desmotivar a los RRHHs y acabarse la implementación de la idea.



Este proyecto fundamentalmente consiste en generar instalaciones que permitan ser prototipos para la enseñanza electromecánica y además prestar un servicio a la UNCo, sin olvidar que la prioridad es la docencia y la investigación.

Como se tiene bastante tiempo de experiencia en especial de las cuestiones de gestión y técnicas se debe poner énfasis en la previsión de atrasos administrativo-técnicos.

## REFERENCIAS:

[1] Watson, 2004: Reunión del Panel Internacional de Cambio Climático en Buenos Aires donde el Director saliente R. Watson, en su discurso de presentación, asegura que ya no hay duda que la variabilidad climática es producida por la actividad antropogénica (industria, confort, transporte, agropecuaria, ganadería y sus daños colaterales: talado de bosques nativos, etc.

Marcelo Ávila, Gustavo Ludueña, Daniel Colón, Isabel Ferraris, Carlos Labriola, *CENTRAL ELECTRICA ESCUELA – IMPLEMENTACIÓN, propuesta a futuro. Los autores son integrantes del Grupo de Energía y Sustentabilidad de la FIUNCo*. Trabajo editado en Anales del IV CAIM 2014, desarrollado en la Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Chaco. Septiembre 2014.

[2] ERyMA, 2001: Creación de la asignatura optativa “Energía Renovable y Medio Ambiente” en el ámbito de la FIUNCo, para todas las carreras de Ingeniería y para la Licenciatura en Saneamiento Ambiental de la UNCo, marzo 2001.

[3] FAIN 4/160,2010: Proyecto de Investigación: “Central Eléctrica Escuela a partir de Combustibles renovables combinados”, Director: MSC. Carlos Labriola, Co\_Director: Ing. Rubén Pérez. Período 2010-2013, proyecto terminado e Informe Final aprobado por evaluación externa.

[4] FAIN 4/199, 2014: “Central Eléctrica Escuela – Implementación”, Director: MSC. Carlos Labriola, Co\_Directora: Ing. Isabel Ferraris Período 2014-2017, proyecto en ejecución e Informe de Avance aprobado por evaluación externa.

[5] CAIM 2014: “CENTRAL ELECTRICA ESCUELA – IMPLEMENTACIÓN”; Ing. Marcelo Ávila, Ing. Gustavo Ludueña, Ing. Daniel Colón, Ing. Isabel Ferraris, Msc. Carlos Labriola. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Chaco, 2 al 5 de septiembre del 2014.

[6] GES, 2023: Central Eléctrica y Subestación Escuelas: proyecto aprobado en mayo del 2023 como continuación y mejoras tecnológicas respecto de FAIN 4/160 y 4/199. Propuesto por el Grupo de Investigación Aplicada de Energía y Sustentabilidad (GES) de la FIUNCo en agosto 2022.



- [7] CIDEL 2014: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES Y CONTROL PARA CENTRAL ELECTRICA ESCUELA A PARTIR DE COMBUSTIBLES RENOVABLES COMBINADOS EN LA UNCo Autores: Ing. Daniel Colón, Msc. Ing. Carlos Labriola, Congreso Iberoamericano de Distribución Eléctrica, Benos Aires, 22 al 24 de septiembre del 2014.
- [8] PICTO, 2010: “DIAGNÓSTICO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO EN DOS MICRO REGIONES DE LA PATAGONIA, Y EVALUACIÓN DE TURBINAS EÓLICAS DESARROLLADAS POR UNIVERSIDADES NACIONALES EN AMBOS LUGARES “, Proyecto PICTO CIN II 2010 -0085, Director: Dr. Jorge Lassig, Co-Director: MSc. Ing. Carlos Labriola, 2010-2014.
- [9] Wolham, C.: *Tesis de Grado: “Estación Transformadora didáctica de 13,2/0,400KV”*, Director: Ing. Rubén Pérez, presentada en agosto 2012, FIUNCo, Neuquén.
- [10] Palmero, 2010: Equipamiento Electrónico Multi-combustible para generación eléctrica, propuesta de convenio de comodato para generación térmica en la FIUNCo.
- [11] Barón, 2010: “Desarrollo de planta experimental de biodiesel a partir de microalgas”, *Convenio Universidad de Hawai-Universidad de Cuyo*, presentación del Dr. Barón, 2010.
- [12] Microalgas, 2013: “UTILIZACIÓN DE EFLUENTES INDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE MICROALGAS” Autores: Quiroga, D., Montenegro L. S., Labriola C., Bagnato C. y Rosenbaum E.. *HYFUSEN*, 10 al 14 de Junio del 2013, Córdoba.

### **Área Temática: Energía y Medio Ambiente**



## Estudio de la curva característica de paneles fotovoltaicos ante la variación de los parámetros de su instalación y de las estaciones del año.

Mg. Ing. Adrian D'Andrea<sup>1</sup>, Ing. Carlos Pacheco<sup>2</sup>, Matías Maglianesi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento Académico Eléctrica - UTN Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina – [afadandrea@gmail.com](mailto:afadandrea@gmail.com)

<sup>2</sup> Departamento Académico Eléctrica - UTN Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina – [cgpach@yahoo.com.ar](mailto:cgpach@yahoo.com.ar)

<sup>3</sup> Departamento Académico Eléctrica - UTN Regional Santa Fe  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina – [matias.maglianesi@gmail.com](mailto:matias.maglianesi@gmail.com)

### RESUMEN

En la última década, el costo por kW generado mediante energía fotovoltaica se redujo desde un 66% hasta un 84% (Irena, 2019), este fenómeno genera un interés mayor en la forma de generar energía eléctrica amigable con el medio ambiente en diferentes grupos, comprendidos desde pequeños usuarios generadores que buscan un método para reducir su consumo eléctrico, hasta medianas y grandes instalaciones con el fin de generar para la comercialización de energía.

La eficiencia energética de los sistemas solares fotovoltaicos es afectada por múltiples factores externos. Con el creciente interés en este tipo de tecnología es de vital importancia encontrar formas de optimizar la generación de estos sistemas.

El presente trabajo expone y explica los resultados de mediciones de las curvas potencia obtenidas en un panel fotovoltaico de 100Wp para diferentes condiciones de instalación en la ciudad de Santa Fe a lo largo de las estaciones del año. En el trabajo se muestran las potenciales ganancias o pérdidas de potencia eléctrica para las diferentes condiciones de inclinación del panel y estaciones del año, tomando como referencia la inclinación anual óptima.

**Palabras claves:** Energía solar; Panel Fotovoltaico, Generación de Energía, Eficiencia Energética

## 1. INTRODUCCIÓN

En la última década, el costo por kW de la energía fotovoltaica, se redujo entre un 66% a un 84% (Irena, 2019), este fenómeno genera un mayor interés en este tipo de tecnología por diferentes grupos de usuarios, los cuales comprenden desde pequeños emprendedores que buscan en método para reducir el consumo eléctrico de la red de distribución, hasta grandes inversores que buscan hacer instalaciones para la comercialización de la producción de energía.

La Argentina posee una superficie de 2.76 millones de Km<sup>2</sup>, y una extensión mayor a 3500 km de norte a sur, presentando en los lugares más óptimos, una radiación solar mayor a 7.5 kWh/m<sup>2</sup> (Grossi et al., 2007), lo que genera un rango de oportunidades para la instalación de este tipo de generación en el país. En el caso específico de la provincia de Santa Fe, la insolación media diaria anual (en el plano horizontal), va de un rango de 4.45 a 4.85 kWh/m<sup>2</sup>/día en el plano horizontal como se ve en la Figura 1, teniendo en el mes de enero valores de hasta 7.25 kWh/m<sup>2</sup>/día, mientras que en octubre hay valores tan bajos como 2.2 kWh/m<sup>2</sup>/día (generfe, 2018). Dada la amplia variación de irradiación en el plano horizontal, surge la pregunta de cómo aumentar la eficiencia de los paneles a lo largo del año.

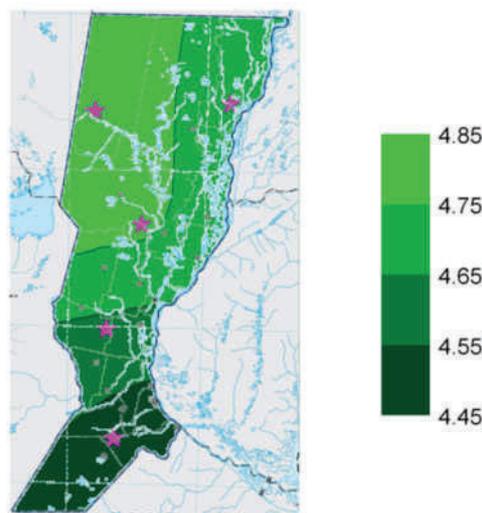


Figura 1. Insolación media anual para la provincia de santa fe en kWh/m<sup>2</sup>/día

Nota: adaptado de Estado de la Red Solarimétrica de Santa Fe (pag.20) FIQ – IFIS-Litoral, UNL – CONICET Grupo de Energías no Convencionales, 2015

Para aumentar la eficiencia de un panel, se puede trabajar desde varios apartados diferentes, como lo son la temperatura, o la orientación e inclinación. En este trabajo nos centraremos en

estas últimas condiciones, ya que la potencia de salida es proporcional a la radiación captada por el panel, la cual presenta un máximo al estar perpendicular a los rayos solares incidentes.

## 2. METODOLOGÍA

Para la adquisición de datos se colocó el panel fotovoltaico en la plataforma móvil con inclinación regulable que se observa en la Figura 2. Las diferentes mediciones fueron realizadas en un mismo día, y en el cual se modificaron tanto el ángulo de inclinación como de orientación respecto al norte magnético.



Figura 2. Plataforma ajustable para ensayos de paneles fotovoltaicos.

Al mantener constante los valores de radiación solar y la orientación del panel, la corriente de salida varía con la tensión sobre la carga y la temperatura (Fernández, 2010: 291), y dado que para el ensayo la temperatura tuvo una variación mínima dentro de una misma serie de ensayos ya que se realizaron bajo las mismas condiciones ambientales, y que se analizó la variación porcentual entre las mediciones y no los valores en sí, la temperatura no es un factor relevante para este estudio.

Para la obtención de la curva, se utilizó una carga electrónica con la cual se obtuvieron 20 puntos diferentes de la curva característica de salida de tensión-corriente del panel de manera automática. Finalmente, se aproximó la curva utilizando interpolación lineal con la forma vista en la ecuación (1), ya que está es la modelización del comportamiento del panel, buscando un ajuste mayor al 99.5%.

$$I(V) = a - b * e^{-c*V} \quad (1)$$

Una vez obtenidas las curvas para las diferentes inclinaciones como las que se observan en la Figura 3.

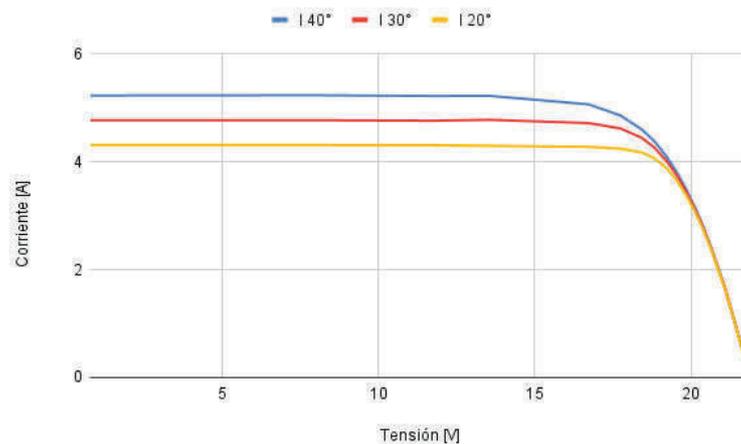


Figura 3. Curva característica del panel fotovoltaico para 3 ángulos de inclinación diferentes.

Luego se encuentra el valor de potencia máxima de salida como el producto de la tensión y la corriente en cada punto, para cada medición y así poder comparar los valores entre sí.

Este trabajo se realizó en diferentes ocasiones a lo largo de múltiples ensayos a lo largo del año.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A los valores obtenidos luego de realizar cada ensayo se los comparó teniendo en cuenta la variación porcentual, y tomando como valor de referencia el valor con una inclinación de 30° y misma orientación.

Este procedimiento se realizó teniendo en cuenta que, para obtener la mejor eficiencia anual sin mover la posición, el ángulo debe ser el más cercano a la latitud del lugar donde está instalado (SOLAR ENERGY INTERNATIONAL, 2007: 34).

Dado que los resultados de los ensayos se obtuvieron en el banco instalado en la terraza de la Universidad Tecnológica Nacional- Facultad Regional Santa Fe, que se encuentra a una latitud de -31.61°, todas las mediciones fueron referenciadas a la realizada a 30°. Los resultados se los pueden observar en la tabla 1.



Tabla 1. Valores porcentuales de potencia en relación a la medición a 30° de inclinación con la misma orientación para diferentes ensayos.

Orientación	4/5/22	11/5/22	29/6/22	31/8/22	14/9/22	27/10/22	27/10/22	24/11/22
40° N	14,86	-7,21	9,88	0,5	0,24	-3,87	-4,46	-7,1
30° N	0	0	0	0	0	0	0	0
20° N	-2,77	-5,97	-10,05	-5,17	-1,88	0,92	1,94	3,36
40° N+10W	4,26	5,61	9,83	2,37	1,41	-3,59	-6,05	-6,46
30° N+10W	0	0	0	0	0	0	0	0
20° N+10W	-6,04	-6,85	-11,58	-7,93	-3,03	-3,59	2,93	2,77
40° N+20W	0,14	5,03	5,45	3,05	1,09	-6,25	-6,27	-5,87
30° N+20W	0	0	0	0	0	0	0	0
20° N+20W	-3,82	-7,11	-4,93	-4,04	-3,93	2,15	2,75	2,94
40° N+10E	5,04	7,01	9,64	7,24	0,26	-3,25	-3,7	-8,45
30° N+10E	0	0	0	0	0	0	0	0
20° N+10E	-6,36	-2,53	-10,31	0,75	-2,51	0,54	2,4	3,93
40° N+20E	4,88	3,48	8,79	-1,49	1,36	-4,22	-4,98	-1,22
30° N+20E	0	0	0	0	0	0	0	0
20° N+20E	-6,17	-9,33	-9,74	1,68	-1,08	1,47	1,48	7,34

Al analizar la tabla, se puede apreciar una tendencia en los resultados donde para valores con mayor inclinación se obtuvieron mayores valores de potencia durante los meses de invierno, mientras que con el ángulo de 20° se obtuvo una pérdida de potencia. En cambio, para los meses de verano para este ángulo se obtuvieron ganancia de potencia.

Por otro lado, si solo comparamos los valores de orientación donde obtuvimos las mayores potencias, obtenemos la

El objetivo de esto es minimizar las variaciones por la hora de la que se realizó la medición, buscando que el panel esté orientado lo más perpendicularmente posible a los rayos incidentes del sol, para así simular la potencia que tendría el panel en el mediodía solar, donde se encontraría su pico de producción.



Tabla 2. Valores porcentuales de potencia en relación a la medición a 30° para la orientación con la máxima potencia de salida.

Medición	4/5/22	11/5/22	29/6/22	31/8/22	14/9/22	27/10/22	27/10/22	24/11/22
Orientación	N+20E	N+20W	N+20E	N+20W	N+10E	N+10E	N+10E	N+20W
40° N	4,88	5,03	8,79	3,05	0,26	-3,84	-2,79	-6,01
30° N	0	0	0	0	0	0	0	0
20° N	-6,17	-7,11	-9,74	-4,04	-2,51	0,31	2,75	2,96
Día del año	124	131	179	243	256	300	328	340

De esta tabla, se puede ver como la ganancia al estar inclinado a los 40° va en aumento, hasta llegar a un valor máximo a final de junio, ocurriendo de manera idéntica con las pérdidas. Este momento es coincidente con ser la fecha más próxima al solsticio de invierno (21 de junio del 2022), momento donde el sol se encuentra en el menor ángulo en el cielo, para luego volver a aumentar como se ve en la Figura 4. Por este motivo para captar mayor radiación solar, se debe aumentar el ángulo en invierno, y reducirlo en verano.

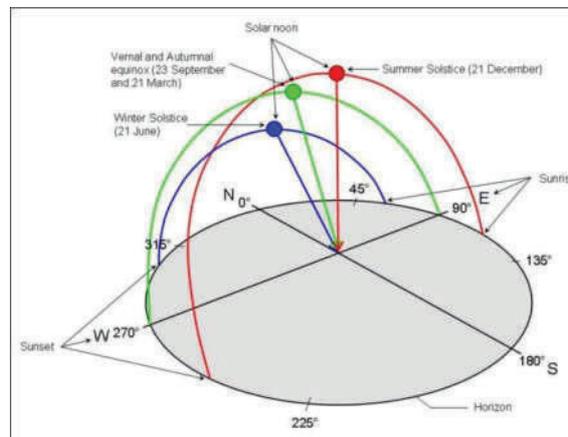


Figura 4. Recorrido del sol a lo largo de diferentes estaciones en el hemisferio sur (Conradie, 2010)

#### 4. CONCLUSIONES

Con los valores presentados se puede apreciar la existencia de una variación de la potencia de salida significativa para los diferentes ángulos de inclinación a lo largo del año. Este comportamiento se corresponde con los modelos teóricos, los cuales dictan que el panel debe tener ángulos mayores en invierno y menores en verano. Teniendo a una misma diferencia de ángulo (tanto positiva como negativa) respecto al valor recomendado, un comportamiento casi idéntico en la variación, solo que en sentidos opuestos. Comprobando experimentalmente que



la máxima diferencia de salida se dará en los días de solsticio, mientras que la mínima será durante los equinoccios

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Generfe. (2018). Informe de Radiación Solar en la provincia de Santa Fe. Disponible en <https://www.santafe.gob.ar/ms/generfe/wp-content/uploads/sites/23/2018/11/Informe-de-radiaci%C3%B3n-solar.pdf>

Conradie, D. C. (2010). Maximising the sun. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10204/7519>

Grossi Gallegos, H y Righini, R. (2007). ATLAS DE LA ENERGÍA SOLAR DE LA REPÚBLICA ARGENTINA.

IRENA (2019), "Renewable Power Generation Costs in 2018", International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi (2019). Disponible en [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA\\_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf)

Fernández, J. (2010). COMPENDIO DE ENERGÍA SOLAR: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica (Adaptado al Código Técnico de la edificación y al nuevo RITE). Madrid: amadrid, 291.

Solar Energy International. (2007). PHOTOVOLTAICS Design and Installation Manual. Gabriola Island: New Society Publishers. 34.



## GENERADORES EÓLICOS DE EJE HORIZONTAL: ESTUDIOS EXPERIMENTALES CON MODELOS A ESCALA REDUCIDA Y SIMULACIONES NUMÉRICAS

Lucas José Maidana<sup>1</sup>, Matías Ezequiel López<sup>1</sup>, Marcelo Italo Adotti<sup>1,2</sup>, Roberto Adrián Wittwer<sup>1</sup>, Jorge Omar Marighetti<sup>1</sup>, Julián Medina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste. Av. Las Heras 727. Resistencia, Chaco. Argentina

<sup>2</sup> Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica IMIT (CONICET - Universidad Nacional del Nordeste). Av. Libertad 5460. Corrientes. Argentina

### RESUMEN

Con el auge de las energías renovables, los aprovechamientos eólicos han registrado un desarrollo importante en los últimos veinte años. Simultáneamente, se están realizando diferentes tipos de estudios que apuntan a evaluar el comportamiento de los aerogeneradores, las estructuras de soporte y sistemas de control con el fin de optimizar su funcionamiento. Dentro de las herramientas de análisis que se utilizan en estos estudios ocupan un lugar cada vez más importante los ensayos en túneles de viento con modelos a escala y las simulaciones computacionales basadas en métodos numéricos.

El trabajo consta de una primera parte donde se describe la problemática de la generación eólica revisando aspectos de la variabilidad de la fuente eólica y su relación con las características de diseño de las turbinas. La segunda refiere a ensayos con modelos a escala reducida. Finalmente se evalúa el diseño de un modelo a escala reducida de un aerogenerador con el objetivo de proponer soluciones para optimizar su rendimiento aerodinámico.

En esta evaluación, que constituye la parte central del trabajo, se contrastan los resultados experimentales con los datos obtenidos de un análisis teórico mediante la aplicación del método de los elementos de pala (BEM, por Blade Element Method) y una simulación numérica preliminar con el software OpenFOAM. En esta simulación se utiliza el modelo simplificado de disco actuador y se analizan los parámetros principales de la turbina. Complementariamente, se estudia el sistema del control del modelo mediante la automatización del posicionamiento del ángulo de ataque de las palas. Es por ello, que disponer de un sistema de control de este tipo permitirá optimizar la extracción de potencia.

**Palabras Clave:** aerogenerador, aerodinámica, sistema de control, CFD

### 1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables se están constituyendo en una fuente sustancial de la energía a nivel global y, en particular, en nuestro país y en toda la región se viene incrementando la cantidad y dimensiones de los parques eólicos. Desde la perspectiva de la aerodinámica de las palas, los aerogeneradores han sido bastante estudiados pero la interacción entre la propia estructura de los mismos y la capa límite turbulenta de la atmósfera todavía no está totalmente entendida. Este aspecto, sumado a la variabilidad del viento, son muy importantes en términos de la eficiencia



de los parques de generación y pueden ser estudiados mediante modelos a escala reducida en túnel de viento.

De manera muy resumida, la variabilidad de la fuente eólica está relacionada con la variación de la velocidad del viento respecto al tiempo. En un mismo lugar, los valores promedio de velocidad del viento atmosférico sobre periodos no muy largos pueden ser caracterizados probabilísticamente mediante una distribución de Weibull [1]. Por otro lado, se puede analizar la distribución vertical de velocidad mediante la ley potencial de velocidades o alguna variante de la ley logarítmica, pero siempre a mayor altura sobre el terreno existe mayor velocidad lo que optimiza el aprovechamiento energético. Asimismo, la turbulencia del viento incidente, que depende del tipo de terreno, las condiciones meteorológicas y la altura [2], afecta el rendimiento del aerogenerador. Recientemente, se ha comenzado a incorporar al cálculo estructural de aerogeneradores algunas condiciones de viento no convencionales, tales como las corrientes descendentes o “downburst”, producto de algunos accidentes registrados en este tipo de instalación por ese tipo de fenómeno [3]. Finalmente, la variación direccional del viento en un determinado lugar, lo que define la rosa de los vientos, que también tiene influencia a la hora del diseño y selección de la disposición y tipo de dispositivo.

La interacción entre aerogeneradores de un parque eólico y, en particular, el estudio de la estela turbulenta que se genera a sotavento de un dispositivo resulta muy importante para poder establecer y prever rendimientos de este tipo de aprovechamiento. Existen antecedentes de estudios experimentales realizados recientemente en túneles de viento de Europa, Asia y América [4, 5, 6]. Un estudio de este tipo ha sido realizado en el túnel de viento “J. P. Gorecki” del Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE [7] y otros en el túnel de viento “J. Blessmann” del Laboratório de Aerodinâmica das Construções de la UFRGS [8, 9, 10]

Además de los parques eólicos convencionales, es importante destacar el crecimiento de aprovechamiento off-shore a nivel mundial. En Sudamérica, Brasil ha emprendido recientemente un ambicioso plan para la implementación este tipo de emprendimiento [11]. El desafío es muy importante debido a que se requiere un enfoque interdisciplinario que incluye nuevos aspectos de Ingeniería Estructural y Meteorología que se suman a los necesarios para aprovechamientos convencionales, sin embargo, las ventajas que se presentan debido al gran potencial de la costa atlántica brasileña han impulsado al desarrollo de este importante programa.

El objetivo general del trabajo es el análisis teórico a partir de una serie de ensayos en túnel de viento con un modelo a escala de un aerogenerador de eje horizontal [12, 13], complementados con simulaciones de fluido-dinámica computacional (CFD). Estos análisis preliminares están orientados en la evaluación del rendimiento aerodinámico de los aerogeneradores y maximización de la extracción de energía renovable disponible mediante el diseño de las palas



y su configuración. Además, en este trabajo se evalúa el mecanismo de posicionamiento de las palas del aerogenerador. Modelando el funcionamiento dinámico del mismo por medio de la teoría de control clásica a partir de las variables de ángulo de ataque y revoluciones del rotor.

## 2. ENSAYOS EXPERIMENTALES

El laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE cuenta con un túnel de viento de baja velocidad del tipo de capa límite, cuya cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho por 1,8 m de alto y 22,4 m de longitud, lugar donde se llevaron a cabo los ensayos del modelo a escala reducida del aerogenerador. La configuración utilizada en el ensayo puede observarse en la Figura 1.

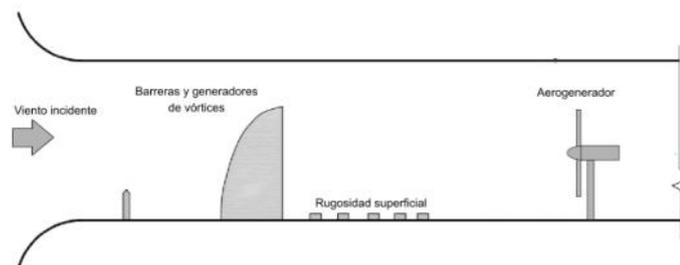


Figura 1: Esquema de configuración del Túnel de Viento Jacek Gorecki y posicionamiento del aerogenerador en la segunda sección de ensayo.

En este ensayo se pretende caracterizar la dinámica del aerogenerador. Evaluando la variación del ángulo de ataque  $\beta$  de los álabes y el efecto con las revoluciones por minuto RPM del rotor. En donde el ángulo  $\beta$  es el compuesto por el vector velocidad relativo de viento incidente  $\vec{w}$  y la línea de cuerda del perfil como se muestra en la Figura 2.

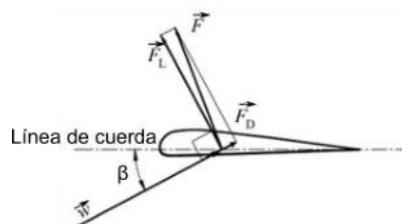


Figura 2: Diagrama de fuerzas e incidencia de viento [12]

## 3. TEORÍA DEL DISCO ACTUADOR

Este modelo es una simplificación físico-matemática útil para analizar los efectos de la presencia de una hélice o un rotor en un fluido en movimiento, despreciando los efectos rotativos producidos por las palas, solo contemplando la caída de presión producida por el rotor, se conoce como disco actuador [13].

Es posible realizar un análisis preliminar del comportamiento aerodinámico de las turbinas eólicas, simplemente considerando el proceso de extracción de energía producido por la interacción entre el fluido y el disco actuador.

El sistema de ecuaciones que rige este modelo se muestra en la Ecuación (1), Ecuación (2) y Ecuación (3). Las cuales permiten calcular la velocidad promedio del flujo a través del disco  $v$ , el empuje axial  $T$  y la potencia absorbida  $P$ .

$$v = 0,5(v_1 + v_3) = (1 - a)v_1 \quad (1)$$

$$T = 2\rho Av_1^2 a(1 - a) \quad (2)$$

$$P = 2\rho Av_1^3 a(1 - a)^2 \quad (3)$$

Donde  $\rho$  es la masa específica del fluido,  $A$  es el área frontal del disco actuador o sección barrida por el rotor,  $v_1$  es la velocidad de viento incidente y  $a$  es el factor de reducción axial de velocidad.

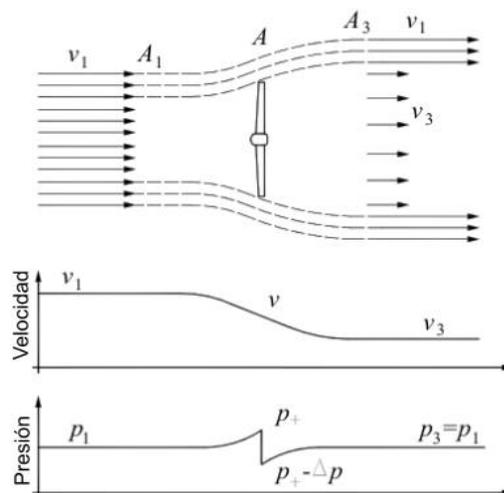


Figura 3. Modelo de tubo de corriente [12]

En Figura 3 se muestra como el flujo al atravesar el disco actuador experimenta una reducción gradual de la velocidad, mientras que la presión experimenta una disminución abrupta. Aguas abajo del disco, la presión se recupera a su valor inicial, mientras que el fluido pierde velocidad. El disco actuador induce una variación de velocidad que se superpone a la velocidad del flujo libre [1].

#### 4. ANÁLISIS GEOMÉTRICO DEL ÁLABE

Uno de los elementos más importante a la hora de diseñar un aerogenerador es el álabe, ya que es el elemento encargado de transformar la energía cinética proveniente del viento en energía



mecánica. Los álabes se componen de perfiles aerodinámicos en el desarrollo de su longitud, es por esto que la selección del mismo es crucial para un óptimo diseño.

El perfil aerodinámico es una forma geométrica diseñada para generar fuerzas de sustentación por efectos de escurrimiento del fluido sobre sus superficies. Estos perfiles están normalizados (NACA, NREL) en función de su aplicación.

En la Figura 4, se muestran las principales partes de un perfil aerodinámico. Estas son utilizadas luego para la nomenclatura según la norma a la que pertenezcan.

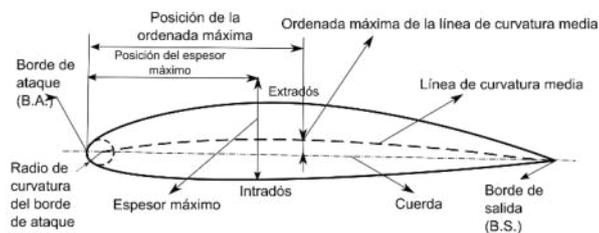


Figura 4. Esquema y partes de un perfil aerodinámico genérico

En la selección de estos perfiles debe primar una alta relación entre la sustentación y la resistencia aerodinámica, representada por la Ecuación (4) [14].

$$GR = C_L/C_D \quad (4)$$

Donde  $C_L$  y  $C_D$  representan los coeficientes aerodinámicos de sustentación y arrastre respectivamente. En este trabajo se han seleccionado cinco perfiles candidatos que presentan  $GR$  elevado, los cuales serán utilizados para la evaluación mediante el método descrito en la siguiente sección.

Mediante el software XFOIL 6.99 [16], se han obtenido los coeficientes aerodinámicos dentro de un rango de ángulos  $\beta$  para las condiciones de viento incidente.

## 5. MÉTODO DEL ELEMENTO DE ÁLABE

La teoría del elemento de álabes (BEM, por Blade Element Momentum Theory), es un modelo matemático más completo que el disco actuador cuyo objetivo es obtener como resultado la fuerza de empuje y torque que se producen sobre el aerogenerador. Las fuerzas son calculadas mediante la discretización en tramos del álabes.

El álabes de una turbina se enfrenta al flujo de aire y al movimiento de rotación, por lo que es necesario analizar la aerodinámica utilizando el factor de reducción axial  $a$ , e introducir el factor de reducción tangencial  $a'$  [12].

El método consiste en dividir el álabe en diferenciales y calcular en esas secciones la fuerza resultante de la interacción de la estructura con el viento incidente, ver Figura 5. Una vez obtenidos los resultados para cada sección, integrarlos o sumarlos para obtener el efecto resultante sobre la turbina [13].

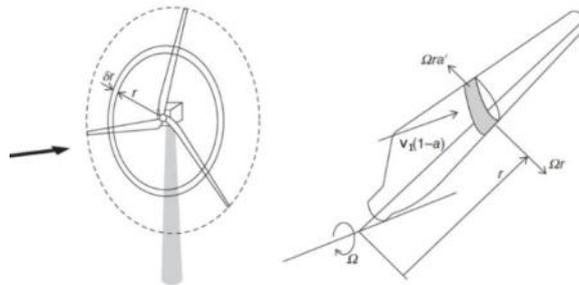


Figura. 5 Ilustración de la discretización de los elementos de álabe [1]

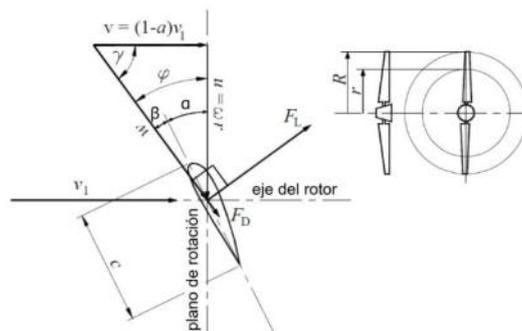


Figura 6. Cinemática del perfil alar [3]

$$T^*(r) = 0,5\rho w^2 c C_D \quad (5)$$

$$U^*(r) = 0,5\rho w^2 c C_L \quad (6)$$

$$T = B \int_0^R T^*(r) dr \quad (7)$$

$$P = \omega B \int_0^R r U^*(r) dr \quad (8)$$

La Ecuación (5) y Ecuación (6) permiten calcular las fuerzas axiales y tangenciales por unidad longitud por cada tramo discretizado. La integración de estas variables, representadas por la Ecuación (7) y Ecuación (8), permiten determinar el empuje axial total y potencia del aerogenerador respectivamente. En la Figura 6 se muestra el triángulo de velocidades y las fuerzas ortogonales que se generan sobre el perfil.

## 6. CONTROL DE POSICIONAMIENTO DE ÁLABES

En esta instancia se presenta el modelo sin la optimización del control de posicionamiento del ángulo  $\beta$  respecto de un valor de referencia de giro del rotor.

El bucle de control consiste en modelo simple de primer orden [19], ver Figura 7, realizado con el software de uso libre SciLab específicamente su aplicación XCOS [17]. Este modelo preliminar representa el comportamiento dinámico de la física del aerogenerador teniendo en cuenta las siguientes hipótesis simplificativas:

1. La relación entre el ángulo de las palas y el giro del servo-motor Futaba es de 1:1.
2. Se han despreciado las pérdidas por resistencia y por inductancia en el servo-motor.
3. Se modeló la física del aerogenerador con una relación lineal entre el ángulo  $\beta$  y los valores de RPM en carga, en función a los resultados experimentales.

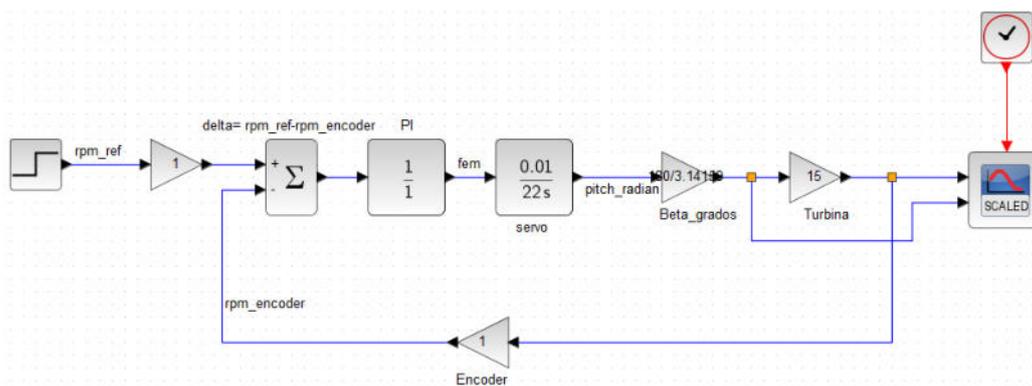


Figura 7: Diagrama de lazo cerrado del sistema de control

## 7. FLUIDO-DINÁMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Es una herramienta usada para resolver las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento lineal, expresadas por la ecuación de Navier-Stokes. Estas ecuaciones son discretizadas mediante el método de volúmenes finitos (FVM, por Finite Volume Method) para observar los campos de las variables de interés, tales como la presión, velocidad y parámetros de turbulencia. La simulación fue realizada con la plataforma de código abierto OpenFOAM.

La simulación fue llevada a cabo adoptando las hipótesis de flujo estacionario e incompresible. El flujo turbulento fue modelado con las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas con el número de Reynolds (RANS, Reynolds Average Navier Stokes), utilizando el modelo  $\kappa - \epsilon$ . Además, se modeló el perfil de velocidad incidente característico del túnel de viento para la condición de ensayo.

La discretización del dominio computacional se realizó mediante elementos hexaédricos, con refinamiento localizado en la zona donde está ubicado el disco actuador. Las condiciones de borde impuestas al dominio y sus dimensiones son representadas en la Figura 8.

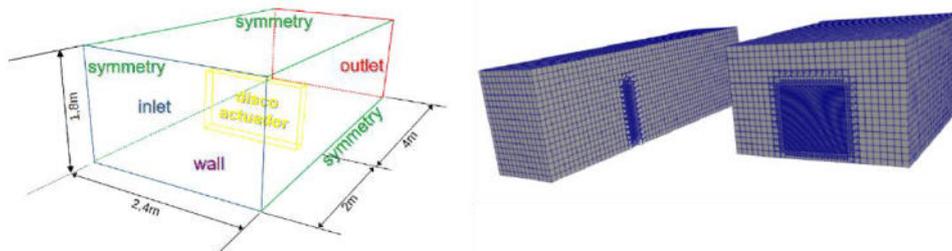


Figura 8. Dimensiones y condiciones de borde - Vista en corte lateral y frontal del dominio computacional

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1 Resultados de los ensayos experimentales

De los ensayos se obtuvo la relación de revoluciones de giro del rotor para cada ángulo  $\beta$  con un viento incidente de 6,76 m/seg. En la Figura 9, se puede observar un comportamiento lineal entre ambas variables, considerando que 0 grados es la posición de bandera acorde a la configuración propuesta por Gundtoft [12]. Es posible conocer mayores detalles de los ensayos en trabajos previos [15].

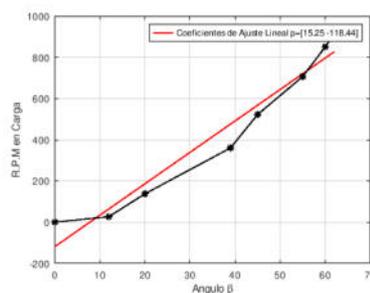


Figura 9. Curva de respuesta del aerogenerador en función al ángulo  $\beta$

### 8.2 Resultados del Método BEM

En la búsqueda de maximizar la extracción de energía del viento, se eligieron distintos perfiles aerodinámicos con  $GR$  elevado. Para la implementación del método se resolvió el sistema de ecuaciones de forma iterativa mediante un código en lenguaje Octave [18]. Los resultados obtenidos del análisis de los perfiles aerodinámicos mediante la aplicación del BEM con una



discretización de 50 elementos, ante condiciones de flujo turbulento  $Re=126.000$ , son expresados en la Tabla 1.

De los cuatro candidatos analizados presentados en la Tabla 1, el perfil NACA 4412 es el que mejor rendimiento aerodinámico posee, lo cual permite inferir en que la estrategia de selección de perfiles en función  $GR$  es adecuada, debido a una relación proporcional de esta variable con la potencia aprovechada.

Tabla 1. Resultados BEM para 1095 RPM y diámetro 0,6 m

Perfil	Potencia (W)	Empuje (N)	Rendimiento	Torque total (Nm)	GR
NACA 4412	26,73	7,97	51,67	2,33E-04	63,82
NACA 4415	26,45	8,13	51,12	2,30E-04	59,03
NREL S318	22,64	8,06	43,76	1,98E-04	31,20
NACA 64 421	21,28	7,81	41,13	1,86E-04	27,62

### 8.3 Resultados del modelo de control de posicionamiento

Se ha simulado la implementación del sistema de control presentado en la Figura 8, imponiendo en la entrada una función escalón de 0 a 200 RPM, con un retardo unitario para un período de 20 segundos. En la Figura 10 se observa la respuesta dinámica del modelo propuesto del aerogenerador. Se evidencian en ellas, un comportamiento estable de ambas variables RPM y  $\beta$ , alcanzando su valor final luego de 15 segundos de aplicación de la función.

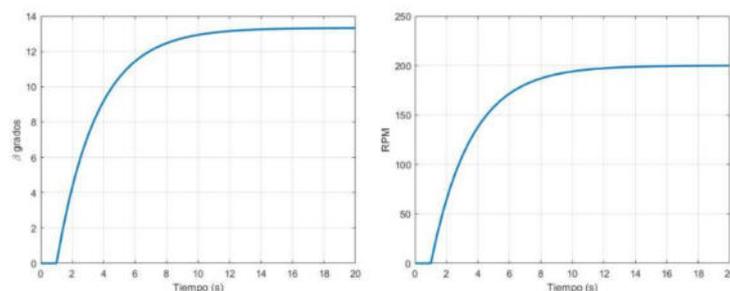


Figura 10. Respuesta dinámica del aerogenerador

### 8.4 Resultados de la simulación CFD

En la simulación computacional realizada se obtienen los campos de velocidad y presión relativa afectados por la presencia del disco actuador. En las Figura 11 se muestra en una vista en corte el campo de presiones, además se muestra el gradiente de presión y velocidad, sobre el eje del disco. Se observa que la presión en la zona del disco alcanza valores máximos de 7,3 Pa, para luego reducir abruptamente hasta -3,6 Pa, donde se encuentra emplazado el disco actuador,

aguas abajo del mismo la presión se recupera hasta un valor cercano a 0 Pa. La velocidad  $U_x$  sufre una reducción gradual en las cercanías al disco actuador, alcanzando un valor mínimo de 7,5 m/s. Aguas abajo del disco la velocidad se recupera gradualmente hasta un valor un valor de 8,1 m/s.

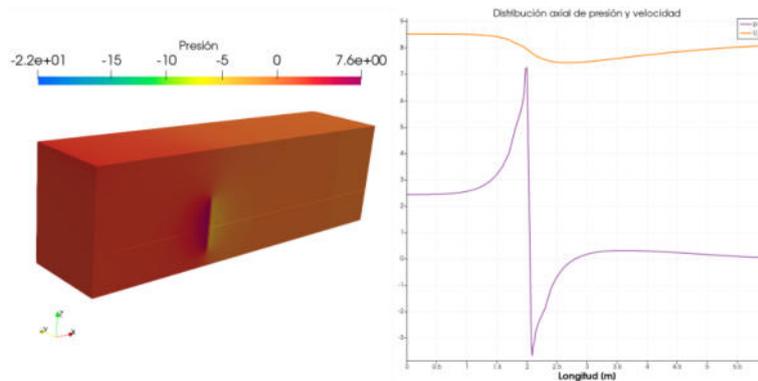


Figura 11. Vista en corte del campo de presión del dominio – gradiente longitudinal de presiones y velocidad axial

Además fueron evaluados los perfiles de velocidad al ingreso y egreso del disco actuador, respectivamente a 1 metro del mismo. En la Figura 12 se muestran los perfiles de velocidad. En el ingreso se observa la distribución generada por la capa límite, y además el perfil de velocidades aguas abajo del disco actuador, con una demarcada disminución de velocidad para esta región.

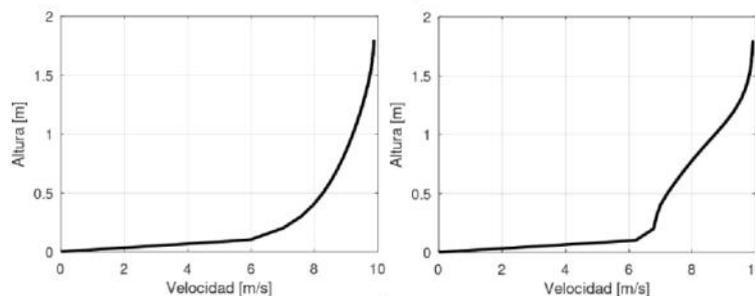


Figura 12. Perfiles de velocidad aguas arriba y abajo del disco actuador

## 9. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha evaluado el comportamiento aerodinámico del aerogenerador en forma teórica, experimental y numérica. Se ha presentado un análisis de cada metodología especificando las hipótesis simplificadoras adoptadas respectivamente. Además, se incluyó un



análisis de la dinámica del sistema de posicionamiento de los álabes. Estos análisis son resultados preliminares que serán profundizados en trabajos futuros.

El análisis experimental ha permitido caracterizar en forma simple la relación de RPM y el ángulo  $\beta$ . Relación que luego es usada como dato de entrada para el modelo de control de posicionamiento de los álabes. El cual es una primera aproximación al comportamiento dinámico del aerogenerador. Resta evaluar mediante ensayos futuros las constantes de las funciones de transferencia y el chequeo de la relación de ángulos entre álabes y el giro del servo-motor. Debiendo evaluarse en forma más precisa la inercia del sistema de posicionamiento.

El BEM resulta una herramienta útil para el diseño de álabes, permitiendo la evaluación en forma rápida de distintos tipos de geometrías, permitiendo seleccionar así los más óptimos y obteniendo, una primera instancia de análisis, la potencia generada y fuerzas que debe resistir el álabes. Además, por el tipo de discretización realizada, el método permite el análisis de distintos tipos de perfiles por tramo para un mismo álabes. En trabajos futuros se desarrollará un diseño óptimo contemplando esta estrategia.

La simulación numérica del disco actuador inmerso en un flujo turbulento aporta información detallada de los campos de presión y velocidad en la región de emplazamiento del aerogenerador. El post-proceso ofrecido por la CFD permitió evaluar los perfiles de velocidad aguas arriba y abajo respectivamente, obteniendo información detallada de la reducción de velocidad por efectos del disco actuador. Este modelo, resulta de una implementación sencilla y con bajo costo computacional. Permitiendo aplicarlo a la evaluación de granjas de generación eólica de aerogeneradores de eje horizontal en trabajos futuros. Además, se prevé la incorporación de los efectos de reducción tangencial, y en un modelo final la simulación del aerogenerador 3D.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Faleh H. Mahmood, Ali K. Resen, Ahmed B. Khamees (2020). Wind characteristic analysis based on Weibull distribution of Al-Salman site, Iraq. Energy Reports 6, 79-87.
- [2] J. Blessmann. O vento na Engenharia Estrutural. Editora da Universidade/UFRGS, 1995.
- [3] M. R. Ahmed, A. A. el Damatty, K. Dai, A. Ibrahim, and W. Lu. Parametric study of the quasi-static response of wind turbines in downburst conditions using a numerical model. Eng Struct. (2022) 250. 113440.
- [4] N. Coudou, S. Buckingham, J. van Beeck. Experimental study on the wind-turbine wake meandering inside a scale model wind farm placed in an atmospheric-boundary-layer wind tunnel. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 854 (2017) 012008.



- [5] Fernando Porté-Agel, Majid Bastankhah, Sina Shamsoddin. Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorology* (2020) 174:1–59.
- [6] Ricardo Castillo, Suhas Pol. Wind tunnel studies of wind turbine yaw and speed control effects on the wake trajectory and thrust stabilization. *Renewable Energy* 189 (2022) 726-733.
- [7] A. R. Wittwer, R. Dorado, G. Alvarez y Alvarez, G. A. Degrazia, A. M. Loredou-Souza, B. Bodmann, Flow in the Wake of Wind Turbines: Turbulence Spectral Analysis by Wind Tunnel Tests, *American Journal of Environmental Engineering*, 6(4A): 109-115, 2016.
- [8] Wittwer; Dorado; Loredou-Souza; Bones; Capeller; Contini; Bodmann; Degrazia. Características da esteira turbulenta do modelo de um aerogerador. *ciência e natureza*, v. 40, p. 155-161, 2018.
- [9] WITWTER, A. R.; DORADO, R.; LOREDO-SOUZA, A. M.; BODMANN, B. E. J.; DEGRAZIA, G. A.; BONES, A. P.; CAPELLER, B.; CONTINI, A. Fluctuating Velocity Measurements in the Turbulent Wake of a Wind Turbine Model. *American Journal of Environmental Engineering*, v. 8, p. 105-111, 2018.
- [10] M. A. Zúñiga Inestroza, J. M. Mattuella, A R Wittwer, A. M. Loredou-Souza. Wind tunnel experiments for investigating wake effects in atmospheric boundary layers using a simplified miniature model wind turbine. *The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2022)* IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Series* 2265, 2022.
- [11] Empresa de Pesquisa Energética-EPE. Brazilian Offshore Wind Roadmap: Learn about the outlook for offshore wind power development in the country, 2020 (<https://www.epe.gov.br/>).
- [12] Gundtoft, S. (2009), "Wind turbines", University College of Aarhus
- [13] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook*.
- [14] *Energía del viento y diseño de turbinas eólicas* (1994). Ricardo A. Bastianon
- [15] Milich, F., Chuaire, M., Wittwer, A., Alvarez y Alvarez, G., Veroli, G., Basterra, J., Adotti, M. "Desarrollo de modelos a escala reducida para el análisis aerodinámico de aerogeneradores". XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Universidad Nacional de San Juan. 2017.
- [16] [Drela M. \(1989\) XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils.](#)
- [17] Software SciLab, paquete [XCOS](#).
- [18] [Software Octave GNU](#)
- [19] Ogata, K. (1988). *Ingeniería de Control Moderna* (3a. ed.). Madrid: Prentice Hall Hispanoamericana.



## ANÁLISIS DE NUEVAS TECNOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE PANELES SOLARES

Alejandro Gorosito <sup>1</sup>, Hernán Solier Zandomeni <sup>2</sup>, Leandro Gieco <sup>3</sup>, Lucas Vicentín <sup>4</sup>,  
Darío Godino <sup>5</sup>, y Alicia Carbonell <sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Departamento Académico de Electromecánica – UTN Facultad Regional Paraná,  
Almafuerte 1033, Paraná, Entre Ríos, Argentina- [ramongorosito@frp.utn.edu.ar](mailto:ramongorosito@frp.utn.edu.ar),  
[hmsolierz@frp.utn.edu.ar](mailto:hmsolierz@frp.utn.edu.ar), [leandrogieco@alu.frp.utn.edu.ar](mailto:leandrogieco@alu.frp.utn.edu.ar),  
[lucasvicentin@alu.frp.utn.edu.ar](mailto:lucasvicentin@alu.frp.utn.edu.ar), [dmgodino@gmail.com](mailto:dmgodino@gmail.com), [aliciacarbonell@frp.utn.edu.ar](mailto:aliciacarbonell@frp.utn.edu.ar).

### RESUMEN

En este trabajo se proporcionar una descripción exhaustiva del estado actual en el desarrollo y la aplicación de placas fotovoltaicas de películas delgadas a nivel internacional y local. Se utiliza una metodología cualitativa como método de estudio para evaluar e interpretar la información obtenida de diversas fuentes, como registros, memorias y publicaciones en general. El propósito principal es indagar en profundidad las características de estas tecnologías, analizando su potencial como fuentes de energía alternativa, su capacidad para reducir los costos de generación y su impacto en la contaminación ambiental. Estos aspectos son fundamentales para impulsar la transición energética propuesta por leyes nacionales, como la ley N° 27191/15, que establece un régimen de fomento para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica, y la ley N° 27424/17, que promueve la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública. Según estas leyes, se espera que para el año 2025 las industrias utilicen al menos un 20% de energías renovables en lugar de las energías de origen fósil.

Como resultado de este estudio, se presentan los avances en eficiencia a lo largo del tiempo de las placas de célula de silicio cristalino, las células de múltiple unión, las tecnologías de placas ultradelgadas (con un espesor del orden de 0.1  $\mu\text{m}$ ) y las tecnologías solares fotovoltaicas emergentes.

En conclusión, se demuestra la factibilidad de aplicar estas tecnologías como reemplazo de las placas solares de tecnología existente en el mercado argentino, ofreciendo así una opción viable para la generación de energía limpia y sostenible.

**Palabras claves:** *Celdas fotovoltaicas; Películas ultradelgadas; Transición energética; Células de múltiples uniones.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La motivación detrás de la elaboración de este trabajo surge del interés de los autores en investigar fuentes de energía alternativas y renovables, las cuales a menudo se desaprovechan en el entorno natural, con el objetivo de reducir el impacto ambiental. La energía fotovoltaica se presenta como una fuente de energía renovable y limpia para la producción de electricidad, por ende, se enmarca dentro de nuestro tema de interés.

Argentina se encuentra en una posición propicia para aprovechar la coyuntura internacional actual y satisfacer una gran parte de su demanda energética nacional mediante productos basados en fuentes de energía renovable. Esta situación representa una oportunidad tanto para mejorar las tecnologías existentes como para establecer acuerdos con países que buscan expandirse hacia otros mercados. Es fundamental reducir la dependencia de las importaciones en el ámbito de la generación de energía.

Para lograr una transición hacia la generación de energía basada en medios renovables, la energía fotovoltaica se presenta como una opción favorable. Para ello, es necesario fabricar las células y ensamblar los paneles en Argentina, lo que permitiría aumentar la capacidad de desarrollo en este tipo de tecnología, además de reemplazar importaciones que impactan negativamente en la balanza comercial y, posiblemente, reducir los costos asociados a la compra y el transporte desde países como China, actualmente el mayor fabricante a nivel mundial.

La energía fotovoltaica, obtenida a través de células fotovoltaicas o celdas solares, desempeña un papel fundamental en la conversión directa de la energía solar en electricidad. Estas células solares han demostrado ser una tecnología altamente eficiente y modular. A lo largo de su historia, han experimentado un continuo desarrollo que ha llevado a una reducción significativa en los costos de fabricación y un aumento notable en la eficiencia de conversión energética. Este avance en la tecnología fotovoltaica ha contribuido a su creciente adopción y aplicación en diversas áreas.

El uso de sistemas fotovoltaicos como fuente de energía está impulsado por la necesidad urgente de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Estos sistemas ofrecen una ventaja significativa en términos de sostenibilidad ambiental, ya que generan una baja emisión de CO<sub>2</sub> por cada kWh de electricidad producida, con un valor inferior a 30 g/kWh [1]. Esta característica los convierte en una opción atractiva y compatible con los objetivos de mitigación del cambio climático y transición hacia un modelo energético más limpio y sostenible.

La evolución de las células fotovoltaicas y su creciente eficiencia son aspectos cruciales para la expansión y adopción masiva de la energía solar. En este contexto, es esencial fomentar la investigación y el desarrollo continuo de nuevas tecnologías y enfoques innovadores en el campo

fotovoltaico. Esto permitirá mejorar aún más la eficiencia, la durabilidad y la rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos, allanando el camino para su aplicación generalizada tanto a nivel local como internacional. Además, la colaboración entre países y la transferencia de conocimientos y tecnología desempeñan un papel vital en el avance de la energía fotovoltaica en el ámbito global

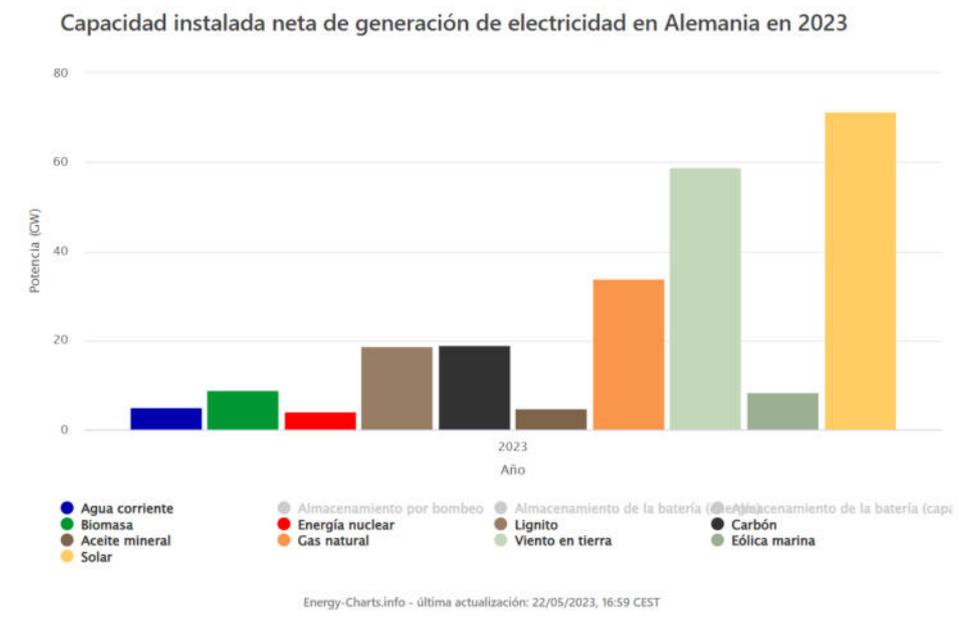


Figura 1. Fuentes de energía eléctrica. Alemania 2023. [2]

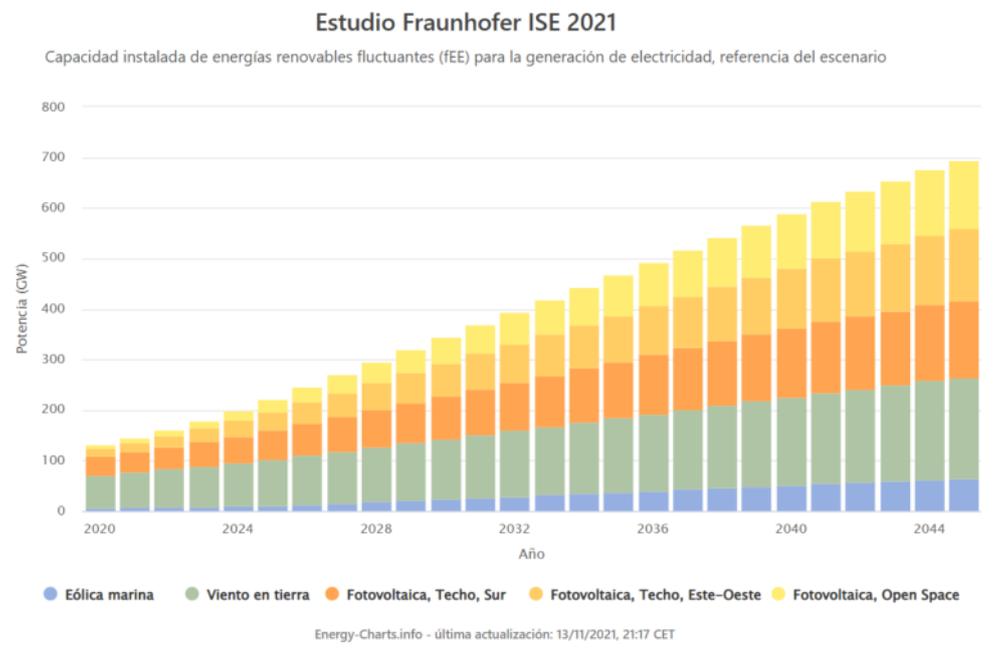


Figura 2. Previsión de crecimiento de energías alternativas en Alemania [2].



En la Figura 1 se muestra el caso de Alemania, donde la energía solar fotovoltaica representa la mayor fuente de energía en 2023. En la Figura 2, se presenta una proyección para los próximos 30 años acerca de la expansión del uso de las energías alternativas. Esta tendencia está motivada por la necesidad de independizarse del gas natural, el cual hasta hace poco tiempo era importado de Rusia. Alemania tiene la intención de duplicar su capacidad de generación de energía eólica para el año 2050 y se espera un aumento de al menos diez veces en la energía solar para esa misma fecha.

Nuestro país tiene la obligación de no quedar rezagado en las transformaciones que se están produciendo a nivel mundial en el uso de energías renovables y poco contaminantes, además de la clara necesidad de ampliar su matriz energética.

## **2-DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS, CON SUS VENTAJAS, DESVENTAJAS, IMPACTO AMBIENTAL Y PRODUCCIÓN**

En la actualidad, las tecnologías fotovoltaicas más utilizadas y disponibles para la fabricación de paneles solares de usos comunes se basan en películas delgadas. Entre ellas, las más destacadas son: la tradicional celda de silicio cristalino, las células de telurio de cadmio, seleniuro de cobre-indio-galio y silicio amorfo (a-Si), que se utilizan en ámbitos comerciales, industriales, agropecuarios y domésticos. Además, existen tecnologías emergentes como las células multicapas y las basadas en perovskitas, con aplicaciones en tecnología satelital y sondas espaciales.

El silicio es el material preferido en la construcción de células solares y representa el 95% del mercado comercial fotovoltaico. Su elección se debe a su abundancia, bajo costo y no toxicidad. A pesar de tener más de cincuenta años de desarrollo, los investigadores continúan innovando para mejorar la eficiencia debido a su dominio en el mercado.

En la década de 1950, se fabricaron las primeras células fotovoltaicas utilizando obleas de silicio. El silicio cristalino (c-Si) es la forma cristalina del silicio y se puede usar como silicio policristalino (multi-Si), que consiste en pequeños cristales, o como silicio monocristalino (mono-Si), que es un cristal continuo. Las células de silicio monocristalino presentan ventajas en términos de microestructura, macroestructura y propiedades fisicoquímicas en comparación con las células de silicio policristalino. Estas ventajas incluyen una mejor estructura reticular, alta pureza del material, resistencia interna reducida, alta eficiencia, color uniforme y sin manchas. En términos de generación de energía real, los módulos monocristalinos superan a los policristalinos, lo que significa que producen más kilovatios-hora de electricidad por unidad de área [3].

Un estudio experimental comparó el rendimiento y la eficiencia de los módulos solares fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino en condiciones climáticas tropicales húmedas y secas en el centro-este de la India. Durante 6 meses, de octubre de 2020 a marzo



de 2021, se analizaron sistemáticamente los datos, prestando especial atención a los parámetros que afectan al rendimiento de los módulos fotovoltaicos, como la energía solar, la irradiancia, la temperatura ambiente y la temperatura del módulo. Octubre presentó la mayor variación en irradiancia y temperatura, con temperaturas medias más altas del módulo (51-52 °C) en octubre-noviembre y temperaturas promedio más bajas (34°C para mono-Si y 36°C para poli-Si) en diciembre. Los resultados mostraron que el módulo mono-Si funcionó mejor en todas las condiciones climáticas, ofreciendo una mayor eficiencia [4].

Por otro lado, los paneles de silicio alcanzaron su máximo de conversión de alrededor del 25% hace unos 20 años, y los avances recientes no han logrado aumentar significativamente su eficiencia. Es importante destacar que el 25% es el máximo alcanzado, mientras que la eficiencia promedio en los paneles comerciales de silicio está más cerca del 20%.

Se realizan numerosas simulaciones para mejorar la eficiencia de las celdas solares a fabricar. Por ejemplo, utilizando el software de Análisis de Estructuras Microelectrónicas y Fotónicas, se llevaron a cabo cálculos de eficiencia al variar los parámetros de diseño. Se simularon cambios en las capas n y p de silicio cristalino, modificando el espesor, la conductividad y el tipo de material semiconductor. Como resultado, se logró una eficiencia de conversión de energía del 28%, reduciendo la cantidad de material necesario. Actualmente, esta tecnología se encuentra entre las más avanzadas para la fabricación de paneles solares y tiene la mayor eficiencia en todo el mercado fotovoltaico global [5].

El silicio amorfo es la forma no cristalina del silicio usada en celdas solares. Está prácticamente en desuso por la disminución acelerada de rendimiento en un periodo muy corto de tiempo.

Se están desarrollando constantemente nuevas tecnologías para producir celdas solares eficientes basadas en nanomateriales y películas delgadas, lo que reduce los costos y minimiza la contaminación ambiental. Dos materiales que han despertado gran interés en los últimos años son el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) y las calcopirritas de cobre e indio (CuInSe<sub>2</sub> y CuInS<sub>2</sub>), de los cuales se ha estudiado ampliamente la obtención de películas delgadas [6].

En 2021, las células de capa fina de CdTe tenían una eficiencia del 18,5%. Estas células son más sostenibles y compiten en precio con las células de silicio, produciendo hasta un 10,5% más de energía a lo largo de su vida útil. Además, las células de CdTe contienen menos del 50% de materiales pesados en comparación con las de silicio y utilizan cuatro veces menos agua en su fabricación. Gracias a su flexibilidad y versatilidad, pueden ser utilizadas en techos, ventanas y otras estructuras, y tienen una menor tasa de rotura. Los modelos semitransparentes para ventanas permiten el paso de la luz a través de los ambientes. Estas células también muestran una mayor resistencia a diversas condiciones climáticas, con un coeficiente de temperatura reducido del 0,21% en comparación con el 0,48% de los paneles de silicio. Además, han



demostrado una mayor eficiencia en momentos de baja luminosidad y días nublados. Su huella de carbono se recupera hasta cuatro veces más rápido que la dejada por la industria solar de silicio, ya que no sufren degradación inducida por la luz (LID), una pérdida de rendimiento que puede ocurrir al inicio de la exposición solar. Estas células también permiten el reciclaje del 90% del material, generando poca contaminación ambiental con respecto a los materiales no reutilizados. Las células de telurio de cadmio tienen un camino de desarrollo por delante que gradualmente aumentará su eficiencia y sostenibilidad a corto plazo [7].

Por otro lado, los paneles solares enfrentan desafíos mecánicos que deben superarse. Cada panel instalado está expuesto a condiciones climáticas y ambientales extremas, como lluvia, granizo, nieve, vientos, tormentas y cambios bruscos de temperatura. Incluso los trabajos de montaje pueden influir en la funcionalidad y en la vida útil esperada, que puede ser de hasta 40 años. Actualmente, no existen normas de ensayo que regulen las especificaciones mecánicas de todos los componentes de los paneles solares, excepto en los acuerdos individuales entre proveedores y fabricantes como garantía de calidad. Los estándares y requisitos individuales varían, y los clientes requieren ensayos de materiales diseñados a medida. Algunas normas que se aplican actualmente incluyen pruebas de seguridad, compresión y flexión de láminas de vidrio para ventanas, pruebas de resistencia a la cizalla y tracción de montajes pegados solapados, pruebas de resistencia de uniones adhesivas y pruebas de envejecimiento de los materiales utilizados en los paneles solares en relación con la exposición solar y los elementos climáticos como luz ultravioleta, frío, calor, humedad, granizo, viento, nieve, piedras, rendimiento eléctrico, aislamiento y posibles defectos de los paneles, entre otros. Sin embargo, estas normas no son exigidas a nivel gubernamental [8].

La evolución de eficiencia de las celdas solares de silicio y otras tecnologías que usan cobre, indio, Galio, CdTe, entre otros, durante décadas han tenido un ritmo creciente, pero sostenido, como se ve en la Figura 3.

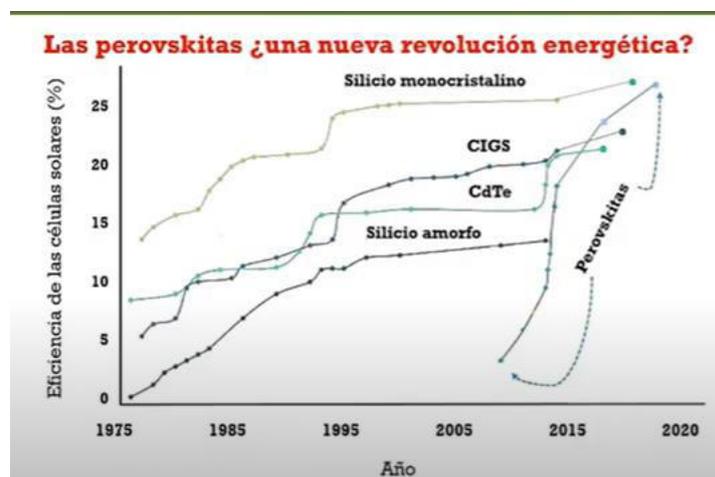




Figura 3. Evolución de la eficiencia de las placas solares producidas de manera masiva [9].

La estructura de las células solares de perovskitas es similar a la de los materiales convencionales y ha sido ampliamente estudiada en la última década. Destaca el increíble desarrollo que han experimentado en este tiempo. Las perovskitas generan grandes expectativas en la comunidad de investigadores y fabricantes debido a sus propiedades óptimas para convertir la energía solar en electricidad, así como a su rápido progreso en comparación con otras tecnologías mencionadas anteriormente. En 2009, se publicó el primer informe de una célula solar fabricada con perovskita, que tenía una eficiencia del 3,8%. Aunque esta cifra se consideraba baja y se degradaba rápidamente en horas, para 2021, la eficiencia había aumentado hasta alcanzar el 25,5% en películas delgadas recubiertas con otros materiales para evitar la degradación. Las células con perovskitas se están produciendo comercialmente desde 2023, gracias a empresas como Oxford Photovoltaics, y prometen cumplir el antiguo anhelo de contar con células fotovoltaicas de bajo costo y rendimientos cercanos a los del silicio [10].

Las perovskitas híbridas orgánicas-inorgánicas se han convertido en alternativas ideales para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos debido a su bajo costo de producción y excelentes propiedades fotoeléctricas. Sin embargo, antes de poder industrializar masivamente estas células, es necesario abordar algunos desafíos. El principal problema de las células de perovskitas híbridas es la degradación de la capa absorbente. Para abordar este desafío, se están sintetizando películas de perovskitas híbridas y se están evaluando parámetros de calidad morfológicos, optoelectrónicos y de estabilidad utilizando técnicas de desarrollo especiales [11].

Las células fotovoltaicas de policristales de cobre, indio, galio y azufre (CIGS) son producidas por la empresa japonesa Solar Frontier, que cuenta con varias plantas de fabricación. Científicos suizos lograron una eficiencia del 21,4% en una célula flexible de película delgada de CIGS fabricada mediante evaporación a baja temperatura. Estas células flexibles tienen una amplia variedad de aplicaciones, como vehículos y dispositivos electrónicos. Este resultado ha sido confirmado por el Instituto Fraunhofer de Alemania. Solar Frontier, fabricante japonés, ha logrado la mayor eficiencia, alcanzando el 23,35%, mientras que la fábrica alemana Avancis ha logrado un 16,6%. Solarg, un fabricante de los Países Bajos produce paneles solares monocristalinos ligeros para techos con baja huella de carbono en comparación con los módulos convencionales. Estos paneles tienen una vida útil de 25 años y son reciclables al final de su vida útil, con eficiencias de conversión que oscilan entre el 17% y el 19%. Un grupo de investigadores de Turquía e Irán ha diseñado células solares bicapa de perovskita invertida con una eficiencia del 24,83%. Estas células están compuestas por un absorbedor superior de yoduro de plomo y metilamonio, una perovskita de haluro de plomo y un absorbedor inferior. Utilizaron software de simulación y determinaron que los espesores óptimos para las capas absorbentes, tanto superior como inferior, oscilan entre 100 y 600 nm [12].



### 3-Evolución de la tecnología de capa gruesa, fina y ultrafina.

La mayoría de las celdas fotovoltaicas de aplicación comercial son fabricadas con semiconductores y son delgadas o muy delgadas. Actualmente se está fabricando la llamada segunda generación, de menos de 200  $\mu\text{m}$  de espesor.

Las células solares de película delgada, en 2017 se consideraban en desarrollo experimental. Actualmente podemos decir que esta segunda generación es la de mayor producción para uso comercial. Existe una gran cantidad de países que tienen empresas de producción de paneles solares de capa fina, China, Hong Kong, India, EEUU, Alemania, Hungría, Indonesia y Reino Unido, funcionando en una gama de potencias entre 0,1 a 500 Wp (vatio pico); donde 1 Wp es la medida unitaria de la potencia eléctrica máxima que puede suministrar un panel fotovoltaico en condiciones estándar de temperatura y radiación solar. Un conjunto de paneles de 1 kWp producirá una media de 1250 kWh/año en una vivienda del sur de Europa [13].

Las células solares de película delgada de segunda generación usan menos material y energía para su producción respecto a las que se fabricaban inicialmente.

Actualmente existen dos tipos de tecnologías emergentes. Las celdas ultradelgadas multiunión, de altísima eficiencia, pero muy costosas, que se usan solamente en satélites y aparatos sofisticados, como robots espaciales. Y la otra, son las células solares ultradelgadas de perovskitas multiunión, de costo menor y con eficiencia de aumento vertiginoso en poco tiempo, lo que las hacen atractivas como tecnologías de punta en los mercados fotovoltaicos. Las celdas multiunión absorben una parte del espectro de la energía solar diferente en cada una de las capas, potenciando su eficiencia de conversión.

### 4-Perspectiva a futuro

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) de Estados Unidos ha publicado una nueva versión de gráficos de eficiencia de células de investigación que se actualiza constantemente. La mayor eficiencia de una célula de investigación registrada en la Figura 4, es del 47,1%, para una célula de cuatro uniones usadas en aplicación espacial. Se puede visualizar el reciente salto en las eficiencias de conversión de tecnologías emergentes como las células solares de perovskita. Las curvas de color violeta corresponden a materiales cuyos costos son altísimos y está usados en aplicaciones experimentales espaciales.

Arabia Saudita, a fin de mayo de 2023, anunció en uno de sus laboratorios de investigación, KAUST, que ha producido una célula solar de perovskita en tándem con silicio con una eficiencia de más de 33%, de 1  $\text{cm}^2$ , pero que aún no logra las dimensiones de las células estándar, para fabricarlas a gran escala en un futuro cercano.

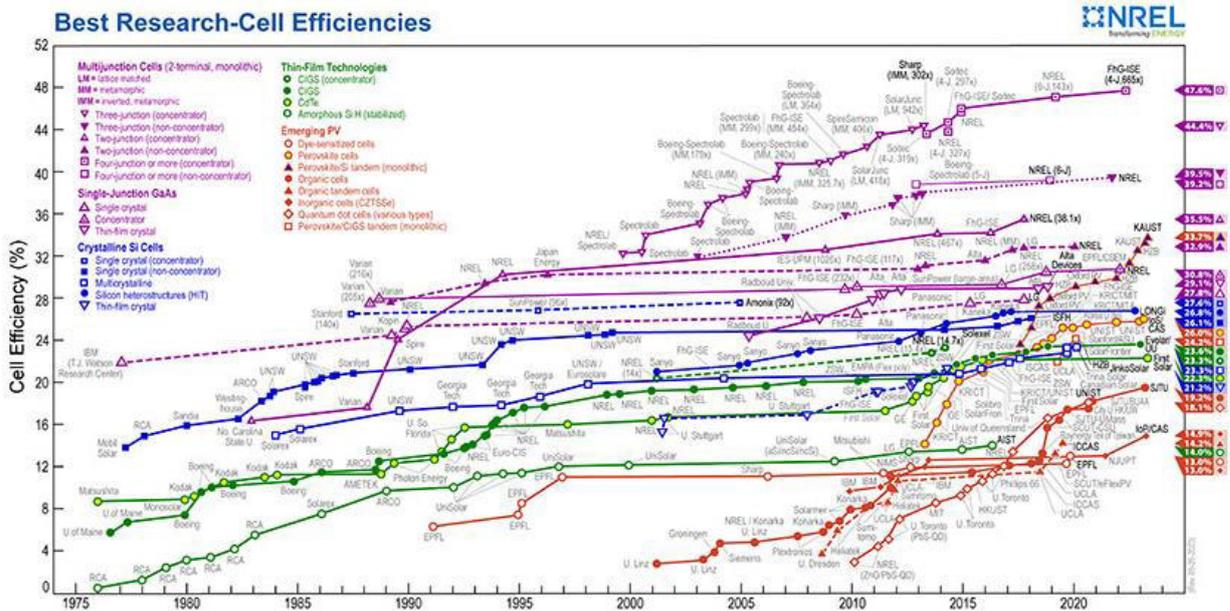


Figura 4. Captura de pantalla de NREL (Laboratorio nacional de energías renovables de EEUU)

[14]

### 5. Mercado argentino de paneles solares.

Existe un único proyecto en marcha para fabricar celdas solares de uso masivo en la Argentina, la Planta de San Juan, en convenio con la empresa alemana Schmid. Este proceso se diseñó con varios pasos, fundir la materia prima para conseguir los lingotes de silicio, cortar las piezas para producir las obleas, transformar esas piezas en celdas solares y, por último, ensamblar los paneles fotovoltaicos. A raíz de diversas dificultades, como la importación de ciertos insumos requeridos, no ha comenzado esta planta a funcionar, pero se buscan financiamientos para producir las celdas solares. La puesta en funcionamiento de la planta ha quedado detenida en el marco de la inestabilidad política financiera. Se reestructuró el plan y ahora lo que se impulsa es licitar por separado distintas fases de montaje de la fábrica, la parte eléctrica por un lado y la obra civil de los galpones de producción, como una primera etapa. No obstante, los contratiempos, se sigue trabajando con los alemanes en el plan y en logística para concretar el sueño de fabricar paneles solares en San Juan. Es una apuesta fuerte a la energía fotovoltaica que se sustenta con varias plantas instaladas de la mano de obra del sector privado.

Existe una gran cantidad de empresas argentinas que ensamblan las celdas solares, Entre las más destacadas se pueden mencionar Schmid Branch Argentina, Solartec S.A, LV-Energy, entre tantas.

En cuanto a la fabricación de celdas solares, en 2017, investigadores del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y la Comisión Nacional de Energía Atómica de la Argentina (CNEA), estudiaron las etapas de construcción de celdas fotovoltaicas de películas delgadas, depositadas



por la técnica de sputtering, para su aplicación en concentradores de radiación solar. El estudio se realizó sobre 2 tipos de sustratos planos: vidrio portaobjetos, que se utilizaron como sustratos de referencia y vidrio comercial gris que tienen mezclas de óxidos metálicos. Se fabricaron celdas solares en capa de películas delgadas de Al, SiO<sub>2</sub>, y Al/SiO<sub>2</sub>. El Al actúa como película reflectante de la radiación solar. El SiO<sub>2</sub> cumple la función de pasivar la película de Al, brindando protección mecánica y manteniendo las propiedades reflectivas del sistema. Los sustratos se limpiaron en una solución de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno en una proporción de 2:1 durante 10 min. Para depositar las películas se utilizó la técnica Physical Vapor Deposition (PVD). Se utilizó Al de calidad industrial, y SiO<sub>2</sub> de pureza 99,995%, de 75mm de diámetro y 6 mm de espesor. Como gas carrier para generar el plasma dentro de la cámara se usó Ar (99,9997%) y O<sub>2</sub> (99,8%). Los sustratos se montaron sobre una plataforma rotatoria que permitió obtener películas homogéneas, a baja presión. Las películas de Al se depositaron con un plasma generado a 400W con una fuente DC y las de SiO<sub>2</sub> con una fuente RF de 13,56 MHz a la misma potencia. Las películas bicapas se depositaron sin perder el vacío en la cámara para controlar la composición de la interfaz Al/ SiO<sub>2</sub>, en atmósferas inerte y reactiva [15].

Por múltiples informes periodísticos se sabe que el Departamento de Energía Solar (DES) de la CNEA, desde hace tiempo, estudia y fabrica celdas solares de silicio y de otros materiales. Pero a fines de mayo de 2023 dio un salto importante en cuanto a la fabricación; se desarrolló, la primera celda solar nacional de uso espacial con superconductores III-V en las instalaciones del Centro Atómico Constituyentes (CAC); son celdas solares multicapas para satélites artificiales que se están estudiando hace más de veinte años. Estos paneles y sus componentes deben ser estables en el tiempo, resistentes a la radiación y ser operativos en sus aplicaciones espaciales. Este desarrollo forma parte de la tesis "Elaboración, caracterización, simulación numérica y ensayo de celdas solares basadas en semiconductores III-V", del doctorando Simón Saint André (Doctorado en Ciencia y Tecnología - mención Física del Instituto Sábató). Para uso satelital hasta 2023 importaban las celdas solares y las armaban. Actualmente el gran salto es la producción de celdas solares para usos espacial con superconductores III-V con arseniuro de galio, de un tamaño de 1 cm<sup>2</sup>, que sirve para ser usado en dispositivos nano y microelectrónicos. Se compra la oblea de arseniuro de galio sobre la que se depositan las capas de los materiales que forman el diodo, constituyendo la celda [16].

## 6. Conclusión

Si se pretende innovar para poder fabricar celdas solares será necesario crear comunidades de que faciliten el salto tecnológico, realizar convenios con empresas líderes en este tema, y entrenar a los sectores productivos en nuevos desafíos.

La Universidad Tecnológica Nacional tienen como misión colaborar en el desarrollo productivo y social de la Argentina. Por eso, este ámbito académico tiene la misión e intención de mostrar



conocimiento y métodos para que las empresas se decidan a fabricar celdas de tecnología de última generación. Se desea que puedan aplicar nuevas ideas, generar productos, servicios y prácticas relativas a la actividad y negocios relativos al mercado de celdas fotovoltaicas. Que puedan incrementar las productividades regionales y en el sistema energético argentino, ayudar a implementar tecnologías de fuentes de desperdicios energéticos y el uso de energías limpias menos contaminantes que los derivados del petróleo.

En este trabajo ha quedado pendiente la respuesta a la siguiente pregunta: ¿Qué datos serían los importantes para un posible inversor particular interesado en hacer desarrollos en el campo de la producción de celdas fotovoltaicas?

Como respuesta a esa pregunta, se supone que se debería hacer una comparación permanente y actualizada de las diferentes tecnologías de producción de células fotovoltaicas que permitan aumentar su uso a bajos costos y con el menor impacto ambiental. Además de un relevamiento de las empresas que usan tecnología de punta, indicando: país de origen, contacto a través de correo electrónico, nivel de desarrollo de las tecnologías usadas, factibilidad de expansión en Argentina para que los posibles inversores pudiesen decidir con quien contactarse.

## Bibliografía

- [1] Louwen, A., Sark, van, W., Schropp, R., Turkenburg, W., and Faaij, A.. *Life cycle greenhouse gas emissions and energy payback time of current and prospective silicon heterojunction solar cell designs*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1406-1428, 2014. <https://doi.org/10.1002/pip.2540>.
- [2] Fraunhofer, consultado Mayo 2023. <https://www.fraunhofer.de/en/research.html>
- [3] Jiang L., Cui S., Sun P., Wang Y., Yang C.. *Comparison of Monocrystalline and Polycrystalline Solar Modules, 2020*. IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, pp. 341-344, doi: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141722, 2020.
- [4] Baghel N., Chander N.. *Performance comparison of mono and polycrystalline silicon solar photovoltaic modules under tropical wet and dry climatic conditions in east-central India*, Clean Energy. Volume 6, pp 165–177, 2022. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac001>
- [5] Sherman D., Marquez J., y otros. *Monocrystalline Silicon Solar Cell Simulation With Reduced Absorber Thickness and Efficiency Exceeding 25% 2021*. IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp.2640-2642, 2021.
- [6] Valdes M., Vazquez M.. *Deposición de CuInS<sub>2</sub> y CuInSe<sub>2</sub> para su aplicación en celdas solares, empleando principalmente técnicas de que no requieren vacío, como rocío pirolítico y electrodeposición: Síntesis, caracterización y ensamblado de dispositivos fotovoltaicos*. Editorial Académica Española, pp 213, 2012.
- [7] NextCity Labs, consultado Mayo 2023. <https://nextcitylabs.com/global/ncl-academy/>
- [8] *Ensayo de células fotovoltaicas y paneles solares ZwickRoell*, consultado Mayo 2023. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/solar/>



- [9] Martil de la Plaza, I. *Energía Solar. De la utopía a la esperanza*. Editorial Escolar Y Mayo, España, 2020.
- [10] Leaders in perovskite solar technology Oxford PV, consultado Mayo 2023. <https://www.oxfordpv.com/>
- [11] Egger D., Rappe A., Kronik L.. *Hybrid Organic-Inorganic Perovskites on the Move*, DOI: 10.1021/acs.accounts.5b00540, 2016.
- [12] Gholami-Milani, A., Ahmadi-Kandjani, S., Olyaeefar, B. et al. *Performance analyses of highly efficient inverted all-perovskite bilayer solar cell*. Sci Rep 13, 8274, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35504-x>
- [13] Alfonso L.. 2023. <https://laenergiasolar.info/>
- [14] Photovoltaic Research, NREL. <https://www.bing.com/ck/a?!&p=2b91b3b0be3305e9JmltdHM9MTY4NjA5NjAwMCZpZ3VpZD0yNTQyN2UyYy04ZjQ1LTZmNGEtMTEzZS02YzVkOGVhNTZlMjkmaW5zaWQ9NTU1Ng&ptn=3&hsh=3&fclid=25427e2c-8f45-6f4a-113e6c5d8ed56e29&psq=El+Laboratorio+Nacional+de+Energ%C3%adas+Renovables%2c+NREL%2c+de+Estados+Unidos+&u=a1aHR0cHM6Ly93d3cubnJlbC5nb3Yv&ntb=1>
- [15] Mangano E., Sambrano E., y otros. *Estudio de Películas Delgadas con Aplicación a Concentradores Solares*. INTI, 2017.
- [16] *Desarrollan las primeras celdas solares nacionales para misiones espaciales*, CNN Radio Argentina, 2023. <https://cnnespanol.cnn.com/radio/2023/06/01/desarrollan-las-primeras-celdas-solares-nacionales-para-misiones-espaciales/>



## USO DE NORMAS PARA DETERMINAR LA CONVENIENCIA DE SISTEMAS PASIVOS O FORZADOS PARA CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA

Jorge Raúl Barral <sup>1</sup>, Javier Hernán Garnica <sup>2</sup>, Juan Martín Lucchini <sup>1</sup>, Sebastián Spasoff Mitcoff <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Energía Solar, Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nacional 36 km 601, Río Cuarto, Córdoba, Argentina - [jbarral@ing.unrc.edu.ar](mailto:jbarral@ing.unrc.edu.ar)

### RESUMEN

Se presenta en este artículo la utilización de normas vinculadas al calentamiento solar de agua para evaluar la conveniencia de un sistema forzado (activo) o un sistema termosifónico (pasivo) para una determinada aplicación. El objetivo es mejorar el conocimiento de los sistemas de calentamiento de agua, ante una oferta de equipos que se están instalando en el país, en distintos lugares, con poca información sobre sus prestaciones, más allá de las opiniones de los fabricantes o vendedores. Se aplican normas IRAM recientemente aprobadas, adaptadas de normas internacionales. Se marcan las sustanciales diferencias entre ensayos de colectores (IRAM 210002-1) y sistemas compactos (IRAM 210004), clarificando el concepto de rendimiento térmico, e interpretando los resultados que estas normas arrojan y que permiten dimensionar los sistemas en correspondencia con climas y demandas a atender. Con el aporte de climas de distintas ciudades seleccionadas del país, resultados de equipos medidos en el Laboratorio de Energía Solar de la UNRC, y datos de fabricantes, se caracterizaron prestaciones para distintas demandas, utilizando para los sistemas activos el método f-chart y la metodología de la IRAM 210004 para sistemas compactos. Se realizaron cuadros comparativos a partir de la fracción solar anual para cada uno de los sistemas en cada lugar seleccionado. Obviamente, la simpleza de los sistemas compactos se impone para consumos más bajos, a razón de un equipo por familia, por los costos iniciales asociados a componentes adicionales de los sistemas activos (bomba, vaso de expansión, válvulas, controlador). El análisis de la fracción solar se acompaña con criterios de diseño y análisis económicos que permiten justificar la conveniencia de sistemas activos cuando los consumos estimados superan los 600 litros diarios

**Palabras clave:** Agua Caliente Solar; Sistema Termosifónico; Sistema forzado; Conveniencia técnico-económica.



## 1. INTRODUCCIÓN

El mercado mundial de sistemas de calentamiento de agua mediante energía solar experimenta un crecimiento sostenido permanente desde la crisis del petróleo de los años 70, contándose actualmente con tecnologías, equipos y sistemas de probado funcionamiento y eficiencia [1]. Si bien en la República Argentina se dieron pasos incipientes en investigación, desarrollos tecnológicos y normalización, el crecimiento de estas aplicaciones ha sido muy por debajo de las condiciones climatológicas, económicas y de desarrollo tecnológico que el país posee. Aunque el último Censo Nacional Solar Térmico del INTI [2] muestra un crecimiento relativo en instalaciones y fabricantes respecto a lo que había en años anteriores, dicho crecimiento es respecto a lo poco que se tenía antes. Esto mismo se ve en el último informe de la International Energy Agency [3] sobre la potencia instalada de energía solar térmica para agua sanitaria y de climatización, donde se observa que América Latina contribuye con solo un 3,4 % a nivel mundial y allí mismo, se ve que Argentina apenas si tiene instalado un 1 % de lo que tiene Brasil.

En los últimos años, con la posibilidad de importación de China, ingresan al país sistemas con la tecnología de tubos evacuados a precios razonables, y con la recomposición de las tarifas energéticas, se han puesto en carrera los fabricantes locales con tecnologías de colectores de placas planas. Aunque no se pueden imponer aún en lugares con distribución barata de gas natural, si compiten muy bien donde los usuarios deben recurrir a gas envasado o electricidad para calentar agua. Se han realizado en su gran mayoría instalaciones para la provisión de agua caliente sanitaria (ACS) residencial y también un cierto número de climatizaciones de piscina, habiendo poquísimos emprendimientos industriales o grandes instalaciones centralizadas.

Ante la oferta mencionada en el párrafo anterior, surgen interrogantes: ¿cuál es el equipo más adecuado para cada necesidad?, ¿los equipos que se comercializan, son confiables y de cierta calidad?, ¿hay instaladores con conocimientos técnicos adecuados para realizar buenos trabajos? Ante la primera pregunta, si uno ve las ofertas a través de la web, suelen presentarse como termotanques de una cierta cantidad de litros, para una cierta cantidad de personas; y aquí surgen otras preguntas: ¿es lo mismo si instalo ese equipo en San Juan, en Buenos Aires o en Comodoro Rivadavia? ¿será independiente del consumo que haya en cada hogar? La segunda pregunta también conduce a otro interrogante: ¿cómo se determina la calidad de un equipo que vino de China o fue fabricado en una pequeña fábrica argentina, ambos de marcas no conocidas?

Peor resulta el análisis de la tercera pregunta. INTI convocó partes interesadas e inició en 2014 un proceso que culminó en el mecanismo de Certificación Instaladores de Sistemas Solares Térmicos, Nivel II [4]. La falta de difusión, el mercado deprimido y la falta de impulso político hizo que solo se certificaran once personas. Hay que tener en cuenta además, que dicho Nivel II contempla solo instalaciones hasta los 600 litros de almacenamiento y no prevé la realización de



proyectos de cálculo. Así, casi la totalidad de las instalaciones que se realizan en el país son hechas por idóneos, con suerte por algunos gasistas y plomeros criteriosos, eventualmente bajo la dirección de profesionales. Como la mayoría de los equipos para uso unifamiliar vienen con su manual de instrucciones, si no se cometen errores groseros, no debería haber problemas de seguridad para el usuario. A veces, la mala instalación, puede hacer que un buen equipo funcione mal o directamente no funcione. Debe tenerse en cuenta también que algunos equipos requieren respaldo eléctrico, lo cual adiciona otro problema de conocimiento requerido y seguridad de la instalación. Otro problema originado por la falta de formación técnica y profesional, es que solo han tenido amplia difusión los equipos compactos unifamiliares (sistemas pasivos), quedando absolutamente rezagados los equipos de funcionamiento forzado (activos), muy útiles y convenientes para medianas y grandes instalaciones.

Se trata en este artículo de aportar en parte a la solución de los tres aspectos mencionados, aunque indudablemente, como ya se está viendo por lo expuesto, será necesario un apoyo importante de la dirigencia política, los distintos organismos del estado, las instituciones educativas y los colegios profesionales, para que el calentamiento de agua solar tenga un impulso y difusión que permita obtener beneficios económicos a la comunidad y contribuya a la disminución de los gases de efecto invernadero generado por los combustibles fósiles.

El análisis y propuesta se basa en el uso de normas ya aprobadas en el país por IRAM, la 210004 [5] y la 210002-1 [6], que indican cómo deben realizarse los ensayos térmicos de sistemas compactos y colectores solares respectivamente. Como se dijo en el párrafo anterior, el aporte será en parte, ya que se prevén muchos más ensayos de los equipos (presión, impacto, congelamiento, choque térmico, penetración de lluvia, etc.). Pero el comportamiento térmico es el ensayo que determina si el equipo provee la energía necesaria o no, razón por la cual lo busca cualquier eventual usuario. Se abordarán básicamente los sistemas vinculados a la provisión de ACS, que son la gran mayoría de las aplicaciones hoy en nuestro país, no considerándose lo vinculado a climatización de ambientes y piscinas, y aplicaciones industriales.

## 2. DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS COMPACTOS Y SISTEMAS FORZADOS

Ambos sistemas tienen uno o varios colectores y una o varias unidades de almacenamiento, pero la diferencia fundamental es que los sistemas compactos son indivisibles y fijos, cada modelo viene con una cierta superficie colectora y un tanque asociado, que funcionan en forma termosifónica (no requieren energía auxiliar) y en cuanto a su comportamiento térmico deben ser ensayados en conjunto (IRAM 210004), mientras que los sistemas forzados, que requieren de una bomba de circulación, pueden variar en cuánto a cantidad de colectores y tamaño del almacenamiento, pudiendo ser cada colector ensayado por separado (IRAM 210002-1).

En funcionamiento termosifónico el agua circula por diferencia de densidad, al calentarse sube por el colector y se deposita en la parte superior de su almacenamiento, por lo cual el tanque de almacenamiento debe estar por encima del colector (Figura 1). Los sistemas compactos son relativamente simples, no tienen bombas ni controles. Pueden incluir una resistencia eléctrica o funcionar en serie con el sistema de calentamiento auxiliar que posea el hogar (calefón común, por ejemplo). Se han obviado componentes menores como válvulas, venteo a la atmósfera, etc.

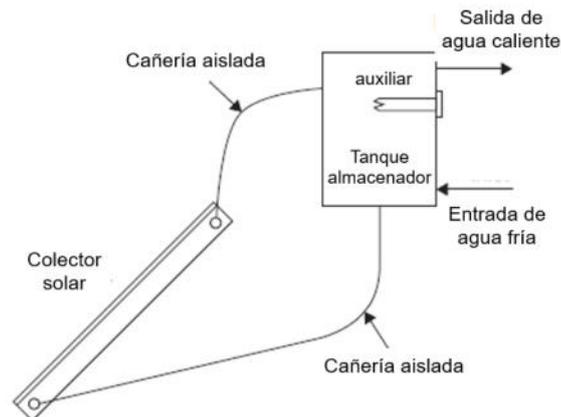


Figura 1: Esquema de un sistema de calentamiento de agua compacto

En la Figura 2 se muestra un sistema forzado con sus componentes esenciales. Aquí, al ser impulsado el fluido por una bomba, no es necesario que el almacenamiento esté sobre el arreglo de colectores y normalmente se le coloca dentro del edificio, estando menos expuesto al clima.

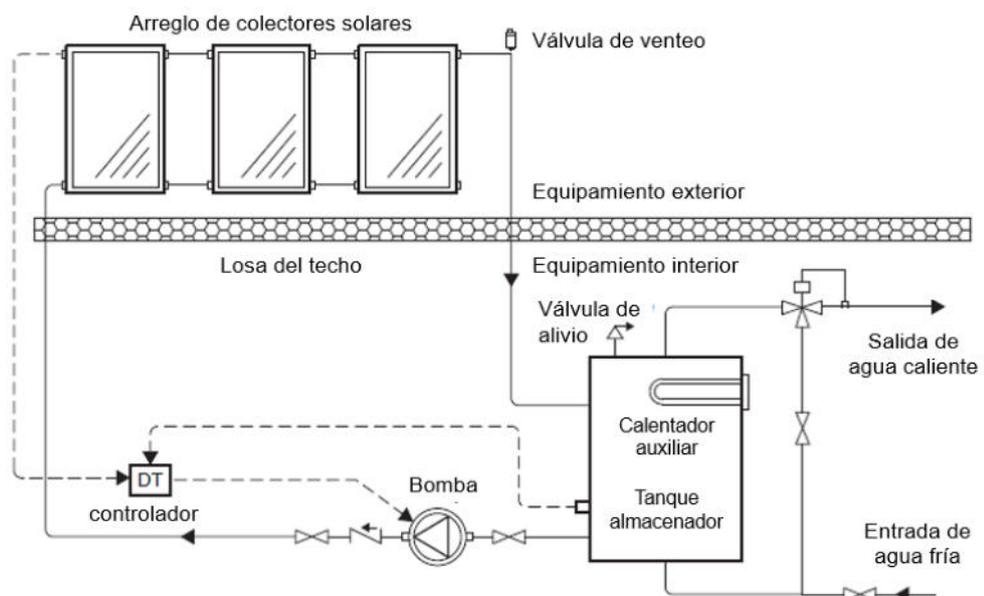


Figura 2: Esquema de un sistema de calentamiento de agua forzado o activo



La orden de arranque y parada de la bomba la da el controlador que testea permanentemente la temperatura del fluido de salida de los colectores y la parte inferior del tanque almacenador. Así cuando el colector se encuentra frío (noche y mañana temprano) el sistema está parado, y cuando la temperatura de la parte superior supera en algunos grados a la parte inferior del tanque, el controlador ordena el arranque, asumiendo el calentamiento del colector superará a las pérdidas de calor del mismo e irá calor útil al tanque almacenador.

Los sistemas compactos termosifónicos, ya sean de placa plana o de tubos evacuados, vienen prediseñados para una cierta cantidad de personas, con equipos de entre unos 100 litros a 300 litros. Como son de instalación bastante sencilla, se proveen con su manual de instalación y embalados en unas pocas cajas, muchas veces, ante una demanda de gran cantidad de agua caliente, se opta por poner varios de ellos para cubrir dicha demanda. Así, se puede ver una instalación en un hotel, hospital o edificio público, como la mostrada en la Figura 3 a la izquierda.

Un montaje de varios sistemas compactos, implica la suma de varios tanques chicos y la repetición cañerías y accesorios para cada uno de los equipos, mientras que en un sistema activo se puede solucionar con un solo tanque y un único circuito hidráulico. Sólo es justificable una instalación múltiple cuando se trate de distintos hogares en un mismo edificio y que paguen sus tarifas energéticas por separado. Pero como un sistema forzado implica elementos adicionales como la bomba y el controlador, la pregunta es ¿a partir de qué cantidad de litros de almacenador es conveniente económicamente utilizar un solo sistema activo en vez de varios compactos?



Figura 3: Instalación no recomendable de sistemas solares compactos (izquierda) e instalación de sistema solar forzado recomendable.

### 3. ENSAYOS NORMALIZADOS DE AMBOS SISTEMAS

Aunque tanto los sistemas termosifónicos como los activos funcionan con una combinación de placas absorbedoras y unidades de almacenamiento, obedecen a concepciones muy diferentes en cuanto al movimiento de los fluidos caloportadores. Tal es así, que para la evaluación térmica



de los mismos se plantean ensayos normalizados muy distintos, y con resultados de distintas características [7]. La diferencia fundamental se da en que los sistemas activos funcionan con un flujo másico impulsado por una bomba. Para mejor comprensión de las diferencias, se presenta primero el ensayo previsto para evaluar la performance térmica de un sistema activo, que se basa en el ensayo del colector solo, en forma independiente del tanque almacenador.

### 3.1 Ensayo de colector para sistemas forzados – Norma IRAM 210002-1

Este ensayo se basa en la determinación de la función eficiencia instantánea del colector,  $\eta_i$ , mediante la siguiente ecuación.

$$\eta_i = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_c G_T} \quad (1)$$

$\dot{m}$ = flujo másico por el colector [kg/s]

$c_p$ = calor específico del fluido caloportador a presión constante [kJ/(kg.°C)]

$T_o$ = temperatura de salida del líquido del colector [°C]

$T_i$ = temperatura de entrada del líquido al colector [°C]

$A_c$ = área efectiva del colector [m<sup>2</sup>]

$G_T$ = radiación global incidente sobre el área efectiva del colector [W/m<sup>2</sup>]

El numerador de la ecuación (1) es un cómputo calorimétrico que da el calor útil que entrega el colector si se le toma como caja negra. Teniendo en cuenta parámetros que son propios de cada colector, la ecuación (1) se puede combinar adecuadamente, para escribir la ecuación de una recta, como se muestra a continuación [7]:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{G_T} \quad (2)$$

$Q_u$ = Calor útil provisto por el colector [kJ]

$T_a$ = Temperatura ambiente [°C]

$F_R(\tau\alpha)$ = Eficiencia óptica del colector [adimensional]

$F_R U_L$ = Parámetro de pérdida de calor total del colector [adimensional]

Donde  $F_R(\tau\alpha)$  es la ordenada al origen,  $-F_R U_L$  es la pendiente y el término  $(T_i - T_a)/G_T$  es la variable independiente. La ecuación (2) es única para cada colector y no se modifica por más que el ensayo se realice en otras condiciones climáticas. Lo importante es mantener la constancia del flujo másico establecido por el fabricante del equipo (caudal de diseño). Esta descripción aclara también el hecho de que la eficiencia (rendimiento térmico) de un colector no es una constante, sino una función, como la que se muestra en la Figura 4.

$F_R(\tau\alpha)$  y  $F_R U_L$  son valores particulares de cada modelo de colector y pueden ser utilizados por distintos métodos de cálculo para dimensionar un sistema de ACS de cualquier tamaño. En este

artículo se tomarán los cálculos realizados mediante un método muy conocido y utilizado en varios países, denominado f-chart [7].

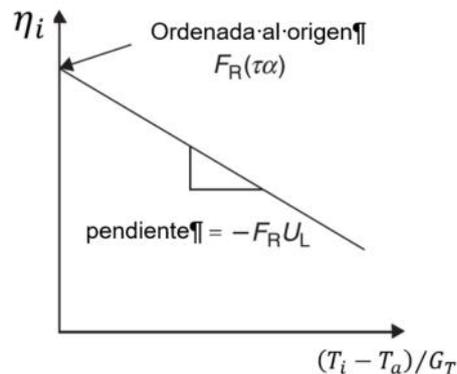


Figura 4: Recta que resulta del ensayo de rendimiento térmico de un colector

### 3.2 Ensayo de sistemas compactos – Norma IRAM 210004

Para los sistemas compactos, no es posible separar el colector del almacenador y el flujo másico del fluido caloportador es variable, dependiendo de la variación de la densidad que ocasiona el aumento de la temperatura. Este ensayo es un tanto más complejo y laborioso que el anterior, demanda varios días de trabajo y en vez de determinar algún tipo de eficiencia, se basa en la determinación de la producción diaria de energía del sistema, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = a_1 H + a_2 (T_{a(día)} - T_{red}) + a_3 \quad (3)$$

$Q$  = Energía calórica útil extraída del sistema compacto en un día [MJ]

$H$  = radiación total recibida durante el día en el plano del colector del sistema compacto [MJ/m<sup>2</sup>]

$T_{a(día)}$  = temperatura ambiente promedio durante el calentamiento [°C]

$a_1$ ,  $a_2$ , y  $a_3$  son constantes que resultan del desarrollo estadístico que genera la ecuación (3)

La ecuación (3) es única para cada sistema compacto. Ensayos bien hechos en distintas condiciones climáticas darán como resultado las mismas constantes. El ensayo prevé también la determinación de un coeficiente de pérdida de calor del sistema compacto y la determinación de una curva de mezclado (cuando ingresa fluido frío). Con todos estos parámetros, se usa un programa, que con los datos climáticos y la demanda del usuario, permite predecir la producción de energía día por día, mes por mes o en un año completo del sistema.

## 4. DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La comparación de los sistemas compactos con los forzados se hizo en función de la comparación de las fracciones solares mensuales y la fracción solar anual. Se define a la fracción



solar como el porcentaje de energía provista por energía solar respecto a la demanda de la aplicación que se trate. De esta manera, se tiene que para un mes

$$f_i = \frac{\text{Energía aportada por equipo solar en el mes } i}{\text{demanda total de energía del usuario en el mes } i (L_i)} \quad (4)$$

Y para un año, es la suma de toda la energía aportada solarmente, dividida por la demanda anual de energía. Se suman así los aportes energéticos mensuales meses en el numerador y todas las demandas mensuales en el denominador (desde  $i= 1$  hasta  $i= 12$ )

$$F = \frac{\sum f_i L_i}{\sum L_i} \quad (5)$$

Considerando primero los sistemas compactos, a partir de un equipo de 300 litros de tubos evacuados inundados (30 tubos) ensayado en el Laboratorio de Energía Solar de la UNRC, se determinaron las constantes  $a_1$ ,  $a_2$ , y  $a_3$ , y se realizaron las proyecciones mensuales con los datos climáticos de distintas localidades del país. En las siguientes dos tablas se muestran los resultados de dos ciudades, con un mismo consumo, pero diferentes regiones climáticas, para remarcar lo sugerido anteriormente, de que un mismo equipo no dará los mismos resultados en distintos climas. La Tabla 1 corresponde al cómputo de un año para la ciudad de La Rioja, mientras que la Table 2, lo es para un año en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA).

Tabla 1. Fracciones solares de un equipo compacto de 300 litros para la ciudad de La Rioja

Localidad: La Rioja Latitud: 29°24' S Longitud: 66°51' O						
mes	H [MJ]	Tamb [°C]	Ta(day)	Qdem [MJ]	Qutil [MJ]	Fs
Enero	23,40	27,10	29,22	609,77	609,77	1,18
Febrero	22,79	25,50	27,75	557,68	557,68	1,27
Marzo	18,29	23,40	26,33	662,46	662,46	1,00
Abril	15,52	19,80	22,06	736,78	710,71	0,96
Mayo	13,50	15,20	15,73	900,84	761,90	0,85
Junio	9,79	10,90	14,71	1020,59	588,44	0,58
Julio	10,69	10,80	13,54	1138,57	627,94	0,55
Agosto	14,80	14,30	16,00	1122,99	751,18	0,67
Septiembre	19,30	17,30	22,15	1026,11	792,50	0,77
Octubre	22,50	22,90	27,48	905,77	811,47	0,90
Noviembre	24,19	25,40	29,35	750,84	746,33	0,99
Diciembre	24,52	27,50	29,91	663,62	663,62	1,11
<b>Totales →</b>				10096,01	8284,00	0,82

La forma de realizar los cálculos está explicada en una publicación previa [8]. No se han colocado todas las columnas necesarias en la tabla. En particular la radiación de la segunda columna es la radiación diaria global media mensual horizontal que resulta de las mediciones de un piranómetro en la ciudad que se trate. Para el cálculo se la refiere al plano del colector, que es lo que va en la ecuación (3) para computar el calor útil diario (columna Qutil en la tabla). Se



adoptó un ángulo de inclinación de colector de 45 grados, valor usual con que vienen los equipos importados de China y también varios de los que se fabrican en el país. La demanda (datos de la columna Qdem) se estima considerando que los 300 litros se deben entregar a 45 °C (la temperatura para duchar una persona ronda los 42 °C). Los números de las filas de dicha columna provienen entonces de un cálculo calorimétrico, lo cual es más riguroso que la estimación de 50 litros por persona que utilizan los vendedores e instaladores en nuestro país

Se han pintado de amarillo ciertas celdas de la tabla de La Rioja. Son los casos en que la fracción solar (Fs) dio mayor que uno (1), lo cual significa que el termotanque solar proveería más energía que la necesaria para ese mes. Lógicamente esto sucede en los meses de verano y cercanos. Como no es posible almacenar ese excedente de energía para meses subsiguientes, en las filas de Qutil se replican los valores de Qdem tomándose la fracción solar como igual a uno (1).

En la Tabla 2, ninguna celda llegó a fracción solar igual a uno. Hubo buena cobertura los meses desde diciembre a marzo, pero se suministró el total de la energía, a diferencia de lo ocurrido en La Rioja. Se verifica entonces lo supuesto: el mismo equipo no tendrá igual comportamiento en distintos climas. A igual consumo, las diferencias en radiación solar y temperatura ambiente hacen la diferencia. Para cada mes, todas las fracciones solares de CABA son inferiores a las de La Rioja. En lo que respecta a la fracción solar anual, para La Rioja resulta ser de 0,82 y para CABA de 0,65. Muchas promociones de los vendedores hablan de una cobertura de los equipos del orden del 80 %, lo cual seguramente no se cumplirá en muchas regiones del país.

Tabla 2. Fracciones solares de un equipo compacto de 300 litros para CABA

Localidad: Ciudad Autónoma de Buenos Aires Latitud: 34°36' S Longitud: 58°23' O						
mes	H [MJ]	Tamb [°C]	Ta(day)	Qdem [MJ]	Qutil [MJ]	Fs
Enero	22,39	25,10	27,06	740,32	690,31	0,93
Febrero	20,59	23,70	25,46	651,09	639,43	0,98
Marzo	17,10	21,40	24,08	750,70	678,49	0,90
Abril	12,82	17,70	19,72	812,75	587,28	0,72
Mayo	9,50	14,30	14,80	957,02	536,92	0,56
Junio	7,20	11,20	15,11	1044,95	433,87	0,42
Julio	8,60	10,90	13,66	1151,02	506,12	0,44
Agosto	11,41	12,70	14,21	1156,09	579,81	0,50
Septiembre	14,18	14,20	18,18	1094,43	583,12	0,53
Octubre	18,22	17,70	21,24	1040,98	656,88	0,63
Noviembre	21,71	20,60	23,80	907,94	669,64	0,74
Diciembre	23,18	23,20	25,24	834,53	699,72	0,84
<b>Totales →</b>				11141,82	7261,59	0,65

Para comparar ahora los sistemas compactos con los sistemas forzados, se presenta aquí un caso de un equipo con colectores de placa plana que se comercializan hoy en Argentina, y su fabricante los provee con las correspondientes hojas de datos (ensayos hechos país de origen).



Para justificar la utilización de un sistema activo, el consumo debe ser relativamente elevado, habiéndose adoptado aquí un consumo diario de 900 litros, que podría ser un pequeño hotel, un pabellón de un internado (18 alumnos), un centro de salud barrial o pequeño edificio público. Se adoptaron 900 litros para que el almacenamiento sea múltiplo de lo que se hizo anteriormente con equipos compactos y poder así hacer una comparación de precios.

Como ya se dijo, se usa el método f-chart para dimensionar la instalación. En este método se supone el área del arreglo de colectores (siempre son más de dos) y el método arroja los valores de fracciones solares mensuales. El método prevé por defecto un almacenamiento de 75 litros de agua por cada metro cuadrado de colector, proponiéndose un factor de corrección si dicho almacenamiento se agranda o se achica. Lo que se buscó es ir aumentando el área de colectores hasta igualar la fracción solar anual de un equipo compacto. De esta manera, el ahorro energético sería el mismo. Solo se publica el caso de la ciudad de La Rioja, pero los otros son similares.

En la Tabla 3 se ven los resultados del dimensionamiento. Las celdas pintadas de celeste son las que deben proveerse con datos para que la hoja electrónica procese el cálculo.

Tabla 3. Fracciones solares de sistema activo de 900 litros para la ciudad de La Rioja

Mes	días por mes	HT [MJ/m <sup>2</sup> ]	Ta [°C]	L [MJ]	X Adimens.	Y Adimens.	f Adimens.	¿f<1?	% Solar [MJ]
Enero	31	22,60	27,10	2091	3,71	2,95	1,239	1,000	2091
Febrero	28	21,38	25,50	2057	3,48	2,56	1,185	1,000	2057
Marzo	31	18,84	23,40	2523	3,23	2,04	1,071	1,000	2523
Abril	30	16,74	19,80	2848	2,90	1,55	0,914	0,914	2603
Mayo	31	13,81	15,20	3480	2,59	1,08	0,698	0,698	2429
Junio	30	12,83	10,90	3854	2,38	0,88	0,586	0,586	2257
Julio	31	12,68	10,80	3994	2,37	0,87	0,578	0,578	2307
Agosto	31	15,67	14,30	3585	2,54	1,19	0,762	0,762	2732
Septiembre	30	17,59	17,30	3131	2,72	1,48	0,894	0,894	2800
Octubre	31	19,50	22,90	2581	3,18	2,06	1,080	1,000	2581
Noviembre	30	21,15	25,40	2215	3,47	2,52	1,178	1,000	2215
Diciembre	31	21,31	27,50	2044	3,77	2,85	1,220	1,000	2044

energía total anual demanda-->

**34403**

total solar anual-->

**28638**

Ts=	45	°C
Ac=	12	m <sup>2</sup>
m=	900	kg

$F_R U_L =$	3,411
$F_R(\alpha) =$	0,788

$F = \Sigma(f.L) / \Sigma L =$	<b>0,83</b>
--------------------------------	-------------

Aquí la radiación (tercera columna) ya ha sido preprocesada y es la que incide sobre el plano de los colectores. Ac es el área del arreglo de colectores, y aquí para llegar a la misma fracción que la de un sistema compacto, se supusieron seis colectores de 2,00 m<sup>2</sup> cada uno (tamaño convencional) para totalizar 12 m<sup>2</sup>. El modelo de colector seleccionado tiene una ordenada al origen de 0,788 (adimensional) y la pendiente de pérdidas calóricas presenta un valor de 3,411 W/m<sup>2</sup>.K. Los valores X e Y son parámetros intermedios que utiliza el método para el cálculo.



Luego, haciendo cálculos con precios del mercado local, pasados a dólares estadounidenses, para poder hacer comparaciones más certeras, se encuentra que el punto de inflexión en la conveniencia de varios sistemas compactos y uno forzado, se desde el pasaje de sistemas para proveer 600 litros a 900 litros de agua caliente. Cuando se tienen que poner 3 equipos compactos, comienza a convenir la utilización de un sistema forzado (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis económico de equipos para 600 litros y 900 litros

Sistemas compactos para 600 litros		
Item	P.U.	Subtotal
2 termotanques de 300 litros	1450	2900
Materiales y Accesorios	750	1500
Mano de obra	550	1100
		<b>5500</b>

Sistema forzado para 600 litros		
Item	P.U.	Subtotal
4 colectores	870	3480
1 tanque almacenador	350	350
Controlador - Vaso exp.	120	120
Bomba	210	210
Accesorios y cañerías	930	930
Mano de obra	700	700
		<b>5790</b>

Sistemas compactos para 900 litros		
Item	P.U.	Subtotal
3 termotanques de 300 litros	1450	4350
Materiales y Accesorios	750	2250
Mano de obra	550	1650
		<b>8250</b>

Sistema forzado para 900 litros		
Item	P.U.	Subtotal
6 colectores	870	5220
1 tanque almacenador	470	470
Controlador - Vaso exp.	140	140
Bomba	210	210
Accesorios y cañerías	930	930
Mano de obra	750	750
		<b>7720</b>

## 5. CONCLUSIONES

Se muestra cuantitativamente la conveniencia de emplear un sistema forzado cuando la cantidad de ACS a proveer supera un cierto límite (600 litros). El proceso repetitivo de armado de estructuras y exceso de cañerías y accesorios encarece el sistema, superando ampliamente el costo de la bomba, vaso de expansión, controlador y válvulas que requiere un sistema forzado, además de tener este también un solo tanque de almacenamiento.

Hay equipos y accesorios disponibles en el mercado local, y muy confiables, que permiten montar sistemas forzados sin ningún contratiempo. La mayoría de los equipos son importados, como también lo son los sistemas compactos que se instalan actualmente, por lo cual no hay diferencia en ese aspecto.

Los sistemas forzados presentan a su vez otras ventajas adicionales: (a) el tanque de almacenamiento puede estar dentro de la edificación, lo cual favorece su durabilidad y mantenimiento de la temperatura; (b) los colectores pueden ponerse con ángulos variables, no dependiendo de una estructura predeterminada; (c) lo anterior hace que también se puedan integrar arquitectónicamente muy bien a la envolvente del edificio.



El problema central radica en la falta de formación técnica y profesional en el tema, que facilite la difusión de la instalación de sistemas forzados, que podrían mejorar notablemente el consumo energético de medianas y grandes edificaciones que hagan uso de ACS. De aquí el compromiso que deben asumir las instituciones educativas de nivel medio y superior para incrementar las actividades de capacitación.

Es necesaria una mayor injerencia estatal en todo el proceso de regulación de la energía solar térmica, con legislación que favorezca el otorgamiento de créditos y exenciones impositivas que atraigan a la instalación de estos sistemas de alto costo inicial, que se cree un registro de instaladores calificados y se implementen de organismos de certificación, gestión y control.

## REFERENCIAS

- [1] Gautam A., Chamoli S., Kumar A., Singh S. *A review on technical improvements, economic feasibility and world scenario of solar water heating system*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 68, pág. 541–562, 2017.
- [2] Sabre M. y otros. INTI (2020) Censo Nacional Solar Térmico 2020 - Informe Período 2019. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, 9-22.
- [3] Weiss W. y Spörk-Dür M. *Solar Heat Worldwide Detailed Market Data 2019, Global Market Development and Trends in 2020*. Solar Heating & Cooling Programme International Energy Agency, 2021.
- [4] INTI [en línea] Instaladores de Sistemas Solares Térmicos, Nivel II, Dirección URL: <<https://www.inti.gov.ar/areas/servicios-regulados/certificaciones/organismo-de-certificacion/tramites/instaladores-de-sistemas-solares-termicos-nivel-ii>> [consulta: 24 de mayo de 2023]
- [5] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 210004 Métodos de ensayo exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, 56 páginas, 2016.
- [6] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 210002-1 Métodos de ensayo para determinar el rendimiento térmico de los colectores solares con cubierta para el calentamiento de líquidos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, 57 páginas, 2016.
- [7] Duffie J.A.; Beckman W.A.; Blair N. *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind, fifth edition*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 683-700, 2020.
- [8] Barral J., Garnica J., Lucchini J.M. *Herramientas para diseño y cálculo de instalaciones Pasivas y activas de agua caliente solar*. Actas del 6° Congreso Argentino de Ingeniería y 12° Congreso Argentino de Enseñanza de Ingeniería CADI-CAEDI, ISBN 978-987-4050-08-3, pág. 1936-1943, 2022.



## MODELACIÓN DEL PATRÓN DE DEMANDA TÉRMICA Y ELÉCTRICA CON RESOLUCIÓN HORARIA Y EN EL TIEMPO DEL DISTRITO DE ENFRIAMIENTO NORTE DE MONTERÍA

Miguel Doria<sup>1</sup>, Stiven Sofan<sup>2</sup>, Jesús Rhenals<sup>3</sup>, Jorge Mendoza<sup>4</sup>, Ernesto Diz<sup>5</sup>, Jorge Mercado<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Programa de ingeniería electromecánica – Facultad de ciencias básicas e ingenierías, Universidad del Sinú-No. 38-153 4536534, Cra. 1W, Montería, Córdoba - [migueledoria@unisinu.edu.co](mailto:migueledoria@unisinu.edu.co)

<sup>2</sup> Programa de ingeniería electromecánica – Facultad de ciencias básicas e ingenierías, Universidad del Sinú-No. 38-153 4536534, Cra. 1W, Montería, Córdoba [stivensofan@unisinu.edu.co](mailto:stivensofan@unisinu.edu.co)

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías –, Universidad de Córdoba-Cra. 6 #77-305, Montería, Córdoba- [jesusrhenalsj@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jesusrhenalsj@correo.unicordoba.edu.co)

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías –, Universidad de Córdoba-Cra. 6 #77-305, Montería, Córdoba [jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co)

<sup>5</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías –, Universidad de Córdoba-Cra. 6 #77-305, Montería, Córdoba [ernestojosedizarenas@yahoo.es](mailto:ernestojosedizarenas@yahoo.es)

<sup>6</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías –, Universidad de Córdoba-Cra. 6 #77-305, Montería, Córdoba [jmercadorangel@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jmercadorangel@correo.unicordoba.edu.co)

### RESUMEN

Colombia está encaminando nuevos retos en la demanda de una mejor eficiencia energética debido a diversos fenómenos climáticos y la transición hacia energías renovables y más amables con el medio ambiente, el desarrollo de los distritos térmicos en el mundo se presenta como una de las alternativas para abastecer la creciente demanda de refrigeración y calefacción. La eficiencia energética es la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, que busca ser maximizada a través de buenas prácticas de reconversión tecnológica o sucesión de combustibles. A través de la eficiencia energética, se quiere obtener el mayor aprovechamiento de la energía, bien sea a partir del uso de una forma primaria de energía o durante alguna actividad que requiera el uso de las diferentes formas de energía respetando la normatividad vigente sobre el ambiente y los recursos naturales renovables. En la ciudad de Montería se identificó una zona de alto potencial (ZAP) para la ubicación de este distrito térmico en la cual predominan edificio de oficinas de entidades bancarias y públicas, asimismo hoteles, zonas educativas, entretenimiento y salud.

**Palabras clave:** *eficiencia energética, energía, distrito térmico, recursos naturales renovables, ZAP.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los sistemas de distritos térmicos (TDS) y las fuentes de energía renovable han ido en constante desarrollo siendo una tendencia mundial [1]. La literatura sobre el pronóstico de carga directa es abundante, y varios artículos y estudios metodológicos recientes se han centrado en temas tales como pronóstico de carga, la demanda de calefacción y el pronóstico de la carga y el consumo eléctrico de los edificios.[2]

Se pronostica que la demanda de refrigeración y el enfriamiento crezca de manera impulsada por el cambio climático, así también el crecimiento económico y la urbanización [3-5]. La eficiencia energética como indicador es una medida de la perfección en el aprovechamiento de la energía en un proceso y como área de estudio es la optimización de la relación entre el consumo de energía y los productos o beneficios obtenidos. Los procesos ineficientes por lo general se caracterizan por ser costosos y contaminantes. [4]

Teniendo en cuenta como base, que para un Distrito Térmico que alimente alrededor de 90 [GWh] de refrigeración consume casi 18 [GWh] de electricidad que obtenido desde la red eléctrica en Colombia (213 [kgCO<sub>2</sub>/MWh]) implica emisiones anuales de aproximadamente 4 [tonCO<sub>2</sub>]. Asumiendo sistemas de enfriamiento convencionales con un COP de 2.7, es decir, la mitad de la eficiencia del distrito, donde se evaden los consumos coligados al sistema de distribución, se alcanzan emisiones anuales de 6,7 [tonCO<sub>2</sub>] para el caso de donde se obtienen los datos. Esto es equivalente a un ahorro de casi el 50% de las emisiones asociadas. El Distrito Térmico permite reemplazar cerca de 8 kg de refrigerantes con potencial de consunción de ozono por refrigerantes naturales sin potencial de agotamiento de la capa de ozono ni que contribuyan al efecto invernadero. [5]

## 2. MARCO TEORICO

Para el presente estudio se tomó como base los siguientes parámetros para los cálculos necesarios en la potencia requerida de los equipos que se vayan a montar dentro de los recintos del distrito térmico. Según la zona climática en la que nos encontremos tendremos 4 tipos de clima, se considera frío temperaturas hasta los 18°C, templado para temperaturas entre 19° - 25° [C], cálido para 26° - 33° [C] y muy cálido para temperaturas superiores a 34°C; así como el área de la zona que se va a climatizar y por último la carga térmica, es decir, la cantidad de personas que frecuenten el ambiente y los artefactos que generen calor tales como lámparas, computadores, televisores, entre otros. La unidad de medida para expresar cuánto calor debe retirar el aire acondicionado del ambiente es la BTU (Unidad Térmica Británica) según el tipo de clima de que se trate habrá que retirar una cantidad específica de calor por metro cuadrado como se ve en la tabla 1.



Tabla 1. Parámetros del clima

CLIMA	CANTIDAD DE BTU EXTRAIDOS
FRIO	500
TEMPLADO	550
CALIDO	600
MUY CALIDO	650

La mayoría de las personas pasan normalmente el 90 % de su tiempo en interiores, de este, un porcentaje estimado del 30 % del tiempo dedicado a la universidad y la educación superior, por lo tanto; es esencial garantizar una buena calidad del interior, esta calidad del aire interior, según la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), "se define como el aire dentro de un edificio o estructura que no contiene contaminantes en concentraciones peligrosas para las personas". [9]

Cuando hablamos de carga térmica sobre un edificio, nos referimos a un fenómeno que tiende a modificar el aire interior o su humedad. En este sentido, se debe establecer una primera clasificación de las cargas térmicas, según su incidencia:

- Cargas térmicas sensibles: aquellas que provocarán variación en la temperatura del aire.
- Cargas térmicas latentes: aquellas que provocarán un aumento de la humedad absoluta del ambiente [10]

## 2.1 Cálculo de cargas sensibles

Para calcular la carga térmica sensible, que denominaremos  $Q_s$ , es necesario ecuación (1):

$$Q_s = Q_{sr} + Q_{str} + Q_{st} + Q_{si} + Q_{sai} \quad (1)$$

Donde:

- $Q_{sr}$  el valor de la carga sensible originada por la transmisión a través de cerramientos translúcidos, expresado en W.
- $Q_{str}$  el valor de la carga sensible por transmisión a través de paredes y techos exteriores, expresado también en W.



- $Q_{st}$  el valor de la carga sensible por transmisión a través de paredes, techos, suelos y puertas interiores (W);
- $Q_{si}$  el valor de la carga sensible transmitida por infiltraciones de aire exterior (W);
- $Q_{sai}$  el valor de la carga sensible debida a aportaciones internas (W).

Se calculan por separado las cargas citadas anteriormente para conseguir el valor de la carga sensible total, a continuación.

## 2.2 Transmisión a través de paredes y techos exteriores

Esta carga térmica por transmisión se calcula como muestra la ecuación (2):

$$Q_{str} = K * S * (T_{ec} - T_i) \quad (2)$$

Donde:

- K el coeficiente de transmisión térmica del cerramiento ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ), también llamado transmitancia térmica.
- S la superficie del cerramiento, expresado en  $m^2$ .
- $T_{ec}$  la temperatura de diseño al otro lado del cerramiento, expresado en  $^\circ C$ .
- $T_i$  la temperatura interior del diseño del local, expresado en  $^\circ C$ .

## 2.3 Transmisión de radiación solar a través del cristal

Aquí se representa la radiación que atraviesa superficies traslúcidas, como puede ser el cristal, transmitiendo calor al interior de la estancia. Esta carga térmica por transmisión a través de cerramientos traslúcidos se calcula mediante la ecuación (3):

$$Q_{sr} = S * R * F \quad (3)$$

Donde:

- $Q_{sr}$  la carga térmica por radiación solar a través de cristal, expresado en W.
- S la superficie traslúcida o acristalada expuesta a la radiación, expresado en  $m^2$ .
- R la radiación solar que atraviesa dicha superficie, expresado en  $W/m^2$ .
- F los factores de corrección de la radiación en función del tipo de vidrio y otros factores, que se pueden consultar en unas tablas del Código Técnico de Edificación (CTE-DB HE Ahorro de energía). [12]



## 2.4 Transmisión a través de paredes, techos, suelos y puertas interiores

Se obtiene usando la ecuación (4)

$$Q_{st} = K \cdot S \cdot (T_e - T_i) \quad (4)$$

Donde:

- $Q_{st}$  la carga por transmisión a través de los cerramientos interiores, en W.
- K el coeficiente global de transmisión térmica del cerramiento expresado en W/m<sup>2</sup>°C.
- S la superficie del cerramiento interior, en m<sup>2</sup>.
- $T_e$  la temperatura de diseño al otro lado del cerramiento (°C).
- $T_i$  la temperatura interior de diseño del local (°C).

## 2.5 Transmisión por infiltraciones de aire exterior

Se calcula mediante la ecuación (5)

$$Q_{si} = V \cdot \rho \cdot C_{e, \text{aire}} \cdot \Delta T \quad (5)$$

Donde:

- $Q_{si}$  la carga térmica por infiltración y ventilación de aire exterior (W).
- V el caudal de aire infiltrado y de ventilación (m<sup>3</sup>/s).
- $\rho$  la densidad del aire, de valor 1,18 kg/m<sup>3</sup>.
- $C_{e, \text{aire}}$  el calor específico del aire, de valor 1012 J/kg°C.
- $\Delta T$  la diferencia de temperaturas entre el ambiente exterior e interior.

## 2.6 Carga sensible por aportaciones internas

Usando la ecuación (6)

$$Q_{sai} = Q_{sil} + Q_{sp} + Q_{sv} \quad (6)$$

Dónde:

- $Q_{sil}$  la ganancia interna de calor sensible por iluminación, expresada en W.
- $Q_{sp}$ , la ganancia interna de calor sensible debido a los ocupantes, en W.
- $Q_{sv}$  la ganancia interna de calor sensible por aparatos diversos, en W.

## 2.7 Ventilación / infiltración de aire

Aquí se calcula la carga latente por ventilación o infiltración de aire exterior, determinada con la siguiente ecuación (7):



$$Q = V * 0,63 * \Delta w \quad (7)$$

- V el caudal de aire infiltrado o de ventilación, expresado en m<sup>3</sup>/h.
- 0,63 el producto de la densidad estándar del aire (1,2 kg/m<sup>3</sup>) por el calor latente de vaporización del agua (0,52 Wh/g).
- $\Delta w$  la diferencia de humedad absoluta entre el ambiente exterior y el interior (°C).

## 2.8 Ocupación del local

Esta carga latente por ocupación del local se obtiene multiplicando una valoración de calor latente emitido por una persona tipo, por el número de ocupantes previstos para este local estudiado. Esta cifra de calor emitido se extrae de una tabla en la que se tiene en cuenta una tipología preestablecida de cada una de las estancias. Estos datos pueden ser obtenidos a través del RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios).

Se tiene en cuenta las cargas térmicas para establecer las BTU necesarias según la carga térmica es decir la cantidad de personas y artefactos presentes en el lugar a climatizar también habrá que retirar una cantidad determinada de calor

## 3. RESULTADOS

Se debe asegurar de que las cantidades de toneladas de refrigeración (TR) proporcionadas por el distrito térmico sean correctas, por lo que es necesario calcular las cargas térmicas de cada uno de los clientes potenciales. Luego se verifican que la cantidad de toneladas de refrigeración recolectadas de cada cliente se utilice de la manera óptima para un rendimiento económico rentable. De lo contrario, el proyecto será rechazado. Por último, se comprueba que la energía producida responde adecuadamente a la demanda

A continuación, presentamos los planos que se pueden encontrar en la página web de algunos de los puntos de la zona de alto potencial, otros fueron estimados según las entrevistas, para esto se utilizó el software libre Excel para determinar las cargas, así como una tabla dinámica para las cargas térmicas latentes y sensibles

### 3.1 Cálculo de áreas y ocupación

De acuerdo a la información presentada en el documento P009956-2-GP-INF-00014P: "Informe de caracterización de ciudades y selección de las zonas prioritarias - Montería y Villavicencio", redujeron los riesgos de no conexión, reduciendo el área considerada para los grandes centros comerciales (Centro Comercial Buenavista y Centro Comercial Alamedas), indicados con un



asterisco en la tabla. La red considerada tiene 2,900 [m] de longitud, con una densidad promedio de 11.4 [kW/m][5]

Luego de haber culminado los planos de cada uno de los clientes potenciales para el distrito térmico, se calculó el área de cada uno de los bloques (locales de centros comerciales, habitaciones de hoteles y de los baños), para otros solo se estimaron sus medidas totales del punto para identificar sus áreas de las plantas (ver Tabla 2) (ver figura 1)

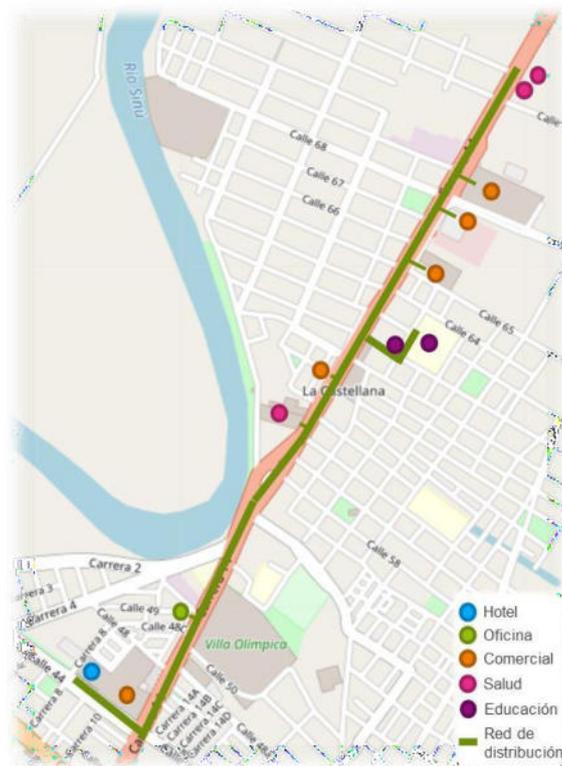


Figura 1. Esquema de la ZAP Montería. Tractebel-Hinicio (2018) con base de OpenStreetMap



Tabla 2. Clientes ancla en la ZAP Montería. Tractebel-Hinicio (2018).

MONTERÍA	TIPO DE EDIFICIO	ÁREA [m <sup>2</sup> ]	CAPACIDAD TR
Clínica IMAT	Salud	4,500	1080
Clínica DIAC	Salud	1,967	950
Clínica Montería	Salud	7,000	398,05
Homecenter Norte	Comercial	12,000	303,402
Almacén Éxito Norte	Comercial	3,100	160,6508333
Colegio Sagrada Familia	Educación	7,000	55,00
Centro Comercial Buenavista	Comercial	33,500 (*)	2175,60017
Surtigas	Oficina	800	45,05
Universidad Católica Luis Amigó	Educación	4,000	148,9326667
Hotel GHL	Hotel	8,460	60,56
Centro Comercial Alamedas	Comercial	29,055 (*)	1169,71833
Centro Comercial Places Mall	Comercial	16,000	144,7216667
<b>Total de las áreas estimadas</b>		<b>127,372</b>	<b>6691,68567</b>

### 3. CONCLUSIONES

Del análisis hecho de la posibilidad de un distrito térmico al norte de la ciudad de Montería-Córdoba se puede concluir que es factible el establecimiento de este, y así pueda suplir la demanda energética de las grandes superficies que se encuentran en la zona.

Se determinó que la capacidad óptima para el distrito térmico de Montería sería de 7000 [TR] y una red de distribución de 3000 [m] conectando a los 12 clientes, configuración que en un análisis de costo total de propiedad con duración de 30 años es más atractiva que un sistema convencional.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba como fuente de financiación, en el marco de la Sostenibilidad de los Grupos de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica asociado al Grupo Ingeniería, Ciencia y Tecnología - ICT, así mismo a la Universidad del Sinú



con el apoyo del programa de Ingeniería Electromecánica de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingenierías enmarcado dentro del programa de movilidad profesoral entre programas académicos de pregrado y posgrado de facultades de Ingeniería de Instituciones de Educación Superior de la Región Caribe Colombiana ACOFI.

## REFERENCIAS

[1] Abrar Inayat, Mohsin Raza, District cooling system via renewable energy sources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 107, 2019, Pages 360-373.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.023>

[2] A. Kipping, E. Trømborg, Modeling and disaggregating hourly electricity consumption in Norwegian dwellings based on smart meter data, *Energy and Buildings*, Volume 118, 2016, Pages 350-369. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.042>

[3] Energy Consumption and Thermal Performance in Different Residential Building Types in Hot-Summer and Cold-Winter Zone, Haiqiang Liu and Shoichi Kojima, *Journal of civil engineering and architecture*, year 2017, volumen 11

<https://doi.org/10.17265/1934-7359/2017.03.004>.

[4]

[5] Informe Técnico Económico – Montería. P009956-2-GP-INF-00014. APR 09, 2019. Disponible en: <https://www.distritoenergetico.com/wp-content/uploads/2020/10/P009956-2-GP-INF-000014P-Informe-T%C3%A9cnico-Econ%C3%B3mico-Monter%C3%ADa.pdf>

[6] Velders GJM, Fahey DW, Daniel JS, Andersen SO, McFarland M. Future atmospheric abundances and climate forcings from scenarios of global and regional hydrofluorocarbon (HFC) emissions. *Atmos Environ* 2015;123:200–9.

<https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2015.10.071>.

[7] UNEP. The importance of energy efficiency in the refrigeration, air-conditioning and heat pump sectors. 2018. Disponible en: [https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-08/briefingnote-a\\_importance-of-energy-efficiency-in-the-refrigeration-air-conditioning-and-heat-pump-sectors.pdf](https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-08/briefingnote-a_importance-of-energy-efficiency-in-the-refrigeration-air-conditioning-and-heat-pump-sectors.pdf)

[8] Cedeño, M. ., Solano, T., Mora, D., & Chen, M. (2022). Evaluación del desempeño de sistemas de ventilación en salones de clase: Estudio numérico en edificios universitarios en Panamá. *Novasineria*, ISSN 2631-2654, 5(1), 100–127.



<https://doi.org/10.37135/ns.01.09.07>

[9] Cálculo de cargas térmicas: conceptos básicos y métodos. PUBLICADO POR S&P EL JAN 20, 2020. Disponible en: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/calculo-cargas-termicas/>

[10] Condiciones de las instalaciones térmicas. Publicado por CTE EL JAN 14/2022. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

[11] Informe Técnico Económico – Montería. P009956-2-GP-INF-00014. APR 09, 2019. Disponible en: <https://www.distritoenergetico.com/wp-content/uploads/2020/10/P009956-2-GP-INF-00014P-Informe-T%C3%A9cnico-Econ%C3%B3mico-Monter%C3%ADa.pdf>



## MODELADO NUMÉRICO Y ANÁLISIS TÉRMICO DE LA PIRÓLISIS LENTA DE BIOMASA MEDIANTE TERMOGRAVIMETRÍA

Jorge Rhenals<sup>1</sup>, Jorge Mendoza<sup>2</sup>, Jesús Rhenals<sup>3</sup>, Rafael Gómez<sup>4</sup>, Julissa Jiménez<sup>5</sup>, Cristina Cogollo<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería Carrera 6 No. 77- 305 Montería, Colombia - [jrhenalshoyos@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jrhenalshoyos@correo.unicordoba.edu.co).

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería Carrera 6 No. 77- 305 Montería, Colombia - [jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co).

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería Carrera 6 No. 77- 305 Montería, Colombia - [jesusrhenalsj@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jesusrhenalsj@correo.unicordoba.edu.co).

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica – Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería y Arquitectura Cra 6 No. 97 A - 99 Montería, Colombia – [rafael.gomezv@upb.edu.co](mailto:rafael.gomezv@upb.edu.co).

<sup>5</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería Carrera 6 No. 77- 305 Montería, Colombia - [jjimenezlopez@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jjimenezlopez@correo.unicordoba.edu.co).

<sup>6</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería Carrera 6 No. 77- 305 Montería, Colombia - [ccogollotorres@correo.unicordoba.edu.co](mailto:ccogollotorres@correo.unicordoba.edu.co).

### RESUMEN

En el contexto de una crisis ambiental global y el agotamiento de las reservas de petróleo, la energía de biomasa emerge como una alternativa a los combustibles fósiles. Se aprovecha a través de procesos de conversión termoquímica, que generan compuestos de alto valor y energía térmica. La combustión es el método más extendido para producir calor o electricidad mediante la conexión a un sistema de generación de energía, generalmente una turbina de vapor. No obstante, el uso de biomasa natural presenta desventajas, como alta humedad, naturaleza higroscópica, baja densidad y bajo poder calorífico, que reducen la eficiencia de estos procesos.

Por esta razón, surge el interés en estudiar procesos alternativos que reduzcan las desventajas y obtengan productos más versátiles. La pirólisis permite la conversión de la biomasa en gas combustible, bioaceite y biocarbón, útiles para generar productos de valor añadido o energía. Sin embargo, la pirólisis es un proceso complejo debido a la diversidad de compuestos y fases presentes en sus productos, lo que requiere el desarrollo de modelos numéricos para su estimación y optimización.

En la implementación industrial de la pirólisis de biomasa, los modelos numéricos tienen diversas aplicaciones prácticas. Por ejemplo, pueden ayudar a diseñar y optimizar los reactores de pirólisis, evaluar la calidad del biocombustible producido y predecir la cantidad de residuos generados. Además, el modelado numérico es útil para la toma de decisiones y la planificación estratégica en la industria de la energía renovable.

En este trabajo, se realiza un análisis cinético mediante termogravimetría del proceso de pirólisis de la cascarilla de arroz. El objetivo es establecer la energía de activación y el factor de frecuencia de acuerdo con la ecuación de Arrhenius, desarrollando un modelo semi-detallado de dos pasos que permita predecir la producción de biocarbón, volátiles condensables y no condensables.

**Palabras clave:** *Pirólisis; Biomasa; Termogravimetría; Modelado numérico.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, se están llevando a cabo numerosos esfuerzos para encontrar recursos y tecnologías alternativas que puedan reemplazar de manera efectiva los combustibles fósiles, entre las principales energías alternativas se encuentran: la energía solar, la eólica, la hidroeléctrica, la geotérmica y la biomasa [1]. La energía de la biomasa se encuentra en el cuarto lugar como una de las fuentes de energía más importantes, después del carbón, el petróleo y el gas natural, debido a la amplia disponibilidad de sus recursos [2]. Existen diversas formas de realizar el aprovechamiento termoquímica de la biomasa, como la pirólisis, gasificación y combustión, obteniendo como resultado productos con alto valor energético [3].

La pirólisis es la descomposición térmica que ocurre en ausencia de oxígeno [4]. En este proceso se producen tres productos principales: biocarbón, gas combustible y bioaceite, donde la composición de estos productos se ve directamente influenciada por la temperatura del reactor y el tiempo de residencia del vapor [4]. En la pirólisis lenta, la principal producción es el biochar, mientras que en la pirólisis rápida se obtienen principalmente bio-oleo [5].

Diversas investigaciones han evidenciado que los resultados obtenidos en la pirólisis de biomasa pueden ser influenciados por factores como la composición de la materia prima utilizada, las variaciones en las velocidades de calentamiento y las temperaturas aplicadas durante el proceso de pirólisis, así como el uso de catalizadores [6].

En los últimos años, las herramientas de modelado se han vuelto cada vez más importantes [7]. Los modelos numéricos para la pirólisis de biomasa son herramientas computacionales que se utilizan para predecir los procesos de conversión térmica de la biomasa basándose en principios físicos y químicos, permitiendo así estudiar y optimizar diversos aspectos del proceso, como la cinética de la reacción, la distribución de productos, la influencia de variables de proceso (como la temperatura, la velocidad de calentamiento y la presión), entre otros [8]. Siendo de gran utilidad en la investigación y desarrollo de tecnologías de conversión de biomasa, debido a que permiten evaluar diferentes escenarios y condiciones de operación sin necesidad de realizar experimentos a gran escala, además, ayudan a comprender los mecanismos subyacentes de la pirólisis y a optimizar los procesos para obtener rendimientos y productos deseados [9].

En este estudio, se llevó a cabo un análisis cinético mediante termogravimetría del proceso de pirólisis de la cascarilla de arroz, con el objetivo de establecer la energía de activación y el factor de frecuencia de acuerdo con la ecuación de Arrhenius. El propósito de este análisis fue desarrollar un modelo semi-detallado de dos pasos que permitiera predecir la producción de biocarbón, volátiles condensables y volátiles no condensables.



## 2. MODELADO Y SIMULACIÓN

Se hizo un análisis termogravimétrico (TGA) a una muestra de cascarilla de arroz de 5.038 mg, la cual fue sometida en una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 100 ml/min, con una tasa de calentamiento de 10 °C/min. A partir de los datos obtenidos del TGA, se realizó un análisis numérico, el cual busca establecer los valores de las constantes cinéticas como lo son el factor de frecuencia ( $A_0$ ) y la energía de activación ( $E$ ). Todo esto a través del uso de la herramienta computacional *Python* (versión 3.11.3), la cual por medio de sus librerías podemos obtener la solución a las ecuaciones diferenciales que rigen el fenómeno de la pirólisis. El método consiste en utilizar una función de optimización que permite encontrar el mínimo de una función objetivo mediante la iteración y ajuste de los parámetros. Además del empleo de funciones para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias de forma numérica.

El objetivo de este estudio es demostrar, desde una perspectiva científica, que el proceso de pirólisis de la biomasa puede ser conceptualizado de manera más simplificada. Se propone que la biomasa sometida a pirólisis genera inicialmente un sólido intermedio y volátiles iniciales. A medida que progresa el proceso, este sólido intermedio se transforma en un sólido final y se generan otros volátiles adicionales, como se ilustra en la figura 1.

La pirólisis de la biomasa es un proceso de degradación térmica que involucra reacciones complejas. Este estudio busca proporcionar una descripción más simplificada del proceso, identificando los principales productos intermedios y su evolución. Se plantea que la biomasa sufre una serie de transformaciones, dando lugar a la formación de diferentes compuestos sólidos y volátiles.

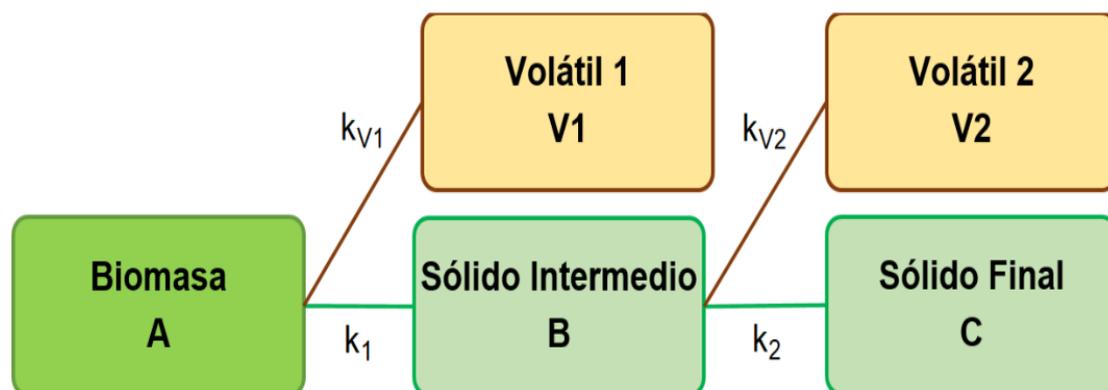


Figura 1. Representación Gráfica de Modelo de Dos Pasos

Con base en el planteamiento de este estudio, se deducen las siguientes ecuaciones diferenciales que describen el sistema. Las ecuaciones diferenciales (1), (2), (3), (4) y (5) modelan matemáticamente los fenómenos y procesos involucrados en la descomposición térmica de los compuestos durante la pirólisis. Estas ecuaciones proporcionan una descripción



cuantitativa de cómo evolucionan las variables de interés, como los factores de frecuencia y las energías de activación, a lo largo del tiempo.

$$\frac{dcA}{dt} = -(k_1 + k_{V1})cA \quad (1)$$

$$\frac{dcB}{dt} = k_1cA - (k_2 + k_{V2})cB \quad (2)$$

$$\frac{dcC}{dt} = k_2cB \quad (3)$$

$$\frac{dcV_1}{dt} = k_{V1}cA \quad (4)$$

$$\frac{dcV_2}{dt} = k_{V2}cB \quad (5)$$

También se plantean las ecuaciones (6), (7), (8) y (9), donde están las variables de interés. Estas ecuaciones arrojan los valores correspondientes a la constante de equilibrio químico.

$$k_1 = A_1 e^{\left(\frac{E_1}{RT}\right)} \quad (6)$$

$$k_2 = A_2 e^{\left(\frac{E_2}{RT}\right)} \quad (7)$$

$$k_{V1} = A_{V1} e^{\left(\frac{E_{V1}}{RT}\right)} \quad (8)$$

$$k_{V2} = A_{V2} e^{\left(\frac{E_{V2}}{RT}\right)} \quad (9)$$

Donde  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_{V1}$ ,  $k_{V2}$  son las constantes cinéticas para el sólido intermedio, el sólido final, los volátiles iniciales y los volátiles finales, respectivamente. R es la constante universal de los gases ideales y T es la temperatura en K.

### 3. RESULTADOS

Los resultados experimentales obtenidos a partir de la degradación termoquímica de la biomasa de residuos agrícolas de la cascarilla de arroz, se presentan en la Figura 2. En dicho gráfico, se observa la representación de la curva de termogravimetría (TGA), que describe la variación de la pérdida de masa en función de la temperatura, y la curva de derivada de termogravimetría (DTG), que muestra la tasa de cambio de la pérdida de masa en relación con el tiempo.

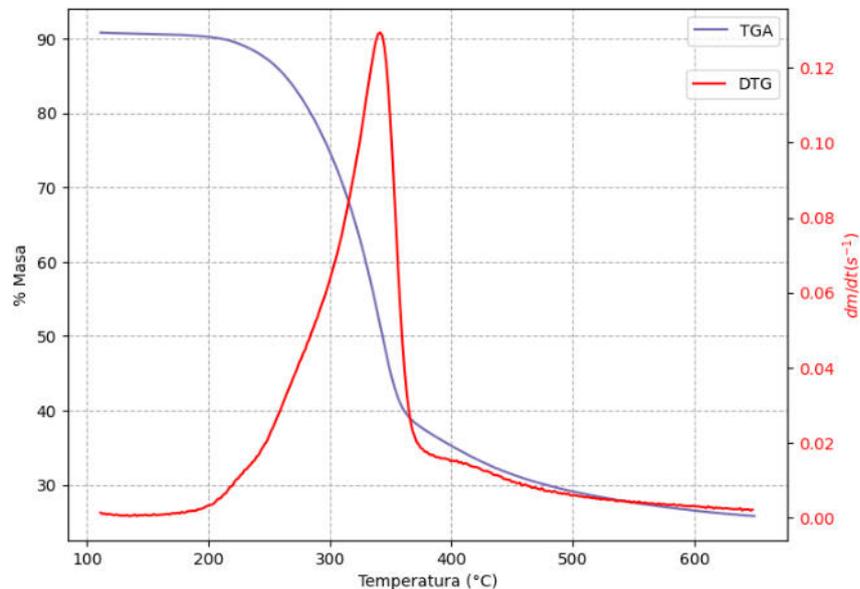


Figura 2. Curvas de TGA y DTG de la pirólisis de biomasa de cascarilla de arroz a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

Con estos datos experimentales, se resuelven las ecuaciones diferenciales por medio de una minimización, donde se utiliza para encontrar el mínimo de la función objetivo, mediante la optimización numérica, ajustando los valores de las variables de manera iterativa. En la Tabla 1 se presentan los valores del factor de frecuencia ( $A_0$ ) y de la energía de activación ( $E$ ), que son las variables de respuesta en las que se centró esta investigación.

Tabla 1. Valores cinéticos obtenidos para una tasa de calentamiento de 10 °C/min.

COMPONENTE	$A_0$ ( $s^{-1}$ )	$E$ (kJ/mol)
Sólido intermedio (B)	93293	101.70
Sólido final (C)	5190536	145.27
Volátil 1 (D)	22579931	130.34
Volátil 2 (E)	14899977	159.85

Utilizando los valores previamente mostrados en la Tabla 1, se realizaron cálculos para determinar los porcentajes en masa de cada uno de los compuestos involucrados en las



reacciones de pirólisis descritas por este método. Este análisis permitió ver la evolución de cada componente a medida que avanzan las reacciones.

En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos, donde se observa un aumento progresivo hasta alcanzar un máximo de los productos finales, los cuales se mantienen constantes hasta el final del proceso. Aquí se muestra la evolución de una de las compuestas. En ella se ve como la biomasa se degrada hasta consumirse en su totalidad, se evidencia la generación de un sólido intermedio que posteriormente es consumido y la creación de los demás compuestos que resultan de la pirólisis de la biomasa. Esta figura representa gráficamente la conceptualización expuesta en el Diagrama 1, el cual ilustra la base teórica de este estudio. De acuerdo con el diagrama, a partir de la biomasa se generan volátiles iniciales (V1) y un sólido intermedio (B). A su vez, a partir de este producto intermedio (B), se forman un sólido final (C) y un volátil adicional (V2).

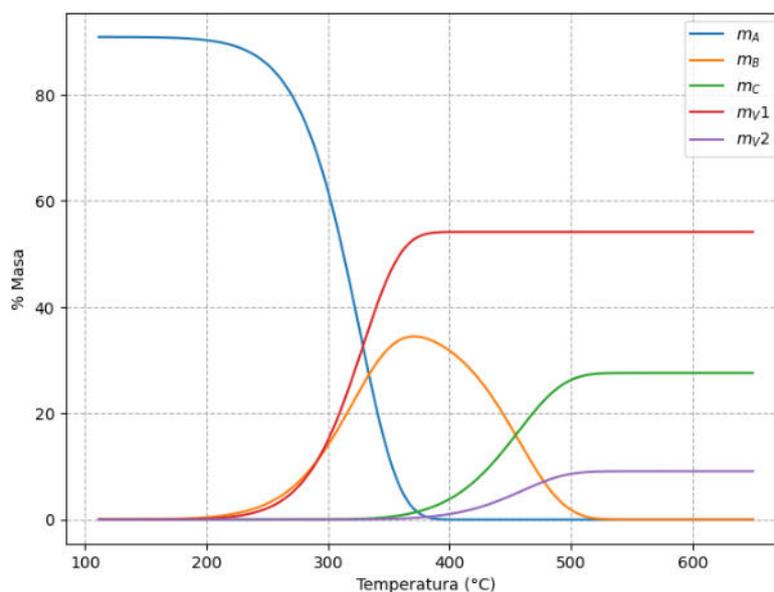


Figura 3. Evolución de los compuestos con respecto a la temperatura de pirólisis.

Por último, se determinó la cantidad total de material sólido resultante de la transformación termoquímica de la biomasa. Este sólido corresponde al material depositado en la termobalanza a medida que progresa la TGA de la cascarilla de arroz. Todo esto se realiza con el objetivo de comparar los valores experimentales con los predichos. Esta comparación se muestra en Figura 4, donde se observa una notable similitud en las curvas, lo que indica un buen ajuste del modelo propuesto.

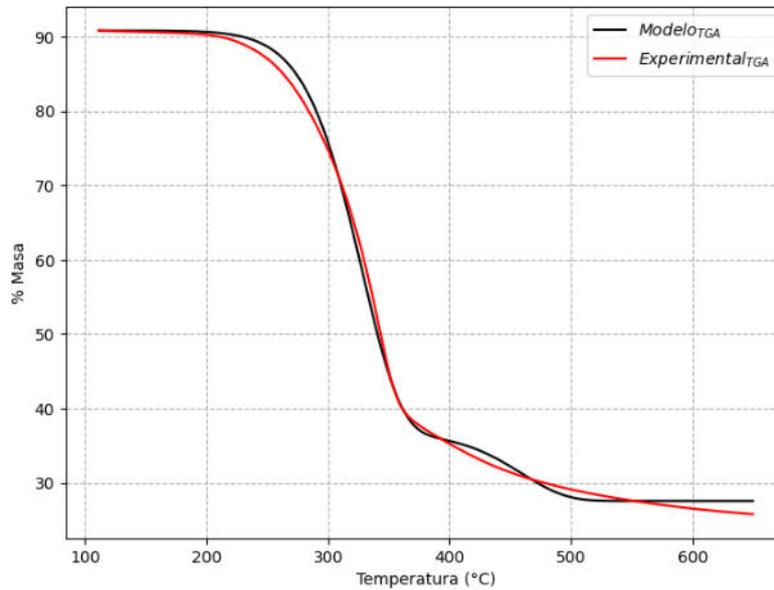


Figura 4. Gráfico comparativo del modelo con los datos experimentales.

Por último, se graficaron los valores de los datos obtenidos en el análisis TGA (experimentales) y los datos predichos por el modelo como se muestra en la Figura 5.

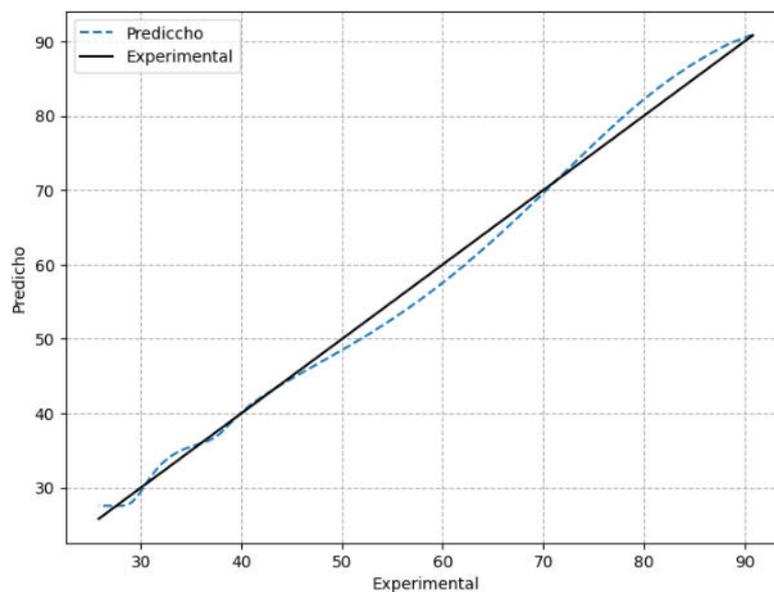


Figura 5. Comparación entre los datos experimentales y los predichos por el modelo.

Además, se calculó el coeficiente de determinación entre los valores experimentales y los del modelo, obteniendo un valor de 0.9984. Este resultado indica una excelente aproximación y respalda la viabilidad de utilizar este método con resultados satisfactorios.



#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales respaldan la validez y efectividad del modelo propuesto para la degradación termoquímica de la biomasa de residuos agrícolas de la cascarilla de arroz.

La comparación entre los valores experimentales y los predichos muestra una buena concordancia, lo que demuestra la utilidad de este enfoque en la caracterización y comprensión de las reacciones de pirólisis de la biomasa, desde una perspectiva más sencilla.

Se recomienda ampliar el modelo utilizando más tasas de calentamiento y diferentes tipos de biomásas, con el objetivo de validar el modelo bajo condiciones de operación diferentes.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba como fuente de financiación, en el marco de la Sostenibilidad de los Grupos de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica asociado al Grupo Ingeniería, Ciencia y Tecnología - ICT, así mismo al programa de Maestría en Ingeniería Mecánica.

#### REFERENCIAS

- [1] Roy, P., & Dias, G. *Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 59–69, 2017.
- [2] Zhang, Y., Liang, Y., Li, S., Yuan, Y., Zhang, D., Wu, Y., Xie, H., Brindhadevi, K., Pugazhendhi, A., & Xia, C. *A review of biomass pyrolysis gas: Forming mechanisms, influencing parameters, and product application upgrades*. *Fuel*, 347, 128461, 2023.
- [3] Sharma, A., Pareek, V., & Zhang, D. *Biomass pyrolysis - A review of modelling, process parameters and catalytic studies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1081–1096, 2015.
- [4] Bridgwater, A. V. *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94, 2012.
- [5] Ranzi, E., Cuoci, A., Faravelli, T., Frassoldati, A., Migliavacca, G., Pierucci, S., & Sommariva, S. *Chemical kinetics of biomass pyrolysis*. *Energy and Fuels*, 22(6), 4292–4300, 2008.
- [6] Collard, F. X., & Blin, J. *A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 594–608, 2014.
- [7] Abio Codignole Luz, F., Cordiner, S., Manni, A., Mulone, V., & Rocco, V. *Biomass fast pyrolysis in a shaftless screw reactor: A 1-D numerical model*. *Energy*, 2018.



[8] Papari, S., & Hawboldt, K. *A review on the pyrolysis of woody biomass to bio-oil: Focus on kinetic models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 1580–1595, 2015.

[9] Cai, L., Wang, Q., Xiong, Q., Wang, X., Fu, L., Han, L., Wang, Z., & Zhou, Y. *Numerical simulation and multi-process coupling analysis for biomass pyrolysis fluidized bed reactor based on synergistic effects between biomass and nitrogen inlet modes*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 169, 105801, 2023.

Área Temática

# Máquinas y Sistemas Térmicos e Hidráulicos





## Adaptación de Turbina a Gas Kingtech K-100 para Hidrógeno

Nicolás Lipchak<sup>1</sup>, Agustín García<sup>1</sup>, Tomás Gally<sup>1</sup>, Guillermo Valvano<sup>1</sup>, Gisela Parmelo<sup>2</sup> y Milagros Soria<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad Regional de Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951, Buenos Aires, Argentina- lipchakster@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional de Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional

### RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo principal adaptar una turbina a gas Kingtech K-100, diseñada originalmente para utilizar combustibles líquidos (Diésel, Queroseno, Jet A, etc.), para que pueda operar con hidrógeno de manera segura y eficiente. Para poder lograr esto, se implementaron modificaciones al sistema de inyección y lubricación de combustible. Así mismo, la turbina fue ensayada verificando que la misma puede alcanzar una aceleración de 101.400 RPM usando 100% hidrógeno. Finalmente, la turbina fue inspeccionada para verificar el estado de los componentes internos luego de su funcionamiento con hidrógeno de modo tal de verificar posibles fenómenos de corrosión que pudieran haberse generado durante la operación.

La conclusión obtenida permite demostrar empíricamente que es posible adaptar este tipo de turbinas para usar hidrógeno.

**Palabras clave:** *Hidrógeno; Eficiencia; KingTech; Turbina.*



## 1. INTRODUCCIÓN

A partir del acuerdo contra el cambio climático en París, firmado el 22/04/2016, el mundo se comprometió a buscar e implementar alternativas sostenibles e innovadoras para reemplazar los combustibles fósiles, causantes de los gases de efecto invernadero [1]. Adicionalmente, la Organización de las Naciones Unidas ha definido dentro de los objetivos sostenibles para el 2030, "Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos".

Este trabajo experimental realizado en la Facultad Regional de Buenos Aires (FRBA) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), tiene como objetivo principal adaptar una turbina a gas Kingtech K-100, diseñada originalmente para utilizar combustibles líquidos (Diésel, Queroseno, Jet A, etc.), para que pueda operar con hidrógeno de manera segura y eficiente.

En el contexto actual de Argentina, el hidrógeno utilizado para este trabajo experimental proviene de la industria petroquímica. Sin embargo, con la transición energética que se está generando globalmente es esperable que en las próximas décadas se pueda obtener hidrógeno verde en nuestro país.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Configuración experimental

Para esta investigación, se ha utilizado una micro-turbina a gas KingTech K-100, que originalmente fue diseñada para funcionar con Diesel, Kerosene y Jet-A. Esta turbina es utilizada normalmente en aviones a radiocontrol. Tiene un compresor radial, una cámara de combustión anular y una turbina axial de una etapa. Ver Figura 1.

La turbina está montada sobre rodamientos lineales y tiene colocada una celda de carga FLEXAR CZA-30 entre la turbina y la superficie fija, la cual es utilizada para medir el empuje.

Un sensor industrial de presión, ADZ-Nagano GmbH. / SML-10.0-0000400-BAR-G-G14E-22-MVS/C, está montado para medir la presión de compresión. Este sensor de presión se encuentra unido a un tubo flexible que se conecta a una perforación en la carcasa y una señal de 4-20 mA es enviada a una pantalla de monitoreo PIXSYS SNC / ATR121-AD.

En el conducto de admisión se coloca un tubo pitot con dos entradas de aire. La primera de ellas en la dirección de la corriente de aire, y mide la presión total. La segunda se coloca en forma perpendicular a la corriente de aire, y así mide la presión estática. Ambas presiones son detectadas por un sensor de presión diferencial MPXV7002DP. El MPXV7002DP que está diseñado para medir presiones positivas y negativas: -2 a +2 kPa (-0.3 a +0.3 psi) que se corresponden con 0.5 a 4.5 V lineales en la salida.



Para medir la temperatura, se utilizan cuatro termocuplas-K, colocadas en diferentes ubicaciones. La primera de ellas se ubica en el tubo de admisión. La segunda, se encuentra instalada a la salida del compresor mediante una perforación en la carcasa de la turbina. La tercera también se encuentra instalada en una perforación de la carcasa, pero a la salida de la cámara de combustión. La cuarta y última, se ubica en la tobera de la turbina.

Las termocuplas están conectadas a una unidad de control y a una unidad de medición, Kyowa EDX-10 and EDX13A, que convierte la señal analógica a una señal de salida digital. Estas unidades también están conectadas a una computadora que recibe los valores y los grafica.

Finalmente, la turbina cuenta con una medición de la aceleración, que realiza el eje de la misma, expresada en vueltas por minuto (RPM). Además, cuenta con una termocupla-K ubicada entre el alabe fijo y móvil de la turbina.

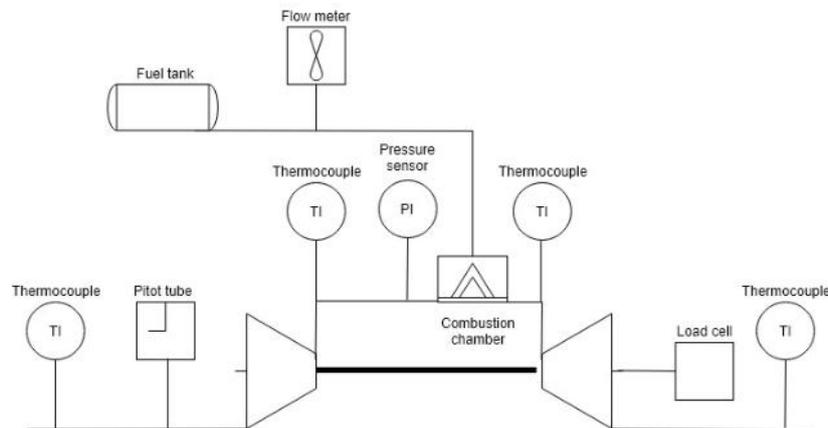


Figura 1: Diagrama esquemático

## 2.2. Especificaciones técnicas del Hidrógeno comercial

Se ha utilizado hidrógeno comercial proveniente de la industria petroquímica con las siguientes especificaciones técnicas otorgadas por el fabricante [2].

Tabla 1. Especificaciones Técnicas Del Hidrógeno Comercial

Propiedad	Valor
Formula Química	H2
Pureza	99,95%
Estado	Comprimido
Provisión	Cilindro
Hoja de Seguridad	P-4604

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Simulación termodinámica del uso de Hidrógeno en la turbina Kingtech K-100

Para poder comenzar a realizar las pruebas sobre el uso del hidrógeno en la turbina, fue necesario hacer una simulación del proceso para tener resultados aproximados de lo que se esperaría que pase en la realidad. Además, fue importante realizarla ya que los equipos tienen presiones y temperaturas máximas admisibles, las cuales no se deben superar porque de lo contrario se dañarían los equipos.

Temperatura máxima admisible en la turbina: 700 °C [3].

Presión máxima admisible: 10 bar [3].

El modelo del proceso termodinámico en la turbina fue diseñado con el programa ASPEN HYSYS, para el cual se consideró un compresor, un reactor de Gibbs, una turbina y las cañerías y accesorios necesarios, tal como se muestra en la Figura 2.

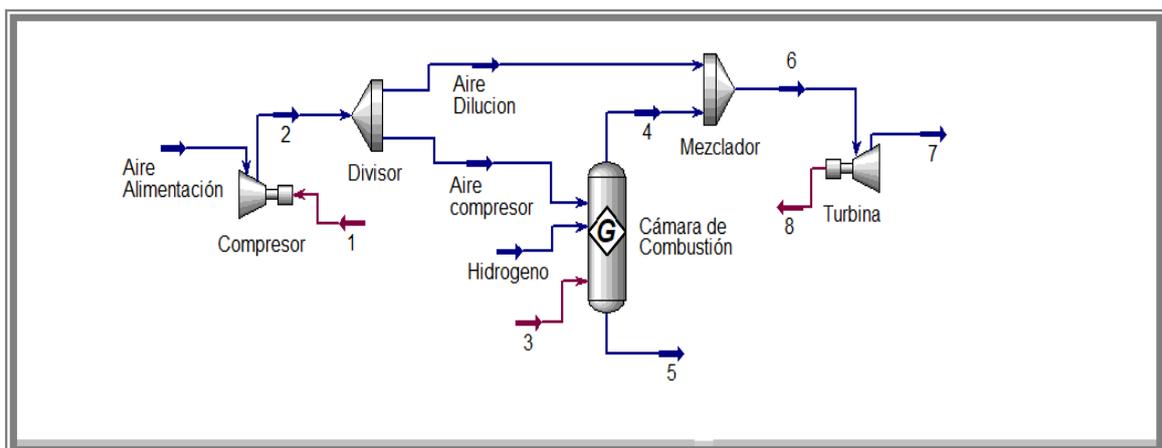


Figura 2: Diagrama esquemático

Se eligió el reactor de Gibbs ya que calcula la composición de equilibrio de la corriente de salida minimizando la energía libre de Gibbs de la corriente de entrada. Solo se requiere especificar la estequiometría.



Al minimizar la energía de Gibbs se produce la reacción más probable. Este es un proceso espontáneo en la naturaleza.

La corriente de entrada de aire, llamada "Aire Alimentación", entra al compresor con un caudal de 0,3221kg/h a una presión de 1 bar y una temperatura de 23°C, y sale por la corriente "2" a una presión de 2,5 bar y una temperatura de 120,3°C. Luego se colocó un divisor para que una parte del aire ingrese al reactor y la otra se utilice como refrigerante a la salida del mismo.

Se inyecta el hidrógeno (con un caudal de 1,25E-3 kg/h, una presión de 2,5 bar y una temperatura de 23°C) al reactor junto con el aire, en el cual se forma agua, y según los caudales de entrada, pueden formarse monóxido y dióxido de nitrógeno. Estos últimos componentes se pueden formar debido a la oxidación a alta temperatura del nitrógeno proveniente del aire de alimentación.

La corriente "4" tiene una temperatura de 592,1°C, la cual al mezclarse con el aire de dilución baja a 548,4°C en "6" para, finalmente, poder ingresar a la turbina donde la mezcla sale en "7" a una presión de 1,013 bar y una temperatura de 400,4°C.

En la siguiente tabla se muestra la composición de los gases de combustión que se generan para las condiciones seguras de operación (caudal de hidrógeno menor que 1,25E-3 kg/h).

Tabla 2. Composición De Gases De Combustión Resultantes de la Simulación

Componentes	Fracción Molar a la salida del Reactor (4)	Fracción Molar a la Salida de la Turbina (7)
Hidrógeno	0,0000	0,0000
Oxígeno	0,1738	0,1773
Nitrógeno	0,7663	0,7687
Agua	0,0599	0,0540
Monóxido de Nitrógeno	0,0000*	0,0000*
Dióxido de Nitrógeno	0,0000*	0,0000*

Es importante destacar que el modelo de simulación de Gibbs verificó la ausencia de dióxido de carbono y monóxido. Gases que no son esperables de encontrar ya que el hidrógeno no posee átomos de carbono que puedan oxidarse con el oxígeno. En la tabla se puede apreciar que la mayor proporción de gases está dada por el nitrógeno y oxígeno libre que se obtienen del proceso de combustión como consecuencia de emplear un exceso de aire que asegure una combustión completa (sin sobrante de combustible en los productos de la combustión). Además, se aprecia que el hidrógeno libre es 0 ya que se convirtió totalmente en agua al oxidarse con el oxígeno, verificándose la combustión completa.

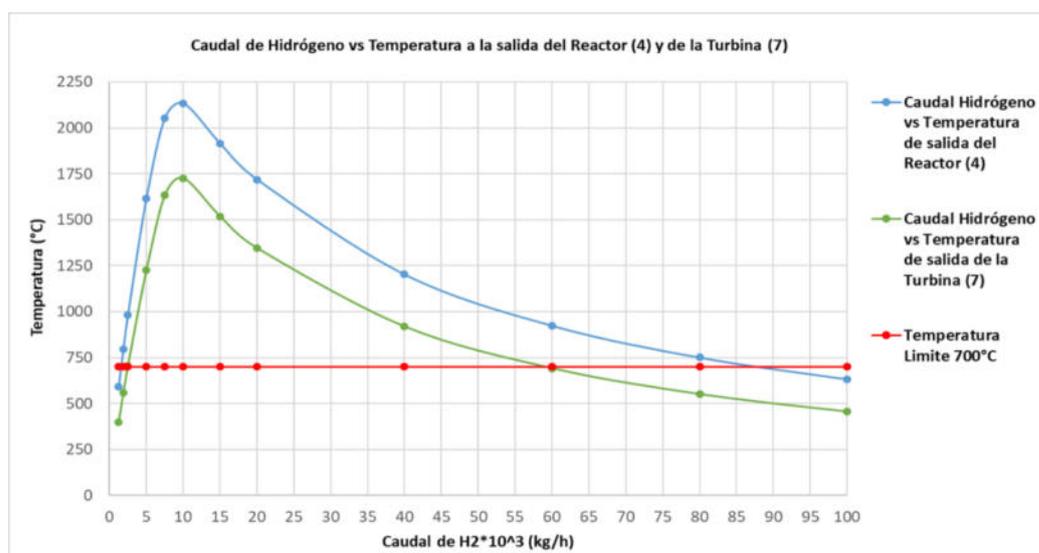


\* Respecto a los óxidos nitrosos, la concentración de los mismos es cero debido al método de simulación utilizado. En la práctica, debido a las temperaturas de combustión esperadas, el nitrógeno se oxida dando lugar a monóxido y dióxido de nitrógeno.

Se varió el caudal de hidrógeno para poder ver qué sucede con la temperatura a la salida del reactor y de la turbina y se construyó un gráfico de variación de parámetros que se puede visualizar en la Figura 3.

Tabla 3. Variación De Parámetros Termodinámicos Según Caudal De Hidrógeno

Caudal de Hidrógeno*10 <sup>3</sup> kg/h	Temperatura a la Salida del Reactor (4) °C	Temperatura a la Salida de la Turbina (7) °C
1,250	592,1	400,4
1,875	794,4	557,8
2,500	982,5	706,5
5,000	1616	1225
7,500	2052	1633
10,00	2133	1726
15,00	1915	1518
20,00	1719	1346
40,00	1203	919,2
60,00	924,2	692,2
80,00	751,3	551,8
100,0	633,7	456,4



Figura

3: Variación parámetros termodinámicos

En la primera parte del gráfico (caudal de hidrógeno  $< 1,25E-3$  kg/h) la temperatura permanece por debajo del límite admisible debido a que el exceso de aire actúa como refrigerante en el proceso de combustión. A su vez en esta etapa, se asegura un quemado completo del hidrógeno sin superar el valor máximo admisible de  $700$  °C.

En la segunda etapa, el caudal de hidrógeno es superior a  $1,25E-3$  kg/h y el exceso de aire no es suficiente para refrigerar el proceso de combustión y que no se supere el valor límite.

Lo que sucede en la tercera parte es que hay un exceso de hidrógeno a la entrada del reactor, haciendo que este pase a ser un refrigerante. La idea no es usar al hidrógeno como enfriador de la corriente "4", sino usarlo como combustible y evitar que quede sin combustionar. Por lo tanto, se deben utilizar caudales de hidrógeno inferiores a  $1,25E-3$  kg/h, para así poder utilizarlo al máximo sin tener desperdicios, que cumpla su función y tampoco supere la temperatura máxima admisible por la turbina.

Se concluye comenzar los ensayos en la turbina con un caudal de hidrógeno inferior a  $1,25E-3$  kg/h, que en condiciones de presión  $2,5$  bar y temperatura  $23$  °C equivale a  $0,006104$  m<sup>3</sup>/h.

### 3.2. Modificaciones realizadas en la turbina

La primera modificación realizada en la turbina fue la independización del sistema de inyección de combustible del sistema de lubricación. Originalmente la turbina fue diseñada para operar con una mezcla de combustible líquido y aceite. El aceite es mezclado con el combustible y por este motivo se usó el mismo circuito de inyección. Dado que el hidrógeno es un combustible gaseoso, para poder operar con el mismo y mantener la lubricación de los cojinetes, se debió separar al aceite del combustible y cada uno usar cañerías independientes. Estos cambios pueden apreciarse en las siguientes figuras.

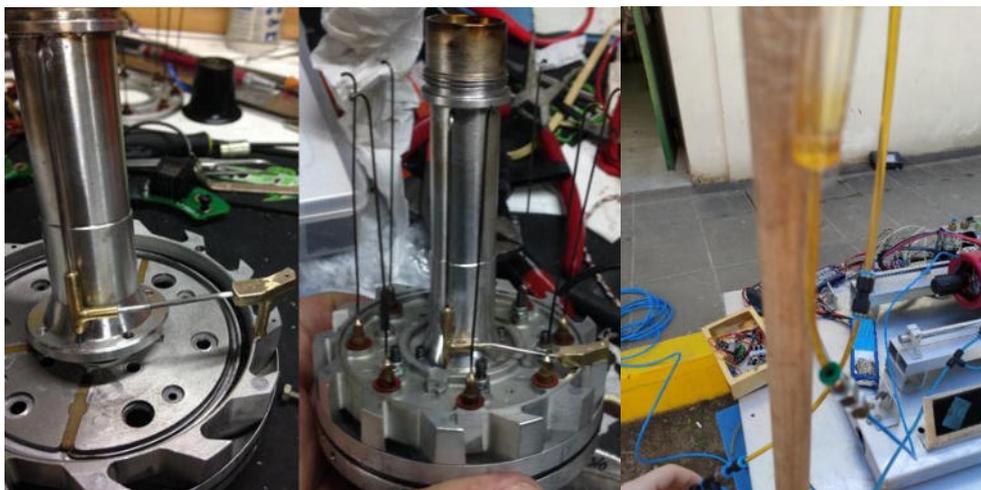


Figura 4: Nueva cañería de lubricación



La segunda modificación que se realizó en la turbina fue la de reemplazar el tanque de combustible líquido por un cilindro de hidrógeno. Además, se instaló una válvula reguladora de presión y una de caudal.



Figura 5: Línea de inyección de hidrógeno

### 3.3. Primer ensayo realizado en la turbina

Una vez implementadas las primeras modificaciones descritas anteriormente, se realizó un ensayo el 27/11/2021 para probar el funcionamiento de los nuevos componentes. De este ensayo se pudo confirmar el correcto funcionamiento de los componentes que integran el nuevo sistema de lubricación y del nuevo sistema de inyección de combustible. Sin embargo, la turbina solamente pudo acelerarse hasta 17.200 RPM inyectando hidrógeno a 6 kg/cm<sup>2</sup> de presión. En estas condiciones de operación la temperatura de los gases de combustión (Principalmente vapor de agua) fue inferior a 700 °C.

Esta situación se explica por las electro-válvulas originales de la turbina, que fueron diseñadas para combustible líquido y no permiten la circulación suficiente de caudal de hidrógeno por las mismas.

### 3.4. Segundo ensayo realizado en la turbina

Se removieron las electro-válvulas originales de la turbina ya que las mismas no permitían la circulación del caudal volumétrico de hidrógeno suficiente para aumentar la aceleración en la misma. En su reemplazo, se instaló una pieza de aluminio con dos entradas tipo FESTO de 4mm para lograr mayor circulación de caudal de hidrógeno.



Figura 6: Nueva pieza con conexiones FESTO para la entrada de H<sub>2</sub> a la turbina

El segundo ensayo realizado el 13/06/2022, permitió verificar la funcionalidad de las conexiones tipo FESTO en reemplazo de las válvulas solenoides. Bajo esta configuración la turbina pudo acelerarse hasta 21.000 RPM, inyectando hidrógeno a 6 kg/cm<sup>2</sup> de presión. La temperatura de los gases de combustión (Principalmente vapor de agua) fue 590 °C. Si bien con la modificación de las válvulas solenoides se logra un 22% más de aceleración, el diámetro de los inyectores de la cámara de combustión de la turbina, no permiten la llegada de suficiente caudal de hidrógeno.

### 3.5. Tercer ensayo realizado en la turbina

Para poder incrementar la aceleración en la turbina se reemplazaron los inyectores originales por otros de acero inoxidable de diámetro 2mm. Además, se realizó un corte a los mismos para que la llama de combustión tenga una dirección normal, direccionándose al centro de la cámara de combustión.

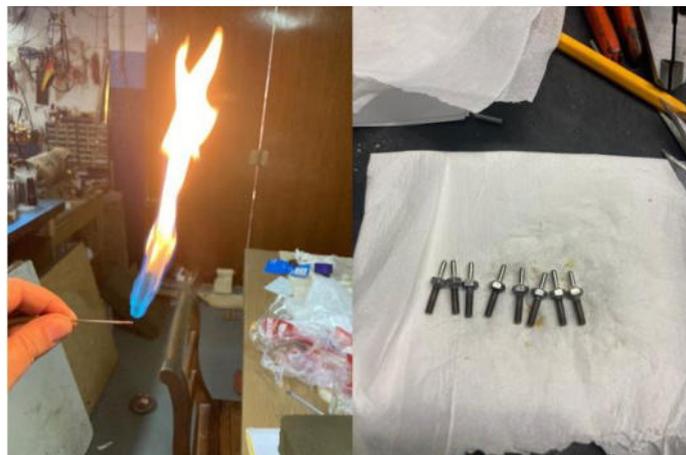


Figura 7: Nuevos inyectores



Figura 8: Nuevos inyectores montados en la cámara de combustión con su nueva disposición

El tercer ensayo realizado el 04/11/2022, permitió verificar la funcionalidad de los nuevos inyectores. La turbina pudo acelerarse hasta 45.100 RPM (con la válvula de marcha abierta y la de arranque cerrada), inyectando hidrógeno a 6 kg/cm<sup>2</sup> de presión. La temperatura de los gases de combustión (Principalmente vapor de agua) fue 352 °C. Si bien con la modificación de los inyectores se logra un 115% más de aceleración respecto al segundo ensayo, aún se requieren modificaciones adicionales para poder incrementar la aceleración y alcanzar 130.000 RPM.

### 3.6 Cuarto ensayo realizado en la turbina

Para poder aumentar el caudal de combustible que les llega a los nuevos inyectores, se ha modificado el ingreso de la línea de inyección de hidrógeno al anillo de distribución de combustible tal como se muestra en las siguientes figuras.

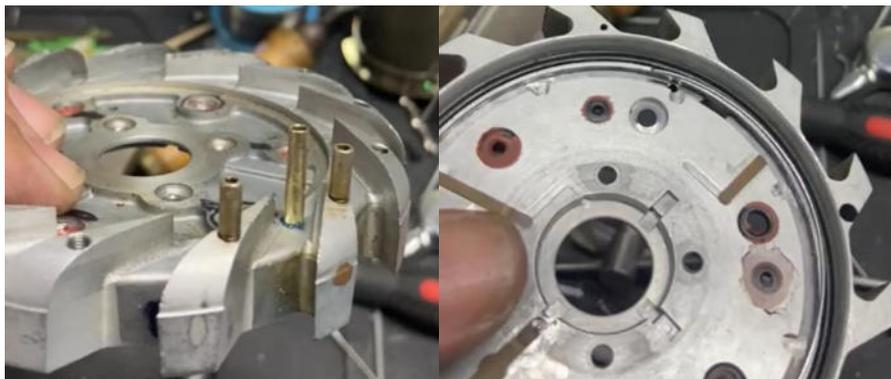


Figura 9: Nuevo tubing central que permite la llegada directa al anillo de distribución

El cuarto ensayo realizado el 03/06/2023, permitió verificar la funcionalidad del nuevo ingreso de la línea de inyección de combustible a la turbina. La turbina pudo acelerarse hasta alcanzar 101.400 RPM, inyectando hidrógeno a 6 kg/cm<sup>2</sup> de presión. La temperatura de los gases de combustión fue 582 °C. Con esta última modificación, se logra un 124% más de aceleración respecto al tercer ensayo.

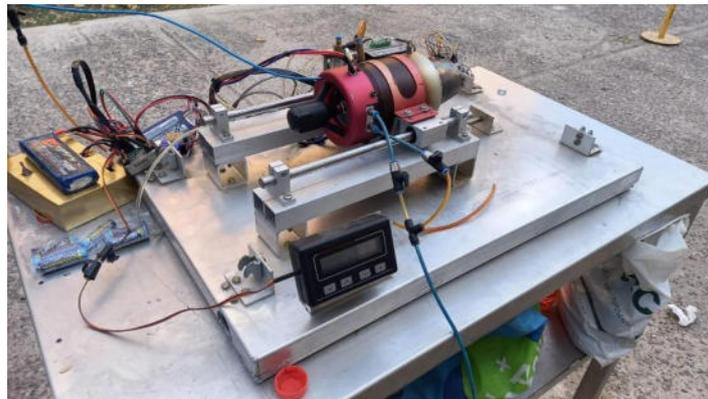


Fig. 10 Cuarto ensayo en la turbina realizado el 03/06/2023



Fig. 11 Resultados del cuarto ensayo en la turbina

#### 4. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas permiten demostrar empíricamente que es posible utilizar hidrógeno en este tipo de turbinas. Para ello, fue necesario realizar modificaciones, principalmente en el circuito de inyección de combustible y de lubricación, que permitieron alcanzar una aceleración de 101.400 RPM. Además, en el corto plazo, no se observa deterioro en los componentes internos.

Es importante destacar que se pudo acelerar la turbina un 78% respecto de la máxima aceleración posible según diseño (130.000 RPM). Para los fines de este trabajo de investigación, consideramos que hemos alcanzado una aceleración aceptable y nos permitirá analizar en profundidad otros aspectos del funcionamiento intensivo de la turbina con hidrógeno como ser posibles fenómenos de corrosión, desgaste y erosión en los internos de la turbina. Así mismo, analizaremos los distintos parámetros termodinámicos como ser presiones, temperaturas, potencia, empuje, velocidades, consumo de combustible, entre otros. También podremos analizar el funcionamiento de la turbina con otros gases combustibles como ser el gas natural,



propano y butano a los efectos de comparar distintas performances en la turbina en función de cada combustible empleado.

## AGRADECIMIENTOS

El equipo de investigación agradece a la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional y al Departamento de Ingeniería Industrial de dicha regional.

## REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, Acuerdo de París, 2016.
- [2] Linde, Ficha técnica “Hidrógeno”.
- [3] Ensayo de Turbina a Gas Kingtech K-100 con Biodiesel, Nicolás Lipchak, Franco Aiducic, Santiago Baieli, Gastón Bustamante y Ayelén Zanitti, Revista Proyecciones, Vol<sup>o</sup>16 – 2018.
- [4] Ensayo de Turbina a Gas Kingtech K-100 con Biodiesel, Nicolás Lipchak, Franco Aiducic, Santiago Baieli, Gastón Bustamante y Ayelén Zanitti, Revista Argentina de Ingeniería, Vol<sup>o</sup>13 – 2019.
- [5] Kawasaki Hydrogen Road, 2018, <https://global.kawasaki.com/en/hydrogen/>
- [6] IPCC, “Special Report: Global Warming of 1.5°C,” October 2018, <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- [7] EU Turbines, “Gas Turbines: Driving the transition to renewable-gas power generation,” 2019, <https://powertheeu.eu/>
- [8] Shell Deutschland Oil GmbH, “Shell Hydrogen Study”, 2017.
- [9] Lindman, O., “SGT-750 Fuel Flexibility: Engine and Rig Tests,” GT2017-63412, Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2017, Charlotte, NC, USA, June 2017.
- [10] Lam, K.K. and Parsania, N., “Hydrogen enriched combustion testing of Siemens SGT-400 at high pressure conditions,” 2016, GT2016-57470, Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2016.



## Comparación de los distintos métodos Reducción del Diámetro del Impulsor de una Bomba Centrífuga para la Modificación de sus Condiciones de Funcionamiento

Ariel Ricardo Marchegiani <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Máquinas Hidráulicas – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue

Buenos Aries 1400, Neuquén, Argentina- [ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar](mailto:ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar).

### RESUMEN

La reducción del diámetro del rotor de una bomba centrífuga es una práctica común en la industria y se lleva a cabo con el objeto de cambiar el punto de funcionamiento de la bomba, a fin de obtener un ahorro en el consumo de energía.

Esta reducción se lleva a cabo mediante las leyes de semejanza aplicadas a turbomáquinas, pero en la práctica no se cumple exactamente.

En el presente trabajo se comparan los distintos métodos de base experimental, existentes, entre ellos un método desarrollado por este laboratorio, a fin de obtener una aproximación más acertada respecto de la metodología clásica de reducción del diámetro del rotor.

Los resultados obtenidos arrojan estimaciones sobre la precisión de cada uno de los métodos analizados.

**.Palabras clave:** Bombas Centrífugas, Leyes de Semejanza, Recorte del Impulsor.



## 1. INTRODUCCIÓN

Las bombas centrífugas, como parte inevitable de cualquier planta industrial, son grandes consumidoras de energía. A menudo se observa que las bombas centrífugas no funcionan en sus puntos óptimos por diversas razones.

Las bombas centrífugas se encuentran probablemente entre las máquinas más utilizadas tanto en instalaciones industriales como en la vida cotidiana. Tras su invención, recorrieron un largo camino evolutivo hasta llegar a ser accesibles para diversas aplicaciones. Su principio físico fue descrito hace siglos por Euler a través de una conocida ecuación que lleva el nombre de llamada ecuación de Euler para turbomáquinas. Muchas aplicaciones técnicas de las bombas centrífugas no pueden realizarse sin un análisis especialmente en lo que se refiere a los parámetros de salida de la bomba, es decir, su altura y rendimiento.

Como resultado de prácticas de ingeniería conservadoras las bombas suelen ser mucho más grandes de lo necesario para las necesidades de procesamiento de una planta industrial. Las bombas centrífugas pueden a menudo sobredimensionarse debido al "redondeo", tratando de predecir la resistencia al flujo con el rugosidad de la superficie de las tuberías y la resistencia del caudal con el paso del tiempo, o por prever futuras ampliaciones de la capacidad de la planta. Además, los requisitos de bombeo de la planta pueden no haberse definido claramente en la fase de diseño. Como resultado de un planteamiento conservador, las bombas a menudo tienen puntos de funcionamiento completamente distintos de los de diseño.

La altura de bombeo suele ser inferior a la prevista, mientras que el caudal es mayor. Desde el punto de vista del punto de funcionamiento óptimo, es decir, el punto en el que el rendimiento de la bomba es máximo, esto hace que el funcionamiento de la de la bomba sea energéticamente ineficaz, ya que el caudal suele regularse con un bypass o una válvula. Como ya se ha señalado, el funcionamiento energéticamente eficiente de una bomba centrífuga ahorra energía y reduce los costos de funcionamiento. Ahora, la cuestión es cómo lograr este objetivo, especialmente cuando se detecta un funcionamiento ineficaz de la bomba.

Para superar la existencia de bombas sobredimensionadas o que funcionan en condiciones "fuera de diseño", pueden llevarse a cabo varios métodos, como sustituir bombas del tamaño adecuado, hacer funcionar las bombas con una velocidad menor o utilizar impulsores más pequeños. La sustitución de la bomba es el método más sencillo, pero requiere un coste elevado. Mientras tanto, cambiar la rotación del motor de una bomba a una más baja requiere un motor con una velocidad de rotación variable (motor de velocidad variable), que también requiere un coste bastante elevado.

El recorte del impulsor es una práctica común realizada por fabricantes y usuarios de bombas cuando es necesario ajustar la altura y el caudal de la bomba centrífuga a las necesidades reales.



La bomba recortada no es estrictamente similar a la bomba inicial porque sólo se modifican unos pocos parámetros, mientras que todos los demás permanecen inalterados. A pesar de ello, la suposición de similitud válida.

Reducir el diámetro del impulsor de la bomba dentro de ciertos límites es la mejor alternativa para superar las bombas "sobredimensionadas". El funcionamiento de la bomba con una reducción del diámetro del impulsor puede ahorrar energía y costos. En la práctica, la reducción del diámetro del impulsor de la bomba (para bombas radiales) se limita a un máximo del 10-15% del diámetro máximo del diámetro original del impulsor de la bomba [1, 2]. El recorte del diámetro del impulsor de la bomba se denomina comúnmente "recorte del impulsor". Cortar el impulsor de la bomba más del 25% del diámetro original puede dar lugar a una gran reducción del rendimiento. Esto se debe a que un recorte excesivo del impulsor provocará un aumento de la "holgura" entre el impulsor y la carcasa de la bomba, lo que causará una circulación excesiva del caudal. Esta circulación excesiva del caudal afecta en gran medida al aumento de la pérdida.

El recorte del impulsor se realiza normalmente basándose en las leyes de afinidad del impulsor. La relación del diámetro del impulsor después del recorte ( $D_m$ ) respecto al diámetro del impulsor antes del recorte ( $D_p$ ), es decir ( $D_m/D_p$ ), depende de la relación de altura requerida ( $H_m/H_p$ ), o de la relación de capacidad requerida ( $Q_m/Q_p$ ). En este caso, el subíndice p indica el diámetro del impulsor, la altura y la capacidad de la bomba antes del corte del impulsor, mientras que el subíndice m indica el diámetro del impulsor, la altura y la capacidad de la bomba después del corte del impulsor.

Para el recorte del impulsor las relaciones son las siguientes:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^2 = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^2 \quad \frac{H_m}{H_p} = \lambda^2 = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^2 \quad \frac{P_m}{P_p} = \lambda^4 = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^4 \quad (1)$$

Existen algunos métodos, principalmente gráficos, para estimar las nuevas condiciones de funcionamiento de una bomba centrífuga por medio del recorte de su impulsor, entre ellos se destacan los propuestos por Stepanoff [3] y Rütshi [4].

Este estudio se llevó a cabo a fin de evaluar diferentes métodos recorte del impulsor hasta un cierto porcentaje de su diámetro inicial y analizar la precisión de la aproximación obtenida con cada uno.

### 1.1. Los métodos gráficos

Las leyes de semejanza han sido estudiadas por diversos autores, los cuales mediante ensayos experimentales han logrado obtener distintas aproximaciones. Las mismas han sido utilizadas para obtener de manera más precisa las distintas curvas de funcionamiento en bombas

semejantes mediante el recorte del rodete. Sin embargo, estas expresiones obtenidas no han podido determinar por completo el funcionamiento de una bomba original y una semejante a la cual se ha modificado una de las dimensiones geométricas, como es el diámetro del impulsor. A continuación, se describen los más conocidos.

### 1.1.1 Análisis de Stepanoff

Stepanoff [3] fue uno de los principales autores en estudiar este comportamiento, entre bombas semejantes las cuales han sufrido una reducción en el diámetro del rotor. De acuerdo a su análisis, el error es mayor cuanto más se reduce el diámetro del impulsor. El efecto de reducir el diámetro del impulsor no es el mismo para una bomba centrífuga de flujo radial, de flujo mixto o bombas de flujo axial. A medida que se reduce el diámetro del impulsor las leyes de semejanza solamente se aproximan, porque la eficacia hidráulica disminuye. La reducción en la eficiencia bruta, debido a la reducción de los diámetros del impulsor es causada por varios factores: álabes de puntas romas, camino más largo para que el líquido, choques por cambio de ángulos.

Para determinar el diámetro del impulsor requerido para un determinado punto de la altura-caudal de la figura 1 se obtiene entonces la razón real de diámetros de impulsor en porcentaje, graficada vs el diámetro del impulsor calculado. Esta corrección sólo es aproximada, y la precisión disminuye con el aumento de velocidad específica.

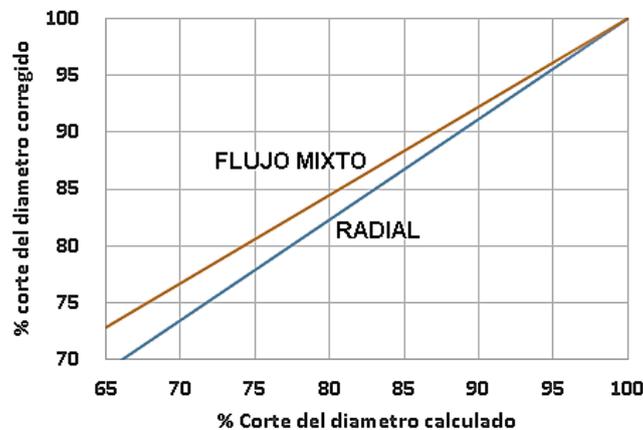


Figura 1

### 1.1.2 Análisis de Karl Rütshi

De acuerdo a Rütshi [4], el diámetro exterior del rotor ( $D_2$ ) es único y se definen las siguientes relaciones:

$$\Delta D = K(D_2 - D'_2) \quad \text{y} \quad D''_2 = D_2 - \Delta D$$



En donde el factor  $K$  es un valor de corrección determinado en numerosas bombas de diferente tamaño y frecuencias. Dentro de la gama  $0,8 \leq \frac{D_2}{D_1} \leq 1$ ,  $K$  es sólo para una única bomba en la región de mejor rendimiento.

En resumen, todos los valores medidos en el intervalo de mejor rendimiento se muestran en la Figura 2, dependiendo de la velocidad específica ( $ns_q$ ) determinada. Los valores de  $k$  son independientes del tamaño de la bomba y de la velocidad de rotación. El valor de corrección generalmente disminuye con el aumento de velocidad específica.

La velocidad específica se define como,

$$ns_q = \frac{n \cdot Q^{1/2}}{(H_n)^{3/4}} \quad (2)$$

Donde  $n$  en r.p.m.,  $Q$ : caudal en  $m^3/s$ ,  $H_n$ : Altura Neta en m, respectivamente.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, se deduce que un cálculo exacto del nuevo diámetro no es posible. Por ello se recomienda en primer lugar, reducir el impulsor en un diámetro ligeramente mayor que el diámetro calculado, y luego ajustar el diámetro final después de la prueba.

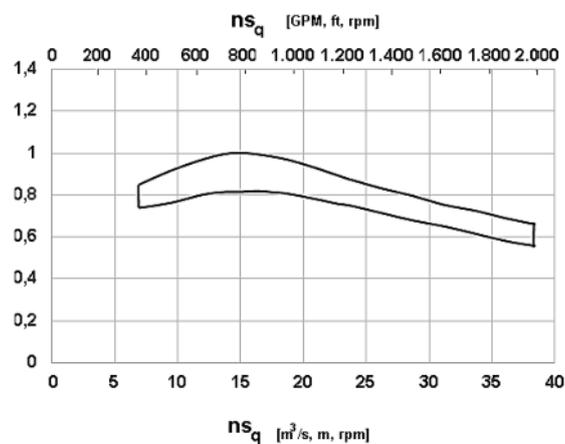


Figura 2

### 1.1.3 Análisis de este laboratorio

Un método analítico fue desarrollado en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Universidad Nacional del Comahue [5] se adaptan las leyes de semejanza, a fin de obtener resultados más acertados respecto de la metodología de reducción del diámetro del rotor, con coeficientes obtenidos mediante ensayos experimentales.

Se analizaron los datos obtenidos de los ensayos y se obtuvieron las expresiones de nuevos coeficientes de las leyes de semejanza modificadas para cumplir el objetivo de una mejor aproximación.



Para bombas centrífugas de baja velocidad específica, lo más probable es que el área de descarga a la salida del impulsor y el ángulo de salida del álabe permanezcan sin cambios después del recorte, como se muestra en [9-14], las leyes de afinidad para la reducción del diámetro del impulsor pueden escribirse mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{n_1} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^{n_1} \quad \frac{H_m}{H_p} = \lambda^{n_2} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^{n_2} \quad \frac{P_m}{P_p} = \lambda^{n_3} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^{n_3} \quad (3)$$

Donde  $n_1$ ,  $n_2$  y  $n_3$  se definen como los exponentes de las leyes de semejanza correspondientes al caudal, a la altura y a la potencia respectivamente.

$Q_p$ ,  $H_p$  and  $P_p$ , son el caudal, altura neta y potencia para el rotor original, y  $Q_m$ ,  $H_m$  y  $P_m$  para el impulsor recortado.

Los exponentes de recorte  $n_1$  a  $n_3$  estimados por medio de la ecuación (3) basados en los resultados experimentales se expresan en términos de la relación  $\lambda$  de diámetros del impulsor, y se observa una ligera dependencia de estos exponentes con dicha relación de diámetros. El análisis de estos coeficientes obtenidos para las distintas bombas muestra una tendencia en su variación, la que fue aproximada por una regresión lineal para cada uno de los componentes, y cuyas expresiones se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Expresiones de los coeficientes experimentales

$n_1$	$n_2$	$n_3$
$14,69112\lambda - 11,63783$	$-6,94016 \lambda - 8,01314$	$5,85154 \lambda - 2,15858$

## 2. DESARROLLO DEL ANALISIS

En el presente trabajo se utilizó la información proporcionada por los fabricantes, de libre acceso a través de internet, del tipo de los mostrados en la figura 3. Se utilizaron diagramas de bombas centrífugas de baja velocidad específica (hasta  $ns_q= 40$ ), y dichas curvas dadas para diferentes diámetros.

Se aplicaron, además de la semejanza clásica, los métodos mencionados anteriormente, y se comparó con los datos de fabricante, para las curvas altura-caudal (H-Q) y potencia-caudal (P-Q), para dos tipos de recortes, uno de bajo porcentaje de recorte y otro de alto porcentaje de reducción del diámetro.

Las bombas utilizadas son de los siguientes fabricantes: Salmson, Grundfoss, KSB, Vogt, entre otras. Por razones de espacio se muestran los resultados más relevantes.

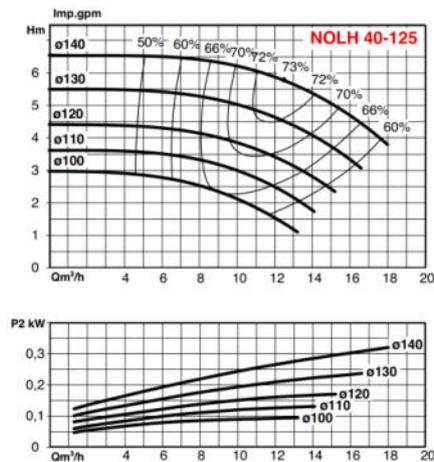
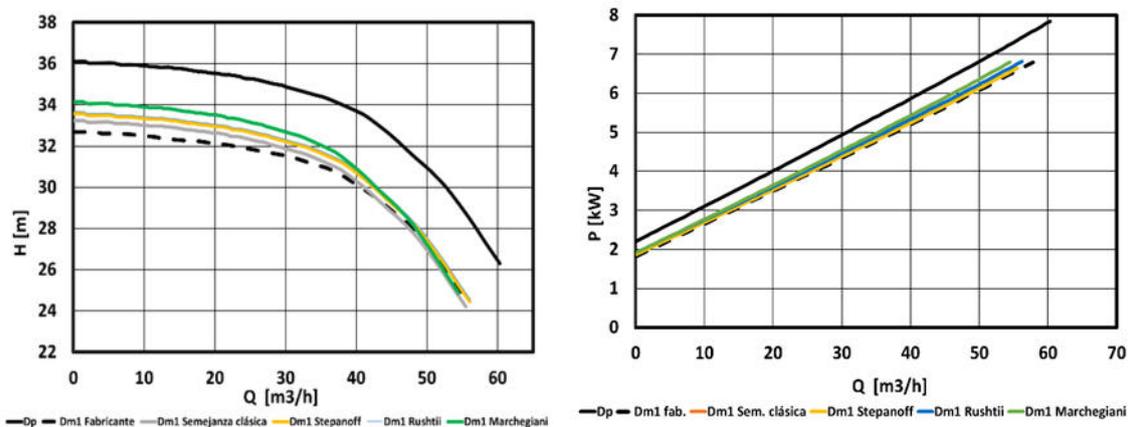


Figura 3: ejemplo típico de información proporcionada por fabricantes

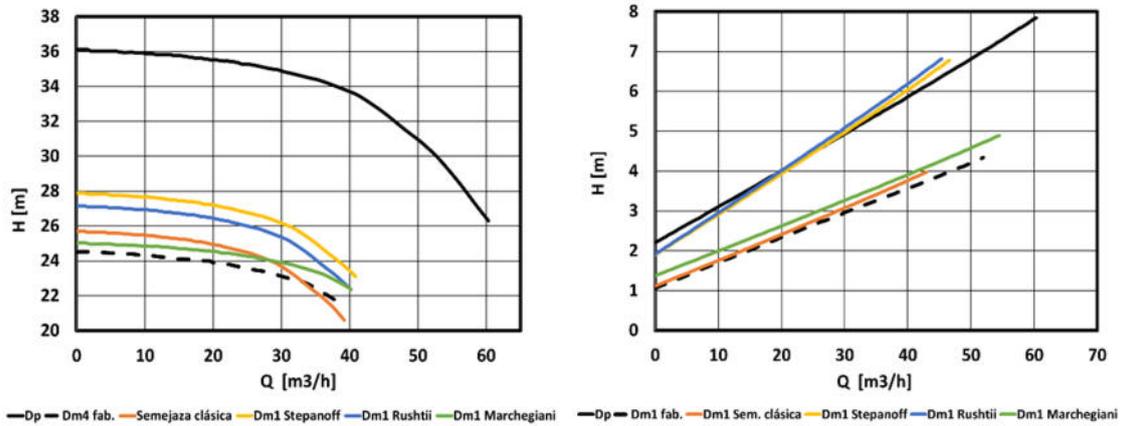
## 2.1. Resultados

Los resultados fueron analizados en planillas de cálculo y graficados a fin de observar las distintas aproximaciones. En las figuras presentadas se graficaron las curvas H-Q y p-Q en línea llena color negro para el diámetro prototipo  $D_p$  y en línea punteada negra para los diferentes cortes  $D_m$ . Las aproximaciones de los distintos métodos fueron graficadas en línea continua de distintos colores.

A continuación se presentan los gráficos de los resultados para los recortes mencionados y los respectivos fabricantes (figuras 5 a 10):

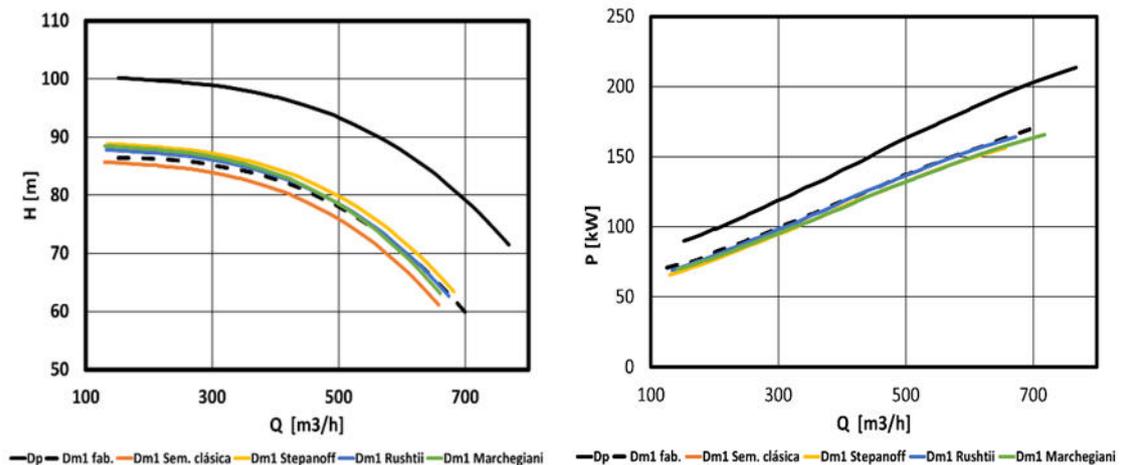


Curvas H-Q y P-Q para el primer recorte ( $\lambda=0.959$ , recorte: 4.1%)

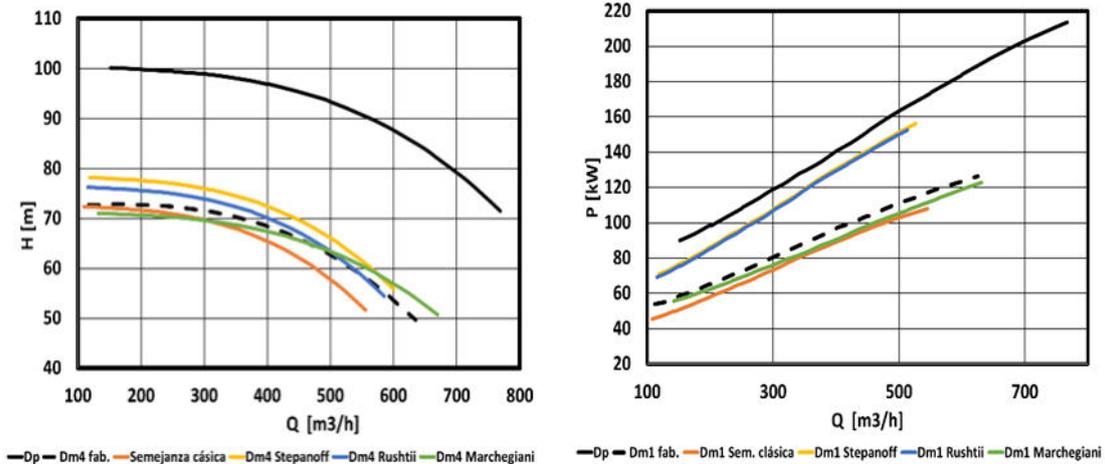


Gráficos H-Q y P-Q para el Segundo recorte ( $\lambda=0.843$ , recorte: 15.6%)

Figura 4: KSV Etanorm 50-315 ( $n_{sq} = 12$  r.p.m.)

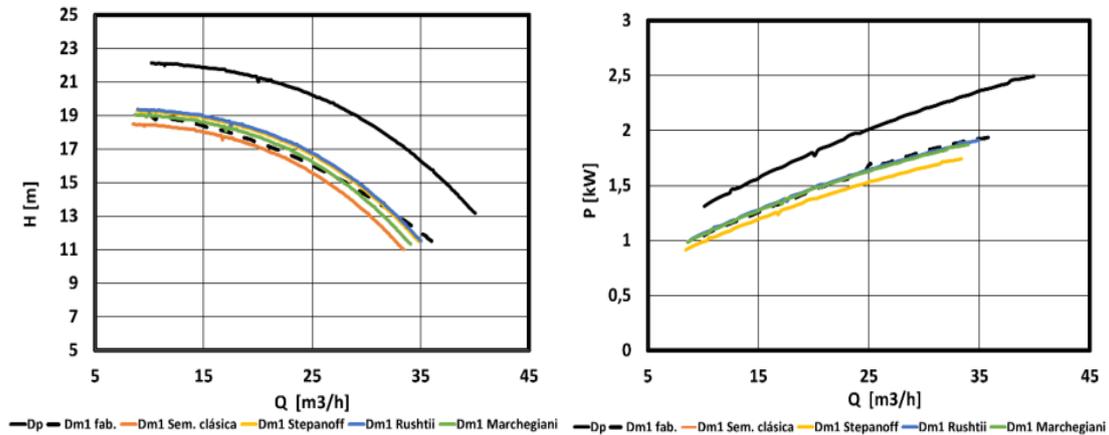


Curvas H-Q y P-Q para el primer recorte ( $\lambda=0.925$ , recorte: 7.5%)

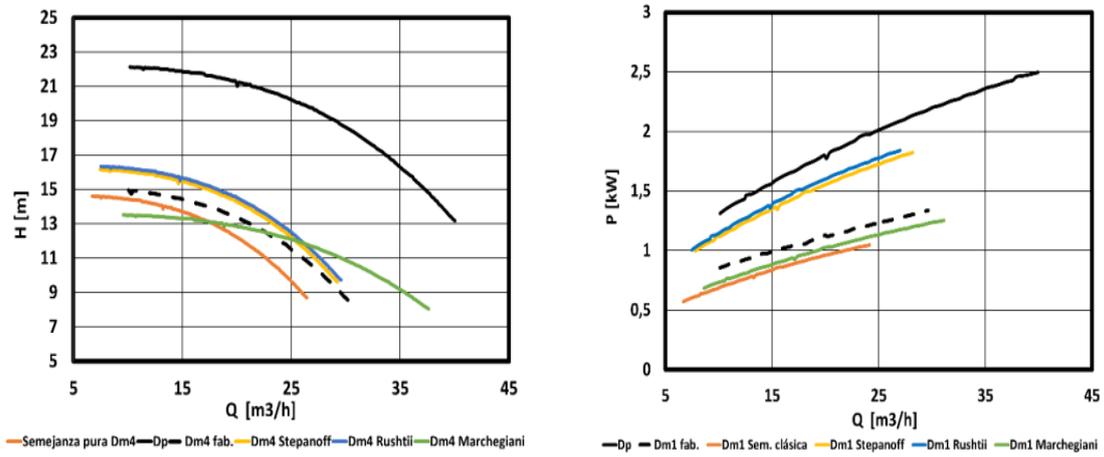


Curvas H-Q y P-Q para el Segundo recorte ( $\lambda=0.85$ , recorte: 15%)

Figura 5: Grundfos SH 200-150-508 ( $n_{sq} = 19.58$  r.p.m.)

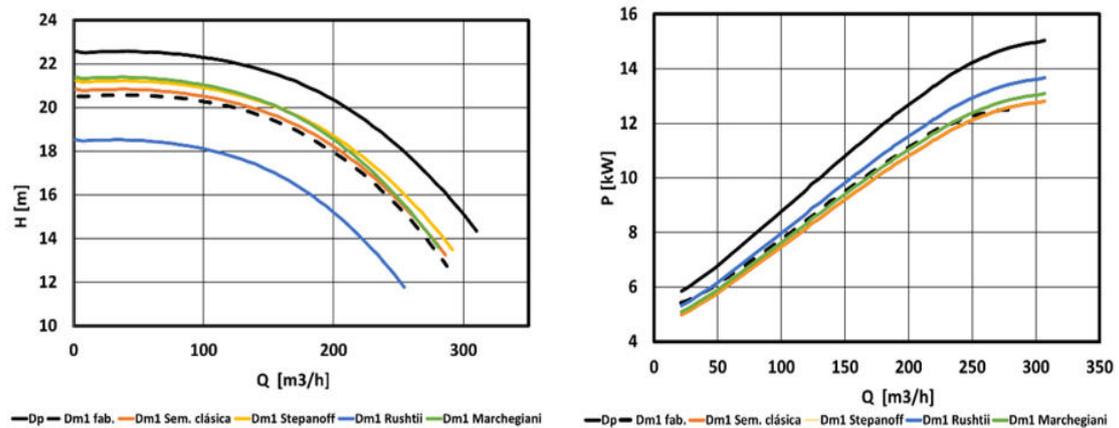


C H-Q y P-Q primer recorte ( $\lambda=0.914$ , recorte: 8.6%)

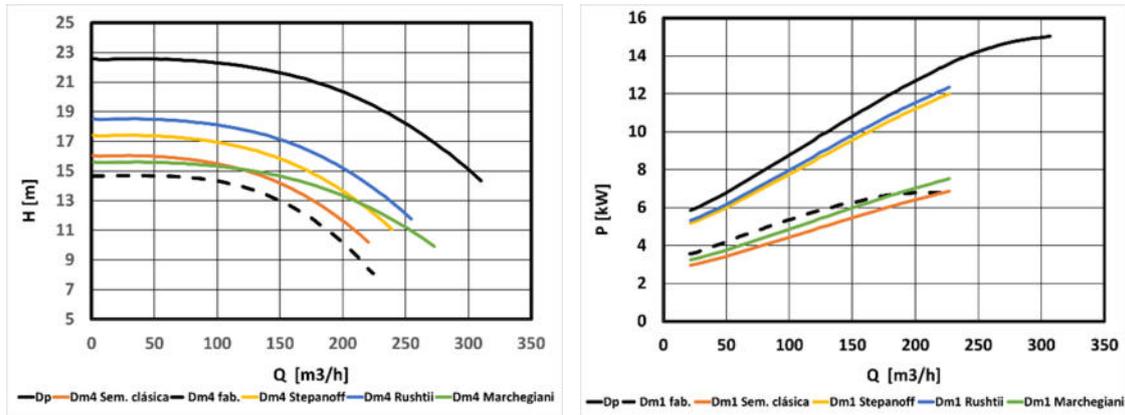


Curvas H-Q y P-Q segundo recorte ( $\lambda=0.8125$ , recorte: 18.75%)

Figura 6: Bomba Grundfos 65-50-125 ( $n_{sq} = 29,25$  r.p.m.)

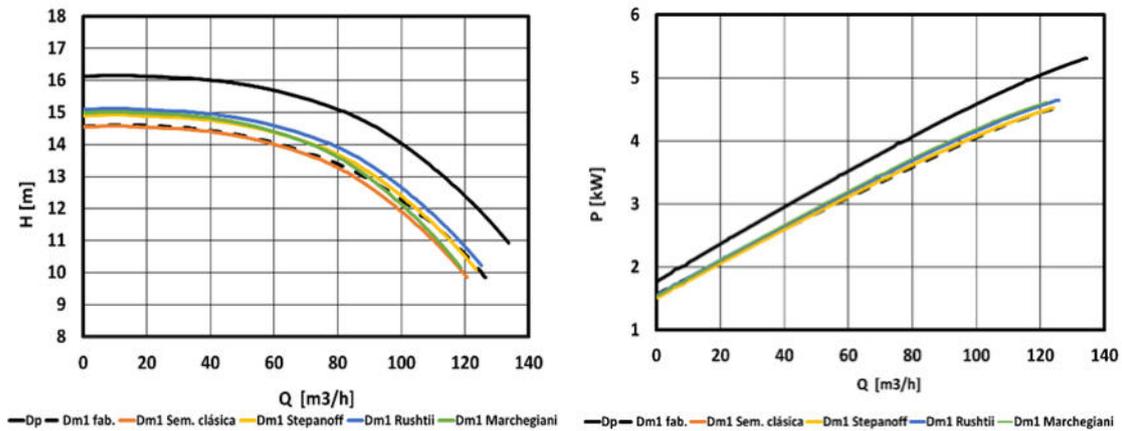


Curvas H-Q y P-Q para el primer recorte ( $\lambda=0.96$ , recorte: 3%)

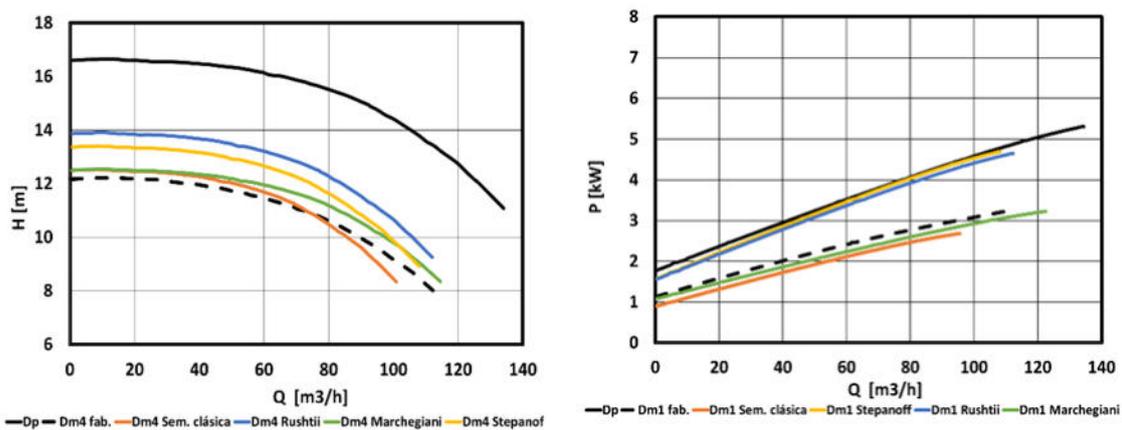


Curvas H-Q y P-Q para el Segundo recorte ( $\lambda=0.843$ , recorte: 15,7%)

Figura 7: Salmson NOLH 125-250 ( $n_{sq} = 31.85$  r.p.m.)

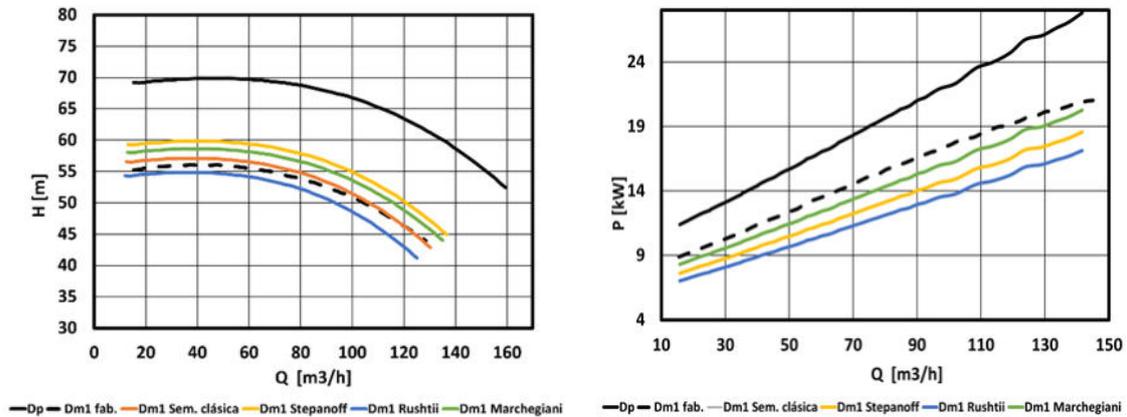


Curvas H-Q y P-Q para el primer recorte ( $\lambda=0.95$ , recorte: 5%)

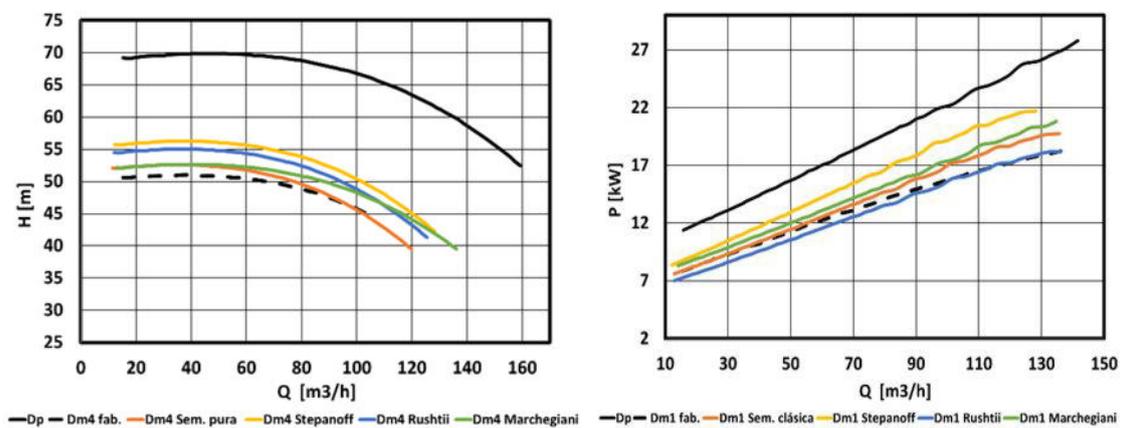


Curvas H-Q y P-Q para el Segundo recorte ( $\lambda=0.867$ , recorte: 13,3%)

Figura 8: KSV Etanorm 100-80-200 ( $n_{sq} = 33.2$  r.p.m.)



Curvas H-Q y P-Q para el primer recorte ( $\lambda = 0.904$ , recorte: 9,6%)



Curvas H-Q y P-Q para el segundo recorte ( $\lambda = 0.867$ , recorte: 13.3%)

Figura 9: Vogt N65-200 ( $n_{sq} = 38.71$  r.p.m.)

### 3. CONCLUSIONES

Se analizaron distintos métodos de recorte del rotor de una bomba centrífuga, a fin de evaluar su precisión, a partir de datos de fabricantes de libre acceso. Dichos métodos fueron aplicados a bombas radiales ( $n_{sq} < 40$ ).

Se evidencia en todos los métodos analizados una pérdida de precisión a medida que aumenta la relación de diámetros  $\lambda$ . Esto puede deberse a que, al ser bombas radiales, los parámetros geométricos de salida del rotor no varían en gran medida a través de los recortes. Con baja relación  $\lambda$  todos los métodos analizados, inclusive el método de reducción por semejanza clásica, tienen buena precisión.



Otra observación interesante, es que los métodos gráficos aplicados a grandes relaciones  $\lambda$  fallan por completo en la predicción de la potencia y en menor medida en la determinación de la curva H-Q.

Se nota una influencia apreciable de la velocidad específica  $ns_q$  en las diferentes aproximaciones. A bajas velocidades específicas todos los métodos arrojaron mejores aproximaciones. Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente, las variables geométricas de salida del rotor varían en menor medida con  $ns_q$  más bajos.

Por último cabe destacar la practicidad del método analítico empleado, por su facilidad de aplicación.

### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se encuentra enmarcado en el Proyecto de Investigación 04/I-268, *Estudio y Desarrollo de Turbomáquinas y Sistemas Asociados Aplicados a Pequeñas Fuentes de Energía Renovable II, aprobado por la Universidad Nacional del Comahue (2022-2025).*

### REFERENCIAS

- [1] Gulich, J., *Centrifugal Pumps*, 2<sup>nd</sup>. ed., Springer, ISBN 978-3-642-12823-3. Heidelberg Dordrecht London New York, USA, 2010.
- [2] L. Nelik, *Centrifugal and rotary pumps: fundamentals with applications*, CRC Press LLC, ISBN 9780429115103, Boca Raton, 1999.
- [3] Stepanoff A. J., *Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, design and application*, John Wiley & Sons, ISBN 978-0-89464-723- 9 , New York, USA, 1957
- [4] C. Pfeleiderer, *Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase*, Springer –Verlag, ISBN-13: 978-3-642-48171-0, Berlin / Göttingen / Heidelberg, 1955.
- [5] Marchegiani A. R. *Modificación de las Condiciones de Funcionamiento de una Bomba Centrífuga mediante la Reducción del Diámetro del Impulsor: Una Aproximación Experimental*, Revista +Ingenio, Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación, Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Misiones, En proceso de evaluación, 10 páginas, 2023.



## Reducción del diámetro del Rotor de Bombas Centrífugas:

### Análisis por Leyes de Similitud

Flavia C. Inostroza<sup>1,2</sup>, Franco L. Pecorari<sup>1,3</sup>, Ariel R. Marchegiani<sup>1</sup>, Orlando A. Audisio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Máquinas Hidráulicas-Departamento de Mecánica Aplicada-Universidad Nacional del Comahue-Facultad de Ingeniería

<sup>2</sup> [flaviainostroza@yahoo.com.ar](mailto:flaviainostroza@yahoo.com.ar)

<sup>3</sup> [francopecorari@hotmail.com](mailto:francopecorari@hotmail.com)

### RESUMEN

En industria es muy frecuente que en el uso de Bombas Centrífugas se proceda a la reducción de rotor para generar el ahorro en el consumo de energía, cambio del punto de funcionamiento y ajuste de las curvas de Altura-Caudal (H-Q) correspondientes.

Las Leyes Semejanza Pura conocidas en Turbomáquinas Hidráulicas permiten predecir el comportamiento del prototipo de una máquina a partir de los ensayos realizados con un modelo de la misma.

El empleo del método de Semejanza Pura conlleva un factor de error en sus fórmulas, más específicamente en sus exponentes ya que es un método general que toma ciertas simplificaciones que no se cumplen en la práctica.

El propósito de este trabajo se orienta en realizar el análisis y estimación de exponentes estadísticos para corregir las fórmulas de Semejanza Hidráulica y se aplica a Bombas Centrífugas Radiales a partir de datos de fabricantes de estos equipos.

Para llegar al objetivo se toma una muestra de un número determinado de bombas de las que se analizan las curvas de desempeños, parámetros generales como son la potencia, altura, caudal, diámetros y principalmente la relación de diámetros ( $\lambda$ ) y relación de velocidades específicas ( $ns_q$ ) para determinar así los diferentes coeficientes de dichas leyes.

### Nomenclatura

- H = altura útil de la bomba
- n = número de revoluciones
- $\omega$  = velocidad de rotación
- D = diámetro del rotor
- Q = caudal de la bomba
- P = potencia de la bomba
- M = momento torsor o cupla
- $\alpha$  = relación de velocidades de rotación
- $\lambda$  = relación geométrica (entre los diámetros de los rotores)
- $\eta$  = rendimiento de la bomba
- p= Prototipo
- m= Modelo



- r= Recortado
- o=Original

### Palabras clave

Bombas Centrífugas, Leyes de semejanza.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las Bombas Centrífugas son equipos que tienen como propósito transformar la energía mecánica, que ingresa al mismo mediante un elemento de entrada como puede ser un motor eléctrico, en energía cinética de presión de un fluido que se encuentra bombeándose.

Este cambio se lleva a cabo gracias a la acción de dos partes principales de la bomba, el impulsor y voluta o difusor.

Dentro de la Hidráulica, el comportamiento de las bombas centrífugas está definido por determinados parámetros como:

1. Caudal (Q)
2. Altura (H)
3. Velocidad de Giro (N)

Las leyes de semejanza son ecuaciones que relacionan matemáticamente estos parámetros para modelos y prototipos de bombas, y se pueden definir de la siguiente manera:

$$\frac{H_p}{H_m} = \frac{n_p^2 \cdot D_p^2}{n_m^2 \cdot D_m^2} \quad (1)$$

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{n_p \cdot D_p^3}{n_m \cdot D_m^3} \quad (2)$$

$$\frac{P_p}{P_m} = \frac{n_p^3 \cdot D_p^5}{n_m^3 \cdot D_m^5} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta la nomenclatura adoptada, subíndice p indica "prototipo" (recortado) y subíndice m indica "modelo" (sin recortar).

Las bombas de flujo radial son aquellas bombas que utilizan principalmente la fuerza centrífuga para impartir energía al fluido impulsado. Estas tienen una envolvente helicoidal, que se denomina voluta, que guía el flujo desde el impulsor hasta el tubo de descarga. Además, se caracterizan por tener una velocidad específica cuyo límite es de aproximadamente  $N_{sq} < 2000$  (rpm.(galones/min)<sup>1/2</sup>.(pies)<sup>-3/4</sup>), en unidades del Sistema Internacional,  $N_{sq} < 40$  (rpm.(m<sup>3</sup>/s)<sup>1/2</sup>.(m)<sup>-3/4</sup>).

Para el proceso de reducción de diámetro de rotores, en el siguiente proyecto se realizó un análisis detallado de funcionamientos y/o desempeño de una muestra conformada por diferentes bombas, contemplando las radiales. Se estudiaron sus parámetros generales como son la

potencia, altura, caudal, diámetros, pero el centro de este está en la relación de diferentes diámetros para determinar así los coeficientes que se están buscando.

Para que el resultado que se busca tenga una aplicación general, en este tipo de bombas, se realiza el estudio teniendo en cuenta 5 fabricantes diferentes, nacionales e internacionales, y al menos dos modelos de bombas de cada uno, como muestra inicial.

### 1.1. ANTECEDENTES

A continuación, se describen los métodos más comunes en el recorte del impulsor, ambos, de características gráficas.

#### 1.1.1. Método de Stepanoff

Stepanoff se destaca en el estudio de este comportamiento, realizó su análisis entre bombas semejantes las cuales habían sufrido una reducción en el diámetro del rotor [2].

De acuerdo a su estudio, el autor concluye que las reglas para estimar las condiciones de funcionamiento de una bomba para una reducción dada del diámetro del impulsor están estrechamente asociadas con las leyes de semejanza, pero estas no son tan precisas y el error es mayor cuanto más se reduce el diámetro del impulsor.

Para este método debe calcularse una relación de diámetros del impulsor, y debe aumentarse para compensar la inexactitud de ciertas normas establecidas.

Este autor elaboró el diagrama de la Figura 1 donde se obtiene entonces la razón real de diámetros de impulsor en porcentaje vs. el diámetro del impulsor calculado. Esta corrección sólo es aproximada, y la precisión disminuye con el aumento de velocidad específica.

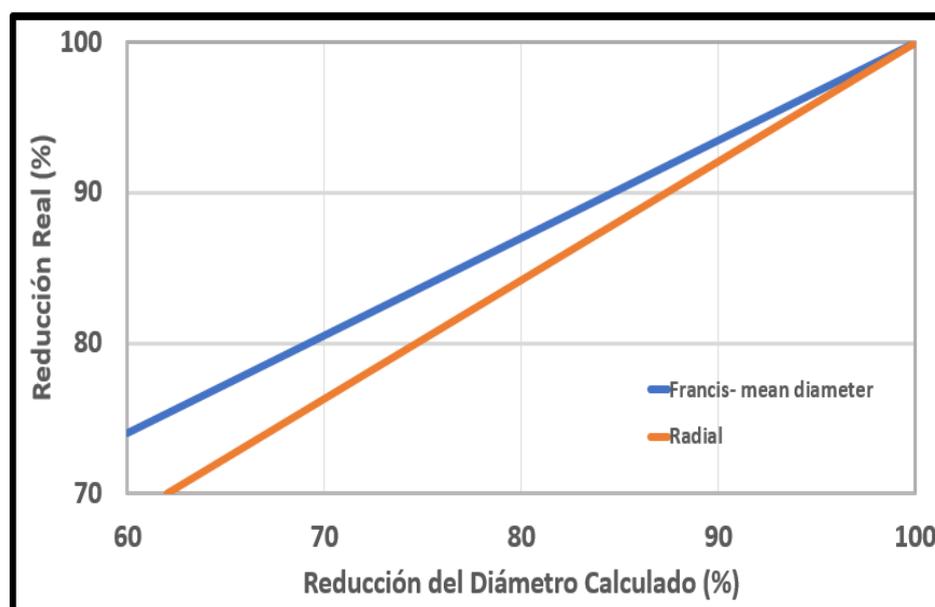


Figura 1. Curva Razón de diámetros vs. Diámetro extraída de [2]



### 1.1.2. Karl Rütshi

El Método de Karl Rütshi es el segundo método gráfico analizado. El diámetro original de la bomba  $D$  será reducido a un  $D'$ , esto se traduce en una disminución en el caudal, además de la reducción en la altura entregada debido a la reducción en la velocidad de salida absoluta y la sección transversal de salida [4]. En la determinación del nuevo valor del diámetro, que corresponde a la altura entregada  $H$  y el caudal  $Q'$ , considerando aproximadamente el mismo ángulo de salida ( $\beta_2$ ) y el ancho de salida ( $b_2$ ) del impulsor sin cambios, se puede suponer que la altura y el caudal cambian cuadráticamente con el diámetro de salida.

Este método implementa un factor  $K$  que es un valor de corrección determinado en numerosas bombas de diferente tamaño y frecuencias.

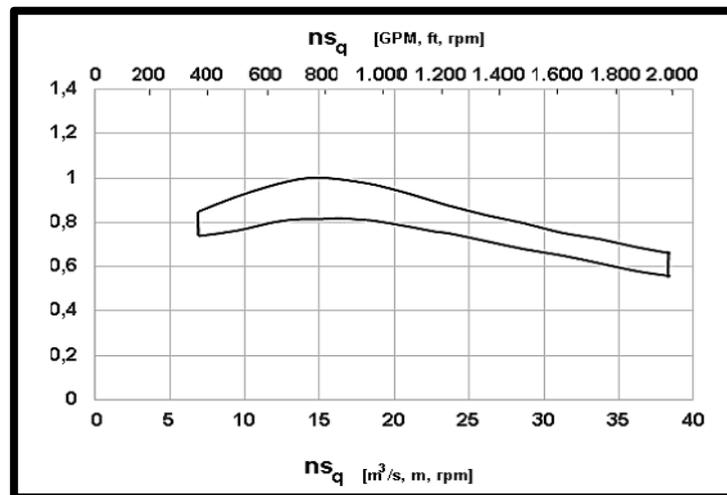


Figura 2. Gráfico de la Constantes  $K$ .

Los valores de  $k$  son independientes del tamaño de la bomba y de la velocidad de rotación. El valor de corrección generalmente disminuye con el aumento de velocidad específica. Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, se deduce que un cálculo exacto del nuevo diámetro no es posible. Por ello se recomienda en primer lugar, reducir el impulsor en un diámetro ligeramente mayor que el diámetro calculado, y luego ajustar el diámetro final después de la prueba.

### 1.2. OBJETIVO

Corregir fórmulas de semejanza hidráulica [1] para ajustar con mayor precisión las curvas de altura caudal obtenidas empíricamente, con la finalidad de poder predecir con mayor precisión el rendimiento hidráulico de una bomba al hacer recortes en el rotor.



## 2. PROCEDIMIENTO

Se tienen en cuenta los antecedentes para desarrollar la nueva metodología y las siguientes hipótesis simplificativas [3], las cuáles introducirán errores en el procedimiento:

- Rendimiento constante
- Los ángulos de salida no varían (tras el recorte)
- El espesor  $b_2$  de salida no cambia
- Viscosidad despreciable (trabajaremos solo con agua)
- $N_{s_q}$  máximo = 38,7 (número específico en función del caudal)
- Recorte máximo del 15%
- $\lambda$  máximo = 0,85

### Elección de bombas:

Se seleccionó una muestra de 10 bombas, cuya información se encuentra disponible en internet. Se nombraron alfabéticamente con letras de la A a la J. Estas bombas se clasifican como se detalla a continuación:

Tabla 1. Muestra de bombas seleccionadas

Bomba	Nombre	Velocidad	Cantidad de diámetros representados	Cantidad de rendimientos representados	Frecuencia
A	SALMSON NOHL 50-160 [5]	1450 rpm	5	6	50 Hz
B	SALMSON NOHL 40-200 [5]	1450 rpm	6	10	50 Hz
C	KSB 40-160 [6]	2900 rpm	8	5	50 Hz
D	KSB 50-250 [6]	2900 rpm	6	7	50 Hz
E	WILO 40-200 [7]	2900 rpm	6	8	50 Hz
F	WILO 40-160 [7]	2900 rpm	6	9	50 Hz
G	PURITY 100-315 [8]	2900 rpm	5	7	50 Hz
H	PURITY 32-250 [8]	2900 rpm	5	7	50 Hz
I	GRUNDFOS NP 65-50-125 [9]	2900 rpm	3	4	50 Hz
J	GRUNDFOS NM [9]100-65-200 [11]	1450 rpm	3	7	50 Hz

Se muestra a continuación las curvas de la Bomba F:

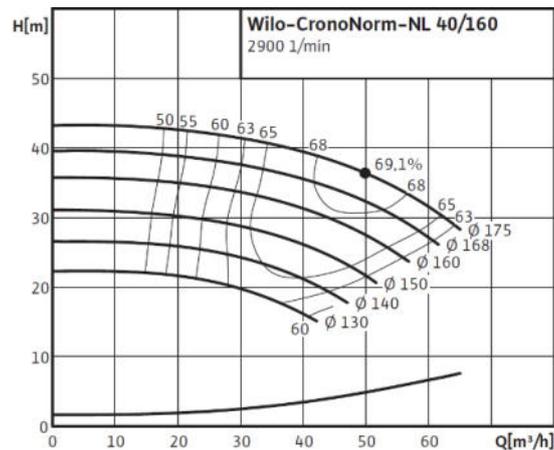


Figura 3. Curva H-Q Bomba F

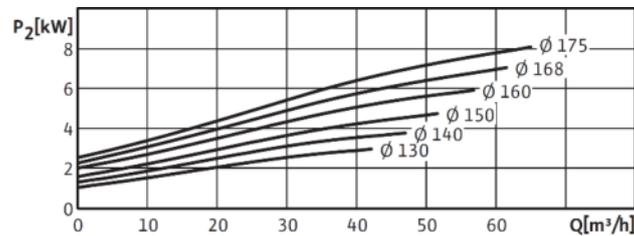


Figura 4. Curva P-Q Bomba F

De los gráficos anteriores se obtienen datos por cada bomba analizada, con los cuales se trabaja estadísticamente para obtener la aproximación de H y Q de las diferentes bombas, teniendo en cuenta el rango de velocidades específicas para bombas centrífugas radiales.

Se agruparon los datos que cumplieran con las condiciones:

- Ser de igual rendimiento
- $\lambda = D_r/D_o > 0,85$

Los exponentes  $n_1$ ,  $n_2$  y  $n_3$  se grafican en función de la relación  $\lambda$  para cada rendimiento:

$$n_1 = \frac{\ln\left(\frac{Q_r}{Q_o}\right)}{\ln\left(\frac{D_r}{D_o}\right)} \quad (4)$$

$$n_2 = \frac{\ln\left(\frac{H_r}{H_o}\right)}{\ln\left(\frac{D_r}{D_o}\right)} \quad (5)$$

$$n_3 = \frac{\ln\left(\frac{P_r}{P_o}\right)}{\ln\left(\frac{D_r}{D_o}\right)} \quad (6)$$



### 3. RESULTADOS

En las siguientes Figuras (Figura 5 a Figura 10) se muestran algunos de los resultados obtenidos, considerando solo dos bombas del total tomado en la muestra, comparándolos con los Métodos de Stepanoff y Karl Rütshi, y el Teórico.

#### 3.1. Exponentes obtenidos

El análisis empírico realizado para la obtención de los nuevos exponentes (De las ecuaciones 4,5,6) arrojó los siguientes resultados mostrados en la Tabla 2 y su correspondiente análisis se muestra en las Figuras 5, 6, y 7.

Tabla 2. Valores de exponentes obtenidos en el Método

$n_1$	$n_2$	$n_3$
$n_1 = 2,2262\lambda - 1,154$	$n_2 = 1,7433 \lambda + 0,735$	$n_3 = 8,6888\lambda - 4,5377$

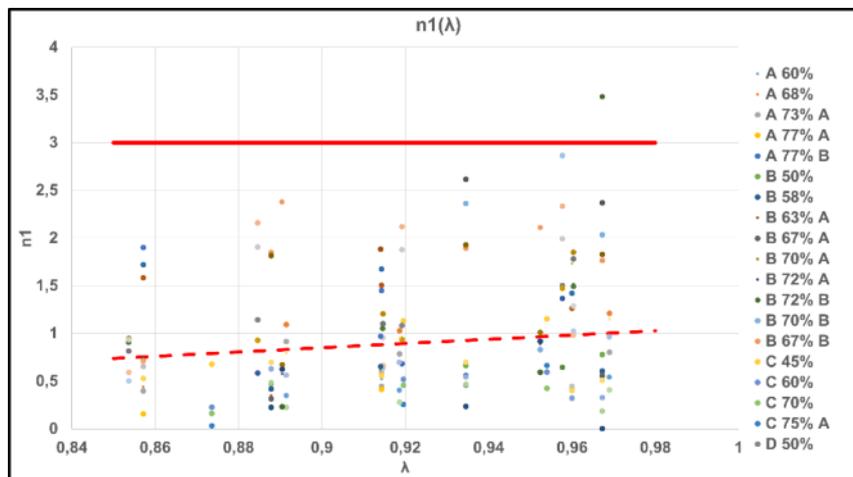


Figura 5. Exponente de Caudal  $n_1$

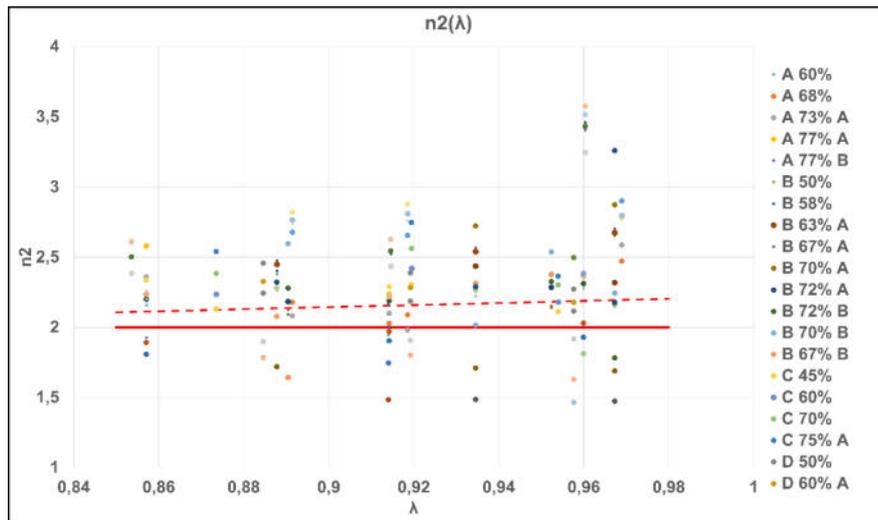


Figura 6. Exponente de Altura  $n_2$

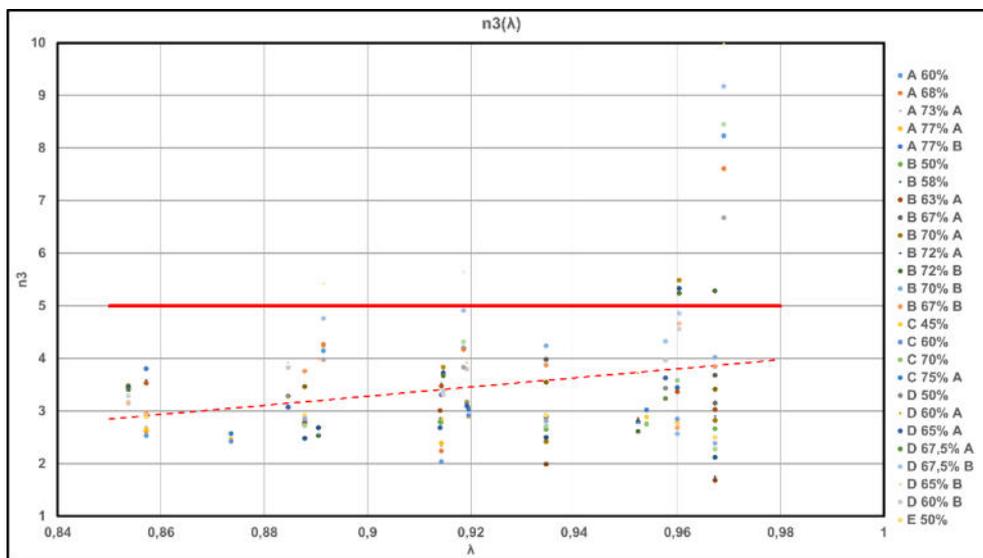


Figura 7. Exponente de Potencia  $n$

### 3.2. Errores obtenidos

Del análisis realizado sobre la muestra de las 10 bombas, se obtuvieron los siguientes errores respecto a los métodos ya existentes:

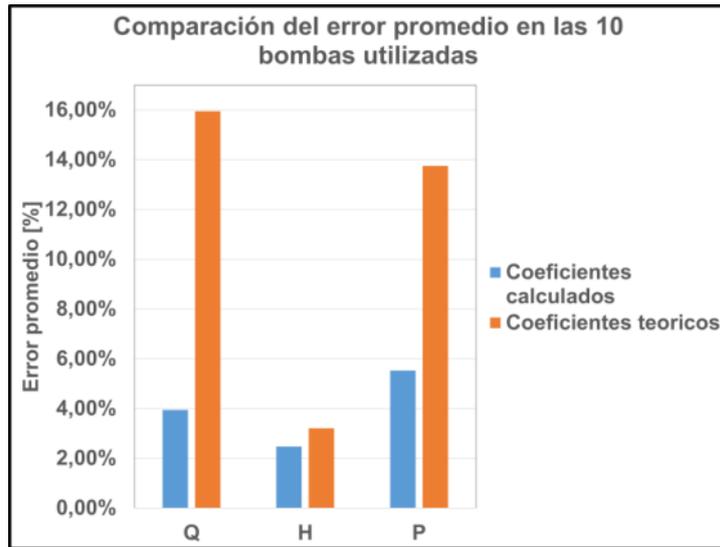


Figura 8. Comparación de errores obtenidos con los diferentes métodos

### 3.3. Bomba F - WILO - Curvas de diámetros Do=175 Dr=168

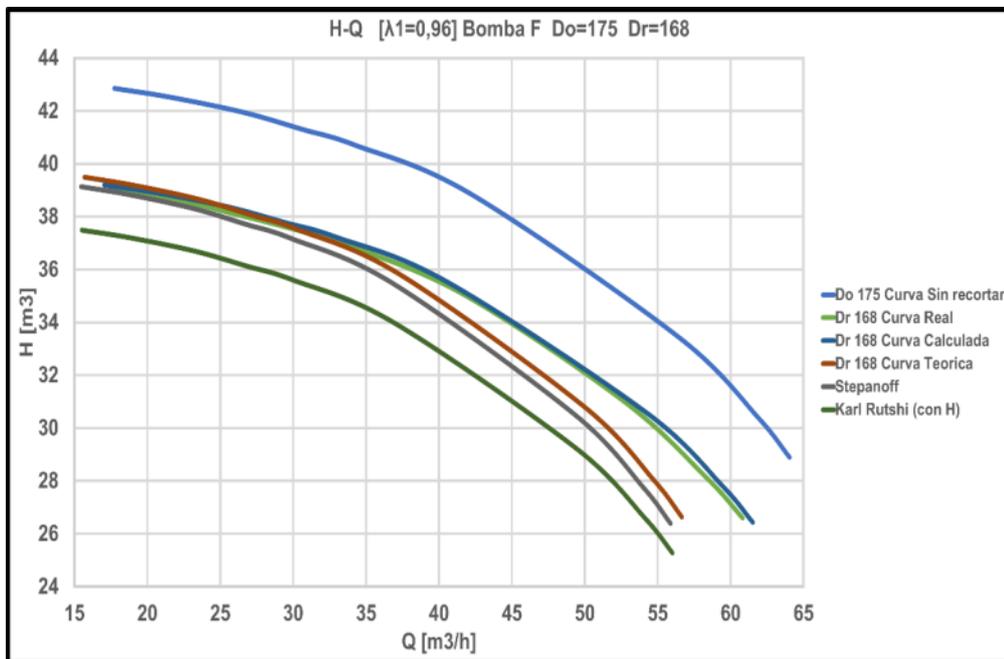


Figura 9. Curvas H-Q para Bomba F para Do=175 Dr=168

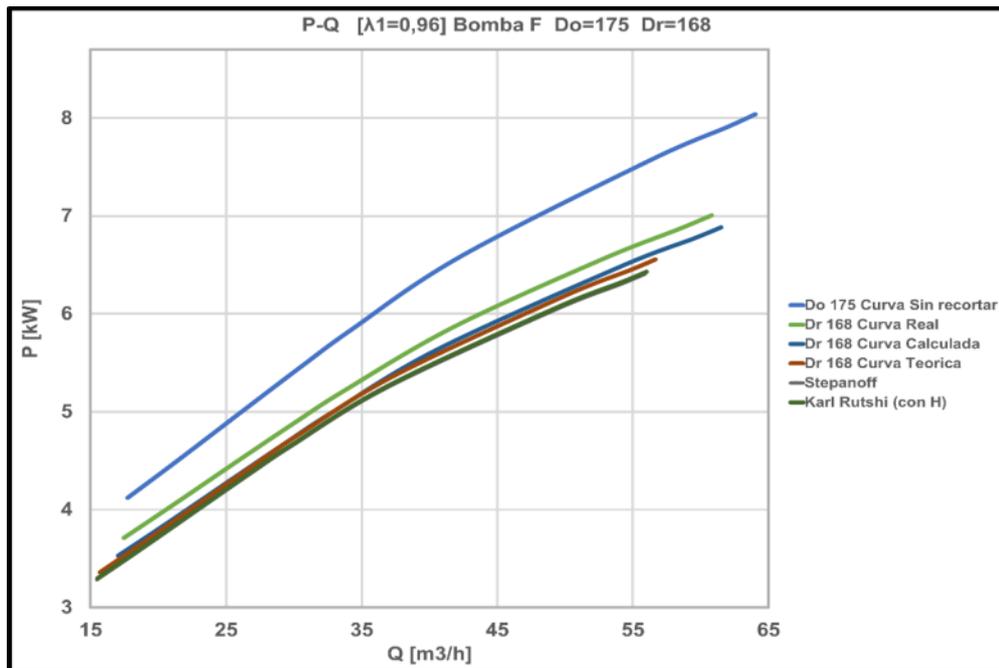


Figura 10. Curvas P-Q para Bomba F para Do=175 Dr=150

### 3.4. Bomba F - WILO- curvas de diámetro Do=175 Dr=150

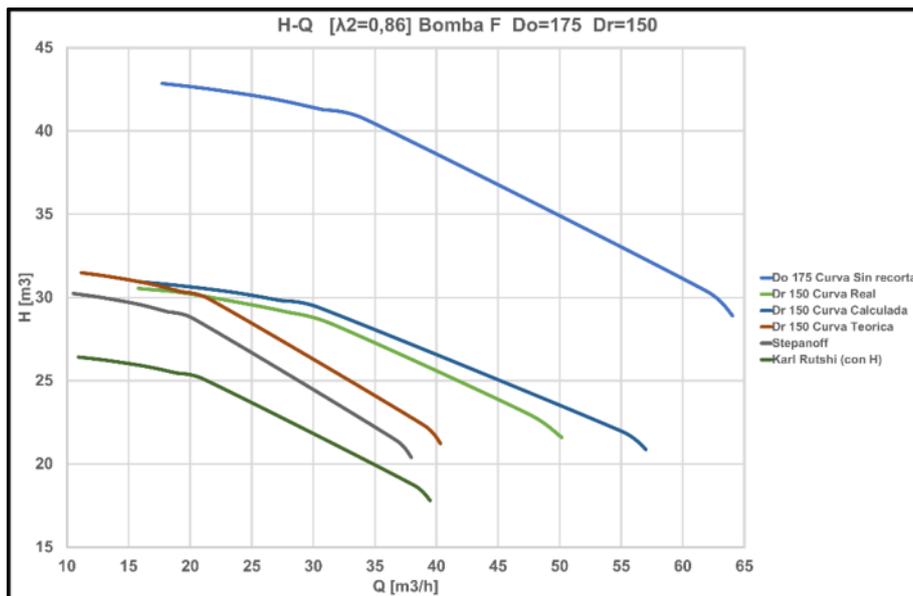


Figura 11. Curvas H-Q para Bomba F para Do=175 Dr=150

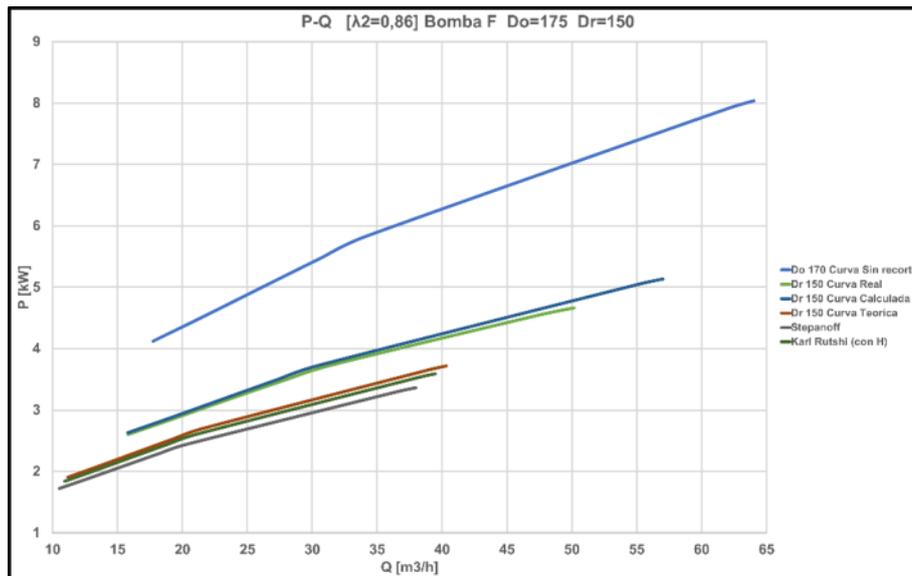


Figura 12. Curvas P-Q para Bomba F para Do=175 Dr=150

#### 4. CONCLUSIONES

Las rectas de tendencia de los exponentes, para los datos obtenidos de la muestra de bombas tomada, tienen un índice de correlación muy bajo. Aun así, son una mejor representación que los valores teóricos. Esto se demuestra en la comparación del error promedio de las predicciones realizadas, sobre el comportamiento de la muestra de bombas tras una reducción del diámetro del rotor, con los coeficientes calculados y con los coeficientes teóricos, donde se observa una notable reducción del error promedio, principalmente para las variables Q y P.

Para la bomba F, tomada como referencia de la muestra, se observó que esta mejora es más significativa para recortes mayores (cerca del 15%), donde las predicciones teóricas fallan en mayor medida. Para esta bomba de referencia, también se realizó la predicción mediante los métodos de Stepanoff y de Karl Rütshi, y se observó que su precisión es similar a la teórica, por lo que también son superados por los coeficientes obtenidos en el planteamiento de este trabajo.

Es importante mencionar que las rectas de aproximación de los coeficientes están determinadas por la muestra de bombas, por lo que se puede mejorar su precisión tomando una muestra de bombas con características similares a la que queremos predecir.

Si bien los resultados obtenidos mediante esta metodología presentan muy buenas aproximaciones, la misma queda abierta para poder continuar realizando más ajustes y lograr mejores resultados a los obtenidos.



## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue. Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto de Investigación 04/I-268, “Estudio y Desarrollo de Turbomáquinas y Sistemas Asociados Aplicados a Pequeñas Fuentes de Energía Renovable II, (2022-2025)”.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Claudio Mataix - Turbomáquinas Hidráulicas – Editorial ICAI 1984
- [2] Stepanoff A.J. – Centrifugal and Axial Flow Pumps – 1993
- [3] Journal of Fluids Engineering - Prediction of the Effect of Impeller Trimming on the Hydraulic Performance of Low Specific-Speed Centrifugal Pumps – August 2018
- [4] “Adaptación de leyes de semejanza en el recorte del rotor en bombas centrifugas: APROXIMACION EXPERIMENTAL” – Barrionuevo Facundo Marcelo – Ing. Ariel Experimental.
- [5] [www.salmson.com](http://www.salmson.com)
- [6] <https://www.ksb.com/de-de/unternehmen>
- [7] <https://www.yumpu.com/en/document/view/8976249/monobloc-norm-and-axial-split-case-pumps>
- [8] [www.cnpurity.com](http://www.cnpurity.com)
- [9] <https://www.grundfos.com/>



## Análise e classificação da qualidade de água de alimentação de caldeiras

Anne Karoline Cardoso Macedo<sup>1</sup>; Márcio Andrade Rocha<sup>2</sup>

1-Instituto Federal da Bahia, IFBA/Jequié, acadêmico do curso de Engenharia Mecânica, E-mail: karolcardoso7@gmail.com;

2-Instituto Federal da Bahia, IFBA/Jequié, coordenador do curso de Engenharia Mecânica;

### Resumo

A água é um recurso vital para as operações industriais, e muitas indústrias dependem de caldeiras para produzir vapor para diversas finalidades, como geração de energia e aquecimento. A qualidade da água utilizada nessas caldeiras é fundamental para garantir sua eficiência e segurança operacional, bem como para evitar a corrosão e o acúmulo de incrustações nos equipamentos. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é avaliar a qualidade da água destinada para alimentação de caldeiras e da água residual produzida. Para isso, a partir de dados sintéticos, será desenvolvido um modelo de aprendizado de máquina, que irá classificar a qualidade da água por meio de parâmetros físico-químicos, como a concentração de ferro, cobre, sílica, a alcalinidade e dureza total, e a condutividade, sendo estes parâmetros previstos pelos órgãos regulamentadores. Espera-se que o modelo forneça uma categorização da qualidade precisa sobre a adequação da água para uso em caldeiras industriais, verificando sua conformidade com as normas e regulamentos ambientais, bem como com as especificações técnicas necessárias para a operação eficiente e segura das caldeiras. O estudo pode ajudar na identificação de problemas de qualidade da água que afetam as caldeiras industriais, como a presença de impurezas ou contaminantes. Isso permitirá que as indústrias tomem medidas para melhorar a qualidade da água de alimentação e residual, evitando danos aos equipamentos. É importante enfatizar que a não conformidade com as normas e regulamentos pode acarretar em sanções regulatórias, como multas, ações judiciais e até mesmo interrupções nas operações, além de prejudicar a reputação das empresas. Esse estudo poderá auxiliar as empresas a manter seus padrões dentro das regulamentações exigidas, tendo em vista que tais sanções podem ser problemáticas para indústrias que dependem das caldeiras para manter suas operações.

**Palavras-chave:** Caldeiras, Aprendizado de máquina, Qualidade.

## Analysis and classification of the quality of boiler feedwater.

### Abstract

Water is a vital resource for industrial operations, and many industries rely on boilers to produce steam for various purposes, such as energy generation and heating. The quality of the water used in these boilers is crucial to ensure their efficiency and operational safety, as well as to prevent corrosion and scale buildup on equipment. In this context, the aim of this study is to evaluate the quality of the water intended for boiler feed and the produced wastewater. For this purpose, a machine learning model will be developed based on synthetic data, which will classify the water quality using physical-chemical parameters such as iron, copper, silica, alkalinity and total hardness concentrations, and conductivity, which are regulated by environmental agencies. It is expected that the model will provide an accurate categorization of water quality regarding its suitability for use in industrial boilers, verifying its compliance with environmental regulations and technical specifications necessary for the efficient and safe operation of boilers. The study can help identify water quality problems that affect industrial boilers, such as the presence of impurities or contaminants. This will allow industries to take measures to improve the quality of feed and wastewater, avoiding equipment damage. It is important to emphasize that non-compliance with regulations may result in regulatory sanctions, such as fines, lawsuits, and even interruptions in operations, as well as harming the reputation of companies. This study can assist companies in maintaining their standards within the required regulations, considering that such sanctions can be problematic for industries that depend on boilers to maintain their operations.

**Keywords:** Boilers, Machine Learning, Quality.



## Introdução

Em decorrência da insuficiência de chuvas em determinadas áreas do território brasileiro durante o ano de 2021, os reservatórios das principais usinas hidrelétricas do país enfrentaram uma carência hídrica, gerando uma diminuição na produção de hidreletricidade (BRASIL, 2021).

Com o propósito de contornar esta redução, verificou-se um aumento na oferta de outras fontes energéticas, tais como carvão vapor, gás natural, energia eólica e solar fotovoltaica, no mesmo período. Consequentemente, a participação de renováveis na matriz elétrica brasileira atingiu 78,1% de renovabilidade em 2021, representando uma diminuição em relação aos anos anteriores - em 2020, essa proporção havia atingido 83,8% (EPE, 2022).



Figura 1 – Proporção de renovabilidade na matriz elétrica brasileira. Fonte: Matos e EPE (2022).

A compensação pela redução no fornecimento de hidreletricidade, refletiu um aumento significativo na produção de termoeletricidade, principalmente a gás natural, obtendo um avanço de 24% em comparação ao ano posterior. Como resultado, a participação da geração termelétrica no total da geração de energia elétrica no Brasil aumentou de 26,2% em 2020 para 31,1% em 2021 (EPE, 2022).

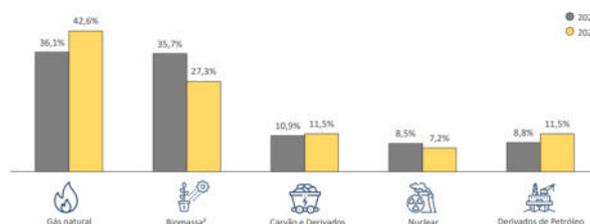


Figura 2 – Proporção de fontes energéticas na geração de termoeletricidade. Fonte: Matos e EPE (2022).

A geração termelétrica é baseada na conversão de energia térmica em energia mecânica, e da conversão desta em energia elétrica. E com o crescimento desse setor no Brasil, faz-se necessário a busca por práticas mais eficientes na produção de energia, a fim de ter um maior aproveitamento energético dos recursos.

A energia térmica é obtida pela queima de combustíveis fósseis ou renováveis, ou pela fissão nuclear de combustíveis radioativos. Um dos tipos de geração de termoenergia



mais comuns é o ciclo a vapor, onde o calor obtido pela queima do combustível é transferido para o fluido, que se expande na forma de vapor a alta pressão e temperatura na caldeira (TOLMASQUIM, 2016).

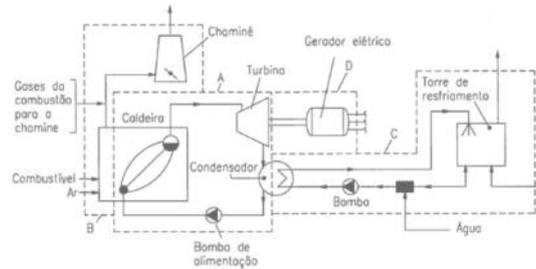


Figura 3 – Ciclo a vapor para geração de termoeletricidade. Fonte: (NASCIMENTO; LORA, 2004 apud TOLMASQUIM, 2016).

A água é o principal fluido usado em sistemas de geração de vapor e a qualidade deste afeta diretamente o rendimento e eficiência do ciclo a vapor. Isto porque a água, em decorrência das suas propriedades de solvente e da sua capacidade de transportar partículas, incorpora a si diversas impurezas, as quais definem sua qualidade (ZARPELON; AZZOLINI, 2015)

Por isso, é importante ter um controle de qualidade criterioso, garantindo que este fluido trabalhe nos parâmetros esperados. Observando ciclo da Figura 3, é desejável que o fluido seja um vapor superaquecido ao chegar na turbina, evitando a ocorrência de cavitação, e que volte ao estado de, pelo menos, líquido saturado antes de chegar à bomba.

Entre os pontos que podem ser destacados, a má qualidade da água das caldeiras podem gerar a formação de depósitos e incrustações, que reduzem a transferência de calor e aumentam as perdas de energia. Essas impurezas, ao longo do tempo, também podem estar relacionadas a problemas críticos ao funcionamento das caldeiras, como:

- Sobreaquecimento;
- Corrosão;
- Mudança de estrutura metalográfica e mudança química (IBP, 2020).

Uma maneira de prevenção, é recorrer a análise da purga da caldeira e da água de alimentação, a fim de verificar se estas se encontram em parâmetros ideais para o funcionamento da máquina. Caso não estejam, pode-se aplicar medidas corretivas, que, em geral, apresentam um custo financeiro significativamente menor, do que pela reparação dos possíveis problemas causados. Para que as indústrias possam monitorar estes parâmetros, as amostras da água são enviadas a laboratórios especializados, que irão avaliar sua qualidade. Com a expansão da automação industrial, esse processo pode ser revisitado e novas ferramentas para gestão de qualidade podem ser implementadas.

Isso é demonstrado em um estudo realizado na Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), onde foi proposto o monitoramento automatizado e remoto da qualidade da água da instituição. Foram levados em conta parâmetros como condutividade, pH,



temperatura e oxigênio dissolvido. Os dados foram armazenados em um banco de dados, onde poderiam ser consultados a qualquer momento (LIMA, 2018).

Outro estudo demonstra que é possível identificar regimes de ebulição de forma não intrusiva e com baixo custo, em máquinas térmicas, usando técnicas de aprendizado de máquina em imagens de baixa resolução e velocidade (HOBOLD, 2021). Sendo assim, a tecnologia pode ser utilizada para simplificar processos já existentes. Logo, este estudo se propõe a desenvolver um modelo de aprendizagem de máquina, a fim de colaborar para diminuição dos impactos causados pela má gestão dos parâmetros físico-químicos da água de caldeira.

O algoritmo deve ser aplicado de forma a classificar a qualidade do fluido com base na análise dos parâmetros padrões estabelecidos pela The American Society of Mechanical Engineers (ASME), sendo eles: ferro, cobre, condutividade, alcalinidade, dureza total e sílica (ASME, 2011).

Inicialmente, o algoritmo classificador deve ser capaz de indicar, em classificação binária, se a qualidade da água obedece os padrões ou não. Desta forma, o modelo de aprendizagem de máquina poderá ser implementado em sistemas de automação já existentes e colaborar com o diagnóstico, através dos dados do sistema, da água da caldeira.

## Objetivo geral

Colaborar para diminuição dos impactos causados pela má gestão dos parâmetros físico-químicos da água de caldeira.

## Objetivos específicos

- Automatizar o processo de diagnóstico de qualidade da água de caldeira a partir dos dados de parâmetros físico-químicos;
- Avaliar e selecionar algoritmos de classificação adequados para a categorização da qualidade da água;
- Apontar possibilidades de aplicação de novas ferramentas de gestão de qualidade da água utilizada na geração de termoeletricidade, com base na automação industrial.

## Metodologia

### Levantamento de requisitos

Na primeira etapa do desenvolvimento, foram identificados quais são os requisitos do projeto. Para ambiente de desenvolvimento, foi utilizado o *Visual Studio Code* como editor de código-fonte e *python* como linguagem de desenvolvimento.

Para construção e treinamento do modelo de aprendizado de máquina, é preciso ter dados de treino consistentes, para que o modelo consiga identificar os padrões necessários para classificar novos dados de teste.

Para obter os dados, há algumas alternativas:

1. Coletar os dados de caldeiras em funcionamento;



2. Utilizar dados abertos disponíveis em plataformas de organizações ou governamentais;
3. Sintetizar dados pseudo-aleatórios, com base em regras que delimitam o cenário e o comportamento dos valores gerados.

Para este estudo, optou-se por sintetizar os dados a serem utilizados no treino do modelo. Isto se deu pois, para a alternativa de coleta de dados em máquinas reais, seria preciso uma amostra grande e variada de caldeiras diferentes, de forma que cobrisse o máximo de cenários possíveis.

Esta variedade na amostra demandaria um maior tempo de estudo de caso e custo para realização das análises químicas das amostras.

Não foram encontrados dados consistentes em plataformas de dados abertos, principalmente, pois não era encontrado dados dos parâmetros necessários para a análise desejada. Logo, optou-se por simular e gerar dados sintéticos, se baseando nos parâmetros estabelecidos pela ASME, descritas na Figura 4 abaixo:

Pressão (psi)	Ferro (ppm Fe)	Cobre (ppm Cu)	Dureza total (ppm CaCO <sub>3</sub> )	Sílica (ppm SiO <sub>2</sub> )	Alcalinidade total (ppm CaCO <sub>3</sub> )	Condutividade específica (micro-ohms/cm) (não neutralizada)
0-300	0,1	0,05	0,3	150	700	7000
301-450	0,05	0,025	0,3	90	600	6000
451-600	0,03	0,02	0,2	40	500	5000
601-750	0,025	0,02	0,2	30	400	4000
751-900	0,02	0,015	0,1	20	300	3000
901-1000	0,02	0,015	0,05	8	200	2000
1001-1500	0,01	0,01	0	2	0	150
1501-2000	0,01	0,01	0	1	0	100

Figura 4 – Parâmetros de qualidade da água de caldeira. Fonte: ASME (2011) (Adaptado pelo Autor).

Apesar de intencionalmente optar por um modelo classificador, testes devem ser realizados com modelos de regressão linear, a fim de avaliar o comportamento de teste e decidir pelo modelo com melhores predições.

Para reduzir o número de possibilidades e selecionar o modelo a ser utilizado, a biblioteca python *Lazy Predict* irá auxiliar, pois consegue, com pouco código, construir testes de variados modelos de aprendizagem de máquina, gerando um relatório com as métricas de avaliação de cada um.

Logo, para os modelos que serão testados, deve-se considerar que:

- O modelo deve, a partir dos dados de entrada, indicar a qualidade da água da caldeira de forma binária - 0 ou 1. Sendo 1 o indicador de qualidade positiva e 0 o indicador negativo;
- Será considerado o modelo que obter as melhores métricas de avaliação, como o Score F1, precisão e acurácia;
- Modelos com métricas abaixo ou próximas a 50% serão descartados, pois por se tratar de uma classe binária, 50% de precisão é, em tese, uma predição pseudo-aleatória.



## Geração de dados sintéticos

Como discutido, os dados utilizados serão sintetizados a partir dos parâmetros físico-químicos estabelecidos para faixas de pressão estabelecidos pela ASME. Ou seja, para cada intervalo de pressão, serão gerados dados pseudo-aleatórios a partir dos critérios definidos a seguir.

Para cada parâmetro em um determinado intervalo, será considerado seu valor máximo como o limite suportado para que a qualidade da água esteja dentro do ideal. E, para que amostras de água com baixa qualidade também sejam geradas, calcula-se uma variação entre o valor máximo e mínimo do parâmetro com base no desvio-padrão. O valor do desvio será a tolerância acima e abaixo dos limites de qualidade da água.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (1)$$

Fórmula do desvio-padrão

O valor mínimo real dos parâmetros não são descritos na Figura 4, pois, idealmente, este representaria a menor quantidade possível de impurezas no fluido. Como é preciso um valor mínimo para cálculo da tolerância, será considerado o menor valor para o parâmetro, independente do intervalo de pressão.

Com a tolerância, calcula-se os novos limites máximo e mínimo para o parâmetro, da forma a seguir:

$$\text{limite máximo} = \text{valor máximo} + \text{tolerância} \quad (2)$$

$$\text{limite mínimo} = \text{valor mínimo} - \text{tolerância} \quad (3)$$

Em casos onde o novo limite inferior seja menor que zero, o valor é corrigido para que seja igual a zero, a fim de se aproximar mais de um cenário real.

Com os limites calculados, números pseudo-aleatórios são escolhidos dentro deste limite e organizados para formar os novos dados sintéticos. O processo é repetido para todas as faixas de pressão, gerando 50 amostras por intervalo e um total de 400 amostras sintéticas, que serão divididos em duas bases de dados, sendo uma para treinamento do modelo - 70% das amostras - e o restante - 30% das amostras - para teste.

## Balanceamento dos dados

Ao sintetizar os dados, entende-se que as proporções entre amostras com boa ou má qualidade de água ficam desbalanceadas, pois cada amostra é um número qualquer em um intervalo possível dentro ou fora do padrão ideal.

Modelos de aprendizado de máquina podem ser sensíveis a este desbalanceamento, tendendo a ficarem enviesados com a classe de maior proporção de dados. Para os dados gerados, sendo a classe confirming representando amostras que estão conforme os padrões de qualidade, e nonconfirming aquelas que não estão. Sendo assim, tem-se a seguinte proporção nos dados:

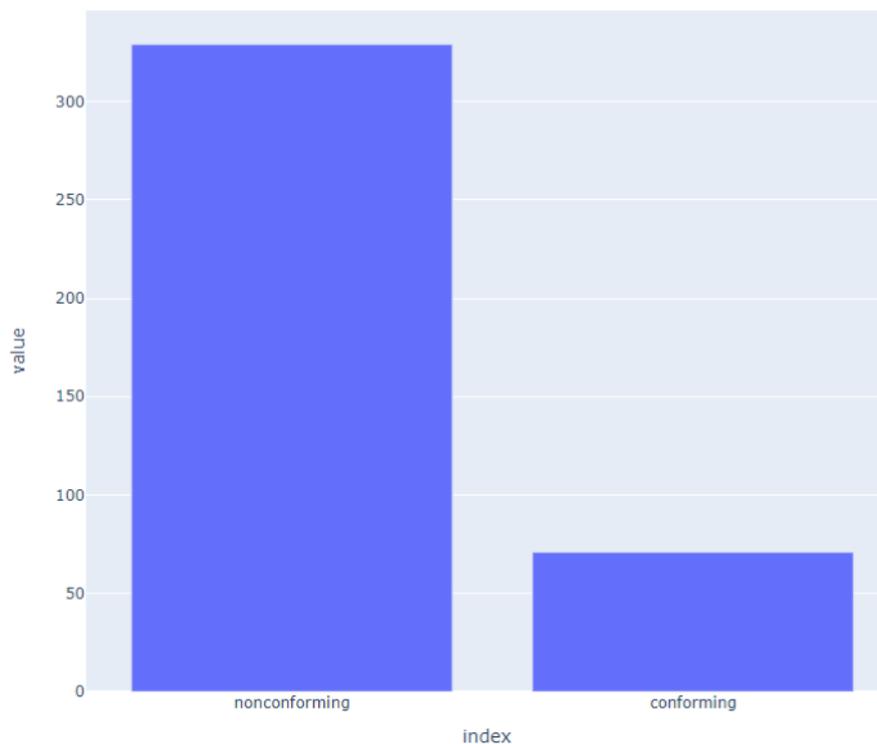


Figura 5 – Dados sintéticos desbalanceados. Fonte: Autor.

Para balancear, foi utilizado o *Synthetic Minority Oversampling Technique* (SMOTE) do pacote *python imbalanced*, uma biblioteca de código aberto, que fornece ferramentas para lidar com classificação de classes desbalanceadas (LEMAITRE; NOGUEIRA; ARIDAS, 2017).

O SMOTE é uma técnica de *oversampling*, onde são gerados novos dados sintéticos da classe minoritária. Isso é feito por meio da criação de novos exemplos a partir dos dados da classe minoritária, gerando sintéticos por meio de uma combinação linear de dados existentes e seus vizinhos mais próximos, com os pesos determinados aleatoriamente (LEMAITRE; NOGUEIRA; ARIDAS, 2017).

Com aplicação do SMOTE, os dados sintéticos ganham a seguinte proporção:

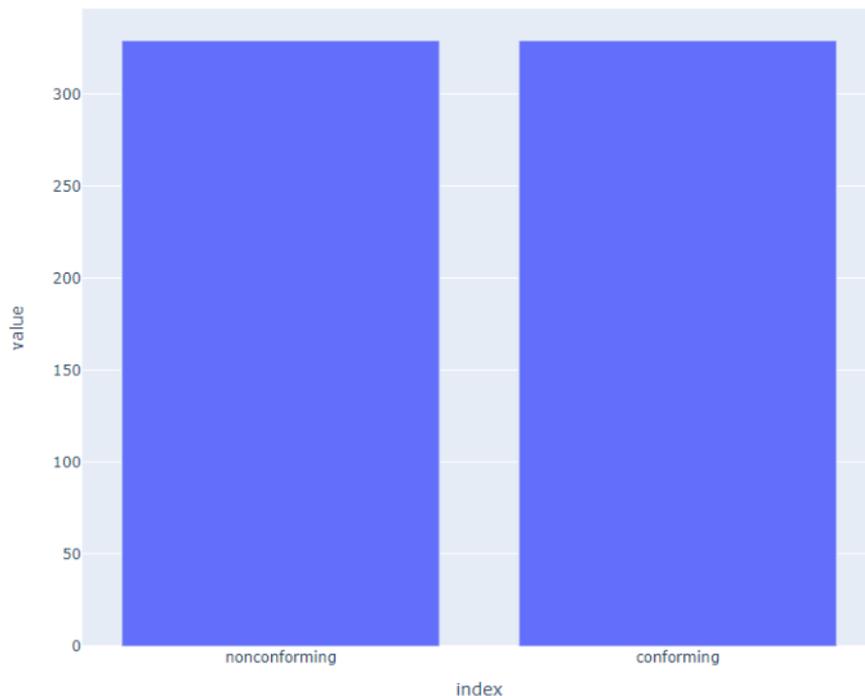


Figura 6 – Dados sintéticos balanceados com SMOTE. Fonte: Autor.

O *oversampling*, em geral, é uma estratégia útil para melhorar o desempenho de modelos de aprendizado de máquina em tarefas de classificação em que as classes estão desbalanceadas. Iremos testar o desempenho dos modelos com e sem a aplicação desta técnica, para metrificar o impacto nos dados sintéticos gerados.

## Resultados e Discussão

Ao executar os testes dos modelos com os dados sintéticos de treino, os modelos de aprendizagem de máquina classificadores tiveram um desempenho superior aos de regressão linear. Estes obtiveram índices de acurácia superiores a 90%, enquanto os de regressão linear alcançaram no máximo 78%.

Ao todo, foram testados 61 modelos distintos, e, entre eles, 29 eram classificadores. O *ExtraTreesClassifier* foi o modelo de melhor desempenho, alcançando uma acurácia e um F1 Score de 93%, como pode ser visto na Tabela 1.

Modelo	Acurácia	ROC AUC	F1 Score	Tempo gasto (segundos)
<i>ExtraTreesClassifier</i>	0,93	0,94	0,93	0,22
<i>RandomForestClassifier</i>	0,91	0,92	0,91	0,3
<i>DecisionTreeClassifier</i>	0,9	0,9	0,9	0,02
<i>XGBClassifier</i>	0,9	0,9	0,9	0,1
<i>LGBMClassifier</i>	0,9	0,9	0,9	0,11

Tabela 1 – Modelos com melhor desempenhos nos testes com *Lazy Predict*.

Fonte: Autor.

Escolhido o modelo, realizou-se um novo treino com o modelo *ExtraTreesClassifier*, com ajustes na proporção de número amostras de treino e teste, obteve-se a seguinte matriz de confusão da imagem 7 a seguir:

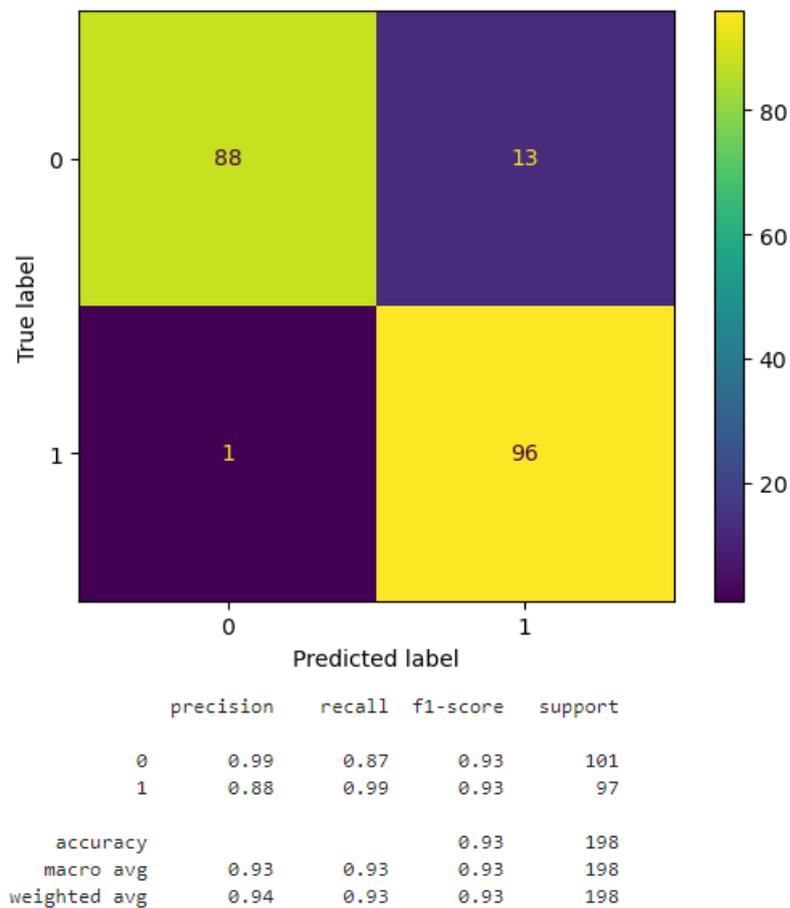


Figura 7 – Matrix de confusão do modelo *ExtraTreesClassifier*. Fonte: Autor.

Onde o eixo y representa o rótulo verdadeiro, ou seja, se o resultado deveria ser 1 - água de boa qualidade - ou 0 - água de qualidade baixa. O eixo x representa o rótulo classificado pelo modelo, também sendo 0 ou 1. Percebe-se que houve apenas 1 falso positivo entre as 97 amostras de teste com boa qualidade, enquanto para as amostras de teste de qualidade ruim, tivemos 88 verdadeiros falsos de 101.

Isso indica que o modelo tem melhor predição para identificar amostras da classe 1, e que pode-se melhorar os dados de treino para a classe 0, a fim de otimizar a precisão de acertos.

Com o modelo finalizado, executou-se novos testes, desta vez forçando o modelo a prever a classe com parâmetros de entrada extremos, ou seja, com números muito próximos ao limite entre uma boa e péssima qualidade. Este teste indicará qual o estado de sensibilidade do algoritmo, onde tem-se todos parâmetros físico-químicos dentro das condições de boa qualidade, com exceção do parâmetro de pressão, o qual iremos variar para testar a sensibilidade.

Para isto, considerou-se a faixa de pressão entre 301 a 450 psi. No primeiro teste, a pressão de entrada foi de 450 psi, ou seja, no limite superior de qualidade, onde o modelo classificou como classe 0.

Na realidade, esta entrada, apesar de próxima do limite, ainda é considerada dentro do padrão de qualidade, ou seja, a classificação está errada. No segundo teste, o valor da pressão teve que ser diminuído até 443 psi para que, com isso, o modelo conseguisse



identificar a classe 1 (Figura 8).

```
row = [[443, 0.03, 0.01, 0.2, 38.07, 458.51, 4000]]
yhat = loaded_model.predict(row)
print('Predicted Class: %d' % yhat[0])

Predicted Class: 1

row = [[450, 0.03, 0.01, 0.2, 38.07, 458.51, 4000]]
yhat = loaded_model.predict(row)
print('Predicted Class: %d' % yhat[0])

Predicted Class: 0
```

Figura 8 – Saída de dados de teste no modelo *ExtraTreesClassifier*, seguindo de cima para baixo, respectivamente, para pressão igual a 443 e a 450 psi. Fonte: Autor.

Num terceiro teste, foi considerado um valor de pressão de 301 psi, ou seja, o limite inferior da faixa, e o modelo conseguiu identificar a classe 1 (Figura 9), que é a classe correta para os padrões da ASME.

```
[27]: row = [[301, 0.03, 0.01, 0.2, 38.07, 458.51, 4000]]
yhat = loaded_model.predict(row)
print('Predicted Class: %d' % yhat[0])

Predicted Class: 1
```

Figura 9 – Saída de dados de teste no modelo *ExtraTreesClassifier*, para pressão igual a 301 psi. Fonte: Autor.

No quarto teste, pode-se observar que a predição também foi correta (Figura 10) para um valor de pressão mais baixo (250 psi), o que evidencia que a margem de erro é maior quando os parâmetros, em conjunto, se aproximam do limite superior de cada faixa de pressão.

```
row = [[250, 0.03, 0.01, 0.2, 38.07, 458.51, 4000]]
yhat = loaded_model.predict(row)
print('Predicted Class: %d' % yhat[0])

Predicted Class: 1
```

Figura 10 – Saída de dados de teste no modelo *ExtraTreesClassifier*, para pressão igual a 250 psi. Fonte: Autor.

Para reforçar a hipótese, o valor de pressão de 450 psi foi novamente testado, desta vez, diminuindo os valores de ferro (ppm) e de dureza total (ppm), fazendo com que estes parâmetros estejam dentro do aceitável também para faixa de pressão de 401 a 600 psi.

Como resultado, o modelo classificou corretamente a classe 1 (Figura ??).



```
row = [[450, 0.025, 0.01, 0.15, 35, 458.51, 4000]]  
yhat = loaded_model.predict(row)  
print('Predicted Class: %d' % yhat[0])
```

Predicted Class: 1

Figura 11 – Saída de dados de teste no modelo *ExtraTreesClassifier*, para pressão igual a 450 psi. Fonte: Autor.

Ou seja, o modelo identificou o padrão dos dados, onde quanto maior o valor de pressão, menor deve ser os valores dos outros parâmetros. Ainda há possibilidade de melhoria de sensibilidade a entradas próximas aos limites superiores das faixas de pressão, contudo, o resultado obtido é acima do esperado, sabido que os dados foram gerados de forma pseudo-aleatória e, este fator, poderia enviesar o modelo para predições mais incertas.

## Conclusão

Nas simulações com dados sintéticos, o modelo treinado apresentou um ótimo desempenho, com acurácia de 93% e uma boa sensibilidade aos dados. Ainda há possíveis melhorias na predição do modelo de aprendizagem de máquina e, para isto, uma das possibilidades é criar novos critérios para geração dos dados sintéticos, visando ter-se mais amostras nos limites das faixas de pressão dos padrões de qualidade da ASME.

Com mais amostras entre as transições, o modelo poderia refinar a sensibilidade e aprender a reconhecer a qualidade com melhor precisão. Apesar disso, os resultados são promissores e o modelo poderia ser testado com dados reais, a fim de monitorar o comportamento com dados de caldeiras em operação.

Vale enfatizar que o modelo ainda está numa versão inicial e são necessários testes mais rigorosos para verificar se as hipóteses levantadas são válidas. Para classificação de qualidade de água de caldeira, o modelo pode ser integrado a sistemas de controle, dado que ele exige pouco recurso computacional para ser executado.

Também podem ser pensadas outras formas de disponibilizar o modelo, como em uma Application Programming Interface (API), que facilitaria não só o compartilhamento do recurso entre distintos sistemas, como também facilitaria a captação de dados de diferentes contexto para evolução do algoritmo.

Uma oportunidade seria utilizar modelos de aprendizado por reforço, onde o algoritmo poderia aprender durante seu funcionamento, a partir da resposta de retorno do usuário ou do sistema sobre suas predições.

## Referências

ASME, American Society of Mechanical Engineers. **Guidelines for Water Quality in Modern Industrial Water Tube Boilers for Reliable Continuous Operation**. New York: ASME Press, 2011.

BRASIL. **Resolução ANA nº 77, de 1º de junho de 2021**. [S.l.: s.n.], 2021. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 25 abr.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2022**. EPE, Rio de Janeiro, 2022.



IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. **Inspeção de caldeiras**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBP, 2020.

LEMAITRE, G.; NOGUEIRA, F.; ARIDAS, C. K. Imbalanced-learn: A Python Toolbox to Tackle the Curse of Imbalanced Datasets in Machine Learning. **Journal of Machine Learning Research**, v. 18, n. 17, p. 1–5, 2017.

LIMA, Ellen Lima de. **Módulo de sensores para monitoramento da qualidade da água com transmissão sem fio utilizando plataforma de prototipagem**. 2018. Universidade Estadual de Feira de Santana.

MATOS, Rogério Antônio da Silva; EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Relatório Síntese: Balanço Energético Nacional 2022. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2022.

NASCIMENTO, M. A. R.; LORA, E. E. S. Fundamentos da Geração Termelétrica. In: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. (Ed.). **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v. 1. cap. 3.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2016.

ZARPELON, Willian; AZZOLINI, José Carlos. Caldeiras de alta pressão: caracterização e avaliação da qualidade do tratamento das águas de abastecimento. **Unoesc & Ciência - ACET Joaçaba**, v. 6, n. 2, p. 141–154, 2015.



## MEDICIÓN DE CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE EN PROTOTIPO DE ÓMNIBUS DIESEL-HIDRÁULICO

Daniel Ades<sup>1</sup>, Mauro Carignano<sup>2</sup>, Guillermo Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Hidráulica, Neumática y Automatización Digital - Escuela de Ingeniería Mecánica - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario - Berutti 2109, Rosario, Argentina - [hidryneu@fceia.unr.edu.ar](mailto:hidryneu@fceia.unr.edu.ar)

<sup>2</sup>Capgemini Engineering - Hermeslaan 9, 1831 Machelen, Bélgica - [mauroguido.carignano@capgemini.com](mailto:mauroguido.carignano@capgemini.com)

<sup>3</sup>FabLab UNR - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario - Berutti 2109, Rosario, Argentina - [guille@fceia.unr.edu.ar](mailto:guille@fceia.unr.edu.ar)

### RESUMEN

El ahorro de combustible y la eficiencia energética en los sistemas de propulsión de automóviles, ómnibus y camiones se han convertido en condicionantes principales para su diseño y construcción combinando tecnologías, dando como resultado entre otros a los sistemas híbridos.

La Municipalidad de Rosario a través de la SEMTUR (Sociedad del Estado Municipal para el Transporte Urbano Rosario) como parte de su política ambiental y de innovación encomendó a la empresa rosarina Inventu el desarrollo del Bus Hybrid InnovaRosario01. Este prototipo experimental funcional se realizó a partir de una conversión a híbrido hidráulico (HHV hydraulic hybrid vehicle) de un ómnibus urbano con motor diesel provisto por SEMTUR. En este prototipo se quitaron el embrague y caja de cambios y se reemplazaron por una transmisión hidrostática regenerativa con la correspondiente electrónica de control, destinada al almacenamiento y recuperación de la energía de frenado mediante acumuladores hidráulicos, y se agregó además al motor diesel un sistema start/stop.

A solicitud de SEMTUR se realizó para el prototipo Bus Hybrid InnovaRosario01 la medición de consumo específico de combustible en condición operativa de Servicio Urbano, para lo cual se realizó una adaptación del método gravimétrico de medición de combustible y con referencia a la Resolución 1147/14 de la Comisión Nacional de Regulación del Transporte (CNRT). A fin de realizar un análisis comparativo, las mediciones de consumo se realizaron en 3 ómnibus distintos (Bus Hybrid InnovaRosario01 y dos unidades más) en un recorrido urbano simultáneo diseñado para condiciones de circulación equivalentes a las del transporte público.

Los resultados obtenidos muestran que el prototipo Bus Hybrid InnovaRosario01 reduce el consumo específico de combustible en hasta un 31% respecto de los ómnibus convencionales.

**Palabras Clave:** Vehículo Híbrido; Eficiencia Energética; Consumo Específico; Transporte; Ciclo de Conducción.



## 1. INTRODUCCIÓN

El ahorro de combustible, la eficiencia energética y la disminución de la contaminación atmosférica y auditiva en los sistemas de propulsión de automóviles, ómnibus y camiones, se han convertido en condicionantes principales para su diseño y construcción combinando tecnologías, dando como resultado los sistemas híbridos.

### 1.1 Sistemas híbridos

“En las últimas décadas el desarrollo y producción comercial de los sistemas híbridos puede dividirse en dos grandes grupos: los híbridos eléctricos y los híbridos hidráulicos. Ambos tipos presentan ventajas y desventajas y campos preferentes de aplicación. En el caso de vehículos semipesados y pesados para circulación urbana a baja velocidad y con numerosos arranques y paradas resulta más conveniente y prácticamente excluyente el híbrido hidráulico por las ventajas y mejoras que se obtienen” [1]. Con ambos sistemas se verifica un ahorro de consumo de combustible.

### 1.2 Transmisiones hidrostáticas

“Se conocen como transmisiones hidrostáticas a circuitos oleohidráulicos dedicados principalmente a la impulsión de las ruedas de vehículos terrestres, en los que se elimina la transmisión mecánica desde el motor (barra cardánica, trenes de engranajes, incluso caja de cambios, etc.). Por esta razón también se las conoce como “eje hidráulico”. En esencia se conecta al motor de combustión una bomba hidráulica que impulsa aceite a presión hacia uno o varios motores hidráulicos que accionan las ruedas. Se utilizan en gran variedad de vehículos pesados, semipesados y livianos: maquinaria vial, maquinaria agrícola, vehículos militares, grúas, aeronáutica, camiones, ómnibus, automóviles, etc.” [2].

### 1.3 Bus Híbrido InnovaRosario01

La Municipalidad de Rosario a través de la SEMTUR (Sociedad del Estado Municipal para el Transporte Urbano Rosario) como parte de su política ambiental y de innovación encomendó a la empresa rosarina Inventu ([www.inventu.tech](http://www.inventu.tech)) el desarrollo del Bus Híbrido InnovaRosario01. Este prototipo experimental funcional se realizó a partir de la conversión a híbrido hidráulico (HHV hydraulic hybrid vehicle) de un ómnibus provisto por SEMTUR carrozado sobre chasis Mercedes Benz OH 1115 L SB con motor diesel. En este prototipo se quitaron el embrague, caja de cambios y barra cardánica, y se reemplazaron por una transmisión hidrostática regenerativa con la correspondiente electrónica de control, destinada al almacenamiento y recuperación de la energía de frenado mediante acumuladores hidráulicos, y se agregó además al motor diesel un sistema start/stop hidráulico. En este caso en particular, la bomba hidráulica montada sobre el motor de combustión puede operar como motor hidráulico y encender el motor de combustión. Por su parte, el motor hidráulico conectado al diferencial puede operar como bomba hidráulica,



para realizar un frenado regenerativo. Inventu diseñó, proyectó y calculó el circuito hidráulico que luego construyó y montó en el ómnibus. La Figura 1 muestra la distribución general de los componentes en el proyecto y muestra parcialmente la implementación del circuito en el ómnibus.



Figura 1: Distribución general de los componentes e implementación

#### 1.4 Solicitud medición consumo de combustible

A los efectos de validar el prototipo Bus Hybrido InnovaRosario01 la SEMTUR solicitó a la Escuela de Ingeniería Mecánica FCEIA-UNR la realización de un ensayo de medición de consumo de combustible.

## 2. METODOLOGÍA Y ENSAYO REALIZADO

### 2.1 Medición de consumo de combustible

Desde la aparición de los motores de combustión interna (MCI) en sus tipos de Ciclo Otto y Ciclo Diesel es necesario medir el consumo de combustible (líquido o gaseoso), sea del motor aislado o instalado en algún tipo de vehículo.

#### 2.1.1 Consumo de combustible en motores MCI

La caracterización de MCI se obtiene en bancos de laboratorio con freno dinamométrico para la realización de distintos ensayos (investigación, de potencia, producción, homologación, recepción, fiabilidad, emisiones, otros). En particular en el ensayo de potencia se obtienen el par, la potencia y consumo específico de combustible para distintas velocidades de operación, siendo la indicación de consumo específico  $[\text{gr/kwh/rpm}]$  [3]. Para la medición de combustible se utilizan dos metodologías [4]:

- método volumétrico: utiliza medidor de flujo diferencial entre el combustible inyectado y el retorno del motor.
- método gravimétrico: se pesa con balanza el depósito de combustible antes y después del ensayo.

El método más preciso para medir el consumo es pesar el combustible utilizado [5].



### 2.1.2 Consumo de combustible en vehículos con MCI

El consumo de combustible de un vehículo es la relación entre la distancia recorrida y la cantidad de combustible consumida resultando dos formas de expresarlo: a) Las unidades de combustible por distancia fija, por ejemplo, litros cada 100 kilómetros (L/100km), b) Las unidades de distancia por unidad de combustible fija, por ejemplo, kilómetros por litro (km/L) [4].

### 2.1.3 Ciclos de conducción

A los efectos de obtener el consumo de combustible en circulación del conjunto MCI-vehículo (llamado también consumo específico) se desarrollaron desde la década del 70 los llamados Ciclos de Conducción. Ciclo de Conducción es el registro de la velocidad instantánea a lo largo del tiempo medido en segundos como se representa en la Figura 2.

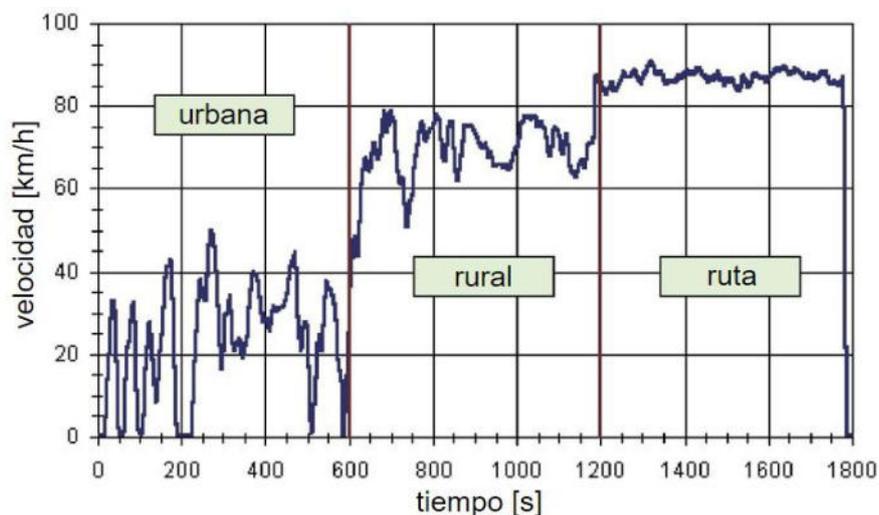


Figura 2 - Ejemplo de ciclos de conducción urbana, rural y en ruta [6].

Es esencial que estos ciclos se ajusten a comportamientos reales de los vehículos con condiciones reales operativas y de manejo. Por lo tanto, es necesario realizar pruebas individuales para cada región a estudiar con el fin de establecer una herramienta representativa para que las autoridades locales identifiquen las características de manejo y en base a esto puedan determinar soluciones para minimizar la cantidad de emisiones de contaminantes que generan, además se puede detectar problemas anexos como el tráfico, consumo de combustible y maneras de manejo [7].

### 2.1.4 Consumo específico del transporte automotor de pasajeros en Argentina

En Argentina, las empresas operadoras del transporte público automotor de pasajeros utilizan el indicador "consumo específico" [litro/kilómetro] obtenido estadísticamente según las condiciones locales. La Comisión Nacional de Regulación del Transporte (CNRT) en su Resolución 1147 de 2014 en su Anexo II establece "la condición operativa del servicio urbano" como aquel que se



presta en zonas urbanas densamente pobladas, con niveles de congestión que determinan una velocidad comercial del orden de catorce (14) km/hr, con el vehículo en condiciones de alta ocupación de pasaje (todos los asientos ocupados y dos (2) pasajeros por metro cuadrado de pasillo) [8]. El Anexo II también explicita las condiciones del ciclo de conducción para la determinación del consumo específico:

- Prestación normal de servicios.
- Condiciones normales de mantenimiento, desgaste del rodado y presiones de inflado de los neumáticos.
- Condición normal de manejo. Se deben evitar las fuertes aceleraciones y que el motor opere a altas revoluciones del motor.
- Red vial de llanura de asfalto u hormigón y a nivel del mar.

Para el ciclo de conducción en condición operativa de Servicio Urbano la Resolución 23/2003 de la Secretaría de Transporte establece en el Anexo I ocho Grupos de según el consumo específico resultante (Tabla 1) [9]

Tabla 1. Res. 23/2003 - Grupos consumo específico Servicio Urbano Transporte Pasajeros

Grupo	Consumo específico [litro/kilómetro]
Grupo 1	0,13 a 0,19 [l/km]
Grupo 2	0,20 a 0,25 [l/km]
Grupo 3	0,26 a 0,30 [l/km]
Grupo 4	0,31 a 0,34 [l/km]
Grupo 5	0,35 a 0,39 [l/km]
Grupo 6	0,40 a 0,44 [l/km]
Grupo 7	0,45 a 0,50 [l/km]
Grupo 8	0,51 a 0,60 [l/km]

## 2.2 Diseño del ensayo

### 2.2.1 Medición comparativa de consumo específico

A los efectos de obtener valores representativos comparables se propuso y realizó el ensayo simultáneo de tres unidades en idéntico recorrido en similar ciclo de conducción con igualdad de condiciones ambientales. El Bus Hybrid InnovaRosario01 está montado sobre chasis Mercedes Benz OH 1115 L SB con motor OM 904 LA EURO III (modelo año 2006), se dispuso del interno 188 con igual chasis y motor (modelo año 2009) (Inscrito en Resolución 1147/14 CNRT Grupo 4 Urbano Consumo Específico 0,34[l/km] - gas oil grado 2) y del interno 420 montado sobre



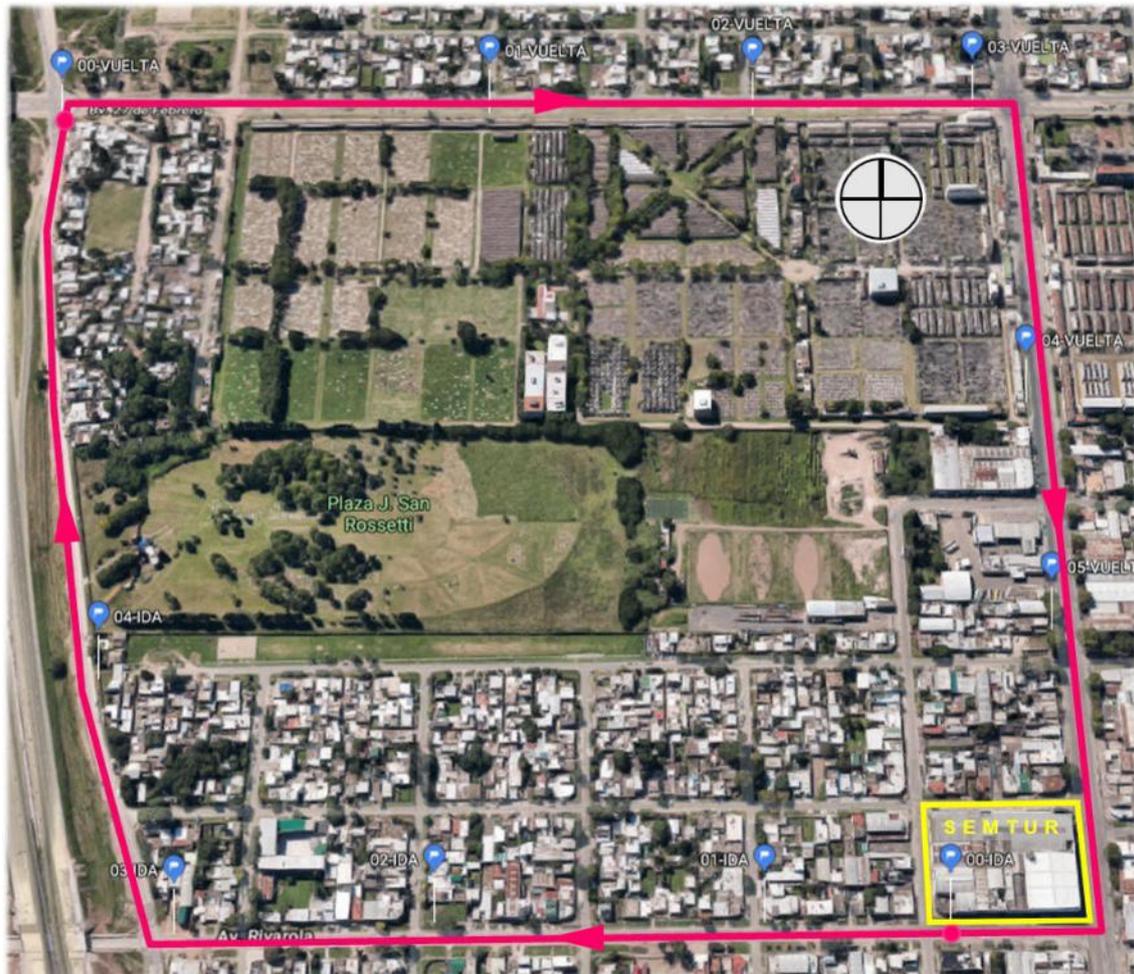


Figura 5 - Circuito urbano de ensayo

Con el procedimiento normal de SEMTUR se estimó la longitud del circuito utilizando el software web Google Earth® obteniendo una distancia de 2.842 metros (+/- 50 metros) considerando un recorrido teórico lineal en el centro de la calzada. Posteriormente se procedió a medir la longitud del circuito con un odómetro recorriendo el margen interno del circuito, verificándose una longitud de 2.830 metros (-0/+6 metros). Se adopta así como longitud mínima del recorrido 2.836 metros. Si bien las unidades no se desviaron en ningún caso del recorrido propuesto (por ejemplo por cortes de tránsito, accidentes, etc.) la circulación real de cualquier unidad ocurre de manera sinuosa dentro de una franja del ancho de la calzada, por lo que el recorrido real difiere en más del teórico o mínimo. Se procedió a medir con el odómetro una trayectoria sinuosa mínima promedio de una unidad en un intervalo de 400 metros lineales, obteniéndose una medición de 404 metros. Con este valor se estableció para el circuito un factor mínimo de rectificación de 404/400 por lo que la longitud a los efectos de los ensayos resultó 2864 metros. Esta distancia recorrida en 15 minutos resulta en una velocidad promedio de circulación de 11,46 km/h.



La zona elegida es adyacente a las instalaciones de SEMTUR, tiene baja muy baja densidad de tráfico por lo que se tuvo equivalencia de circulación, siendo el factor de mayor peso y equalizador las paradas obligatorias, igualando las situaciones de parada y arranque. Se solicitaron a SEMTUR 3 choferes calificados que previamente al ensayo tuvieron una instancia de capacitación y pruebas en el manejo del Bus Hybrido InnovaRosario01, ya que no dispone de caja de cambios, operándose marcha y detención principalmente con el pedal acelerador y operación diferente de lo usual del pedal de freno mecánico.

### **2.2.3 Adaptación del método gravimétrico**

El método de pesaje de combustible antes y después de un recorrido independiza la medición de la temperatura del gasoil y permite medir con precisión el combustible consumido. La cantidad de combustible consumido se determina pesando el combustible antes y después de un recorrido. El método de pesaje, o su equivalente por cuantificación de repostaje a lleno, son ampliamente utilizados dado que ofrecen mayor precisión que aquellos que utilizan caudalímetros [10]. Para la medición de combustible se adoptó el método gravimétrico por la precisión de la medición y por factores económicos y de restricciones tanto económicas como de disponibilidad para la adquisición de 3 caudalímetros diferenciales digitales (y su respectiva calibración). Para el pesado del combustible se seleccionó una balanza digital portátil de 150 kg de capacidad máxima y precisión de 20 gr con alimentación de 12VCC. Para la manipulación, medición y certificación del combustible se dispuso de 3 bidones plásticos de 60 litros de capacidad conectados al motor a través de 2 mangueras paralelas para alimentación y retorno de combustible. Para ello se solicitó a SEMTUR la modificación transitoria de las conducciones de alimentación y retorno de combustible anulando los tanques de los chasis e ingresando al habitáculo las dos mangueras paralelas que permitieron tanto la normal circulación de las unidades como también pesar los bidones externamente a las unidades por la puerta trasera (aún con el motor en funcionamiento) como se observa en la Figura 3.

### **2.2.4 Análisis del combustible utilizado**

Se tomaron muestras de los combustibles utilizados provistos por SEMTUR y se enviaron a analizar en laboratorio químico un litro de muestra de cada combustible en envases identificados con "1" y "2". De dichos análisis se obtuvieron los valores de densidad.

### **2.2.5 Circulación solo chofer y con carga simulación pasajeros**

Se realizaron dos circulaciones de medición. La primera solo con chofer durante 90 minutos continuos completando 6 recorridos de 15 minutos con las 3 unidades circulando simultáneamente con separación de 5 minutos entre ellas. La segunda con carga de bolsas de arena simulando pasajeros durante 45 minutos continuos completando 3 recorridos de 15 minutos con las 3 unidades circulando simultáneamente con separación de 5 minutos entre ellas.



### 3. RESULTADOS OBTENIDOS

#### 3.1 Consumo de combustible

##### 3.1.1 Consumo másico

El consumo másico se calcula mediante la Ecuación 1, en la que  $C_m$  = consumo másico [kg/km],  $M_c$  = masa de combustible [kg],  $D_r$  = distancia recorrida [km].

$$C_m = M_c / D_r \text{ [kg/km]} \quad (1)$$

Utilizando la precisión de la balanza, de  $\pm 20$  gramos y estimando para la distancia recorrida una precisión de  $\pm 10$  metros por vuelta al circuito propuesto, se calculó el error relativo del consumo másico mediante la Ecuación 2, donde  $\Delta M_c$  = error máximo esperado de la medición del peso del combustible [kg],  $\Delta D_r$  = error máximo esperado de la medición de distancia recorrida [km].

$$\text{Error relativo \%}C_m = ( \Delta M_c / M_c + \Delta D_r / D_r ) \times 100 \quad (2)$$

##### 3.1.2 Densidad

La densidad responde a la Ecuación 3 y su medición se realizó en laboratorio externo con una precisión de  $\pm 0,1\%$ .

$$\rho = \text{masa} / \text{volumen} \text{ [kg/litro]} \quad (3)$$

##### 3.1.3 Consumo específico

El consumo específico se calcula mediante la Ecuación 4, en la que  $C_e$  = consumo específico [litro/km],  $C_m$  = consumo másico [kg/km],  $\rho$  = densidad [kg/litro].

$$C_e = C_m / \rho \text{ [litro/km]} \quad (4)$$

El error relativo del consumo específico se calcula a partir del error relativo del consumo másico mediante la Ecuación 5, donde  $\Delta \rho$  = error máximo esperado del valor de la densidad [kg/litro].

$$\text{Error relativo \%}C_e = \text{Error relativo \%}C_m + \Delta \rho / \rho \times 100 \quad (5)$$

##### 3.1.4 Porcentaje de ahorro de combustible

Tomando como base el consumo del coche 188 (plataforma convencional motor Euro III) y asignando a éste un valor porcentual de 100% se calcula el porcentaje de ahorro de combustible mediante la Ecuación 6, donde  $P_{ac}$  = porcentaje ahorro de combustible [%],  $C_{mu}$  = consumo másico unidad considerada [kg/km],  $C_{m188}$  = consumo másico coche 188 [kg/km].

$$P_{ac} = 100 - ( C_{mu} \times 100 / C_{m188} ) \quad (6)$$

El error relativo del porcentaje de ahorro de combustible se calcula a partir del error relativo del consumo másico mediante la Ecuación 7.

$$\text{Error relativo \%}P_{ac} = \text{Error relativo \%}C_{m188} + \text{Error relativo \%}C_{mu} \quad (7)$$



A partir de los datos relevados de distancia recorrida, peso del combustible consumido, densidad del combustible se calcularon indicadores relativos al consumo de combustible que fueron presentados en la tabla de resultados finales que se muestra en la Figura 6.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura  
Escuela de Ingeniería Mecánica



FCEIA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS,  
INGENIERÍA Y AGRIMENSURA

**Tabla resultados ensayos comparativos indicadores de consumo de combustible y emisiones equivalentes CO<sub>2</sub>**

Coche	Peso coche [kg]	Carga adicional [kg]	Recorrido total [km]	Combustible grado N	Combustible consumido [kg]	Densidad a 15°C [kg/dm <sup>3</sup> ]	Consumo máscico [kg/km]	Grupo CNRT Res. 23/03	Consumo específico [lt/km]	% ahorro combustible	Rendimiento [km/lt]	Incremento de rendimiento [%]	Emisiones CO <sub>2</sub> equivalentes [kgCO <sub>2</sub> /km]	Reducción CO <sub>2</sub> equivalente [%]
<b>188</b>	9.240	0	17,184	2	5,54	0,854	0,32	5	0,38	0,0	2,65	0,0	1,05	0,0
<b>420</b>	10.640	0	17,184	3	4,78	0,846	0,28	4	0,33	13,7	3,04	14,8	0,92	12,9
<b>Hibrido</b>	10.060	95	17,184	2	4,30	0,854	0,25	3	0,29	22,4	3,41	28,8	0,82	22,4
<b>188</b>	9.240	993	8,592	2	2,80	0,854	0,33	5	0,38	0,0	2,62	0,0	1,06	0,0
<b>420</b>	10.640	999	8,592	3	2,50	0,846	0,29	4	0,34	10,7	2,91	11,0	0,96	9,9
<b>Hibrido</b>	10.060	1.093	8,281	2	1,86	0,854	0,22	3	0,26	31,1	3,80	45,1	0,73	31,1
Error de medición	± 0,5%	± 0,1%	± 0,36%	----	± 1,1%	± 0,1%	± 1,4%	----	± 1,5%	± 2,4%	± 1,5%	± 2,4%	± 1,5%	± 2,4%



ING. DANIEL ADÉS  
Director Ing. Mecánica  
FCEIA-UNR

Los porcentajes de ahorro de combustible, incremento de rendimiento, y reducción de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> se calcularon tomando como base 100% los datos del coche 188.  
Ensayos realizados en un recorrido urbano en condiciones de circulación equivalentes a las del transporte público según Planilla de Ruta SEMTUR N° 37913 del 30/01/18.  
El acondicionamiento previo y los ensayos se realizaron los días 29, 30 y 31 de enero de 2018 de 8:00 a 17:00 con base en las instalaciones de Semtur ubicadas en Av. Provincias Unidas y Av. Rivarola.

Figura 6 - Tabla resultados ensayos comparativos consumo de combustible



Los resultados plasmados en la figura 6 muestran claramente la disminución de consumo de combustible mediante la implementación de un sistema regenerativo oleohidráulico en unidades de transporte urbano de pasajeros. Se obtuvieron además resultados complementarios a lo solicitado como ser una adecuada categorización de las unidades por Grupo según CNRT Res. 23/20. Los datos relevados permitieron también el cálculo teórico de emisiones y rendimientos (se omiten en el presente trabajo por una cuestión de extensión).

#### 4. CONCLUSIONES

- La adaptación del método gravimétrico resultó adecuada, permitiendo determinar valores precisos de consumo de combustible aún en distancias relativamente pequeñas.
- Las mediciones comparativas realizadas y los resultados obtenidos muestran que el Bus Hybrido InnovaRosario01 efectivamente reduce el consumo específico de combustible en hasta un 31% respecto de las unidades convencionales.
- Se aclara que en la tabla de Figura 6 se presentan valores relativos a otras variables, por ejemplo, lo referido a las emisiones y al rendimiento que también fueron abordados en el informe presentado a SEMTUR, pero que por razones de espacio no fueron incluidos en este trabajo.
- El apagado del motor de combustión interna mientras el Bus Hybrido se encuentra detenido, además de no producir emisiones elimina la contaminación sonora y disminuye la radiación térmica en las proximidades y en el lugar de las paradas, disminuyendo o eliminando molestias a transeúntes y pasajeros en espera en las paradas.

#### 4.1 Propuestas

En la continuidad del desarrollo del Bus Hybrido InnovaRosario01 realizan las siguientes observaciones y sugerencias:

- Relevar con sistema GPS de precisión perfiles representativos de circulación en el sistema de transporte público de pasajeros para diseñar perfiles locales de circulación.
- Realizar mediciones y/o ensayos de consumo en condiciones más extensas de tiempo y distancia (día, noche, condiciones climáticas, etc.). Esto permite reducir la incertidumbre inherente a las mediciones.
- La modalidad de conducción de cada chofer tiene influencia en el consumo, por lo tanto se propone realizar mediciones y/o ensayos rotando a los choferes entre las distintas unidades.
- La Resolución 1147/14 CNRT Anexo II establece para los ensayos de consumo específico "todos los asientos ocupados y dos (2) pasajeros por metro cuadrado de pasillo" que estimamos como una carga de 1750 a 2500 kg. Por limitaciones operativas solo se pudieron ensayar las unidades con una carga de 1000 kg, verificando el aumento de consumo en las convencionales y disminución en el Híbrido. Se sugiere realizar ensayos con mayor carga,



por ejemplo 1750 y 2500 kg a fin de determinar factores de corrección de consumo respecto de la circulación sin carga.

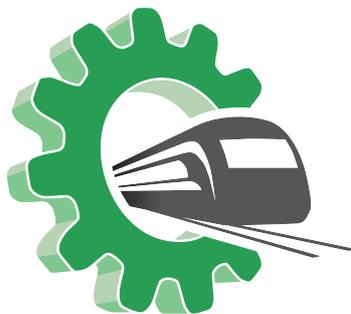
- Se propone analizar la posibilidad de realizar mediciones y/o ensayos de consumo de combustible en condiciones de carga variable (ascenso y descenso de pasajeros).
- Instalar en el Bus Hybrid InnoVaRosario01 un caudalímetro diferencial digital para medir y registrar el consumo de combustible. Este instrumento permitirá mejorar el proceso de optimización en las estrategias de control de la electrónica de mando e incidirá en la reducción del consumo.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Rydberg, K. E. *Energy efficient hydraulic hybrid drives*. In 11:th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'09, June 2-4 2009, Linköping, Suecia.
- [2] de Groot, J. P. *Tecnología de los circuitos hidráulicos*. CEAC. Barcelona. 1997.
- [3] González Calleja, D. *Motores térmicos y sus sistemas auxiliares*. Paraninfo. Madrid. 2015.
- [4] Nunige O. *Evaluación y comparación de métodos de medición de consumo de combustible para laboratorio y ruta en un vehículo liviano*. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2018.
- [5] Cummins. *Manual de Diagnóstico y Reparación Motores ISL y QSL9*. Cummins Engine Company. USA. 2000.
- [6] González-Oropeza, R. *Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte*. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología VI. 3. 147-162. México. 2005.
- [7] Espimbera Morales D. *Estudio de los ciclos de conducción para determinar parámetros de manejo en condiciones reales de operación mediante la metodología Micro-Trip*. Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador, 2018.
- [8] Resolución 1176/2014. Categorías de consumo específico aplicadas a los chasis. Comisión Nacional de Regulación del Transporte. Argentina. 2014.
- [9] Resolución 23/2003. Combustibles. Secretaría de Transporte. Argentina. 2003.
- [10] Rojas, D. *Medición del consumo de combustible en un bus articulado de la empresa Integra SA operadora del sistema integrado de transporte Megabús*. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 2016.

Área Temática

# Materiales





## CORROSIÓN ACELERADA DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 316L PREVIAMENTE SENSIBILIZADO

Mariano N. Inés <sup>1</sup> y Graciela A. Mansilla <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Línea de Metalurgia Física, Departamento Ingeniería Metalúrgica/DEYTEMA.  
Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional. Colón 332, San Nicolás de  
los Arroyos (2900), Pcia. Buenos Aires. Argentina.  
mines@frsn.utn.edu.ar – gmansilla@frsn.utn.edu.ar

### RESUMEN

El estudio de la corrosión que sufren muchas estructuras y elementos construidos a base de acero inoxidable cuando en servicio se los somete a condiciones de trabajo no ideales (atmósferas agresivas) es un tema de creciente interés en la literatura. Largos tiempos de exposición a elevadas temperaturas (450°C a 850°C) pueden generar que la resistencia del límite de grano pueda verse afectada por la precipitación de carburos intergranulares (principalmente,  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$ ), y en especial la formación de fase sigma, responsables del daño intergranular en este tipo de acero. Entonces, especial atención debe prestarse ya que estos carburos son sensibles a la captura del hidrógeno originado como consecuencia de reacciones corrosivas.

En este trabajo se evalúa el comportamiento microestructural de un acero inoxidable AISI 316L sometido a ensayo de corrosión acelerada, considerando distintos tiempos de exposición a una atmósfera salina, esto es, 8h, 50h y 96h. Las muestras fueron previamente solubilizadas a 1100°C durante 1h, y luego enfriadas en agua y otras en aire. Posteriormente, éstas fueron sensibilizadas isotérmicamente a 650°C durante 6h, con enfriamiento lento en horno.

Del análisis microestructural realizado en las muestras sensibilizadas, se determinaron ataques intensos en bordes de grano austenítico, posiblemente atribuidos a la precipitación de partículas submicroscópicas de carburos de cromo y fases intermetálicas. Ahora bien, como resultado de los ensayos de corrosión, se destaca que, la mayor velocidad de degradación y pérdida de masa por unidad de tiempo (en un ambiente altamente clorado) la evidenció la muestra con enfriamiento en aire, en comparación con su par enfriada en agua.

En una etapa posterior, se analizará el posible ingreso de hidrógeno y su impacto como consecuencia de los ensayos de corrosión en niebla salina llevados a cabo en AISI 316L bajo las condiciones experimentales definidas en este trabajo.

**Palabras clave:** Corrosión; Niebla Salina; Acero Inoxidable; Carburos; Tratamientos Térmicos.



## 1. INTRODUCCIÓN

La familia de aceros inoxidable se clasifica con frecuencia en austeníticos, dúplex, ferríticos, martensíticos y aleaciones endurecibles por precipitación, pero, sin embargo, son los aceros inoxidable del tipo austenítico el grupo más grande en término de cantidad de aleaciones, y consecuentemente, el que mayor número de aplicaciones posee. Debido a su excelente combinación de propiedades mecánicas y alta resistencia a la corrosión, este tipo de aceros inoxidable constituye uno de los materiales preferidos en aplicaciones para las industrias siderúrgica, química, petroquímica y nuclear, entre otras [1]. La más utilizada es la serie AISI 300, formada por un sistema de aleaciones de Fe-Cr-Ni.

No obstante las innumerables ventajas que poseen estos aceros inoxidable, debe considerarse también que los mismos están sujetos a degradación causada principalmente por tratamientos térmicos de envejecimiento (exposiciones prolongadas a determinadas temperaturas) que podrían poner al límite la vida útil de estos materiales en servicio. Dentro de las posibles alteraciones microestructurales posibles de ser obtenidas por exposiciones térmicas prolongadas, la precipitación de partículas de carburos y de fases intermetálicas presentan un rol determinante, pues no siempre son estables, y van evolucionando conforme se acentúa el envejecimiento [2].

Entre las posibles formas de corrosión atribuidas a los aceros inoxidable, la literatura señala la corrosión intergranular, por picaduras y el agrietamiento por corrosión bajo tensiones dentro de las principales. No obstante, el mecanismo localizado de corrosión intergranular es el más frecuentemente encontrado e importante que afecta el comportamiento en servicio de estas aleaciones metálicas.

En muchos aceros inoxidable austeníticos, la precipitación de partículas de  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  conlleva a una mayor sensibilidad del acero a corroerse intergranularmente bajo condiciones nocivas de trabajo, [3]. Esta precipitación se origina luego del tratamiento en solución ( $1000^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$ ) y envejecimiento (en el orden de los  $450^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C}$ ) con posterior enfriamiento lento en aire. Esto genera un estado de sensibilización microestructural, debido a una difusión inicial de cromo en las cercanías a los bordes de grano, creando zonas empobrecidas de este metal en la microestructura del acero inoxidable [4] que dificulta la regeneración de la capa de óxido de cromo protectora, dejando al material en un estado de sensibilidad tal que, bajo condiciones de trabajo no ideales (esto es, exposiciones continuas a altas temperaturas, ciertas atmósferas, y tensiones mecánicas) puede dar lugar a una disolución activa y preferencial de los bordes de grano, mediante la activación de mecanismos de corrosión, preferentemente localizados, sobre el material. De esta manera, el material puede llegar a corroerse a velocidades cercanas a las del acero al carbono y el hierro puro [5]. Por lo tanto, en la condición sensibilizada, los aceros



inoxidables son bastante susceptibles a la corrosión intergranular y al agrietamiento por corrosión bajo tensiones que puede resultar en fallas prematuras de los componentes fabricados [1].

En este trabajo se evalúa la susceptibilidad a la corrosión intergranular de un acero inoxidable AISI 316L sometido a ensayo de corrosión acelerada, en Cámara de Niebla Salina, de acuerdo con ASTM B117 e ISO 9227 [18], y limpieza mecánica y química posterior a la prueba bajo la norma ASTM G1 [19].

## 2. EXPERIMENTAL

En este trabajo se utilizaron muestras planas de acero inoxidable austenítico AISI 316L. La composición química se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero inoxidable AISI 316L.

Composición	C	Si	Cr	Mn	Ni	Mo	Fe
[%Masa]	0,032	0,65	17,2	1,50	10,7	2,57	Bal.

Inicialmente, sobre el material en condición *as-received* (AR) se realizó tratamiento de recocido de solubilización a 1100°C durante 1h, con enfriamiento posterior en aire (TTSa) y en agua (TTSw). Posteriormente, ambos conjuntos de muestras fueron sensibilizadas isotérmicamente a 650°C durante 6h, con enfriamiento lento en horno (muestras TTSa+ST y TTSw+ST). El propósito de estos tratamientos fue identificar la condición más susceptible de ataque intergranular atendiendo a condiciones de servicio propias de estos aceros.

Luego de esto, muestras en estado AR y con tratamiento térmico de sensibilización se colocaron en una máquina de niebla salina DIGIMESS modelo QSS-108. Las pruebas se desarrollaron de acuerdo con las normas ASTM B117 e ISO 9227 [6]. Las muestras fueron expuestas a solución de NaCl al 5% considerando extracciones periódicas a intervalos de 8h, 50h y 96h.

Considerando los tiempos definidos previamente, se extrajeron muestras de la cámara para evaluar la pérdida de masa siguiendo el procedimiento explicado por los autores en [7]. Finalmente, para evaluar el deterioro del material, se calculó la velocidad de corrosión mediante la ecuación (1).

$$Velocidad\_de\_corrosión\left(\frac{g}{m^2h}\right) = K \cdot \Delta W / A \cdot T \cdot D \quad (1)$$

donde  $K$  representa una constante del material,  $\Delta W$  refiere a la pérdida de masa (en gramos),  $A$  es el área de la muestra,  $T$  representa el tiempo de exposición y  $D$  es la densidad del material.



Se emplearon métodos convencionales de caracterización con lupa estereoscópica (Olympus SZ61) y microscopía óptica (Olympus GX51). Para esta última, las muestras fueron inicialmente seccionadas con cortadora ultralenta de manera de no dañar características superficiales e internas (microestructurales) de la muestra, luego se las incluyó en resina fenólica termoplástica, empleando temperatura y presión. Se realizó desbaste grueso, fino y muy fino en pulidora metalográfica con papeles de SiC de granulometrías: 400, 600, 1000 y 1200. Para el ataque o revelado de la microestructura se empleó reactivo de Agua Regia diluida, el cual permitió determinar la evolución microestructural del material con los distintos tratamientos térmicos y analizar caminos preferenciales de avance de la corrosión interna.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis microestructural realizado en muestras del acero inoxidable AISI 316L en condición *as-received* (Figura 1a) se determinó un tamaño de grano austenítico de 35,3  $\mu\text{m}$ , con escasa presencia de carburos de cromo (tamaño medio 2-3 micrones), siendo su ubicación mayoritaria en posiciones transgranulares y algunos aislados en bordes de grano. Se detectaron alineamientos de partículas de carburos, que, en algunos casos, presentaron una longitud de 140-160 micrones. Además, se detectó escasa cantidad de inclusiones de geometría poligonal (tamaño 4-6 micrones), de aspecto frágil, decohesionadas de la matriz metálica, y presencia de maclas atribuidas al proceso de deformación al que fuera sometido el material.

Ahora bien, como consecuencia del tratamiento de recocido de solubilización llevado a cabo, e independientemente del medio de enfriamiento empleado, ambos conjuntos de muestras (TTSa y TTSw) evidenciaron una microestructura con menor cantidad de carburos frente al material en condición AR, de acuerdo con análisis de micrografías tomadas con microscopía óptica sobre regiones superficiales, sub-superficiales e internas del material – Figuras 1b y 1c. Respecto de la caracterización microestructural postratamiento de sensibilización (esto es, en muestras (TTSa+ST y TTSw+ST), los bordes de granos austeníticos quedaron perfectamente atacados por el reactivo de revelado, denotándose éstos ligeramente más gruesos, debido posiblemente a la formación submicroscópica de partículas secundarias de carburos y otras fases intermetálicas en estas posiciones, Figuras 1e y 1f. Empleando iluminación con luz polarizada, en la Figura 1d, se revela claramente la gran densidad de partículas de carburos ubicadas en bordes de grano austeníticos, determinados como puntos brillantes en estas posiciones. Ahora bien, sobre estas muestras (TTSa+ST y TTSw+ST) se realizaron ensayos de microdureza Vickers, los que confirmaron un aumento del 32% en los valores determinados en las muestras TTSw+ST, respecto de aquellas en condición AR. Este aumento pone de manifiesto la nucleación y crecimiento de las partículas de carburos y fases intermetálicas. La literatura reporta que para este mismo tipo de acero inoxidable (AISI 316) sometido a recocido de solubilización a 1100°C,

durante 1 hora, seguido de enfriamiento en agua, y luego colocado en horno a 650°C/700°C por 10 horas, se origina la precipitación en bordes de grano de carburos del tipo  $M_{23}C_6$  y fase sigma. Sin embargo, en la muestra solubilizada a 1100°C/1h con enfriamiento en aire y posterior tratamiento a 650°C/6h (esto es, TTSa+ST), no pudo hallarse una variación significativa de la microdureza respecto de la condición inicial (AR), muy probablemente relacionado esto con la baja severidad del enfriamiento en aire que no permitió obtener un estado sobresaturado de soluto en los granos austeníticos, y, por lo tanto, el material no respondió efectivamente al tratamiento posterior de sensibilización.

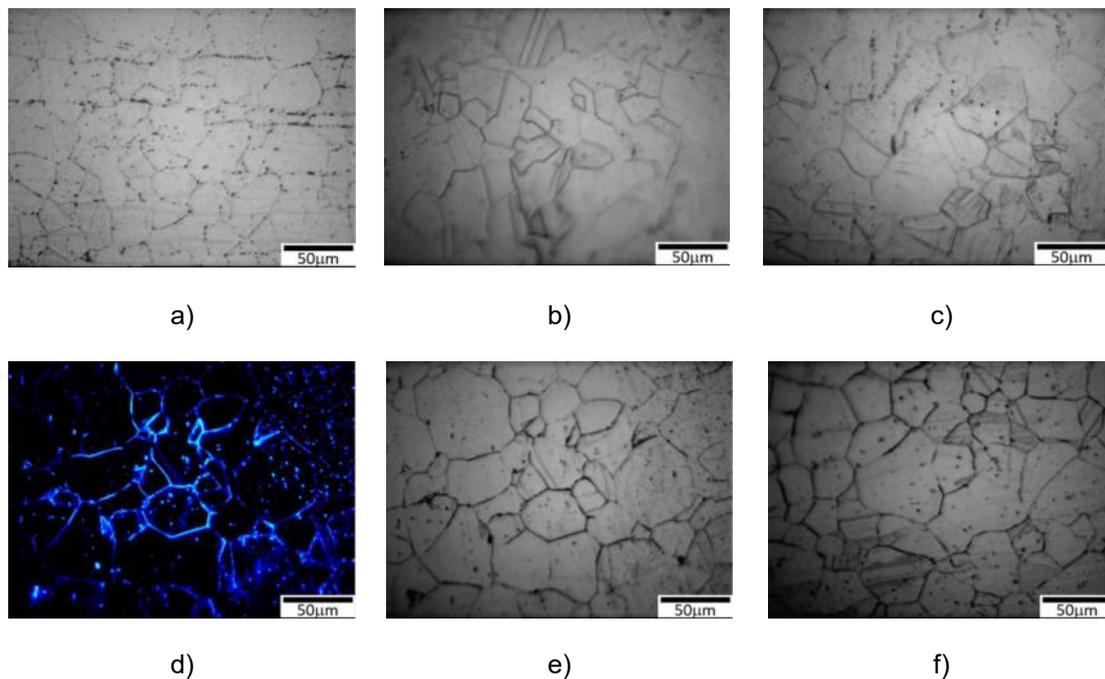


Figura 1: Estado microestructural de AISI 316L en condición: a) AR, b) TTSw, c) TTSa, d) TTSw+ST (imagen con luz polarizada), e) TTSw+ST, y f) TTSa+ST.

Ahora bien, luego del ensayo de corrosión acelerada, se caracterizó con lupa estereoscópica el estado superficial presentado por las muestras sometidas a la atmósfera salina durante 8h, 50h y 96h, Figura 2. Como resultado, las muestras en condición as-received (es decir, sin tratamiento térmico) presentaron escasa cantidad de óxidos en superficie para todo el intervalo de tiempo considerado. Sin embargo, y contrariamente a lo evidenciado en las muestras descritas anteriormente, en aquellas con tratamiento térmico de sensibilización, se manifestaron gran cantidad de óxidos en superficie.

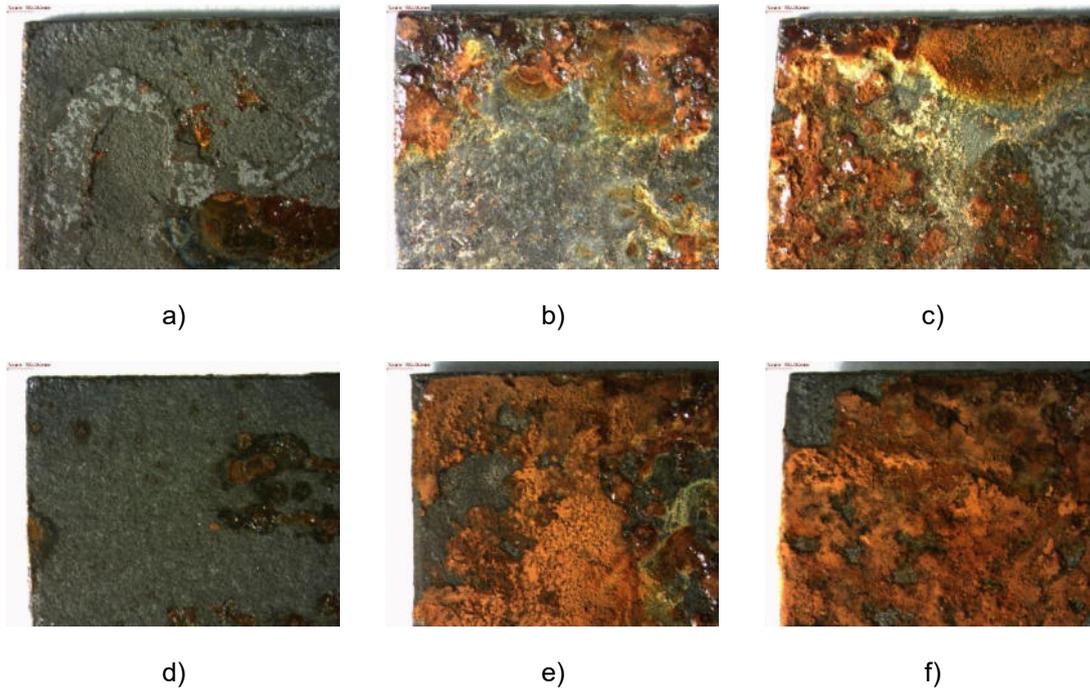


Figura 2: Estado superficial de muestras TTSw+ST (a,b,c) y TTSA+ST (d,e,f), pos-ensayo de corrosión acelerada en niebla salina: a-d) 8h, b-e) 50h y c-f) 96h de exposición al spray salino. Magnificación [6,7x]

Nótese como a partir de los resultados de cuantificación de óxidos, Figura 3, se determinó un aumento de éstos frente a incrementos en el tiempo de exposición a la atmósfera salina, para todas las muestras con tratamiento térmico.

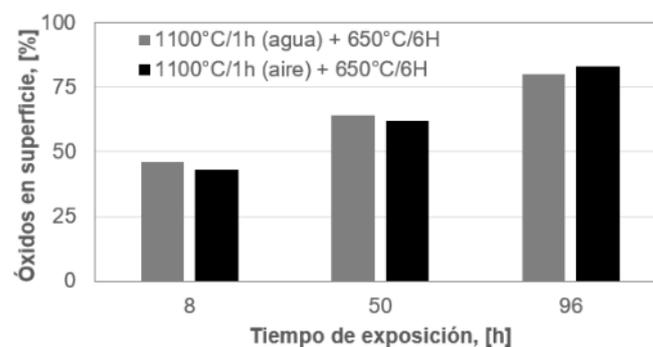


Figura 3: Cuantificación de óxidos en superficie en función del tiempo de exposición al spray salino y del tratamiento térmico previo aplicado.

Del gráfico anterior, también quedó en evidencia que el tipo de enfriamiento (en aire o agua) aplicado posterior al tratamiento de solubilización no generó una variación sustancial en la



cantidad de óxidos formados en superficie, por el contrario, se observa cantidad similar para ambas historias térmicas.

Respecto de los productos de la corrosión desarrollados, éstos fueron más evidentes en las muestras sometidas a los mayores tiempos de exposición a la solución salina, esto es, 50h y 96h. La pátina obtenida, en tonos naranjas, amarillos y rojos, se puede observar en todas las muestras analizadas (Figuras 2b-2c-2e-2f). La literatura reporta que, en los aceros inoxidables, las películas de óxido se componen principalmente de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ . [8-10], pero que son los óxidos ricos en hierro los más nocivos, mientras que un material con óxido rico en cromo es más resistente a los ataques de corrosión, [11]. Las formaciones de estos óxidos podrían obedecer al hecho de que la presencia de iones cloruros (con una alta difusividad) provocan la degradación de la película pasiva compacta de óxido de cromo en regiones con cierto tipo de heterogeneidad metalúrgica y con ello, activan mecanismos de corrosión localizada, como, por ejemplo, aquella del tipo intergranular y por picado [12].

Ahora bien, considerando que la mayor cantidad de óxidos en superficie se presentó para las muestras con 96h de exposición a la niebla salina, en la Figura 4 se presentan imágenes de microscopía óptica de sectores superficiales y sub-superficiales de estas muestras para evaluar la posible degradación microestructural.

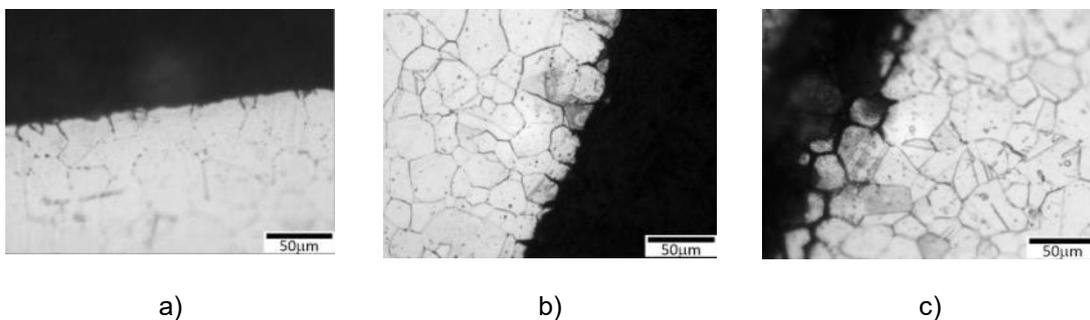


Figure 4: Avance de la degradación intergranular en AISI 316L, en muestras: a) AR, b) TTSw+ST, y c) TTSA+ST.

Según las micrografías de la Figura 4, en todas ellas se aprecia daño intergranular, no obstante, en las tratadas térmicamente (Figura 4b y 4c) la degradación fue mayor. De su análisis se pudo determinar una profundidad de avance de la corrosión (intergranular) de hasta 35 micrones para la muestra que había sido previamente solubilizada a  $1100^\circ\text{C}/1\text{h}$  con enfriamiento en agua y posterior tratamiento de sensibilizado a  $650^\circ\text{C}/6\text{h}$ . Sin embargo, en las muestras con tratamiento inicial de  $1100^\circ\text{C}/1\text{h}$  con enfriamiento en aire y posterior sensibilizado a  $650^\circ\text{C}/6\text{h}$ , el avance fue sustancialmente mayor, representando en zonas localizadas una profundidad de avance de hasta 350 micrones. Como es bien sabido, se dan muchos cambios microestructurales en la fase



austenítica recocida en el rango de los 500°C – 900°C dependiendo de la composición química y tiempo de exposición. Nuevas fases se nuclearán y crecerán en sitios de alta energía, tales como bordes de grano, bordes de maclas y dislocaciones [13]. De acuerdo con ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) llevados a cabo para poder identificar las partículas de carburos y fases intermetálicas formadas en las muestras de este trabajo, se atribuye el gran avance de la corrosión en la muestra TTSa+ST (enfriada en aire) a la presencia de carburos del tipo  $M_{23}C_6$  bajo la condición que sensibilizan al acero a la corrosión intergranular, signos que no se observaron en la muestra con enfriamiento en agua. Estos carburos serían los responsables del gran avance del fenómeno corrosivo, provocando fragilización del material alcanzando incluso la decohesión de los granos. Este resultado coincide con lo manifestado por [13] en su estudio acerca de los tipos de precipitados y la corrosión intergranular en un acero AISI 316L. Por otro lado, el aumento de la microdureza originado en las muestras TTSw+ST (con enfriamiento severo en agua), podría deberse a partículas de carburos (MC y  $M_2C$ ) halladas en el material, que según la literatura son responsables de generar un control del tamaño de grano y aumento de la resistencia mecánica en estos aceros.

Para finalizar, en la Figura 5 se evidencia el comportamiento de la velocidad de corrosión para cada condición de muestra, es decir, sensibilizada con tratamiento previo a 1100°C, durante 1 hora, y enfriamiento posterior en agua o aire, es decir, muestras TTSw+ST y TTSa+ST. Se aclara que los datos correspondientes a las muestras en condición AR no se graficaron pues la pérdida de masa fue despreciable frente a aquellas con tratamiento térmico. De ésta se aprecia que el máximo en la tasa de corrosión se da dentro de las primeras 8 horas de exposición a la atmósfera salina, luego la misma descende marcadamente hasta las 50 horas, para finalmente mantenerse prácticamente constante hasta alcanzar el máximo de duración del ensayo (96 horas).

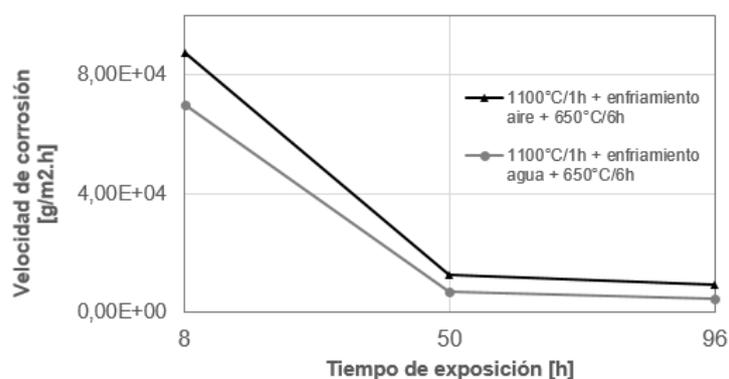


Figura 5: Velocidad de corrosión de las muestras

Si bien las muestras bajo ambas condiciones registraron un comportamiento similar, aquella con enfriamiento en aire fue la que presentó los valores más altos de velocidad de corrosión frente a



su par con enfriamiento en agua. Esto podría obedecer a la mayor cantidad de precipitados obtenidos a partir del tratamiento térmico y, al tipo de carburo determinado por DRX. Es decir, que los carburos del tipo  $M_{23}C_6$  detectados reducen marcadamente la resistencia a la corrosión del acero inoxidable al decromizar zonas cercanas a los bordes de grano. De esta forma, dejan al acero en estado de susceptibilidad a la corrosión bajo condiciones de servicio no ideales, por ejemplo, en atmósfera de niebla salina, al generar zonas sensibles al ataque de los iones cloruro, favoreciendo así la ruptura de la película pasivante protectora y acelerando la reacción de corrosión [14-16]. Debe tenerse en cuenta que la estabilidad de la película dependerá de la relación Cr/Fe, del óxido metálico de mayor valencia formado y de la concentración de defectos, [17-23].

Para finalizar, el avance del daño intergranular manifestado por esta muestra (de aproximadamente 1000% respecto de la muestra con enfriamiento en agua) está en consonancia con la mayor velocidad de corrosión determinada.

#### 4. CONCLUSIONES

Como resultado de los tratamientos térmicos previos en muestras de acero inoxidable AISI 316L, la velocidad de corrosión fue mayor para aquellas enfriadas en aire.

Los tiempos de exposición al spray salino más prolongados favorecieron el desarrollo de corrosión intergranular en zonas de bordes de grano como consecuencia de la decromización originada por la precipitación de carburos de cromo del tipo  $M_{23}C_6$ . Se determinó que la muestra con tratamiento de solubilización a 1100°C, durante 1h, enfriada en aire y posterior tratamiento de sensibilización fue la que mayor daño microestructural presentó al finalizar el ensayo de corrosión acelerada.

#### REFERENCIAS

- [1] Dománková M., Kocsisová E., Slatkovský I., Pinke P. *The Microstructure Evolution and its Effect on Corrosion Properties of 18Cr-12Ni-2,5Mo Steel Annealed at 500-900°C*. Acta Polytechnica Hungarica, 11, 3, 125-137, 2014.
- [2] Xiong Q., Robson J. D., Chang L., Fellowes J. W., Smith M. C. *Numerical Simulation of Grain Boundary Carbides Evolution in 316H Stainless Steel*. Journal of Nuclear Materials, 508, 299-309, 2018, ISSN 0022-3115, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.074>.
- [3] Saremi M., Mahallati E. *A Study on Chloride-Induced Depassivation of Mild Steel in Simulated Concrete Pore Solution*. Cement and Concrete Research Journal, 32, 1915-1921, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00895-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00895-5).



- [4] R. Winston Revie y Herbert H. Uhlig. *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering, 4th Edition*. John Wiley & Sons, New York: Revie RW, 2008. ISBN: 978-0-471-73279-2.
- [5] Martins M., Casteletti L. C. *Microstructural Characteristics and Corrosion Behavior of a Super Duplex Stainless Steel Casting*. *Material Characterization*, 60, 2, 150-115, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.12.010>.
- [6] ASTM B117 – 07. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2003.
- [7] Bertucelli M. J., Inés M. N., Delpupo M. N., Mansilla G. A. *Corrosion Study in SAE 1016 Electrogalvanized Steel*. XI Corrosion Latinamerican Congress, Latincorr, 031, 23- 25, 2018.
- [8] Somervuori M., Johansson L. S., Heinonen M. H., Van Hoecke D. H. D., Akdut N., Hanninen H. E. *Characterisation and Corrosion of Spot Welds of Austenitic Stainless Steels*. *Materials and Corrosion*, 55, 6, 421-436, 2004.
- [9] Mc Carty K. F., Boehme D. R. *A Raman study of the systems Fe<sub>3-x</sub>Cr<sub>x</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>2-x</sub>Cr<sub>x</sub>O<sub>3</sub>*. *Journal of Solid State Chemistry*, 79, 1, 19-27, 1989.
- [10] Gonzales S., Combarmond L., Tran M. T., Wouters Y., Galerie A. *Materials Science Forum*, 595-601, 2008.
- [11] Von Moltke T., Pitsorius P. C., Sandenbergh. *The Influence of Heat-Tinted Surface Layers on the Corrosion Resistance of Stainless Steels*. *Proceedings of the 1st International Chromium Steel and Alloy Congress*, 2, 185-195, 1992.
- [12] Frankel G.S. *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. 13A, *ASM Handbook*, ASM International, 236–241, 2003.
- [13] Sahlaoui H., Makhlof K., Sidhoma H., Philibert J. *Effects of Aging Conditions on the Precipitates Evolution, Chromium Depletion and Intergranular Corrosion Susceptibility of AISI 316L: Experimental and Modeling Results*. *Materials Science and Engineering, A*, 372, 98–108, 2004.
- [14] Abd Rashid M. W., Gakim M., Rosli Z. M., Asyadi Azam M. *Formation of Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> During the Sensitization of AISI 304 Stainless Steel and its Effect to Pitting Corrosion*. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 9465 – 9477, 2012.
- [15] Rodríguez C. J., Figueroa Y., Prin J. *Efecto de la Temperatura en el Comportamiento del Acero Inoxidable Austenítico 316L frente a la Corrosión Electroquímica*. *Universidad de Oriente, Venezuela*, 25, 3, 302-308, 2013.



- [16] Afolabi A., Peleowo N. *Effect of Heat Treatment on Corrosion Behaviour of Austenitic Stainless Steel in Mild Acid Medium*. Anales de International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences, 2011.
- [17] Maurice V., Yang W. P., Marcus P. *X-Ray Photoelectron Spectroscopy and Scanning Tunneling Microscopy Study of Passive Films Formed on (100) Fe<sub>18</sub>Cr-13Ni Single-Crystal Surfaces*. Journal of the Electrochemical Society, 145, 909–920, 1998.
- [18] Fujimoto, S., Yamada, T., Shibata, T. *Improvement of Pitting Corrosion Resistance of Type 304 Stainless Steel by Modification of Passive Film with Ultraviolet Light Irradiation*. Journal of the Electrochemical Society, 145, 79–81, 1998.
- [19] Maurice, V., Klein, L. H., Marcus, P. *Atomic-Scale Investigation of the Localized Corrosion of Passivated Nickel Surfaces*. Surface and Interface Analysis, 34, 139–143, 2002.
- [20] Maurice V. Marcus, P. *Passive Films at the Nanoscale*. Electrochimica Acta, 84, 129–138 2012.
- [21] Maurice V. Marcus, P. *Progress in Corrosion Science at Atomic and Nanometric Scales*. Progress in Materials Science, 95, 132–171, 2018.
- [22] Ohtsuka T., Ueda M., Abe M. *Aging of Passive Oxide on SUS304 Stainless Steel in a Sulfuric Acid Solution*. Journal of the Electrochemical Society, 163, 459–469, 2016.
- [23] Talha M., Ma Y., Lin Y., Pan Y., Kong X., Sinha O.P., Behera C.K. *Corrosion Performance of Cold Deformed Austenitic Stainless Steels for Biomedical Applications*. Corrosion Reviews, 37, 283–306, 2019.



## EFFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO GMAW-B EN JUNTA DISÍMIL DE ACERO-ALUMINIO

César Marconi<sup>1</sup>, Carlos Consigli<sup>1</sup>, Cristian Camperos<sup>1</sup> y Hernán Svoboda<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Metalurgia, Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional, Colon 332 (B2900LWH), San Nicolás, Buenos Aires, Argentina -  
cmarconi@frsn.utn.edu.ar – cconsigli@frsn.utn.edu.ar – ccamperos@frsn.utn.edu.ar

<sup>2</sup> GTSyCM3 – INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Paseo Colon 850 (C1063ACV) CABA, Argentina.

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Godoy Cruz 2290, Ciudad de Buenos Aires, Argentina - hsvobod@fi.uba.ar

### RESUMEN

El desarrollo e implementación de procesos de soldadura que permiten el uso de nuevos materiales de modo de minimizar el peso del vehículo de forma de limitar el nivel de emisiones nocivas para el medio ambiente, es un tópico de investigación de gran interés actual. Así, la soldadura de materiales disímiles es una demanda actual que presenta desafíos metalúrgicos, particularmente para uniones entre aceros y aleaciones de aluminio. Esto motiva su estudio en el presente trabajo a fin de generar conocimientos que aporten a la mejor comprensión de los fenómenos involucrados.

Se analizó la influencia de ciertas variables del proceso Gas Metal Arc Welding – Brazing (GMAW-B) en uniones de solape de un acero *dual phase* (DP) de 1000 MPa y una aleación de aluminio AA6063-T6 de 1,2 y 2 mm de espesor respectivamente. Las variables analizadas fueron: ángulo de desplazamiento (arrastre o empuje), velocidad de soldadura y velocidad de alimentación de alambre. Sobre las probetas soldadas se evaluó la macroestructura, la presencia de defectos, la integridad de la interfaz acero-aluminio y el comportamiento mecánico de la unión mediante ensayos de arrancamiento por corte.

Se observó un aumento de la carga de rotura con la disminución de la velocidad de soldadura, para la condición de arrastre. A su vez, la carga de rotura para esta condición fue superior que para el caso de empuje. Esto estaría asociado al aumento de la longitud de la interfaz acero-aluminio y el espesor promedio de la capa de compuestos intermetálicos en la misma.

**Palabras clave:** Soldadura GMAW-Brazing, Junta Disímil Aluminio-Acero, Intermetálicos.



## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de materiales de mayor resistencia y mayor tenacidad es un factor de vital importancia en diversas industrias. En particular, en el caso de los materiales metálicos, en las últimas décadas los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS) han encontrado un fuerte desarrollo. Así, aceros como los Dual Phase (DP) forman parte de esta familia de los AHSS, que presentan resistencias mecánicas entre 500 y 1200 MPa. A su vez, existe una preocupación creciente y una necesidad real de reducir los niveles de emisión de CO<sub>2</sub>, aspecto que se ha convertido en un requerimiento para la industria. Una de las alternativas para esto es utilizar materiales de mayor resistencia mecánica, de modo de poder disminuir los espesores empleados en ciertas partes, principalmente estructurales.

La soldadura ocupa un lugar primordial en la industria metalmeccánica siendo uno de los procesos de fabricación más empleados. La incorporación de nuevos y distintos materiales lleva a la necesidad constante de desarrollar o implementar nuevos procedimientos de soldadura capaces de realizar en forma eficiente (calidad y costo) las nuevas uniones soldadas requeridas y/o mejorar las uniones actualmente realizadas, en especial en materiales de alta y ultra-alta resistencia. En este sentido, recientemente, procesos como el Brazing empleando un arco eléctrico y alambre macizo protegido por gas (GMAW-B), han sido implementados con éxito en diversas plantas industriales del mundo y se prevé una mayor demanda para los próximos años. Debido a su microestructura los AHSS son sensibles al ciclo térmico de la soldadura, por lo que el desarrollo de procedimientos de soldadura adecuados es un aspecto de gran relevancia actual. Este proceso se presenta como una alternativa interesante para estos materiales ya que introduce un menor aporte de calor, y no se produce la fusión de los materiales base.

Además, el uso de aleaciones livianas es otra de las alternativas exploradas en los últimos tiempos, por lo que la incorporación de aleaciones de Aluminio y Magnesio ha crecido en componentes estructurales automotrices. Con el uso creciente de acero de alta resistencia y aleaciones de aluminio, las estructuras multimateriales son inevitables en la carrocería de los automóviles [1]. Sin embargo, la unión de materiales diferentes no es trivial, presentando en general dificultades adicionales. Las uniones Aluminio-Acero presentan baja soldabilidad debido a sus diferentes puntos de fusión, resistividad eléctrica, conductividad térmica y coeficientes de expansión térmica. Además, se forma una capa de compuesto intermetálico Al-Fe (IMC) en la interfaz, la cual puede afectar las propiedades mecánicas de la unión [2]. En general es escasa la información disponible respecto de la influencia de los parámetros de soldadura brazing en uniones Acero-Aluminio.



Esto motiva su estudio en el presente trabajo a fin de generar conocimientos que aporten a la mejor comprensión de los fenómenos involucrados. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del ángulo de desplazamiento (arrastre o empuje), velocidad de soldadura y velocidad de alimentación de alambre en uniones disimiles de acero DP de 1000 MPa de resistencia a la tracción de 1,2 mm de espesor con aleación AA6063T6 de 2 mm, soldadas por GMAW-B.

## 2. METODOLOGÍA

Como materiales base se utilizaron una chapa de 1,2 mm de espesor de acero DP de 1000 MPa de resistencia a la tracción y una chapa 2 mm de espesor de aleación de aluminio AA 6063T6, sobre las cuales se determinó la composición química mediante espectrometría de emisión óptica (OES) y se realizó la caracterización microestructural mediante microscopía óptica. Asimismo, se determinaron las propiedades mecánicas mediante mediciones de microdureza Vickers (HV1Kg) y ensayo de tracción uniaxial. En la Tabla 1 se muestra la composición química de los materiales empleados expresada en porcentaje en peso (wt%).

Tabla 1. Composición química de los metales base (wt%)(\*ppm)

Muestra	Al	Fe	Si	Mg	Ti	Mn	Cr	Cu	Zn
AA6063	97,2	0,75	0,80	0,55	0,04	0,08	0,05	0,19	0,11

Muestra	C	Mn	Si	P	S	Nb	Ti	V	B*	Al
DP1000	0,14	1,49	0,48	0,009	<0,001	0,016	0,003	0,006	3	0,039

En la Tabla 2 se muestran los resultados de las propiedades mecánicas de los materiales base empleados.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los metales base

HV: Microdureza Vickers. R: resistencia a la tracción. Rf: tensión de fluencia. A: alargamiento a rotura.

Probeta	HV	R (MPa)	Rf (Mpa)	A (%)
AA6063	83	216	180	11
DP1000	309	1032	753	10

Se observa que el acero corresponde a un material de alta resistencia, superando los 1000 MPa de resistencia a la tracción con una relación de R / Rf de 1,37, con un buen alargamiento a rotura. En el caso del AA6063T6 presenta una resistencia superior a los 200 MPa asociada al tratamiento térmico de solubilizado y envejecido.

En la Figura 1a se muestra la microestructura del acero base. Se aprecian las islas de martensita en una matriz de ferrita y tamaño de grano fino uniforme de 2 a 3  $\mu\text{m}$  de diámetro en todo el espesor de la chapa. El contenido de cada fase corresponde con un 57 % de ferrita y un 43 % de martensita. En la Figura 1b se muestra la microestructura de la aleación de aluminio

base de la serie 6000, la misma corresponde a una solución sólida de aluminio endurecida tratamiento térmico.

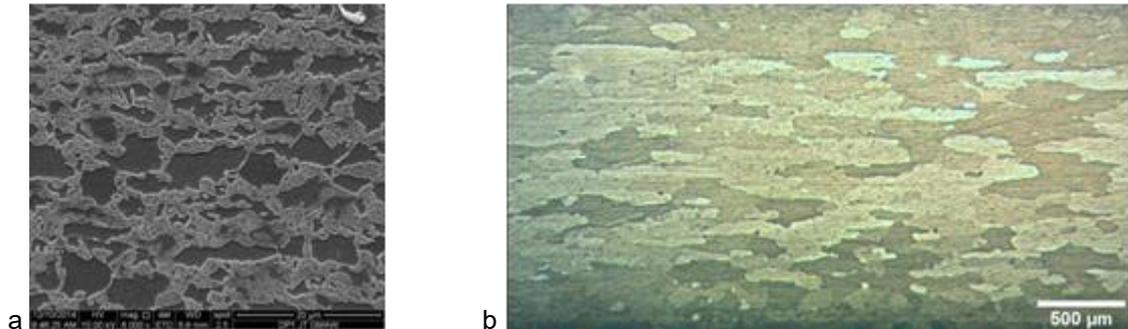


Figura 1: Microestructura: a) del acero base DP 1000 y b) de la aleación de aluminio AA6063

A fin de alcanzar los objetivos propuestos se soldaron probetas de solape de 100 x 100 mm, mediante el proceso GMAW-B bajo distintas configuraciones operativas. Se utilizó una fuente ESAB Aristo U500. Probetas de 100 x 100 mm en condición de solape, se soldaron en forma mecanizada con un dispositivo de avance Miggytrac 1500. En la Figura 2 se muestra el montaje experimental empleado.

Como metal de aporte se empleó un alambre macizo de aluminio ER4043 de 0,9 mm de diámetro. Inicialmente se realizaron pruebas preliminares a fin de definir la matriz de ensayos a analizar.

El criterio empleado fue obtener una soldadura con buen aspecto superficial y sin grandes defectos, buscando la mayor velocidad de soldadura posible. Para ello se definieron los parámetros eléctricos de trabajo, fijando el modo de transferencia pulsado.

El solape entre las chapas inferior y superior fue de 15 mm. La posición de soldadura utilizada fue plana bajo mano, y la torcha se ajustó de modo tal que el extremo del alambre se ubique sobre la chapa de aluminio a 0,5 mm de la junta de solape. Se fijó la distancia pico pieza dp-p = 16 mm, el gas de protección utilizado fue argón, con un caudal de 12 L/min. El ángulo de trabajo fue de 75°.

Los parámetros variados fueron el ángulo de desplazamiento de 75° por empuje y por arrastre, la velocidad de alimentación del alambre (6,5; 7,0 y 7,5 m/min) y la velocidad de soldadura (5; 7,5 y 10 mm/s). En la Tabla 3 se resume la matriz de ensayos.

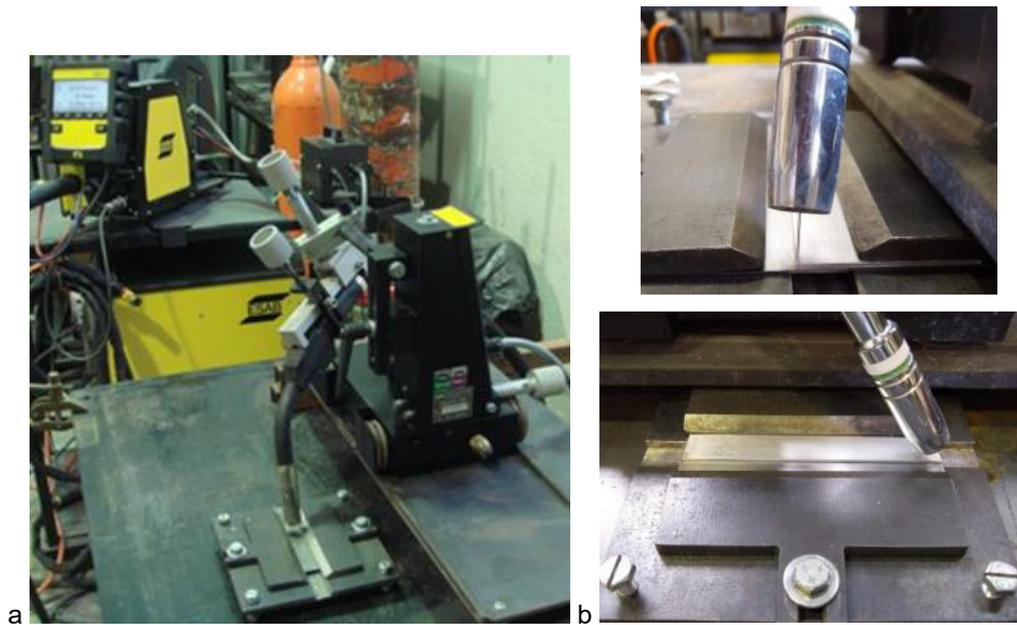


Figura 2: a) Posicionamiento de la torcha, b) Montaje experimental empleado

Tabla 3. Identificación de las probetas soldadas y los parámetros utilizados

Probeta	Desplazamiento	V alim (m/min)	V sold (mm/s)
7-10-A	Arrastre	7	10
6,5-7,5-A	Arrastre	6,5	7,5
7-7,5-A	Arrastre	7	7,5
7,5-7,5-A	Arrastre	7,5	7,5
7-5-A	Arrastre	7	5
7-10-E	Empuje	7	10
6,5-7,5-E	Empuje	6,5	7,5
7-7,5-E	Empuje	7	7,5
7,5-7,5-E	Empuje	7,5	7,5
7-5-E	Empuje	7	5

Sobre las uniones soldadas se realizó una inspección visual y se evaluó el aspecto superficial de los cordones. Asimismo, se prepararon probetas para observación metalográfica. Se realizaron cortes transversales de cada unión y se analizó la macroestructura. Todas las muestras se desbastaron con papeles abrasivos de carburo de silicio hasta grado 600, el pulido final se realizó utilizando pasta diamantada de 6 y 1  $\mu\text{m}$ . La macroestructura de soldadura se reveló con Nital 2% para el caso del acero, y con ácido fluorhídrico 0,5% para el aluminio, y se obtuvieron imágenes con lupa estereoscópica. Sobre las macrografías de cada cordón soldado se evaluó la presencia de defectos y se realizó un análisis dimensional empleando el software de análisis de imágenes libre ImageJ, relevando las dimensiones mostradas en el esquema de la Figura 3.

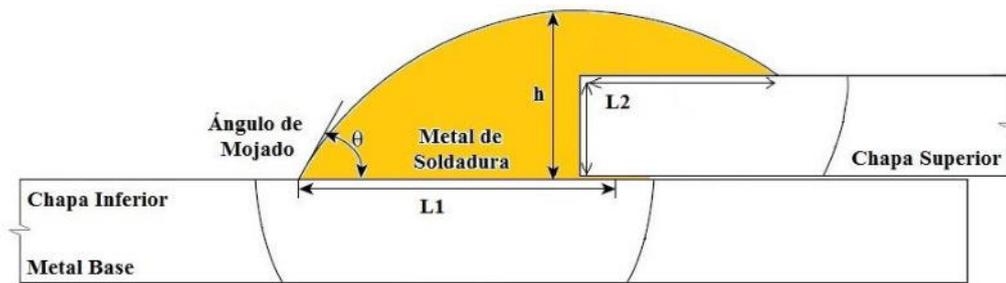


Figura 3: Esquema de las mediciones tomadas en la sección transversal de los cordones

Además, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), se analizó la presencia de intermetálicos (IMC) en la interfaz entre el aluminio y el acero DP 1000. Se tomaron mediciones de espesor y longitud de la capa continua de IMC a lo largo de la interfaz, y se realizaron perfiles de composición química semicuantitativo atravesando la misma (EDS), en diferentes zonas a distancias regulares del centro del cordón.

De cada probeta soldada se realizaron ensayos de arranque del tipo Shear Test (tres muestras). Las probetas fueron ensayadas con una máquina de tracción universal Instron de 10 kN y los resultados de carga máxima fueron promediados para las distintas condiciones analizadas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Inspección Visual, Análisis Dimensional y Macrografía

En la Figura 4 se muestra el aspecto superficial de uno de los cordones soldados. En cuanto a la operatividad del proceso para todas las condiciones el aspecto superficial fue bueno y el nivel de salpicaduras y defectos casi nulo.

La Figura 5 muestra las macrografías de los cortes transversales a los distintos cordones. En las mismas se aprecian las distintas zonas de las juntas soldadas, la morfología de estas y aspectos dimensionales.



Figura 4: Aspecto superficial del cordón 7,5-7,5-A

Probeta	Arrastre	Empuje
7-10		
6,5-7,5		
7-7,5		
7,5-7,5		
7-5		

Figura 5: Macrografías de los cordones soldados

Se puede observar que la cantidad de material fundido (aporte + metal base de aluminio) es mayor para las condiciones de menor velocidad de soldadura de 5 mm/s tanto para arrastre como para empuje (probetas 7-5), pero en ambos casos el ángulo de mojado y la altura de los cordones es excesivo. Por otro lado, el aumento de la velocidad de alimentación del alambre, para una misma velocidad de soldadura (7,5 mm/s), conlleva un aumento de la corriente y por



lo tanto, una mayor tasa de fusión del aporte, resultando en mayor volumen de metal depositado por unidad de tiempo.

En la Tabla 4 se muestran las mediciones realizadas de los aspectos geométricos de cada cordón soldado. Además, se agrega una columna con la carga de rotura promedio por unidad de ancho de la probeta (N/mm), correspondiente al ensayo de arrancamiento, para cada una de las condiciones.

Tabla 4. Relevamiento dimensional de las uniones soldadas

Probeta	L1	L2	h	Áng. mojado	Carga rotura (N/mm)
	(mm)				
7-10-A	4	2	2,5	77	153
6,5-7,5-A	4,4	2,6	2,6	62	159
7-7,5-A	4,8	2,9	3	78	115
7,5-7,5-A	4,4	2,7	3	90	124
7-5-A	4,8	3	3,1	110	170
7-10-E	3,6	2,7	2,4	118	129
6,5-7,5-E	4,6	2,7	2,6	71	120
7-7,5-E	3,7	2,7	3,1	80	126
7,5-7,5-E	5,3	2,8	3,1	63	131
7-5-E	4,8	2,7	3,5	113	126

En las Figuras 6 y 7 se muestra la variación de las dimensiones analizadas en función de la velocidad de soldadura, para las condiciones de arrastre y empuje respectivamente, manteniendo constante la velocidad de alimentación en 7 m/min. Se observa para la condición de arrastre un incremento de la interfaces inferior y superior ( $L1$  y  $L2$ ) y la altura de los cordones ( $h$ ) con la disminución de la velocidad de soldadura, notorio a partir de 7,5 mm/s. Para las mismas condiciones de empuje el comportamiento es similar pero el incremento es más notorio, en cuanto a la interfaz  $L1$  y la altura de los cordones, para la menor velocidad de soldadura de 5 mm/s.

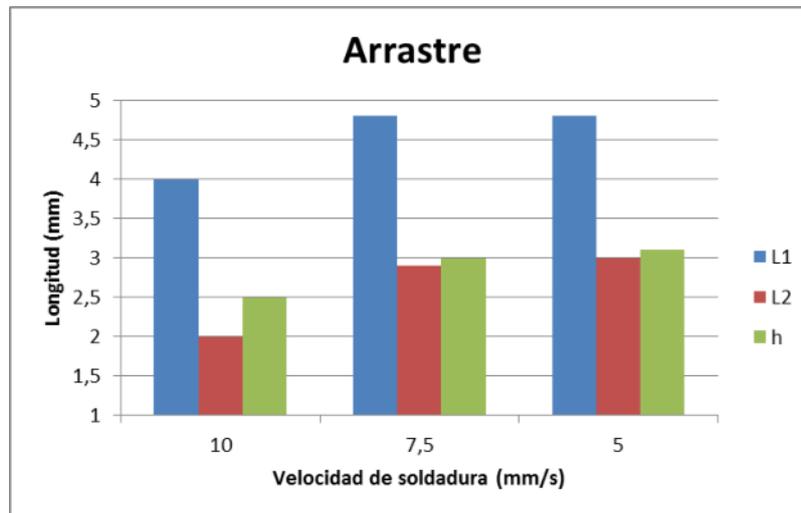


Figura 6: Dimensiones del cordón en función de la velocidad de soldadura para arrastre

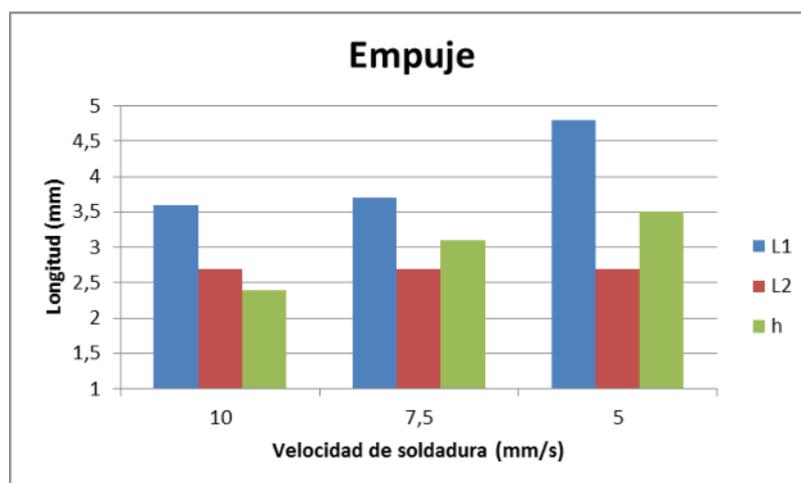


Figura 7: Dimensiones del cordón en función de la velocidad de soldadura para empuje

### 3.2 Caracterización de la Capa de Intermetálicos

La Figura 8 muestra la evolución del espesor de IMC a lo largo de la interfaz para el corte transversal de uno de los cordones.

Se observa para la Figura 8a un espesor continuo de la capa de IMC de alrededor de 15  $\mu\text{m}$  en la zona centro izquierda del cordón. En cambio, para el extremo derecho (Fig. 8b) el espesor es más irregular y va desde los 6 a los 15  $\mu\text{m}$ .

En la Tabla 5 se muestra para algunas condiciones la medición del espesor de la capa de intermetálicos (IMC) en diferentes zonas de la interfaz de los cordones, y dado la irregularidad de esta se agrega el espesor promedio en cada zona.

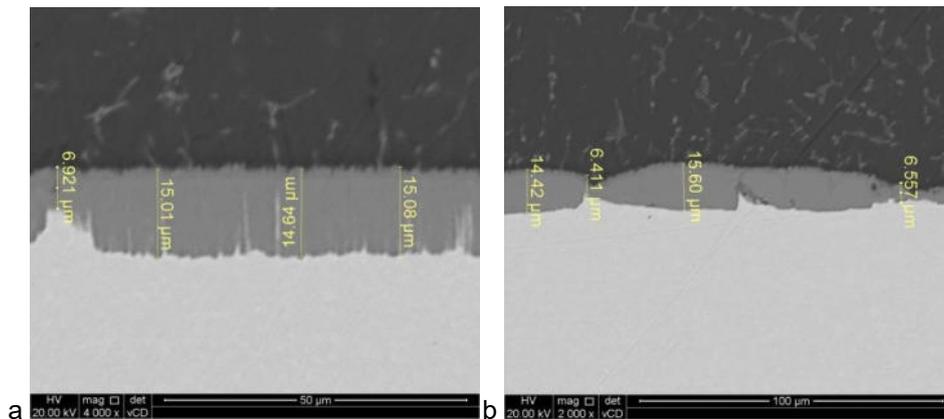


Figura 8: Capa IMC a lo largo de la interfaz para el cordón 7,5-7,5-A. Extremo centro izquierdo del cordón a) Extremo derecho

Tabla 5: Mediciones de la capa de IMC

	Espesor de IMC ( $\mu\text{m}$ )		Espesor promedio IMC ( $\mu\text{m}$ )			Espesor promedio IMC ( $\mu\text{m}$ )
	Mín	Máx	Izq	Centro	Der	
7,5-7,5-A	6	16	16	14	6	12
7-10-E	4	8	8	6	5	6,3
7,5-7,5-E	4	17	6	17	5	9,3

Se observa que, si bien la variación de espesor está casi en el mismo rango, para la misma condición en arrastre como empuje, el espesor promedio de la capa de IMC es mayor para la primera. La longitud y el espesor de la capa de IMC están directamente relacionados con el tiempo y la temperatura, porque la formación de los IMC requiere difusión atómica, que es un fenómeno dependiente del tiempo que se ve muy potenciado por la temperatura [3].

En la Figura 9 se muestra el barrido de composición química mediante EDS atravesando la interfaz.

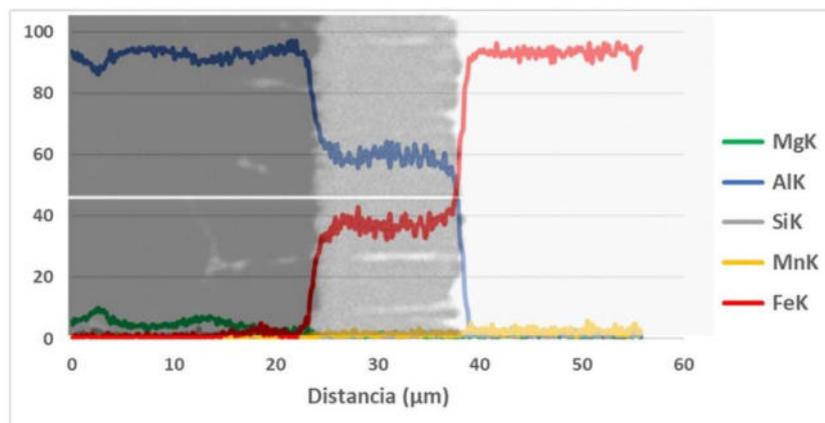


Figura 9: Perfiles de composición química a través de la interfaz para el cordón 7,5-7,5-A

Estos compuestos IMC generalmente exhiben una extremadamente baja ductilidad y, por lo tanto, son una de las principales causas de la fragilidad de la unión metálica. Por lo tanto, es importante minimizar el espesor de la capa de IMC para lograr propiedades mecánicas aceptables [3].

Con el propósito de controlar el espesor de IMC, generalmente es necesario mantener la temperatura y la duración del proceso lo más bajas y cortas posible, pero a su vez, Meco et al. [4] encontraron que una capa delgada de IMC, es decir, más delgada que  $10\ \mu\text{m}$ , generalmente no compromete la resistencia y ductilidad de las uniones metálicas, mientras que una capa más gruesa puede ser perjudicial.

### 3.3 Ensayos de Arrancamiento

En la Figura 10 se muestra como varía la carga de rotura en el ensayo de corte (ST) con la velocidad de soldadura para las condiciones de arrastre y empuje.

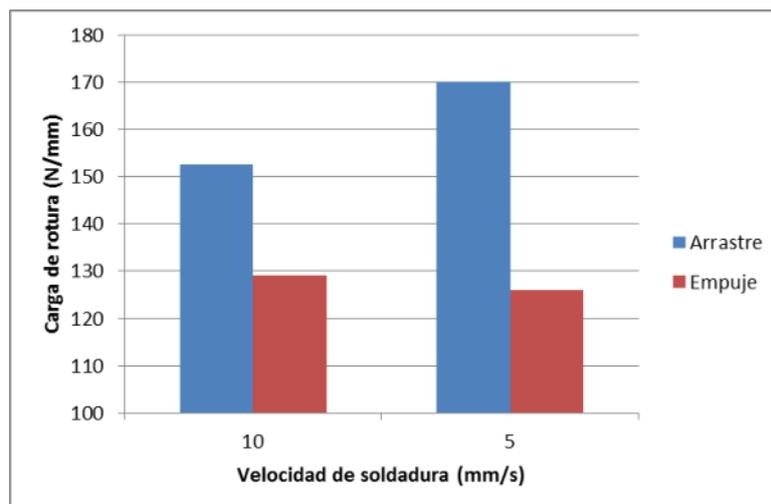


Figura 10: Carga de rotura en ST en función de la velocidad de soldadura

Se observa claramente que las condiciones de arrastre presentan la mayor carga de rotura y esta aumenta con la disminución de la velocidad de soldadura.

Es sabido que los ángulos de la torcha en relación con la pieza de trabajo son un importante parámetro de soldadura. Un ángulo de empuje hará que el perfil de penetración sea más superficial y el ancho del cordón sea mayor. Por otro lado, para el caso de arrastre, la penetración será más profunda y menor el ancho del cordón [5].

En soldadura Brazing se recomendaría la técnica de empuje para evitar afectar el metal base en demasía y conseguir un mayor ancho de cordón. Pero para el caso de soldadura disímil de acero-aluminio, la interacción de las superficies a unir requiere de tiempo y temperatura para



conseguir una capa de compuestos IMC continua y estable en espesor. Esto sería más factible de conseguir con la técnica de arrastre.

#### 4. CONCLUSIONES

Se lograron obtener juntas solapadas disimiles de acero DP1000 con aleación de aluminio AA6063T6. Los resultados obtenidos permiten generar conocimientos que aporten a la mejor comprensión de los fenómenos involucrados en la soldadura disímil de acero con aluminio.

Se observó un aumento de la carga de rotura con la disminución de la velocidad de soldadura, para la condición de arrastre. A su vez, la carga de rotura para la condición de arrastre fue superior que para el caso de empuje. Esto estaría asociado al aumento de la longitud de la interfaz inferior aluminio-acero y el espesor de la capa de IMC.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la FRSN-UTN.

#### REFERENCIAS

- [1] Bhushan, R.K. and Sharma, D. *Green welding for various similar and dissimilar metals and alloys: present status and future possibilities*. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2019.
- [2] Shome, M., *Metal inert gas (MIG) brazing and friction stir spot welding of advanced highstrength steels (AHSS)*. Welding and joining of advanced high strength steels (AHSS), Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2015, pp. 137-165.
- [3] Alessio, G., P. Matteis and D'Aiuto, F. *Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications*. Metals 9, 315. 2019.
- [4] Meco, S. et al. *Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminium joints for thick structural components*. Opt. Lasers Eng. 67, 22–30. 2015.
- [5] Weman, K. and Lindén G. *MIG welding guide*; Woodhead Publishing and Maney Publishing; Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England; 2006.



## ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISCOS DE ARADO

María N. Delpupo<sup>1</sup>, Graciela A. Mansilla<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento Metalurgia, Grupo Metalurgia Física, Facultad Regional San Nicolas,  
Universidad Tecnológica Nacional, Colon 332, 2900 San Nicolas de los Arroyos,  
Argentina, [mdelpupo@frsn.utn.edu.ar](mailto:mdelpupo@frsn.utn.edu.ar)

### RESUMEN

El boro es un elemento químico, accesible, económico que se incorpora en los aceros ya que provoca una mejora en la templabilidad, brindándole mejores propiedades mecánicas. Su efecto varía según diversos factores como la microestructura inicial y los procesos de obtención primarios, que posteriormente se transformará en productos finales como los discos de arados.

El estudio de estos aceros ha sido relevante para su aplicación en la industria agropecuaria argentina donde se requieren aleaciones con resistencia al desgaste e impacto. Estas propiedades, a su vez, están relacionadas con la templabilidad de estos grados de acero que varía sustancialmente con pequeñas cantidades de boro incorporadas en la fabricación primaria. El objetivo de este trabajo es analizar la microestructura y la dureza de muestras de discos de arado de acero AISI 15B30X, conformados a partir de palanquillas y de chapa laminada. De esta manera, se podrá sentar las bases del estudio primario que permita optimizar el proceso de obtención de productos finales empleados en la industria agropecuaria para seleccionar cuál material será más conveniente para el uso final.

**Palabras Clave:** Acero, Boro, Desgaste, Microestructura



## 1. INTRODUCCIÓN

El boro es un metaloide con propiedades mecánicas útiles, que se utiliza como elemento de aleación en el acero [1]. En los aceros, es un elemento intersticial que tiene baja solubilidad en solución sólida  $\alpha$  ( $<0.003\%$ ) [2-4] y cuya función principal en aceros al carbono, es aumentar la dureza a partir de los tratamientos térmicos, permitiendo sustituir ciertos elementos como el níquel y el molibdeno [5]. Este incremento en la dureza se debe a que el boro retarda la nucleación de la ferrita, la cual es asociada con la facilidad de segregar a los límites del grano austenítico. La presencia de boro también incrementa el valor de otras propiedades en relación con el esfuerzo y la ductilidad [6]. Además del beneficio económico, estos aceros presentan ventajas significativas en la maquinabilidad en comparación con los aceros libres de boro, en la susceptibilidad al agrietamiento por enfriamiento rápido durante el tratamiento térmico [7-9] y en la resistencia al desgaste del material ya que permite la formación de bainita. Es por estos motivos que la adición de este elemento produce aceros con mejores características mecánicas para su uso en la industria agropecuaria [10-11].

En línea con lo expresado, en los aceros, el boro mejora su templabilidad, propiedad que se define como la facilidad con la que los aceros se pueden enfriar para formar martensita; específicamente, la velocidad crítica de enfriamiento que se necesita para formar una microestructura completamente martensítica [12]. Resultados de otros autores obtenidos sobre acero al carbono con microaleaciones de B, indican que la adición de hasta  $0.00230\%$  aumenta su rendimiento en tracción, y mejora la resistencia al impacto a  $25^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, deben evitarse las altas temperaturas de austenización, así como los rangos de temperatura donde pueden ocurrir ciertos precipitados de boro que fragilicen la estructura [4].

El efecto del boro en la dureza y templabilidad también depende de la cantidad de carbono en el acero, aumentando en proporción inversa al porcentaje de carbono presente, aunque es más efectivo en aceros con bajo contenido de carbono, hasta  $0.25\% \text{ C}$  [13]. Elementos como manganeso y cromo producen una pérdida de su efecto de templabilidad; y la presencia de molibdeno y niobio producen una mejora por los efectos sinérgicos que presentan con el boro [14]. Por último, los límites de grano de la austenita también son importantes en la templabilidad de los aceros ya que influyen en la cinética de transformación y en la distribución del boro en los límites de grano.

En línea con lo expuesto, los aceros al carbono-boro se utilizan ampliamente como componentes en herramientas de corte y componentes agrícolas (p.ej. discos de arados), por presentar resistencia a diferentes formas de desgaste tribológico e impacto [15-16]. Los daños son el resultado de estar sometidos a diversas condiciones variables, como la humedad y densidad de las plantas, los tipos de suelo y las condiciones ambientales en el campo; por lo tanto, conducen

a un aumento en el consumo de energía, pérdidas de producción y una disminución en la vida útil de servicio de las máquinas herramientas empleadas en los campos [17]. Por tanto, la sostenibilidad de estas máquinas es uno de los temas más importantes en la industria agropecuaria nacional [4]. El proceso de desgaste mencionado está directamente relacionado con la dureza de las piezas metálicas. Estudios realizados por otros autores evidencian que cuanto mayor es la dureza de la pieza metálica en contacto con el suelo, mayor es la cantidad de desgaste [18-19]. Por todo lo expresado, el boro se emplea en la producción de piezas de máquinas agrícolas, como los discos de arados, Figura 1a, cuyos problemas específicos se asocian a desgaste y fractura prematura en servicio en zonas agrícolas, Figura 1b. Estas fracturas se inician en la zona periférica del disco, donde está en contacto directo con el suelo y se propagan intergranularmente hacia el centro del disco. Actualmente, hay una gran cantidad de trabajos que proporcionan datos sobre el uso de boro en varios campos de la metalurgia, pero aún se encuentran escasas investigaciones en cuanto a este grado de acero, su estudio integral de aplicación en suelos y su relación con la abrasividad del suelo [20]. De esta manera, se vuelve relevante analizar estos materiales puestos en la industria agropecuaria por diversos fabricantes y en condiciones de servicio en el campo argentino.

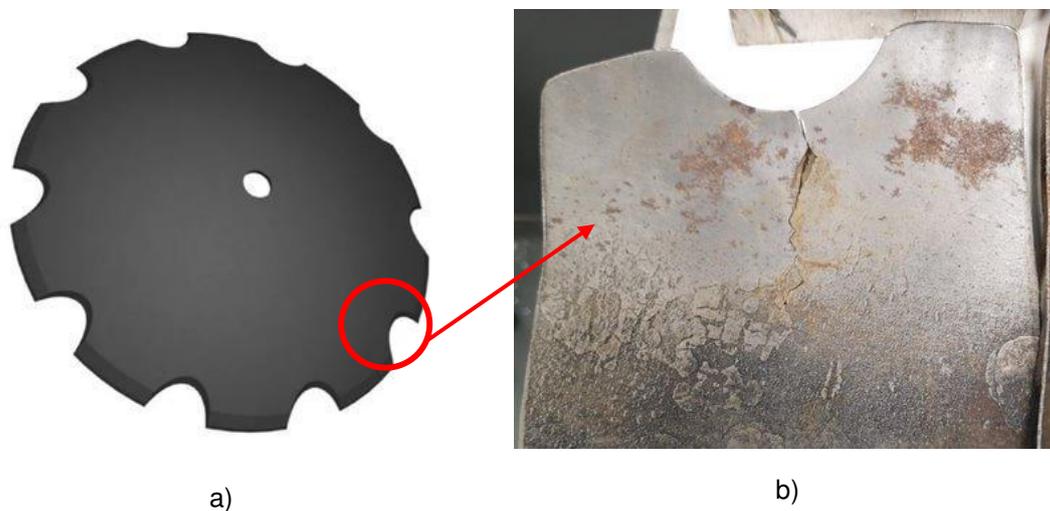


Figura 1: a) Disco de arado producido por industria argentina de 76,2 cm de diámetro, b) Parte estructural que presentó desgaste y fractura en servicio.

El objetivo de este trabajo es caracterizar muestras de discos de arado de acero al boro sin uso, (AISI 15B30X), obtenidos de dos orígenes diferentes; por un lado, discos de arado producidos a partir del conformado de palanquilla de sección cuadrada y por otro, discos obtenidos a partir de chapa laminada.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las probetas se obtuvieron a partir de discos de arado de acero al boro, procedentes de dos procesos de conformado diferentes. Ambas muestras se extrajeron del borde externo de discos de arados sin uso, es decir, de la zona que está sometida a los mayores esfuerzos mecánicos y de desgaste con el suelo. Por un lado, la *Muestra P* corresponde a disco de arado fabricado a partir de una palanquilla de sección cuadrada sometidas a laminación cruzada y forja hasta obtener espesores de 45 mm, corte, estampado y finalmente tratamiento térmico de temple en aceite a 890°C y revenido a 200°C. Por otro lado, la *Muestra C* corresponde a disco de arado fabricado a partir de chapa laminada en caliente. La chapa laminada, posteriormente, es cortada, estampada y tratada térmicamente bajo las mismas condiciones que las empleadas para las palanquillas. En resumen, ambas muestras presentan los mismos tratamientos térmicos finales, diferenciándose en los procesos de conformado de cada una.

En primer lugar, se obtuvieron muestras de ambos discos de acero AISI 15B30X mediante máquina cortadora LECO. Para el análisis de microscopía óptica, se cortaron muestras longitudinales al disco de arado en cortadora a disco refrigerado LECO MC-80. Se realizó desbaste grueso sobre una pulidora de banda con el objeto de eliminar rebabas, imperfecciones de corte. Luego, en el desbaste fino se realizó remoción de los efectos del desbaste grueso y remoción de los efectos del grano de papel empleado en cada etapa anterior. Por último, el pulido se realizó con pasta de diamante de 8 a 4 micrones en pulidora Buehler ECOMET 4 y se atacaron las muestras con Nital al 2%.

La composición química de cada disco fue medida en espectrómetro ARL 3460, según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero [%].

Muestra	C	P	S	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
P	0,29	0,009	0,004	1,24	0,28	0,15	0,02	0,03
C	0,29	0,016	0,002	1,36	0,16	0,02	0,02	0,02
Muestra	Mo	Al	V	Nb	Sn	B (ppm)	Ti	
P	0,01	0,022	0,002	0,001	0,002	20	0,0043	
C	0,01	0,031	0,005	0,001	0,002	25	0,027	

En una segunda instancia, se analizaron las microscopías ópticas de cada muestra con microscopio OLYMPUS GX51.

Finalmente, se determinó la dureza de las muestras, realizando cuatro mediciones sobre la zona perimetral del disco de arado, zona que está mayormente expuesta al desgaste tribológico, en un equipo Rockwell Hardness Tester THRP-1500.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Analizando las composiciones químicas de ambas muestras, resultó que ambas contienen niobio y molibdeno en la misma proporción, indicando que presentarían efecto similar sobre la templabilidad en productos finales. A su vez, el cromo disminuye la templabilidad de estos aceros, y con ello la resistencia al impacto y desgaste [21].

La Muestra P correspondiente a disco de arado conformado a partir de palanquillas presenta un tamaño de grano uniforme de tipo equiaxial, con una microestructura bainítico-perlítica, Figura 2.

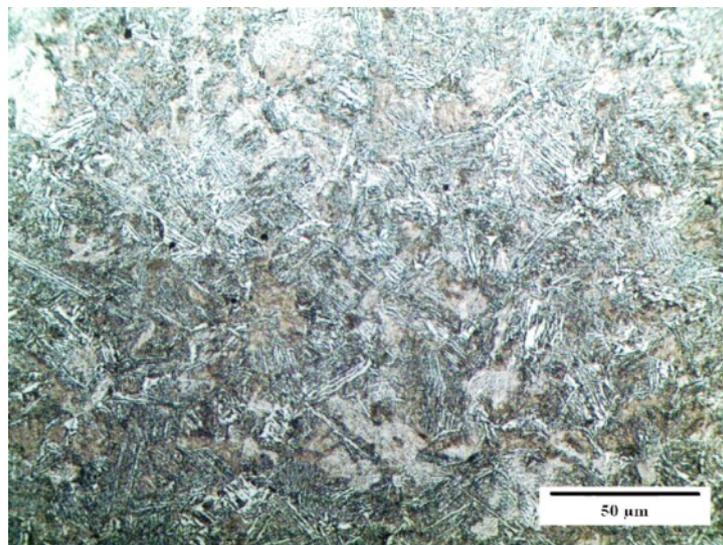


Figura 2: Microscopía óptica de Muestra P (500X)

Por su parte, la Muestra C presenta matriz ferrítico-perlítica con granos equiaxiales orientados en el sentido de la laminación, Figura 3.

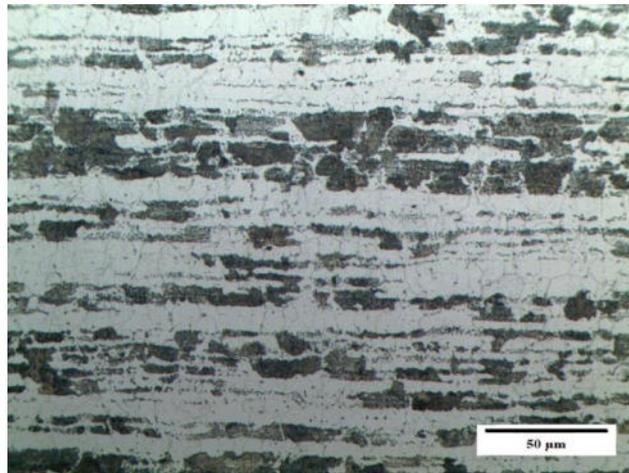


Figura 3: Microscopía óptica de Muestra C (500X)

De acuerdo con la composición química y la microestructura observada, se calculó la temperatura de inicio de transformación bainítica para cada muestra. En los aceros bainíticos las transformaciones incompletas se presentan por no seleccionar una temperatura apropiada, dado que algunos elementos de aleación retardan la formación de la bainita. Muchos autores han establecido distintas expresiones para la determinación de la temperatura a la cual inicia la transformación bainítica ( $B_s$ ) dependiendo del porcentaje en peso de los elementos de aleación, así Bornat [22] estableció esta temperatura para aceros sin limitante del porcentaje en peso de carbono de acuerdo con la Ecuación (1).

$$B_s (^{\circ}C) = 844 - 597(\% C) - 63(\% Mn) - 16(\% Ni) - 78(\% Cr) \quad (1)$$

Para la Muestra P, la temperatura de comienzo de formación bainítica resultó de 580°C, mientras que para la muestra C, la temperatura es de 584°C. Considerando que el tratamiento de temple se realizó a 890° C en ambos materiales, Muestra C y Muestra P, la composición química en este caso no sería una variable de la formación bainítica de estos aceros. Ahora bien, el contenido de B es otra variable importante en la estructura final alcanzada. De acuerdo con algunos estudios realizados [23] que demuestran un retardo en la cinética de la transformación bainítica en el acero con adición de boro, para la muestra C con 25 ppm de B habría una cinética de transformación menor que la muestra P con 20 ppm de B, lo que se corresponde con la microestructura observada en cada caso. Por último, los granos equiaxiales observados en la muestra P, como producto de la laminación cruzada previa al tratamiento térmico, presentarían mejores propiedades mecánicas en servicio, en correspondencia con Lan et al [24].

La uniformidad en la microestructura de la Muestra P observada en la Figura 1, se traslada a su vez en los ensayos de dureza que arrojaron valores superiores para esta muestra respecto del disco de arado fabricado a partir de chapa laminada, Muestra C. Las mediciones de dureza en



zona periférica del disco de arado, área en contacto con el suelo, los valores promedios se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Dureza de las muestras

Muestra	Dureza [HRB]	Dureza [Brinell]
P	99 ± 0,4	235 ± 0,96
C	83 ± 0,5	157 ± 1,2

En particular, la Muestra P obtenida por forja y laminación cruzada supera en 16 puntos de dureza Rockwell B (equivalente a 78 puntos de dureza Brinell) a la muestra obtenida a partir de chapa, Muestra C. A partir del requerimiento de dureza mínimo para un implemento agrícola que oscila entre 38 y 48 HRC (equivalente a 352-460 Brinell), y para áreas desérticas en las cuales se encuentran suelos duros, se entre 50 y 60 HRC [25] (equivalente a 480-653 Brinell), los discos obtenidos a partir de palanquilla, Muestra P, serían los más adecuados por presentar durezas más cercanas al valor de referencia y esto se traduce, en que presentarían mayores energías absorbidas en ensayos de impacto [26] que permita que las piezas no se fracturen en servicio.

#### 4. CONCLUSIONES

Ambos tipos de materiales cumplen con el rango químico correspondiente al grado 15B30X, infiriéndose que la Muestra C, obtenida a partir de chapa laminada, al presentar mayor proporción de boro de 25 ppm presentaría una cinética de transformación bainítica menor que la muestra P con 20 ppm de B, que se traduce en una menor templabilidad en servicio y resistencia al desgaste. A partir de las mediciones de dureza superiores obtenidas en el disco de arado conformado a partir de palanquillas, junto con la estructura equiaxial revelada, se infiere que este material podría presentar mayor resistencia al desgaste en servicio, es decir, en el empleo en la industria agropecuaria. Se continuará con el estudio de este grado de acero referido a su comportamiento mecánico de manera de evaluar su aplicación en cuanto a resistencia al desgaste y a la corrosión.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Ing. Mauro Martín y Silvina Bertozzi por el apoyo en la realización de los ensayos experimentales.

#### REFERENCIAS

- [1] Habashi, F. *Boron: Physical and Chemical Properties*. Encyclopedia of Metalloproteins, 2013.



- [2] T. I. Titova, N. A. Shulgan and I. Yu. Malykhina, *Effect of Boron Microalloying on the Structure and Hardenability of Building Steel*, Metal Science and Heat Treatment, Vol. 49, No. 1-2, pp. 39-44, 2007.
- [3] M. A. Bedolla-Jacuinde, C. Maldonado and J. M. Cabrera, *Hot Ductility Behavior of a Low Carbon Advanced High Strength Steel (AHSS) Microalloyed with Boron*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, No. 13-14, pp. 4468-4474, 2011.
- [4] Saeed N., Hoda S., Mamdouh M. *Influence of Boron Additions on Mechanical Properties of Carbon Steel*. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2019.
- [5] A. Bardelcik, C. P. Salisbury, S. Winkler, M. A. Wells and M. J. Worswick, *Effect of Cooling Rate on the High Strain Rate Properties of Boron Steel*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, No. 6, pp. 694-702. doi:10.1016/j.ijimpeng.2009.05.009, 2010.
- [6] P. Lizarazo, R. Rodríguez-Baracaldo, J. Olaya, M. Sierra Cetina, I. Mejía and A. Bedolla-Jacuinde. *Evaluación del comportamiento al desgaste de los aceros bainíticos aleados con boro*. Revista Colombiana de Materiales (ISSN: 2256-1013). 5. Pp. 91-97. 2014.
- [7] V. C. Uvaraja and N. Natarajan, *Optimization of Friction and Wear Behaviour in Hybrid Metal Matrix Composites Using Taguchi Techniterials Characterization and Engineering*, Vol. 11, No. 8, pp. 757-768. 2012.
- [8] T. Senthilkumar and T. K. Ajiboye, *Effect of Heat Treatment Processes on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steel*, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 143-152, 2012.
- [9] D. A. Fa, *Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of NST 37-2 Steel*, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, Vol. 10, No. 3, pp.299-308, 2011.
- [10] Manashev, I., Shatokhin, I., Ziatdinov, M., Bigeev, V. *Microalloying of Steel with Boron and the Development of Ferrotitanium Boride*. Stal, No. 10, pp. 34-38, 2009.
- [11] Parra E. C., Martínez Luévanos A. *Boron steels and applications*, CienciaCierta No. 67, ISSN: 2683-1848, 2021.
- [12] Rayan, G. *Hot Forming of Boron Steels with Tailored Mechanical Properties Experiments and Numerical Simulations*. (Tesis de posgrado). Universidad de Waterloo, Canada, 2011.
- [13] El-Shennawy, M., Farahat, A., Masoud, M., Abdel-Aziz, A. *Effect of Boron Content on Metallurgical and Mechanical Characteristics of low Carbon Steel*. International Journal of Mechanical Engineering (IJME), 2016.



- [14] Maitrepierre, Thivellier, D., Rofes-Vernis J., Rousseau, D., Tricot R. *Microstructure and Hardenability of Low Alloy Boron- Containing Steels*. Proceedings of a Symposium. Hardenability Concepts with Applications to Steel pp. 422-447, 1977.
- [15] Triani, R.M, Gomes, L.F.A, Neto, A.L *et al. Producción y Caracterización de Capas de Boruro y Carburo sobre Acero AISI 15B30*. J. de Materi Eng and Perform 29, 3534–3541, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04698-w>
- [16] Sierra H. *Propiedades mecánicas del Acero 15B30*. Revista Universidad EAFIT 124, pp 67-75, 2001.
- [17] Gamal E.M. Nasr, Z. Abdel Hamid, Mohamed Refai. *Agricultural Machinery Corrosion*, Chapter IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.108918, 2023.
- [18] Hamzaban, M.T & Rish Sefid Mohammadi, N. *Effects of the water content and grain size on soil-cutting tools interactions: implications of LCPC abrasion test*. International Journal of Mining and Geo-Engineering, 56-1, pp. 75-81. 2022.
- [19] Umit, ER. *The Abrasive Wear Behaviour of Boron Steels*, ng. & Arch. Fac.Osmangazi University, Vol. XVII, 2, 2004.
- [20] Mirmehrabi, Hossein; AU - Ghafoori, Mohammad; Lashkaripour, Gholam Reza. *Impact of some geological parameters on soil abrasiveness*. Bolletin of Engineering Geology and the Environment 75 (4), DOI: 10.1007/s10064-015-0837-3, 2015.
- [21] Maitrepierre D, Thivellier and Tricot R. *Influence of Boron on the Decomposition of Austenite in Low Carbon Alloyed Steel*. Metallurgical Transactions Vol 6<sup>a</sup>, pp. 287-300, 1975.
- [22] R. L. Bodnar, T. Ohhashi, R. I. Jaffee. *Effects of Mn, Si, and Purity on the Design of 3.5NiCrMoV, 1CrMoV, and 2.25Cr-1Mo Bainitic Alloy Steels*, Metallurgical Transactions A, Vol 20A, pp. 1445-1460, 1989.
- [23] K. Zhu, C. Oberbillig, C. Musik, D. Loison, T. Lung. *Effect of B and B + Nb on the bainitic transformation in low carbon steels*. Materials Science and Engineering A 528, pp. 4222- 4231, 2011.
- [24] H. F. Lan, L. X. Du, R. D. K. Misra. *Effect of microstructural constituents on strength-toughness combination in a low carbon bainitic steel*. Materials Science & Engineering A 611, pp. 194–200, 2014.
- [25] Bhakat, A., Mishra, A., Mishra, N., Jha, S., *Metallurgical life cycle assessment through prediction of wear for agricultural grade steel*, Wear 257, 338 - 346, 2004.
- [26] Sierra Restrepo H. *Resistencia al desgaste vs resistencia al impacto del acero AISI 15B30, templado y revenido*. Dyna, Año 74, Nro. 153, pp. 125-133. Medellín, ISSN 0012-73, 2007.



## EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS COMPUESTOS CEMENTO CARBÓN SOTERRADOS EN LA RESISTIVIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL DEL TERRENO.

N. Cotella<sup>1</sup>, D. Gallo<sup>1</sup>, S. Antonelli<sup>1</sup>, L. Soler<sup>1</sup>, D. Acevedo<sup>1</sup>, M. Bruno<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nac. 36 km 601- 5800 Río Cuarto (Cba.) Argentina - [ncotella@ing.unrc.edu.ar](mailto:ncotella@ing.unrc.edu.ar),  
[dgallo@ing.unrc.edu.ar](mailto:dgallo@ing.unrc.edu.ar), [santonelli@ing.unrc.edu.ar](mailto:santonelli@ing.unrc.edu.ar), [lsoler@ing.unrc.edu.ar](mailto:lsoler@ing.unrc.edu.ar),  
[dacevedo@ing.unrc.edu.ar](mailto:dacevedo@ing.unrc.edu.ar)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas FQyN – Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nac. 36 km 601- 5800 Río Cuarto (Cba.) Argentina - [mbruno@exa.unrc.edu.ar](mailto:mbruno@exa.unrc.edu.ar)

### RESUMEN

La puesta a tierra (PAT) es la conexión entre la instalación eléctrica y el terreno, su objetivo principal es disipar las corrientes originadas por fallos o descargas atmosféricas. La correcta ejecución de una PAT implica considerar el tipo de electrodos utilizados, la profundidad a la que se instalan en el suelo y las condiciones de humedad presentes.

Con el objetivo de evaluar la influencia de los compuestos cemento carbón soterrados en la resistividad de la capa superficial del terreno, se emplearon electrodos metálicos recubiertos de cemento con un 40% de carbón conductor obtenido a partir de la carbonización de cáscaras de maní a 1100°C. Se comparó la resistencia obtenida de la PAT utilizando electrodos metálicos y electrodos con revestimiento de pasta de cemento. La resistencia eléctrica de la PAT se evaluó mediante mediciones en diferentes configuraciones de electrodos, analizando su comportamiento a lo largo del tiempo y su relación con las condiciones atmosféricas externas.

Se determinó la resistividad de la capa superficial del suelo y del cemento que rodea a la PAT utilizando la ecuación de Dwight. Esta capa superficial es rápidamente afectada por la lluvia y los períodos de sequía. Por otro lado, la humedad en el suelo profundo varía muy lentamente debido a la menor influencia que ejercen sobre esta los fenómenos atmosféricos. La resistividad de este suelo profundo se determinó utilizando el método de cuatro puntos.

Se llegó a la conclusión que la resistividad del cemento con agregado de carbón conductor por encima del punto de percolación eléctrica es aproximadamente cuarenta veces menor que la resistividad de la capa superficial del suelo circundante en la Ciudad de Río Cuarto.

La pasta de cemento con el agregado del 40% de carbón de cascara de maní alcanza resistencias de puesta a tierra ( $R_{pat}$ ) menores y más estables en el tiempo que la  $R_{pat}$  presentada por un electrodo metálico de dimensiones similares.

**Palabras clave:** Puesta a tierra; cemento conductor; resistividad del terreno; mediciones.



## 1. INTRODUCCIÓN

El propósito de un sistema de puesta a tierra (PAT) es garantizar la seguridad eléctrica a las personas, equipos, y además de proveer un suministro de energía confiable ante fallos eléctricos o descargas atmosféricas [1]. La puesta a tierra de equipos e instalaciones eléctricas requiere de una conexión entre dicho equipo y el material conductor que forma la corteza terrestre. La resistencia de esta conexión no debe superar un valor máximo que asegure el funcionamiento óptimo del sistema y debe ser capaz de transportar la máxima corriente presunta de falla [2].

La forma más habitual de materializar una PAT es el uso de electrodos metálicos de puesta a tierra en forma de varillas hincados en el suelo. Estos pueden unirse para formar una malla que optimiza la resistencia de la PAT. Uno de los requisitos para diseñar un sistema de puesta a tierra adecuado es obtener el valor reducido de la resistencia de PAT [3]. La adecuada ejecución de la PAT depende de manera crítica de la resistividad del suelo en el lugar de emplazamiento, a menor resistividad del suelo, menor resistencia de PAT para igual disposición de electrodos. La resistividad del suelo depende de varios factores, entre los que podemos citar: tipo de suelo, que tiene un efecto determinante en la resistencia de puesta a tierra; la profundidad de ejecución de la PAT y la existencia de humedad [4].

Los terrenos o suelos no se pueden considerar un medio homogéneo, ya que su constitución y efectos climáticos producen variaciones de su resistividad en distintos puntos considerados y con el transcurso del tiempo. La resistividad del suelo depende de diversos factores donde el tipo de suelo, composición, estratificación y compactación del material son propiedades inherentes a la formación geológica en un sitio determinado y su variación depende de cambios a muy largo plazo. Por el contrario, el porcentaje de humedad, la temperatura, la composición química y concentración de las sales disueltas son factores variables en el corto plazo. La resistividad del suelo disminuye con el incremento de la humedad presente en el mismo, hasta alcanzar un umbral, a partir del cual la resistividad tiende a ser independiente de dicha humedad [5].

Con el objetivo de reducir la resistencia de la PAT en suelos altamente resistivos, se pueden utilizar electrodos metálicos rodeados de cemento. El ingeniero Helbert Ufer investigó durante la década de 1940 la técnica de rodear con una cápsula de concreto los electrodos de puesta a tierra [6]. Un electrodo metálico revestido con concreto presenta una resistencia de PAT menor que un electrodo similar enterrado directamente. El revestimiento de cemento reduce la resistividad del material que rodea el elemento metálico [7]. Cuando los electrodos de puestas a tierra metálicos se encuentran rodeados de cemento sin agregado de sustancias conductoras, la conducción eléctrica en el seno del cemento se lleva a cabo por conductores de segunda especie. [8]. Un hormigón ubicado bajo el suelo tiene una resistividad comprendida entre 30 a 90  $\Omega \cdot m$  [3]. La resistencia eléctrica de las PAT depende principalmente de la resistividad del suelo y las



dimensiones del electrodo con el cual se materializa la misma. Para vincular estas variables se han desarrollado distintas expresiones matemáticas [9]. Entre ellas, las desarrolladas por Dwight [10], Tagg [11] y Sunde [12].

En el presente trabajo se evaluó la resistividad de los compuestos cemento - carbón soterrados en la capa superficial del terreno. Se utilizó como medio de comparación la resistividad de la pasta de cemento sin agregados conductores y la resistividad del suelo, tanto en capas superficiales (afectadas por las precipitaciones atmosféricas) y las capas profundas del terreno.

Para ello, se evaluaron distintos arreglos de electrodos hincados en el terreno del campus de la UNRC. Se analizó el comportamiento eléctrico de los mismos a lo largo del tiempo y su relación con las condiciones atmosféricas, las cuales influyen sobre el comportamiento eléctrico del suelo. Se utilizaron electrodos de acero cobreado, con y sin revestimiento de pasta de cemento y pasta de cemento conductor formulada con cemento portland con agregado de 40 % de carbón de cáscara de maní, obtenido a 1100 °C (en adelante "C+40C1100") en el laboratorio. Este agregado asegura que el cemento-carbón se encuentre por encima de la percolación eléctrica [13].

En la Provincia de Córdoba la cáscara de maní representa el 95% de la biomasa disponible, (180.000 toneladas anuales) [14]. En la zona de influencia de la Universidad Nacional de Río Cuarto, se concentra una elevada producción del cultivo de maní y una considerable actividad industrial en torno al procesamiento del mismo [15].

## 2. MATERIALES Y METODOS.

Para llevar a cabo el conjunto de mediciones en campo se evaluaron distintas áreas dentro del predio de la UNRC factibles de ser utilizadas como zonas de ensayos de PAT. Se seleccionó el lugar que presentase mayor homogeneidad de los valores de resistencia de PAT reportados por un grupo de electrodos hincados en el terreno y monitoreados durante varios meses.

Para los ensayos de campo, se utilizaron electrodos comerciales de 9,5 mm (3/8") de diámetro realizados con núcleo de acero y revestidos en cobre. Esto permite hincarlos a golpes de maza sobre la sufridera montada en el núcleo de acero y disponer de la cobertura de cobre a los fines de conducción eléctrica y protección de la degradación. Se utilizaron electrodos de 500 mm de longitud, a los cuales se les cubrieron los 200 mm superiores con aislante termo contraíble. Esto a efectos de evitar la acción de la capa superficial del terreno, la cual es muy susceptible a presentar variaciones en su comportamiento eléctrico con pequeñas precipitaciones atmosféricas o variaciones de la humedad ambiente [16].

La medición de la resistencia de puesta a tierra ( $R_{pat}$ ) se realizó por el método de caída de potencial [17], utilizando un telurímetro electrónico de lectura directa marca UNI-T modelo UT-522. Para este método, la distancia recomendable entre la toma de tierra a evaluar y el electrodo



que inyecta corriente debe ser como mínimo entre 4 o 5 veces la longitud máxima del electrodo de la toma de tierra y la distancia entre la toma de tierra y el electrodo de tensión óptima es el 62 % de la longitud anterior. En virtud de lo recomendado, se ubicó el electrodo de inyección de corriente a 15,13 m y el electrodo de referencia de tensión a 9,38 m. Estas distancias superan ampliamente lo sugerido a fin de obtener valores confiables en un amplio rango de medida [18].

Tabla 1. Tipos de electrodos utilizados para el control y medición de las PAT

Ubicación	Tipo constructivo	Longitud total [mm]	longitud útil [mm]	Diámetro [mm]
1	Electrodo PAT	500	300	9,5
2	Electrodo PAT	500	300	9,5
3	Electrodo rodeado de pasta de cemento	500	300	60
4	Electrodo PAT	500	300	60
5	Electrodo PAT	500	300	9,5
6	Electrodo con pasta de cemento + Car-	500	300	60
7	Pica tensión	500	500	9,5
8	Pica corriente	500	500	9,5
9	Pica tensión	500	500	9,5

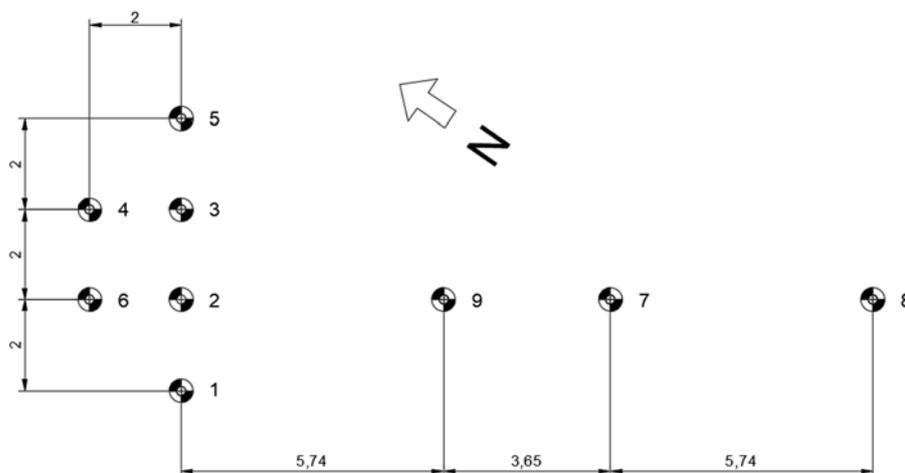


Figura 1: Ubicación de los electrodos referidos en la tabla 1.

En el emplazamiento seleccionado, Figura 1, se procedió a monitorear la resistencia eléctrica de PAT con el transcurso del tiempo. Luego se rodeó un grupo de electrodos con pasta de cemento y por pasta de cemento conductor C+40C1100, Tabla 1. Para ello, se realizaron en el terreno orificios cilíndricos de 60 mm de diámetro y 500 mm de profundidad por medio de un sacabocados. Se colocó el electrodo metálico de 9,5 mm de diámetro en su centro y se procedió a rellenar el espacio restante con C+40C1100, alcanzando un nivel 200 mm por debajo de la superficie.



## 2.1. Determinación de la resistividad del suelo y del cemento que rodea a las PAT.

La ecuación de Dwight, Ecuación (1), vincula la resistencia de la puesta a tierra ( $R_{pat}$ ) con la resistividad del terreno que lo rodea y las dimensiones del electrodo utilizado. Siendo esta ecuación ampliamente utilizada para mediciones de PAT de electrodo único con corrientes alternas. [19]. De la Ecuación (1), se obtiene la resistividad del suelo.

$$R_{pat} = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (1)$$

$R_{pat}$  = Resistencia de la PAT.

$\rho$  = Resistividad del terreno [ $\Omega \cdot m$ ].

$L$  = Longitud del electrodo de PAT [m].

$a$  = Radio de la Varilla [m].

En el caso de tratarse de un electrodo metálico recubierto por un material distinto al terreno circundante, como puede ser la pasta de cemento y la pasta C+40C1100, la resistencia de PAT se puede calcular a partir de la Ecuación (2) propuesta por Fagan y Lee [20].

$$R_{pat} = \frac{1}{2\pi L} \left[ \rho_c \left( \ln \frac{a_c}{a} \right) + \rho \left( \ln \left( \frac{4L}{a_c} \right) - 1 \right) \right] \quad (2)$$

$R_{pat}$  = Resistencia de la PAT.

$\rho$  = Resistividad del terreno [ $\Omega \cdot m$ ].

$\rho_c$  = Resistividad del material circundante al electrodo [ $\Omega \cdot m$ ].

$L$  = Longitud del electrodo de PAT [m].

$a$  = Radio de la Varilla [m].

$a_c$  = Radio del cemento [m].

De la Ecuación (2) se obtiene la resistividad del material que envaina el electrodo en condiciones de campo.

La Figura 2 muestra la representación gráfica de la Ecuación (2) de Fagan y Lee, para un electrodo de 9,5 mm de diámetro y 300 mm de longitud. Se destaca la influencia del diámetro en el peso del revestimiento del cemento conductor y en la reducción de la resistencia de puesta a tierra ( $R_{pat}$ ). Se observa que la  $R_{pat}$  decrece de manera logarítmica con el incremento del diámetro de la camisa de cemento. Por otro lado, el aumento del diámetro conlleva a un aumento cuadrático en la cantidad de cemento conductor necesario para su ejecución. Por lo tanto, se desprende que diámetros muy grandes de camisa de cemento no lograrán mejoras apreciables en la disminución de la  $R_{pat}$ , a pesar del notorio incremento en la cantidad necesaria de agregado de cemento conductor.

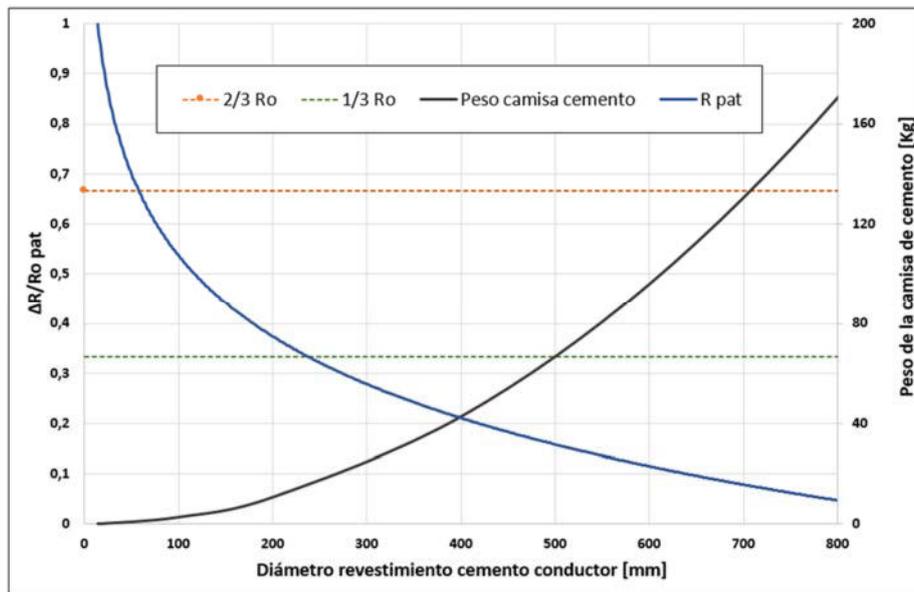


Figura 2:  $R_{pat}$  (Ec. de Fagan y Lee) para un electrodo metálico de 9,5 mm de diámetro y 300 mm de longitud en función del diámetro del revestimiento del cemento conductor.

Del análisis de la Figura 2, se deduce que una camisa de aproximadamente 60 mm de diámetro reducirá la resistencia inicial del electrodo ( $R_o$ ) a  $2/3$  de su valor. Por otro lado, para alcanzar el  $1/3$  de  $R_o$ , el diámetro de la camisa debería superar los 400 mm. La densidad aparente del C+40C1100, fraguado y endurecido, utilizada para el cálculo del peso de la camisa se determinó en el laboratorio y arrojó un valor de  $1130 \text{ kg/m}^3$ .

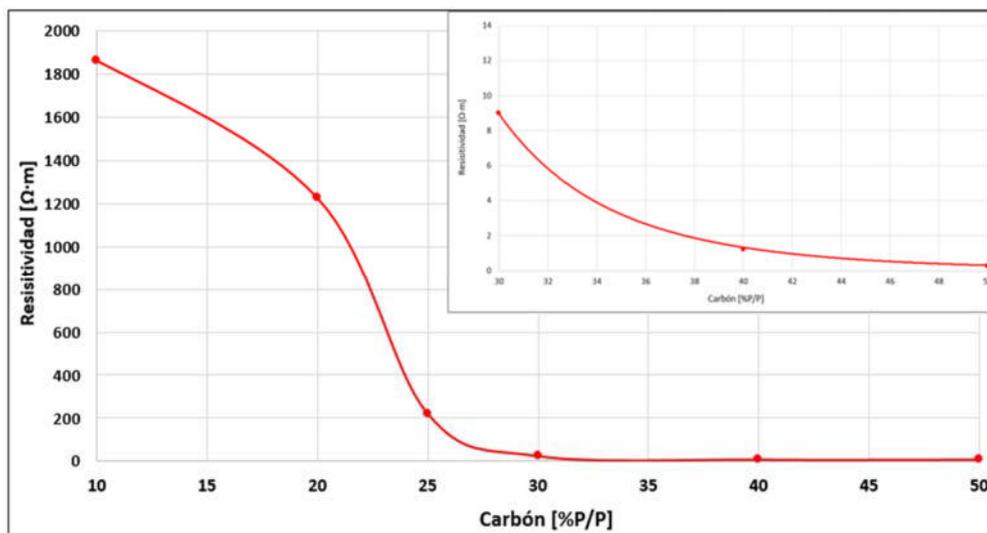


Figura 3: Resistividad del cemento conductor en función del carbón conductor agregado.



De la Ecuación (2) de Fagan y Lee, se desprende que también es posible reducir la  $R_{pat}$  al disminuir la resistividad de la pasta de cemento que rodea el electrodo. Para lograr esto, se recurre a la adición de especies conductoras. En la Figura 3 se puede observar que la resistividad del cemento disminuye a medida que aumenta el porcentaje de agregado de carbón conductor. Una vez alcanzada la percolación eléctrica, los valores de resistividad se mantienen prácticamente constantes a medida que se incrementa la cantidad de carbón conductor agregado.

El método de cuatro puntos se presenta adecuado para medir la resistividad, alcanzando las capas profundas del terreno, las cuales presentan mayor estabilidad en su resistividad al no ser alcanzadas inmediatamente por las precipitaciones atmosféricas debido al retardo de la infiltración del agua. Para efectuar la medición, se instalan cuatro electrodos alineados en la superficie del suelo. Se hace circular una corriente alterna entre los electrodos extremos y se determina la caída de tensión existente entre los dos electrodos internos mediante un voltímetro de alta impedancia. Este método obtiene los datos de resistividad aparente del terreno alcanzado las capas más profundas sin necesidad de introducir las picas de prueba hasta esos niveles [21].

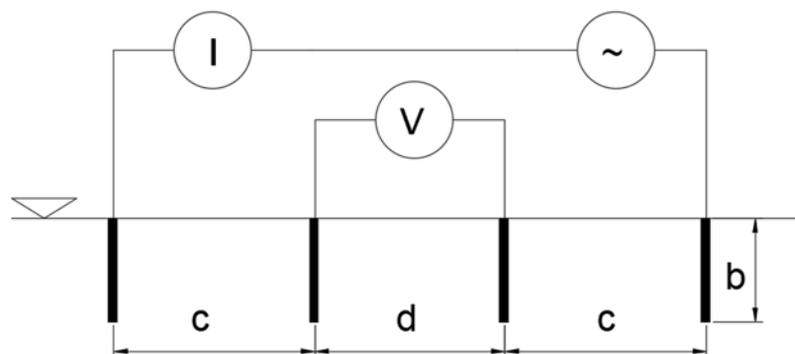


Figura 4: Método de Schlumberger.

El método de Schlumberger-Palmer considera la colocación de las picas interiores más cercanas entre sí en comparación con las picas exteriores, que se colocan más distantes [22]. La Ecuación (3) de Schlumberger se aplica cuando la profundidad de hincado de los electrodos es pequeña en comparación con su separación. Esta ecuación permite calcular la resistividad del terreno hasta una profundidad definida por la semidistancia entre los electrodos externos [16].

$$\rho = \frac{\pi \cdot c(c+d)}{d} \frac{V}{I} \quad (3)$$

$c$  = Distancia entre electrodos de tensión y corriente [m].

$d$  = Distancia entre electrodos de tensión [m].

$V$  = Tensión presente entre electrodos de tensión (centrales) [V].

$I$  = Corriente circulante entre electrodos de corriente (extremos) [A].



Para la realización de las mediciones utilizando el método de Schlumberger, se aplicó corriente entre los electrodos N° 2 y 8 utilizando una fuente de corriente de 750  $\mu$ A a una frecuencia de 850 Hz. Se llevaron a cabo las mediciones de la tensión eléctrica presente entre los electrodos N° 9 y 7 de acuerdo a lo mostrado en la Figura 1. La corriente aplicada se midió utilizando un multímetro Owon OW18B, mientras que la tensión presente en los electrodos centrales se midió utilizando un multímetro Uni-t UT61C.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION.

En la Figura 5 se muestra la evolución a lo largo de un año de la variación de la resistencia de puesta a tierra de los distintos electrodos soterrados. Los valores presentados están referidos a la resistencia inicial del electrodo de 9,5 mm de diámetro. Se incluye información sobre la cantidad de lluvia caída para establecer una correlación con la resistencia de las PAT. Se recubrieron los electrodos metálicos de 9,5 mm de diámetro, con cilindros de pasta de cemento y C+40C1100 de 60 mm de diámetro, respectivamente.

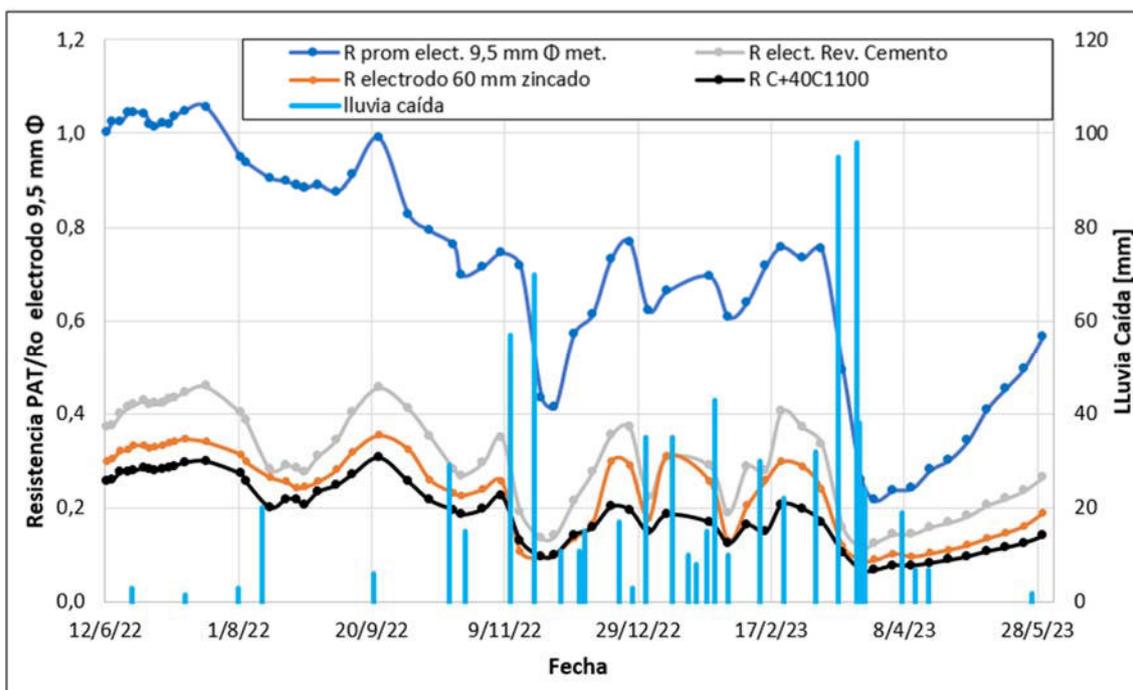


Figura 5. Variación de la RPAT de los distintos electrodos, al cabo de un año (Valores referidos a la resistencia inicial del electrodo de 9,5 mm de diámetro).

Realizando la comparación de la Rpat de los electrodos soterrados, Figura 5 (metálicos de 9,5 y 60 mm de diámetro, metálicos de 9,5 mm revestidos en pasta de cemento y C+40C1100), se observa que el grupo de electrodos de 9,5 mm de diámetro presenta la mayor Rpat del conjunto,



mientras que electrodos idénticos revestidos con una camisa de pasta de cemento de 60 mm de diámetro reducen su resistencia de Pat a un 40% en comparación con el electrodo anterior.

Analizando la  $R_{pat}$  que presenta un electrodo de acero zincado de 60 mm de diámetro frente a un electrodo de 9,5 mm recubierto con una camisa de idéntico diámetro de C+40C1100, se observa que este último presenta una  $R_{pat}$  menor que el electrodo metálico. Esta reducción de la  $R_{pat}$  puede deberse a que el electrodo de C+40C1100 fue realizado por vertido de la pasta, consiguiendo así un mejor contacto eléctrico con el suelo circundante, lo que disminuye la  $R_{PAT}$ . Además, el electrodo de cemento compuesto con carbón es poroso, lo cual permite la absorción de agua de las precipitaciones y la regresa al suelo próximo en períodos de sequía. Esto a diferencia del tubo de acero zincado, el cual es impermeable. Esta diferencia se pone en evidencia en la Figura 5 como una mayor dependencia de la  $R_{pat}$  del tubo de acero a los cambios de humedad ligados a las precipitaciones atmosféricas.

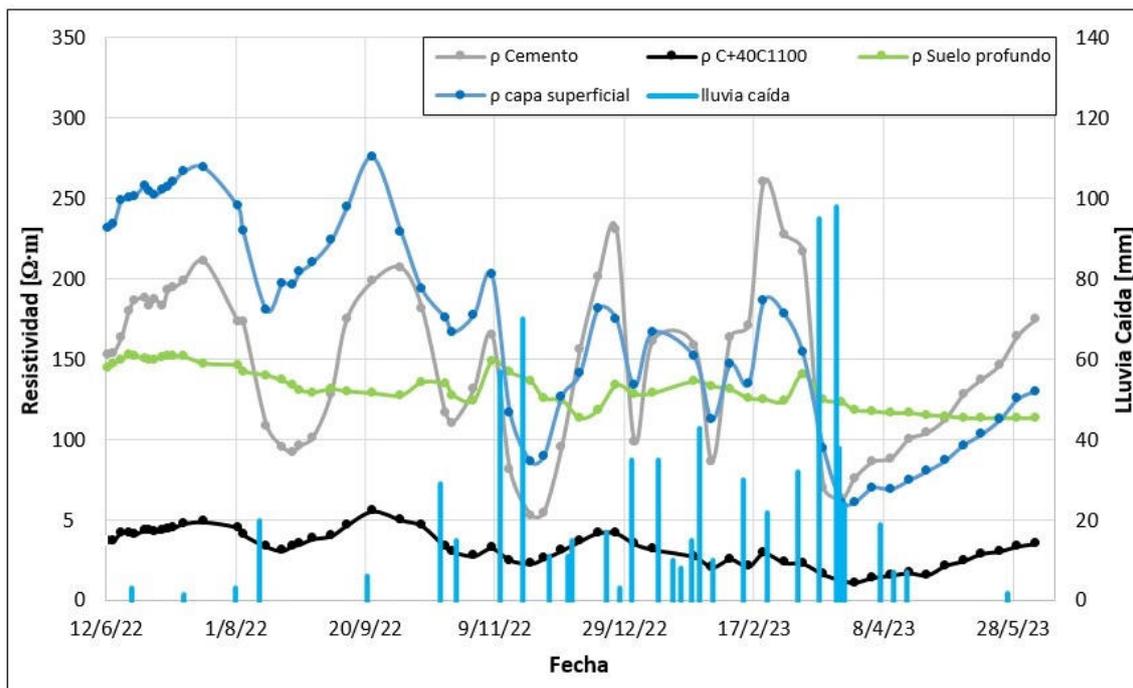


Figura 6. Evolución de la resistividad del suelo superficial y profundo, del cemento y del C+40C1100 a lo largo del tiempo. Se indican las fechas con precipitaciones.

La resistividad del terreno hasta una profundidad de 5 m se calculó utilizando la Ecuación (3) propuesta por Schlumberger, cuyos resultados se muestran en la Figura 6. En esta figura, podemos observar que la resistividad del terreno profundo muestra una dependencia reducida frente a la humedad proporcionada por precipitaciones atmosféricas de baja intensidad (menos de 30 mm de lluvia caída en un día).



Los valores de resistividad de la capa superior del suelo (500 mm), calculados utilizando la Ecuación de Dwight (1) y basándose en las resistencias de la PAT de cada uno de los electrodos hincados en la superficie, oscilan alrededor de  $270 \Omega \cdot m$  en condiciones de clima seco. Por otro lado, al realizar mediciones de resistividad a profundidades diez veces mayores mediante el método de Schlumberger, se observa que la resistividad disminuye a valores cercanos a los  $120 \Omega \cdot m$ . Durante el periodo húmedo o de lluvias, esta tendencia se invierte, ya que la capa superficial presenta una resistividad más baja en comparación con el suelo profundo. Esto se debe a la mayor presencia de humedad en la capa superficial, la cual no se ha infiltrado en las capas más profundas del terreno.

La presencia de humedad proveniente de las precipitaciones tiene un efecto significativo en la resistividad de la pasta de cemento que rodea los electrodos, especialmente en la zona ubicada entre los 200 y 500 mm de profundidad bajo la superficie del terreno. Cuando llueve, el agua penetra en la capa superior del suelo y se desplaza hacia el cemento, creando un camino para el movimiento de los portadores de carga secundarios. Esto se refleja en la Figura 6 como una disminución en la resistividad de la pasta de cemento después de las precipitaciones. En periodos de sequedad en el suelo, la resistividad de la pasta de cemento es mayor que la resistividad del suelo circundante. Sin embargo, después de recibir lluvias, la resistividad de la pasta de cemento disminuye considerablemente y alcanza valores inferiores incluso a los presentados por las capas profundas del terreno. Esto indica que la humedad afecta la resistividad de la pasta de cemento, volviéndola más conductora y reduciendo su resistividad en comparación con el suelo circundante.

Los valores de resistividad del cemento conductor son considerablemente más bajos que los valores de resistividad del suelo y de la pasta de cemento, tanto en condiciones de clima seco como después de las lluvias. En este caso, la influencia de la humedad superficial causada por las precipitaciones en la disminución de la resistividad del medio conductor es menos significativa, ya que la conductividad eléctrica se debe principalmente al carbón conductor añadido al cemento.

La comparación de los resultados anteriores revela dos evidencias importantes. En primer lugar, al colocar C+40C1100 en la capa superficial del suelo, se logran resistividades significativamente bajas. Esto indica que el cemento conductor tiene la capacidad de reducir de manera efectiva la resistividad del medio en comparación con el suelo natural. En segundo lugar, el C+40C1100 muestra una notable estabilidad frente a los cambios de humedad del suelo en términos de su resistividad. Aunque el suelo superficial experimenta variaciones significativas en su resistividad debido a los cambios en la humedad, el cemento conductor apenas experimenta cambios. Esta estabilidad en la resistividad del cemento conductor lo hace comparable a la estabilidad observada en la resistividad del suelo a una profundidad mayor.



#### 4. CONCLUSIONES.

La resistividad del cemento, con un agregado del 40% de carbón conductor obtenido a partir de la carbonización de cáscaras de maní a 1100°C, superando el punto de percolación eléctrica, varía entre 3 y 6  $\Omega \cdot m$  cuando está soterrado en el suelo de la Ciudad de Río Cuarto. Esta cifra representa una mejora considerable en comparación con las capas superficiales del suelo circundante, cuya resistividad varía entre 80 y 270  $\Omega \cdot m$  a lo largo del año.

La resistividad del cemento con agregado de carbón conductor es aproximadamente cuarenta veces menor, y más estable frente a las variaciones de humedad, comparada con la resistividad de la capa superficial del suelo circundante en las condiciones de ensayo.

La pasta de cemento con un agregado del 40% de carbón de cáscara de maní alcanza resistencias de puesta a tierra inferiores y más estables en el tiempo en comparación con la resistencia presentada por un electrodo metálico de dimensiones similares.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de UNRC (PPI 2020-2023), PICT-2020- SERIE A-00785. Mariano M. Bruno y Diego F. Acevedo son miembros de la CIC del CONICET.

#### REFERENCIAS.

- [1] Malanda, S. Davidson, I. Buraimoh, E. Singh, E. *Analysis of Soil Resistivity and its Impact on Grounding Systems Design*. IEEE PES/IAS PowerAfrica. 2018.
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std-142: IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems* New York: IEEE, 2007
- [3] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE 80: 2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York: IEEE, 2000.
- [4] Gouda, O. Amer G. EL-Saied, T. *Factors affecting the apparent soil resistivity of multi-layer Soil*, Proceedings of 14<sup>th</sup> Int. Sym. on HV Engineering (ISH 2005), Beijing, China, 2005.
- [5] Hildemaro Briceño, J. *Resistividad Del Terreno*. Departamento de Potencia-Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes Mérida - Venezuela
- [6] Ufer, H. *Investigation and Testing of Footing-Type Grounding Electrodes for Electrical Installations*. IEEE Trans. on Power App. and Systems, vol. 83, no. 10, pp. 1042-1048, 1964.



- [7] Martin, Y. Permata, D. Ulya, A. Marwansyah, M. Rahmat, A. Ufer *Grounding System to Minimize Risk of Lightning Strike using Concrete Mixed with Bentonite and Coconut Fiber*. Journal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni 9(1):133-140. 2020.
- [8] Wiener, P. *A comparison of concrete-encased grounding electrodes to driven ground rods*. IEEE Trans. Industry and General Applications, : IGA-6: 282287. 1970.
- [9] Al-Shawesh, Y, Chun Lim, S. Nujaim, M. *Analysis of the Design Calculations for Electrical Earthing Systems*. Int. Review of Electrical Engineering, Vol. 16, N. 2 ISSN 1827- 6660. 2021
- [10] Dwight, H. *Calculation of Resistances to Ground*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 55, no. 12, pp. 1319-1328, 1936.
- [11] Tagg, G. *Earth Resistance*. England: George Newnes Ltd, 1964.
- [12] Sunde, E. *Earth conduction effects in transmission line systems*. Dover Publications Inc., 1968.
- [13] Cotella, N., Gallo, D., Antonelli, S., Soler, L., Acevedo, D., Bruno, M. *Cemento compuesto multifuncional a partir de carbón de cáscara de maní*. CADI, CAEDI, CLADI 2021.
- [14] [http://www.probiomasa.gob.ar/\\_pdf/Balance\\_de\\_Energia.pdf](http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/Balance_de_Energia.pdf) (accedido el 06/2023).
- [15] <https://www.infocampo.com.ar/cordoba-la-produccion-de-mani-cayo-8-pero-aseguran-que-los-datos-son-positivos/>. (accedido el 06/2023).
- [16] Márquez, R. *La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el RAT*. Marcombo, 1990.
- [17] Tate, J. Foote, P. *Probe-wire measurements of anode fall of potential*. Journal of the Washington Academy of Sciences, Vol. 7, No. 15, pp. 482-486. 1917.
- [18] IEEE Std81-1983. *Guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system*. 1983.
- [19] Liew, A.; Darveniza, M.: *Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths*. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 121, (2), p. 123-135, 1974.
- [20] Fagan, E. and Lee, H. *The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes* IEEE Transactions on Industry and General Applications. IGA-6(4). 1970.
- [21] Mahadev, U, Vishal, T. *Soil Resistivity Measurement and Interpretation Technique*. International Journal of Engineering Research and Applications Vol. 10, Issue 5, (Series-I), pp. 25-30. 2020.
- [22] Wenner, F. *A Method of Measuring Earth Resistivity*. Report No. 258, Bulletin of the Bureau of Standards, Volume 12, No. 3. 1915.



## ESTUDIO METALGRÁFICO DE ACEROS Y FUNDICIONES DESTINADO A LA PRODUCCIÓN DE MATERIAL BIBLIOGRÁFICO DE REFERENCIA PARA INDUSTRIAS DEL LITORAL SANTAFESINO.

Hugo Mártires <sup>1</sup>, Natalia Veizaga <sup>1y2</sup>, Ricardo Verón <sup>1</sup>, Rodrigo Leurino <sup>1</sup> y Ezequiel Avellaneda <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento Académico de Mecánica – UTN Facultad Regional Santa Fe - Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina. [hmartires@frsf.utn.edu.ar](mailto:hmartires@frsf.utn.edu.ar); [nveizaga@frsf.utn.edu.ar](mailto:nveizaga@frsf.utn.edu.ar); [raveron@frsf.utn.edu.ar](mailto:raveron@frsf.utn.edu.ar); [rleurino@frsf.utn.edu.ar](mailto:rleurino@frsf.utn.edu.ar); [eavellaneda@frsf.utn.edu.ar](mailto:eavellaneda@frsf.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> CONICET – INCAPE- Instituto de investigaciones en catálisis y petroquímica– Universidad Nacional del Litoral - Colectora Ruta Nac. N° 168 Km 0 - Paraje El Pozo- (3000) Santa Fe – Argentina - [nveizaga@fiq.unl.edu.ar](mailto:nveizaga@fiq.unl.edu.ar)

### RESUMEN

En la región son utilizados una amplia variedad de materiales ferrosos de los cuales no hay bibliografía específica. Toda la información y estructuras de referencia están dispersas, incompletas y a través de años de docencia hemos observado que los alumnos y los profesionales no disponen de bibliografía enfocada de los materiales que se utilizan en las industrias de la región.

Las probetas incluidas dentro del muestrario metalográfico fueron evaluadas de acuerdo a la forma de suministro, aplicación, tratamiento térmico al que fue sometido el material, reactivo de ataque químico utilizado, aumento con el que fue tomada la micrografía, zona específica de la muestra estudiada, estructura metalográfica, dureza obtenida, tamaño de grano y la presencia de inclusiones no metálicas.

Se obtuvo una diversa variedad de imágenes metalográficas de materiales provistos por empresas de distintos rubros de la zona del litoral santafesino. Asimismo, con la recopilación de micrografías se logró un documento valioso de carácter académico y de interés para las industrias, con el objetivo de que las mismas puedan evaluar sus materias primas o la eficacia de sus procesos de fabricación.

**Palabras clave:** Metalografía; Tratamientos térmicos; Aceros; Fundiciones.



## 1. INTRODUCCIÓN.

En la región son utilizados una amplia variedad de materiales ferrosos de los cuales no hay bibliografía específica. Toda la información y estructuras de referencia están dispersas, incompletas y a través de años de docencia hemos observado que los alumnos y los profesionales no disponen de bibliografía enfocada de los materiales que utiliza la industria de la región. Particularmente, materiales de construcción de elementos de máquinas, generadores de vapor, intercambiadores de calor, herramientas y matricería.

Por otro lado, los materiales modernos-nuevos desarrollados por las acerías europeas y que se disponen en el mercado local presentan solo catálogos limitados a datos de trabajo y curvas orientativas sin referencias de vinculación de tratamientos térmicos y estructuras metalográficas.

Muchas veces, la capacidad del material no es aprovechada en su totalidad, y durante la etapa de trabajo del herramental hay tratamientos térmicos intermedios que se pueden realizar para aumentar considerablemente su vida útil incrementando de esta manera la eficiencia de la pieza. En este tipo de investigación no se cuenta con bibliografía concreta, si bien se disponen de manuales como ASM no puntualizan los materiales de uso local [1, 2].

Por lo tanto, el objetivo fundamental de este trabajo consiste en brindar al medio una bibliografía específica en forma de manual de micrografías. Se pretende mostrar de manera resumida parte de los materiales utilizados en la industria local (litoral santafesino) desde el punto de vista de la estructura metalográfica, asociándola a tratamientos térmicos, su función o requisito técnico.

## 2. METODOLOGÍA Y ENSAYOS EXPERIMENTALES.

### 2.1. Origen y procesamiento de las muestras.

Las muestras que dieron origen al compendio de imágenes aquí expuesto fueron procesadas en su totalidad en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, más específicamente en el Laboratorio Metalográfico Químico perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la misma.

Muchas de ellas fueron obtenidas a través del propio presupuesto de la universidad mientras que otras fueron donadas por las instituciones que se mencionan dentro de los agradecimientos.



## 2.2. Equipamiento utilizado.

El corte de las probetas fue llevado a cabo utilizando una cortadora metalográfica PRAZIS modelo. COR-01. El pulido de las mismas se logró con una Pulidora metalográfica de paño PRAZIS modelo PUL-01. Las imágenes metalográficas fueron observadas con un Microscopio trinocular metalográfico INV MET T – Aumentos 100x, 200x, 400x y 1000x el cual tiene acoplado una Cámara Web para microscopio MOTIC modelo MOTICAM 10 MP – Res. 3664 x 2748 pixeles y un Decodificador de imágenes, software MOTIC IMAGES PLUS 2.0 ML. La dureza fue llevada a cabo por un Durómetro Rockwell Superficial Cific – Modelo: HR2 – Certificado de calibración 7926 – Laboratorio de calibración NRZ. (Bloque Patrón de dureza NRZ - escala HR15N – Número 03758/07 – Certificado de calibración 3136) y Durómetro Rockwell Cific – Modelo: HR1 – Certificado de calibración S-43088 – Laboratorio de calibración LC 003.

## 2.3. Técnica metalográfica aplicada.

La secuencia de prácticas aplicadas a las probetas del presente trabajo son las que se listan a continuación [3].

### 2.3.1. Exámenes macrográficos

La forma más sencilla de realizar el estudio es examinando las superficies metálicas a simple vista o con lupa logrando determinar de esta forma las características macroscópicas. De este examen se extraen datos sobre los tratamientos metálicos sufridos por el material, es decir determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado entre otros, comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales de forja, rechupes de partes soldadas, asimismo los exámenes macrográficos se realizan sin preparación especial pero a veces es necesaria una cuidadosa preparación especial de la superficie para poner de manifiesto las características macroscópicas.

### 2.3.2. Exámenes Micrográficos.

Es una técnica más avanzada y se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos –microscopios- para observar las características estructurales microscópicas, o sea, micro estructuras. Para este estudio se necesita aun una preparación más cuidadosa de las superficies.

### 2.3.3. Pasos para la preparación de probetas metalográficas.

Los pasos para la obtención de una probeta metalográfica se listan a continuación.



- Toma de muestra no destructiva: Extremos de barras, coladas de piezas fundidas, trozos de perfiles, caños o barras según el material a investigar
- Toma de muestra destructiva: Por corte o separación de partes de piezas que estuvieran falladas o de fabricación.
- Corte: Con el método menos agresivo posible. Sierra de corte manual disco de cortes con herramientas metálicas, o discos abrasivos. En último caso corte con soplete dejando un sobre metal del orden de varios milímetros en la cara a observar. La temperatura que toma el material en la zona de observación no debe superar los 100°C.
- Dimensiones de la probeta: Probetas cilíndricas = 25 mm, probetas cuadradas = 20x20 mm, probetas rectangulares = 10x30 mm y altura = 20 mm.
- Las probetas de sección reducida no pueden trabajarse correctamente. Para obtener caras planas hay que incluirlas en resinas especiales (baquelita) o metales de bajo punto de fusión (Pb, Sn) y probetas de secciones muy grandes son muy pesadas se emplean más tiempo en emplearla y pueden romper o agredir papeles y telas abrasivos.
- Desbaste mecánico con piedras: Se emplea para eliminar rastros de operación de corte. Se utiliza piedras de carburo de silicio de grano medio o fino. No hay que presionar en exceso, ni sostener la probeta sin usar guantes y enfriar en agua cuando no se pueda sostener por el calentamiento.

Observar con frecuencia hasta obtener un rayado fino y uniforme luego lavar con abundante agua.

- Desbaste mecánico con tela o papeles de esmerilado fino: Se usa diversos grados de tamaño de abrasivo (Por ej.: 180-240-320-400-500-600) Se puede hacer a mano o con plato giratorio. A mano con hoja de abrasivo sobre un mármol a vidrio se aplica la cara de la probeta a desbastar sobre el papel y se mueve linealmente hacia abajo o arriba hasta obtener una superficie de líneas paralelas sin rastros del rayado anterior. Se lava la cara de observación, se pasa a un papel más fino girando la probeta a 90° y se prosigue hasta la de n° 600.
- Desbaste con plato giratorio: Se usan discos metálicos o de plástico intercambiables colocados en equipos que producen movimiento giratorio de 250 a 500 r.p.m.. La cara a observar se aplica sobre el disco y se sostiene con firmeza, sin oprimir en exceso. Conviene girar lentamente la probeta sobre su eje para no arrastrar inclusiones



conocidas normalmente como colas de cometa. Se puede usar baterías de platos con distintos abrasivos.

- Pulido final de la probeta: Plato giratorio cubierto con paño tipo billar. Se emplea un abrasivo en suspensión acuosa (alúmina en agua) 20 gramos de  $Al_2O_3$  en 1 litro de agua se agita enérgicamente y se deja reposar dos o tres minutos, se usa el líquido y se descarta el depósito, se moja la tela o el paño con el líquido abrasivo, se aplica la probeta sobre el paño, se gira lentamente la probeta hasta obtener un pulido a espejo. El tiempo de este es aproximadamente de 20 a 25 minutos luego se lava con agua y se seca con alcohol.

Después del pulido de las probetas, estas tienen una superficie capaz de reflejar un haz luminoso que se proyecta sobre ella de modo que el observador tendrá una imagen clara y brillante de esa superficie siempre que el material no tenga compuestos en su estructura que no reflejen la luz, es decir, un material totalmente metálico reflejara por completo la luz por eso es de principal importancia en primer término tener las probetas pulidas sin efectuar antes ataques superficial alguno. Estas observaciones primarias en probetas pulidas sin ataque permiten definir si la probeta está bien preparada, establecer los tipos y cantidades de inclusiones y distinguir si se trata de un acero o de una fundición

#### ***2.3.4. Caracterización de las probetas para ser incluidas dentro del compendio.***

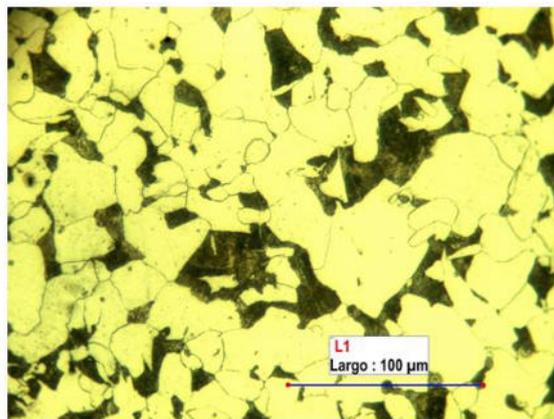
Con el fin de que las muestras sean observadas bajo el mismo criterio, las probetas incluidas dentro del muestrario metalográfico fueron evaluadas de acuerdo a la forma de suministro y aplicación, es decir, si la muestra se trata de un elemento de máquina o una pieza específica de algún equipo, o bien si la misma proviene de una de las formas básicas de provisión como podría ser una barra, una chapa, una planchuela, etc, y su uso dentro de la industria. También se incluye la norma del material que conforma la muestra. Seguido de esto, mencionamos el tratamiento térmico al que fue sometido el material. Luego, es importante mencionar el reactivo de ataque químico utilizado, el aumento con el que fue tomada la micrografía y la zona específica de la muestra estudiada. Finalmente se mencionan aquellas características que son el resultado del tratamiento térmico aplicado, como la estructura metalográfica, la dureza obtenida, el tamaño de grano y la presencia de inclusiones no metálicas.

### **3.RESULTADOS.**

Para poder presentar el trabajo se seleccionaron algunas de las imágenes que se pueden encontrar en el muestrario completo de 100 micrografías de aceros y fundiciones.



La Figura 1 presenta la micrografía de un acero SAE 5115. El mismo se encuentra en estado de suministro, tal como se lo podría adquirir en forma directa en una empresa siderúrgica. Particularmente, este material tiene gran interés dentro de la industria autopartista de nuestra región, utilizándose como en este caso para la fabricación de “pernos de pistón”.



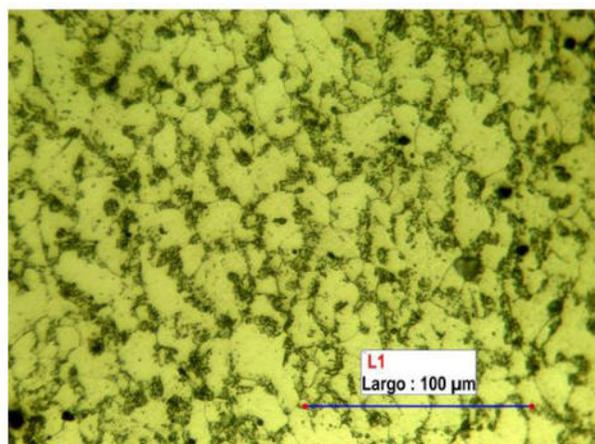
Fotografía N° 15 – Probeta 1-5-A

BARRA DE ACERO SAE 5115. Aplicación: Perno de Pistón. Sin tratamiento térmico.  
NITAL al 3% 400X (Núcleo) Dureza 46 HRB. Estructura ferropérlítica. Tamaño de grano 5,5.  
Muy pequeña cantidad de óxidos globulares ASTM tipo D serie gruesa.



Figura 1: Micrografía de un acero SAE 5115 - Perno de pistón

Por su parte, la Figura 2, muestra una probeta del mismo material que se presentó en la Figura 1 con la diferencia que dentro del proceso de fabricación se le ha aplicado un tratamiento térmico de recocido, obteniendo una estructura lo suficientemente blanda para un primer trabajo en frío de conformación del “perno de pistón”.



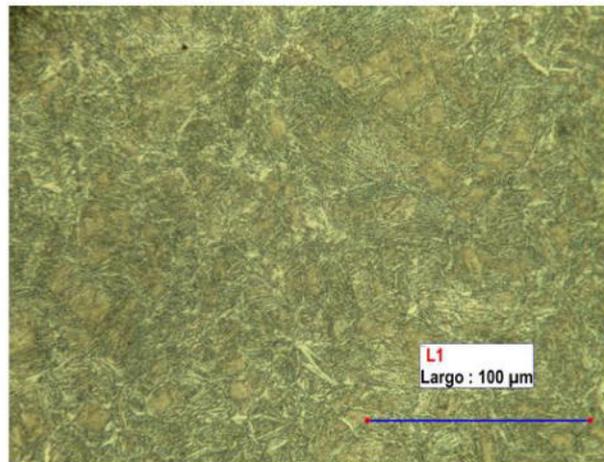
Fotografía N° 21 - Probeta 1-5-J

PERNO DE PISTÓN DE ACERO SAE 5115. Recocido. NITAL al 3% 400X (Núcleo)  
Dureza 33 HRB. Estructura ferropérlítica con poca presencia de bainita. Tamaño de grano 7.  
Se observan inclusiones ASTM Tipo "D" (Óxidos globulares) del grado 1.

Figura 2: Micrografía de acero SAE 5115 con tratamiento térmico de recocido, mostrando perlita globular [4], poca bainita e inclusiones [5,6]



Para continuar ejemplificando los estadios del mismo material SAE 5115 durante el proceso de producción, en la Figura 3 se observa el núcleo de un perno que fue sometido al tratamiento termoquímico de cementado, para luego ser templado y revenido. La estructura mostrada coincide con las características esperadas en este tipo de elementos de máquinas, correspondiendo a una estructura de gran tenacidad dentro del núcleo de la pieza.

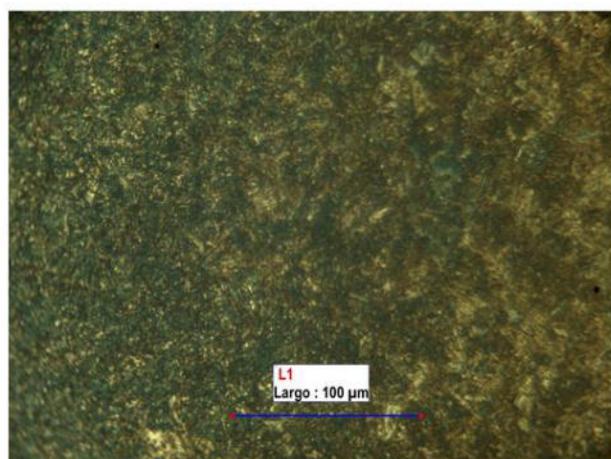


Fotografía N° 16 – Probeta 1-5-M

PERNO DE PISTÓN DE ACERO SAE 5115. NITAL al 3% 400X (Núcleo)  
Dureza 31 HRC. Cementado, templado y revenido. Estructura martensítica (zonas oscuras),  
algunos carburos no disueltos y ferrita (zonas blancas). No se observan inclusiones

Figura 3: Micrografía de acero SAE 5115 Cementado

Luego, la misma probeta puede ser observada en la zona periférica, que como consecuencia del tratamiento a la que fue expuesta será diferente a la observada en la Figura 3. En la Figura 4 se pudo observar la zona de transición de la estructura obtenida en el núcleo y en el borde.

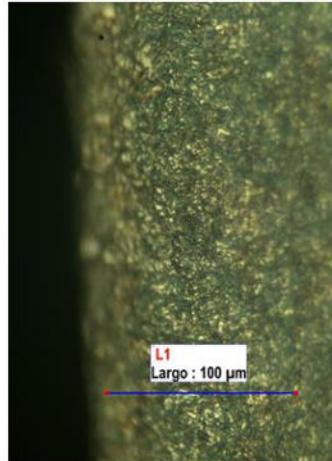


Fotografía N° 17 – Probeta 1-5-M

PERNO DE PISTÓN DE ACERO SAE 5115. NITAL al 3% 400X (Núcleo) Cementado, templado y revenido.  
A la derecha la estructura es martensítica (zonas oscuras), algunos carburos no disueltos y ferrita (zonas blancas).  
A medida que nos desplazamos hacia la izquierda (borde de la pieza), aumenta el contenido de carbono y la  
estructura se transforma en martensita (oscuro) con austenita retenida (pequeñas zonas claras).

Figura 4: Micrografía acero SAE 5115 en zona de transición

En la Figura 5 se visualiza el borde de la pieza, donde la estructura obtenida es la más resistente y de mayor dureza posible para el material en estudio.



Fotografía N° 18 – Probeta 1-5-L

PERNO DE PISTÓN DE ACERO SAE 5115. NITAL al 3% 400X (Borde)  
Dureza 58 HRC. Cementado, templado y revenido. Estructura martensítica de placas  
(Zonas oscuras) con austenita retenida (pequeñas zonas claras). Sin inclusiones visibles.

Figura 5: Borde de acero SAE 5115 cementado, mostrando estructura martensítica con austenita retenida [7].

Para esclarecer el grado de alcance de la aplicación del tratamiento termoquímico antes mencionado es necesario utilizar un aumento menor, dilucidando de esta forma la capa exterior cuyo contenido de carbono ha sido aumentado para obtener las características superficiales requeridas por el “perno de pistón”, como sucede en la Figura 6 que fue tomada con un aumento de 100X.



Fotografía N° 19 – Probeta 1-5-L

PERNO DE PISTÓN DE ACERO SAE 5115. NITAL al 3% 100X (Borde)  
Cementado, templado y revenido. Se dilucida con este aumento claramente la capa cementada.  
La imagen refleja con la medición el espesor de dicha capa.

Figura 6: Micrografía de acero SAE 5115 con 100 aumentos para realizar mediciones.



Completando la secuencia de imágenes dentro del proceso de fabricación del “perno de pistón” de acero SAE 5115, también podemos observar una fotografía macrográfica de la muestra (Figura 7), donde nos permite tomar conciencia de que la eficacia del tratamiento termoquímico aplicado puede ser evaluada, al menos cualitativamente, con sólo mirar la pieza a ojo desnudo y la observación de la capa de carbono circundante.

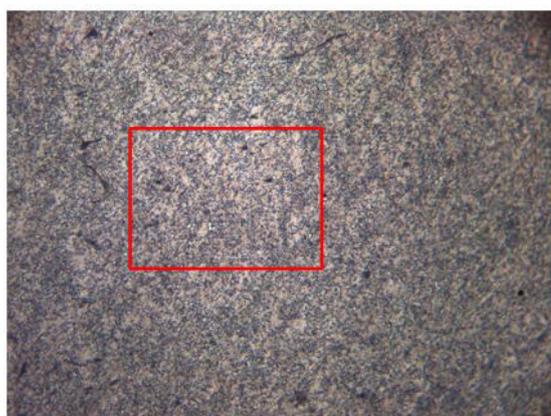


Fotografía N° 20 – Probeta 1-5-L

PERNO DE PISTÓN DE ACERO SAE 5115. NITAL al 3% Macrografía  
Cementado, templado y revenido. Se dilucida a ojo desnudo claramente la capa cementada.

Figura 7: Macrografía de perno de pistón de acero SAE 5115.

Otro ejemplo de material muy utilizado en la zona es el acero inoxidable AISI 420. El mismo tiene variadas aplicaciones, pero las micrografías que citaremos en el presente trabajo fueron obtenidas de una barra que se encontraba en proceso de transformación en una herramienta de mano. La Figura 8 nos muestra la estructura con menor dureza posible para el material en estudio, donde específicamente los carburos se encuentran en forma globular.



Fotografía N° 44 – Probeta 3-3-J

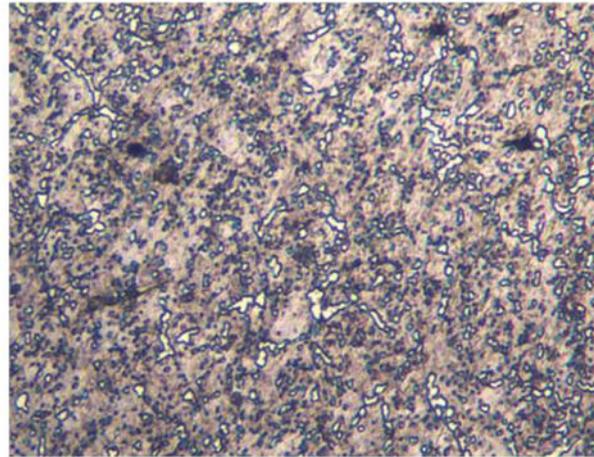
BARRA DE ACERO AISI 420. Tratamiento térmico de Recocido globular (36 Hs). Marble 400X. (Núcleo Dureza 30 HRB. Estructura Austenítica (matriz general) con glóbulos de carburos (pequeños óvalos clar) Sin inclusiones visibles



Figura 8: Acero AISI 420 Recocido para fabricar herramientas de mano.



Luego, la Figura 9 amplía la zona resaltada en la Figura 8, por el interés que para este caso representa el hecho de observar en mayor detalle la estructura.

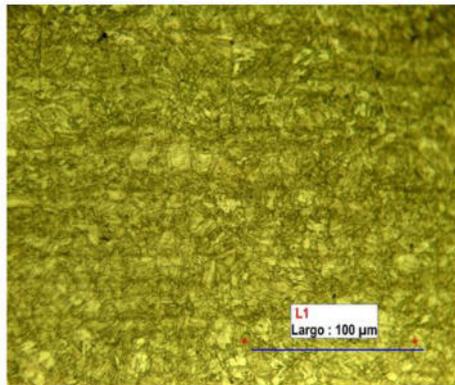


Fotografía N° 45 – Probeta 3-3-J

BARRA DE ACERO AISI 420. Tratamiento térmico de Recocido globular (36 Hs).  
Marble 400X. (Núcleo). Estructura Austenítica (matriz general) con glóbulos de carburos  
(Pequeños óvalos claros) y cementita nodular (círculos negros). (Ampliación cuadro rojo Fotografía N° 44)

Figura 9: Ampliación de micrografía de la figura 8 para facilitar su interpretación.

Finalmente, citamos la estructura metalográfica de la chapa utilizada para construir fundamentalmente tanques autoportantes para gas licuado de petróleo, confiriéndole propiedades de alta resistencia que permite bajar la tara del conjunto semirremolque.



Fotografía N° 29 – Probeta 1-9-A

CHAPA DE ACERO ASTM A517 GB – Aplicación: Tanques de GLP – Estado de suministro bonificado.  
Nital 400X (Núcleo). Dureza 26 HRC. Estructura bainítica inferior. Sin inclusiones visibles.



Figura 10: Estructura de chapa utilizada para la fabricación de tanques de GLP [8].

#### 4.CONCLUSIONES

Se logró obtener una amplia variedad de imágenes metalográficas de materiales provistos por empresas de distintos rubros de la zona del litoral santafesino. Asimismo, con la recopilación



de micrografías se pudo lograr un documento valioso de carácter académico y de interés para las industrias, con el objetivo de que las mismas puedan evaluar sus materias primas o la eficacia de sus procesos de fabricación.

Se diferenciaron las muestras de acuerdo a su aplicación, material y tratamiento térmico aplicado. A través de la metalografía, fue posible vincular las estructuras con los parámetros mencionados.

Fue posible observar los cambios de las propiedades del material a través del proceso de fabricación. Para el acero SAE 5115 usado en la fabricación de “pernos de pistón”, en primera instancia se observó una estructura perlítica de la barra en bruto, que luego de ser sometida al tratamiento térmico de recocido presentó una estructura globular pudiendo así ser extruida en frío. Finalmente, fue sometida a un tratamiento termoquímico de cementado dando como resultado una estructura martensítica de placas en el borde y de agujas en el núcleo entregando de esta manera una pieza con altas resistencia al desgaste y tenacidad.

#### **AGRADECIMIENTOS.**

Los autores de este trabajo desean agradecer a las empresas que otorgaron el material que compone el presente trabajo. Destacamos el valioso aporte de las empresas SNAE Argentina, SICA SA, FAPERSA, BIASSONI e hijos SAICA, INGENIERÍA TÉCNICA SA, Aguas Santafesinas SA.

#### **REFERENCIAS**

- [1] Metallography and Microstructures Volume 9 of ASM Metals Handbook, Autores varios pertenecientes a la ASM, USA, 2004
- [2] Heat Treating Volume 4 of ASM Metals Handbook, Autores varios pertenecientes a la ASM, USA, 1991
- [3] IRAM IAS U 500 – 34. Selección y preparación de muestras y probetas de productos de acero - Parte 1: Muestras y probetas para ensayos mecánicos. IRAM. Año 2003.
- [4] ASM International. Physical Metallurgy for Engineers. Miklós Tisza, USA, 2001.
- [5] Jian G. Zhu, Xichen Sun, Gary C. Barber, Xue Han y Hao Qin. Bainite Transformation Kinetics-Microstructure Characterization of Austempered 4140 Steel. Metals MDPI, 16 páginas, Año 2020.
- [6] ASTM E45-18A. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. ASTM. Año 2018.



[7] George F. Vander Voort. *Martensite and Retained Austenite*. Industrial Heating, Año 2009.

[8] ASTM A517 M-10. Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, High-Strength, Quenched and Tempered. Año 2010.



## DESARROLLO DE MATERIALES BIOBASADOS A PARTIR DE ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO Y SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES DE ARGENTINA

**Camila M. Picco, Silvina Regenhardt**

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica, Facultad de Ingeniería Química,  
Universidad Nacional del Litoral - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
(CONICET)- Argentina. N° Km 0, 3000, RN168, Santa Fe.  
[cpicco@fiq.unl.edu.ar](mailto:cpicco@fiq.unl.edu.ar) ; [sregenhardt@fiq.unl.edu.ar](mailto:sregenhardt@fiq.unl.edu.ar)

### RESUMEN

Los plásticos se han vuelto un problema a nivel mundial debido a la contaminación ambiental que generan. Los biomateriales son un potencial sustituto para materiales plásticos derivados del petróleo. Los mismos se pueden desarrollar a partir de fuentes renovables y de la recuperación de subproductos agroindustriales.

Estamos en busca de desarrollar materiales compuestos biobasados con residuos agroindustriales del Litoral Argentino con buenas propiedades para el desarrollo de productos de diseño. Se propone generar productos que reemplacen materiales plásticos y colaboren con el medio ambiente bajo un modelo de economía circular, es decir, aprovechando materias primas.

Se realizaron muestras de material compuesto usando como matriz almidón termoplástico (TPS) e incorporando como refuerzo cáscara de naranja (CN) y fibras de cañamo (FC), estas últimas son subproductos de Cannabis Sativa L. del Centro de Investigación y Desarrollo de Cultivo de Cannabis Medicinal, fruto de la cooperación entre Provincia, INTA y CONICET. Las probetas de estos biocompositos se realizaron con distintas dosificaciones mediante prensado en caliente a 70 Bar durante 30 min a 130°C logrando un material compuesto biobasado.

Es un trabajo incipiente y hasta el momento con los ensayos realizados se observó que el refuerzo de FC incrementa significativamente los valores de tensión a la flexión y tracción, y la cáscara de naranja aporta flexibilidad. Realizando algunas optimizaciones en la formulación consideramos que el material podría ser una alternativa al aglomerado o al tablero de fibra de densidad media (MDF), los cuales utilizan materiales derivados del petróleo para su fabricación.

**Palabras clave:** Biocomposito; Almidón termoplástico; Economía Circular; Fibra de Cañamo.



## 1. INTRODUCCIÓN

La generación masiva de plásticos se ha convertido en un importante problema ambiental debido a su durabilidad, resistencia a la descomposición y su impacto en los ecosistemas. Por esta razón, se está considerando la búsqueda de alternativas más ecológicas a los polímeros sintéticos. En particular, este trabajo se centra en encontrar una alternativa a los aglomerados de madera fabricados con polímeros termoestables, como el contrachapado y los tableros de partículas (MDF), que utilizan adhesivos de formaldehído, sustancia considerada tóxica.[1]

Los materiales compuestos mencionados anteriormente, que utilizan resinas de origen petroquímico, no solo dependen de un recurso no renovable, sino que también presentan una baja biodegradabilidad, lo que contribuye a la contaminación ambiental durante su disposición final. Estos materiales se utilizan comúnmente en revestimientos, paneles divisorios y amoblamientos.

Con el objetivo de desarrollar materiales compuestos libres de derivados del petróleo, ha surgido un interés creciente en los materiales compuestos biobasados o biomateriales. Estos materiales se producen a partir de almidones, gelificantes y celulosa bacteriana, y en ocasiones se combinan con fibras y cáscaras orgánicas como refuerzos. Se considera que estos biomateriales podrían ser sustitutos viables del plástico convencional. Además, tienen la ventaja de poder obtenerse a partir de la recuperación de subproductos de la industria.

En este sentido el almidón se considera uno de los polímeros naturales más prometedores para el desarrollo de biomateriales debido a su biodegradabilidad inherente y amplia disponibilidad. Sin embargo, el almidón tiene propiedades mecánicas limitadas, por lo que se propone la incorporación de refuerzos a la matriz de almidón para mejorar sus características [2].

En este trabajo, se busca formular un material compuesto utilizando almidón de mandioca como matriz y refuerzos de CN y FC. Estos refuerzos son biodegradables y se obtienen a partir de residuos o subproductos de bajo valor comercial de la industria en Argentina. El objetivo es aprovechar estos residuos agroindustriales para desarrollar un material biobasado y biodegradable [3]. Para obtener el polímero a partir del almidón, se requieren diferentes reactivos y condiciones específicas que aporten características de humectación, plasticidad, lubricación, extensión y resistencia [4]. El TPS es un material obtenido a partir de la desestructuración del gránulo de almidón cuando se procesa con bajo contenido de agua y bajo la acción de fuerzas térmicas y mecánicas, en presencia de plastificantes que no se evaporan fácilmente durante el procesamiento. Este material renovable y flexible puede adaptarse a diferentes procesos de termoplastificación utilizando equipos estándar utilizados en la fabricación de polímeros sintéticos [5].



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En primera instancia se acondicionaron los refuerzos. Para ello se secó, trituró y tamizó la cáscara de naranja y la fibra de cáñamo. Estas últimas fueron adquiridas de plantas de *Cannabis sativa L.* del Centro de Investigación y Desarrollo de Cannabis Medicinal, Acuicultura y Agroecología (CIDCaM), (Santa Fe, Argentina) y se extrajeron mediante un proceso de enriado, que permite separar las fibras liberianas de la porción leñosa del cáñamo [6].

Para el desarrollo de las muestras se empleó almidón de mandioca y glicerol como plastificante. Se preparó una suspensión en proporción agua-almidón de 4/1. Los demás componentes se incorporan en relación al almidón; 1/4 en peso de plastificante y 1/4 en peso de ácido acético. La suspensión se calentó durante 10 minutos a 90 °C con agitación constante para asegurar su completa gelatinización. Finalmente se añadió la cáscara de naranja y la fibra de cáñamo en diferentes proporciones para evaluar propiedades. Las mezclas se secaron en la estufa a 60 °C durante 24 horas obteniendo cuatro formulaciones: 100FC, 100CN, 20CN+2FC y 20CN+4FC, las cuales se detallan en la Tabla 1. Las distintas mezclas se trituraron y tamizaron para luego realizar el moldeo de 25 g en peso seco de polvo compuesto por termocompresión en caliente usando una prensa hidráulica termostalizada a 130° C y 70 bar durante 30 min.

Tabla 1. Formulaciones de las cuatro muestras

Materiales	100CN	100FC	20CN+2FC	20CN+4FC
Almidón	1	1	1	1
Ácido acético	1/4	1/4	1/4	1/4
Plastificante	1/4	1/4	1/4	1/4
Cáscara de Naranja	1	-	1	1
Fibra de cáñamo	-	1/10	1/10	1/5

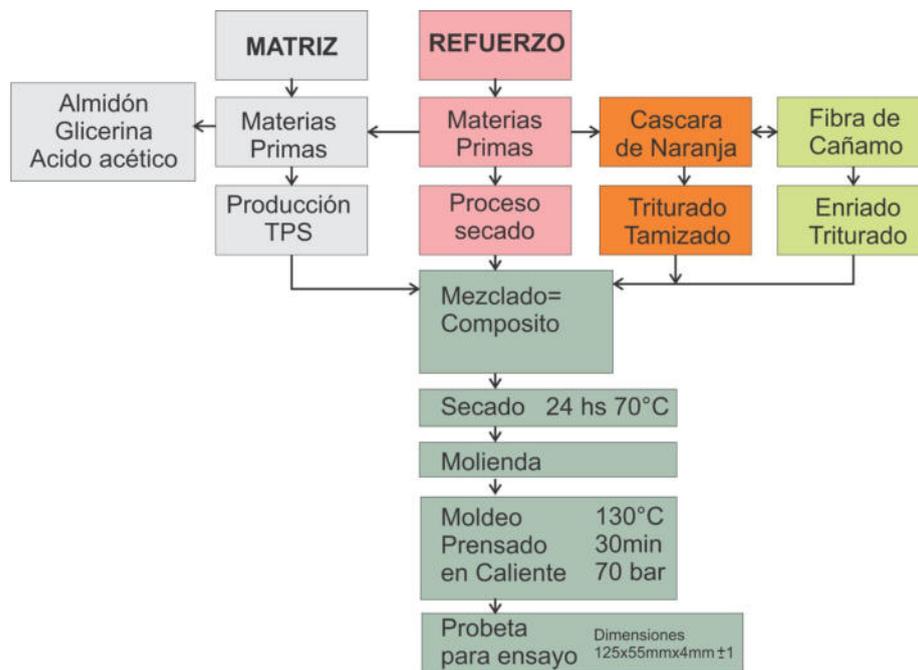


Figura 1: Esquema de pasos de procesamiento para obtener los materiales

Se obtuvieron placas rectangulares de  $2,5 \pm 1 \text{ mm}$  de espesor las cuales fueron cortadas por láser según especificación de normas para obtener probetas de cada formulación por sextuplicado para ensayar a tracción y flexión siguiendo la normas ASTM D790-17 [7] y ASTM D368-14 [8] respectivamente utilizando un equipo Instron 3344 (Instron, EE. UU.), con celda de carga de 1000 N. Antes del ensayo, las muestras se acondicionaron a  $23^\circ \text{ C}$  y 50 % de HR durante 24 hs.

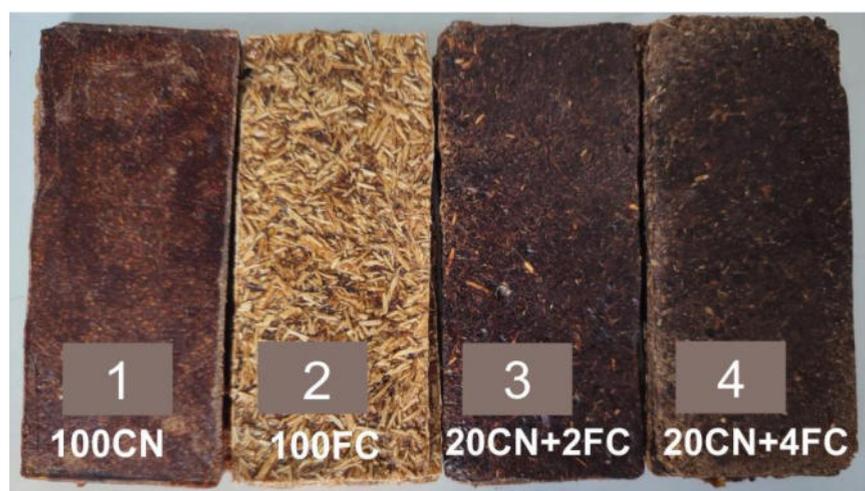


Figura 2: Formulaciones e imágenes de las muestras.



Asimismo se realizó ensayo de hinchamiento y absorción siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D1037 (1999) [9] para evaluar el comportamiento de las muestras al estar en contacto con agua. Para ello se estableció la masa y el espesor inicial de las probetas por quintuplicado luego de que se acondicionaran a 23°C y 50% HR hasta masa constante. A continuación, se sumergieron en agua destilada y se volvió a determinar el peso y el espesor a las 2h encontrando que la mayoría de las muestras se habían disuelto en el agua, esto llevó a no poder continuar con el procedimiento hasta finalizar el ensayo.

### 3. RESULTADOS

En cuanto a los resultados del ensayo de flexión, los materiales obtenidos mostraron una flexibilidad tal que no presentaron rotura en la superficie exterior antes del 5% de deformación porcentual, por lo tanto, se informa la tensión alcanzada para esta deformación del 5%, como establece la norma (Tabla 2). Se observó que la incorporación del refuerzo de FC incrementó significativamente los valores de tensión.

Tabla 2. Resultados del ensayo a la flexión. Norma ASTM D 790-17

Formulación	Tensión promedio (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
100%CN	2,26	80,84
100% FC	7,59	528,86
80CN+20FC	3,48	236,74
90CN+10FC	2,90	131,94
Promedio	4,06	244,60

En cuanto al ensayo de tracción (Tabla 3) podemos concluir que la FC aporta resistencia y la cáscara de naranja incrementa la deformación por tracción. Analizando ambos ensayos mecánicos y comparando con materiales existentes en el mercado los valores promedios de resistencia a la tracción (1,68 MPa) y a la flexión (4,06 MPa) se asemejan a un MDF de 3 mm de la empresa MASISA reportando valores de resistencia a la tracción de 1,00 MPa y a la flexión de 4,5 MPa.

Tabla 3. Resultados del ensayo a la tracción. Norma ASTM D 368-14

Formulaciones	Tensión de tracción (MPa)	Deformación por tracción a máxima Carga (%)	Módulo de Young (MPa)
100 %CN	1,67	4,73	110,03
100%FC	2,80	2,39	313,25
80CN+20FC	0,79	2,39	120,08
90CN+10FC	1,45	2,12	214,53
Promedio	1,68	2,91	189,47



En cuanto al ensayo de hinchamiento y absorción podemos concluir que los materiales desarrollados no poseen resistencia al agua. No obstante, en paralelo a estas muestras ensayamos unos films de TPS reforzados con CM Y FC producidos sin la etapa final de prensado en caliente y los mismos se mantuvieron estables y conservaron parcialmente sus dimensiones, lo que nos da indicios de que la resistencia al agua se puede mejorar reformulando el método de procesamiento de los materiales y evaluando la incorporación de aditivos a la formulación para mejorar su comportamiento al agua.

#### **4. CONCLUSIONES**

Este estudio logró obtener materiales compuestos con matriz de TPS reforzados con CN y FC que presentan un buen acabado superficial y son adecuados para el corte láser, mostrando viabilidad como alternativa al MDF. Sin embargo, se requieren ensayos adicionales de biodegradabilidad, envejecimiento acelerado por luz ultravioleta, análisis químicos (FTIR, TGA) y Microscopía electrónica de barrido (SEM) para una caracterización completa de los TPS reforzados y determinar la formulación más adecuada.

Además, a partir de los resultados obtenidos, se identificó la necesidad de mejorar la capacidad de absorción de agua de los materiales. Es importante destacar que los bioplásticos tienden a ser más costosos en comparación con los plásticos petroquímicos convencionales. Sin embargo, este mayor costo se compensa con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al aprovechar el CO<sub>2</sub> proveniente de la biomasa, lo que contribuye a establecer un equilibrio basado en la economía circular.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto de Tecnología Celulósica (ITC) FIQ-UNL por la colaboración en los ensayos mecánicos.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la beca doctoral para realizar la investigación.



## REFERENCIAS

- [1] Jaimes Morales J, Pérez Díaz K, & Severiche Sierra C. A. *Riesgo toxicológicos por la exposición ocupacional al formaldehído en sala de anatomía patológica*. Ciencia Y Salud Virtual, 6(2), 141–152., 2014.
- [2] Offiong E.U., Ayodele S.L. *Preparation and characterization of thermoplastic starch from sweet potato*. International Journal of Scientific & Engineering Research, 7(5), 438-447, 2016.
- [3] Xiaofei M., Jiugao Y. *The plasticizers containing amide groups for thermoplastic starch*, Carbohydr. Polym: 57 (2), 197-203, 2004.
- [4] Bastioli C. *Global status- production of biobased packaging*, Starch/Stärke: 53 (8), 351-355, 2001.
- [5] Zhai M, Yoshii F. y Kumb T. *Radiation of starch-based*, Carbohydr. Polym: 52(3), 311–317, 2003.
- [6] Muriel-Páez M, Pulla M. *El cáñamo, una fibra textil sostenible*. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6(6), 12155-12182, 2023.
- [7] ASTM D790. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM, 2019.
- [8] ASTM D368. Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics. ASTM, 2014.
- [9] ASTM D1037. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. ASTM, 1999.



## ESTUDIO DE LAS CAUSAS DE ROTURA EN TUBO DE HP MODIFICADO DE UN HORNO REFORMADOR

Mauro Puccinelli <sup>1</sup>, César Lanz <sup>1</sup>, Matías Sosa Lissarrague <sup>1</sup> y Daniel Ziegler <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica, Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina- [mauro.puccinelli@uns.edu.ar](mailto:mauro.puccinelli@uns.edu.ar) - [clanz@uns.edu.ar](mailto:clanz@uns.edu.ar) - [matias.sosa@uns.edu.ar](mailto:matias.sosa@uns.edu.ar) - [d.ziegler@uns.edu.ar](mailto:d.ziegler@uns.edu.ar)

### RESUMEN

En este trabajo se estudian las posibles causas de falla que han producido la rotura por fisuración en un tubo perteneciente a un horno reformador de una planta de fabricación de urea y amoníaco. Se utilizaron técnicas de caracterización como análisis metalográfico con microscopía óptica y medición de las propiedades mecánicas mediante ensayos de dureza Vickers. Los tubos analizados, son de la aleación refractaria HP modificada con niobio (HP-Nb), ampliamente utilizada cuando las condiciones de servicio son muy complejas por el tipo de especies químicas que circulan en el interior de los tubos. Las condiciones de temperaturas altas, del orden de los 800° a 950°C y la presión interna del tubo propia del proceso de pirolisis (en este caso de 6,7 MPa), provocan daños por creep y thermal aging en la microestructura. Se encontró que en la microestructura del material fallado aparecen voids propios del daño por el fenómeno de creep, y que dicho daño no ha llegado aún a la etapa de producir fisuración. Paralelamente, se halló que hubo fusión de determinadas fases de la microestructura (precipitación primaria), característica típica del daño por thermal aging. Estos factores, producen un ablandamiento de la aleación, dado que los valores medidos de dureza son inferiores al máximo especificado según la norma correspondiente para este tipo de aleaciones refractarias.

**Palabras clave:** HP-Nb; Thermal aging; Creep; Precipitación secundaria.



## 1. INTRODUCCIÓN

La aleación HP modificada con niobio (35Ni-25Cr-Nb), es utilizada en la fabricación de tubos y otras piezas que se emplean en los hornos de pirólisis en la industria petroquímica. Por su alto contenido de níquel y cromo, estas aleaciones presentan una alta resistencia al creep y a la corrosión para un rango de temperaturas de servicio entre 650 y 1050°C [1-5]. La resistencia a la carburación de estos materiales, está determinada por la estabilidad de la austenita, la cual depende de la relación entre el contenido de cromo y de níquel. Las elevadas concentraciones de estos elementos retardan la difusión del carbono hacia el interior de la pared del tubo [6]. La microestructura en estado as-cast está constituida por una matriz austenítica rica en hierro, níquel y cromo, fortalecida por una red de carburos eutécticos primarios, que pueden ser de tipo  $M_7C_3$  y/o  $M_{23}C_6$  ( $M = Cr, Ni, Fe$ ) y carburos del tipo MC, ( $M = Nb, Ti$ ). Durante el envejecimiento o el servicio prolongado a las temperaturas de trabajo, precipitan en la matriz carburos secundarios ricos en Cr del tipo  $M_{23}C_6$ . El niobio (así como otros microaleantes como el Ti), en proporciones adecuadas, controla la precipitación de carburos secundarios, fragmentando más aún la red de los carburos primarios y retardando la coalescencia de los carburos secundarios, siendo éstos últimos de menor tamaño [7]. Se ha señalado en la bibliografía de referencia, que la transformación del NbC a fases ricas en silicio (siliciuros como la fase G de composición  $Ni_{16}Nb_6Si_7$  o la fase  $\eta$  de composición  $Ni_3Nb_2Si$ ), tiene lugar gracias a la difusión del átomo de C, el cual es expulsado hacia la matriz, formándose de esta manera la precipitación secundaria [8-10]. Estos siliciuros, de naturaleza predominantemente frágil, han sido detectados por otros autores en aleaciones similares a la analizada en el presente estudio, a temperaturas entre 750 y 1000°C en la interfaz matriz/carburos primarios de niobio. Por otro lado, debido a que el proceso de difusión es más rápido en bordes de grano, la precipitación de tales fases en la matriz requiere de un tiempo mucho mayor.

El objetivo del presente trabajo, ha sido caracterizar la microestructura de la aleación para analizar las causas que desencadenaron la salida de servicio del equipo reformador para producir urea y amoníaco.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los tubos del horno reformador fallados en servicio fueron retirados del mismo para análisis de falla, y pueden observarse a continuación en la Figura 1, pudiendo notarse el severo daño sufrido.

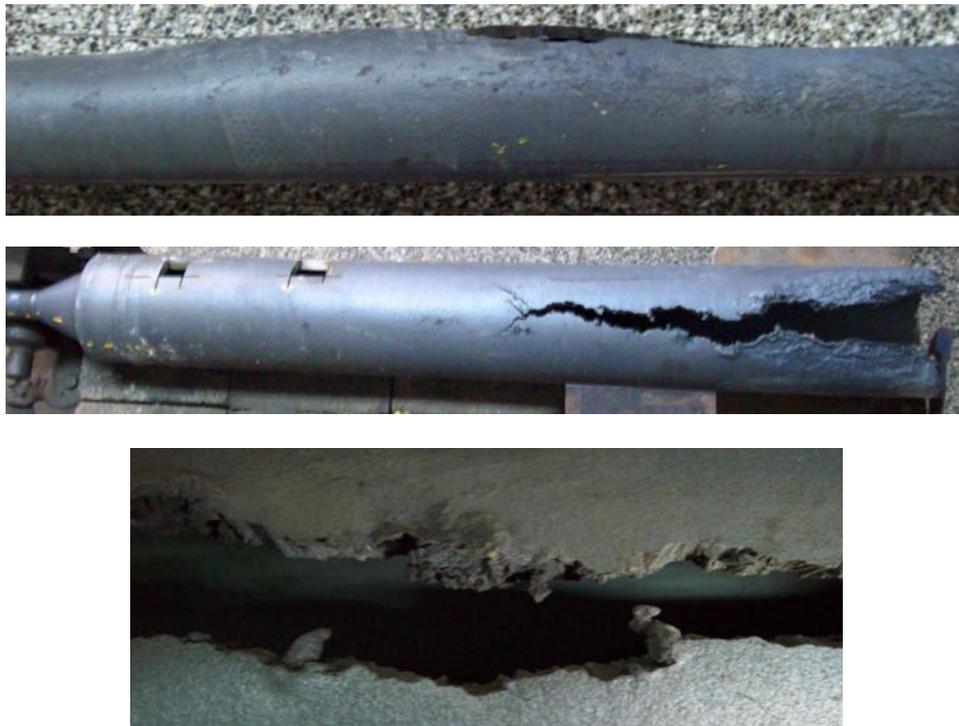


Figura 1: Tubos de la aleación HP-Nb fallados en servicio utilizados para el presente análisis.

A partir de uno de los tubos, se realizaron mediciones de composición química para identificar la aleación en cuestión. Los valores indicados en la Tabla 1, corresponden al promedio de tres mediciones y están dados en porcentajes en peso.

Tabla 1. Composición química de la aleación, expresada en % en peso

Muestra	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Fe	%Mo	%Ni	%Nb	%Fe
Tubo	0.44	0.49	0.67	23.55	38.04	0.03	38.04	1.12	Bal.

Según los valores obtenidos en el análisis químico del material, el tubo corresponde a una aleación Ni-Cr-Nb para alta temperatura con designación ASTM A297 Grado HP Mod. Los porcentajes de Cr están apenas por debajo del límite inferior de los valores aceptados por la norma. Una posibilidad es que los tubos nuevos de fábrica hayan venido con esos valores (verificable con control de recepción); la otra es que se hayan decromizado superficialmente por algún mecanismo durante la operación de los mismos. Para la observación metalográfica, se utilizó un microscopio óptico de platina invertida marca Leica modelo DM ILM equipado con cámara digital modelo DFC 295CCD, con un aumento máximo de 1000X. Las superficies de las muestras fueron atacadas químicamente mediante hisopado con el reactivo Murakami (10 g  $C_6N_6FeK_3$ , 10 g KOH y 100 ml de agua destilada), apto para este tipo de aleaciones altamente

resistentes a la corrosión. Las mediciones de dureza se llevaron a cabo con un durómetro Vickers marca Karl Frank con una carga de 20 kgf y un tiempo de aplicación de 30 segundos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Estudio metalográfico de muestras en zonas libres de falla

En primer lugar, para este fin se extrajeron dos (2) muestras del tubo fallado en las Zonas A y B alejadas de la zona fisurada mostradas en la Figura 2. La muestra A se encuentra a 290 mm del borde de unión tubo-cono por lo cual se ubica fuera de la protección de refractario, lo que expone a esta zona a la atmosfera de gases calientes. Por otro lado, la muestra B se localiza a 150 mm de dicho borde y queda bajo el refractario. Se realizó el pulido metalográfico bajo norma a fin de dejar las superficies preparadas para la observación en microscopio óptico de la sección transversal del tubo.

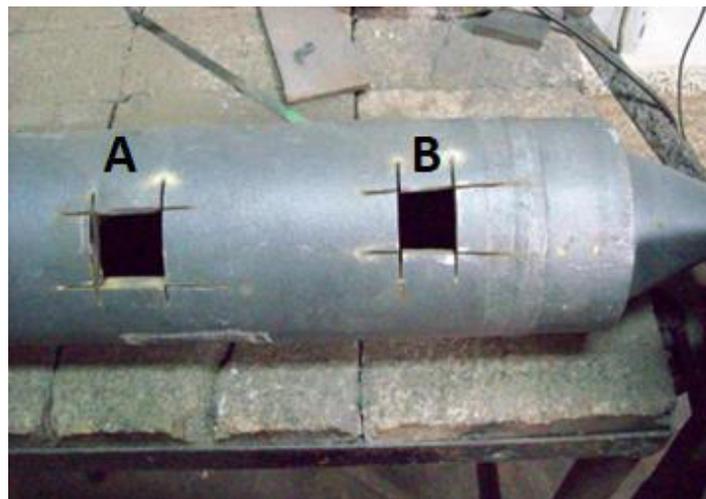


Figura 2: Zonas A y B para extracción de muestras para análisis metalográfico

La Figura 3, muestra la microestructura con 200X de la sección transversal en la zona media del espesor de pared del tubo. Se visualizan carburos primarios, secundarios y en negro posiblemente, existencia de voids aislados. El efecto sobre las propiedades mecánicas del fenómeno de creep, o fluencia lenta, puede medirse de forma cualitativa en base a la observación y análisis microestructural. Este método, consiste en la asignación de 5 fases en función del avance del daño según la curva  $\epsilon_{creep}$  vs.  $t$ . La microestructura observada, da cuenta de la existencia de voids o cavidades en los bordes interdendríticos, hecho que se corresponde con la fase A del daño por creep (ver Figura 4) [11].

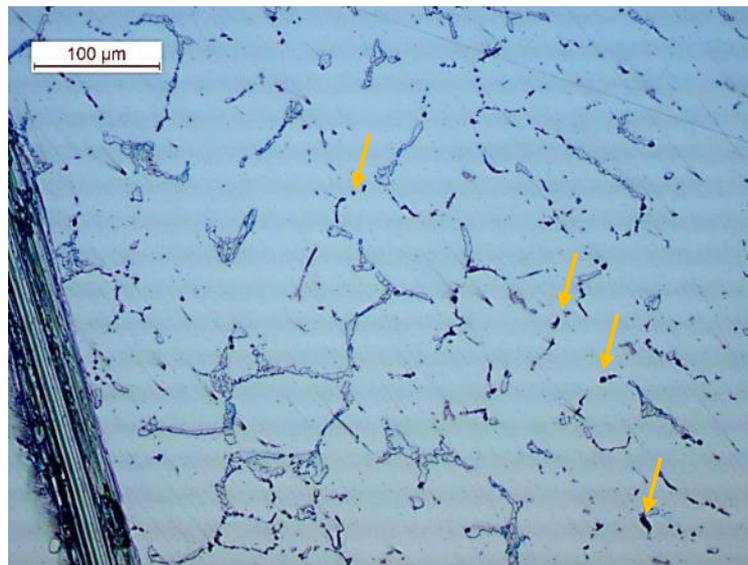


Figura 3: Microestructura de la Zona A, revelando la existencia de voids aislados señalados con flechas (200X)

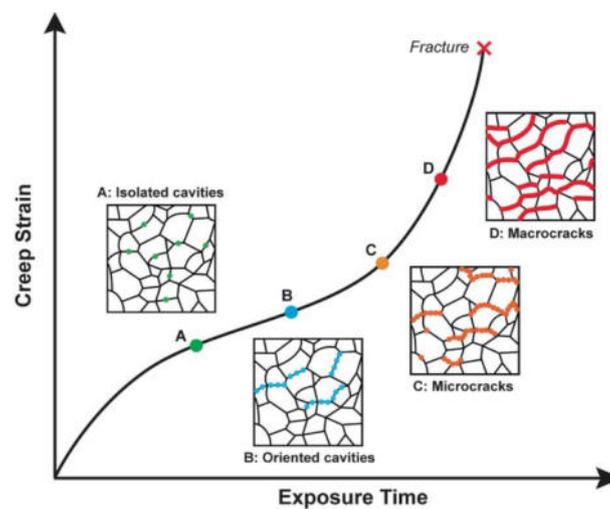


Figura 4: Fases del daño por creep hasta la fractura del material

Por otro lado, respecto a la muestra B que es la que se halla más cerca del borde del tubo, en la metalografía expuesta en la Figura 5 se visualizan carburos primarios en gran dispersión (disolución) y en negro la existencia tanto de voids aislados como ya coalescidos, correspondiente a la fase B del daño por creep, tal como se expuso en la Figura 4. Sin embargo, como ambas muestras fueron tomadas en zonas libres de falla, los voids todavía no forman microfisuras que puedan inducir a la falla, es decir, no se ha avanzado hacia la fase C del daño por creep.

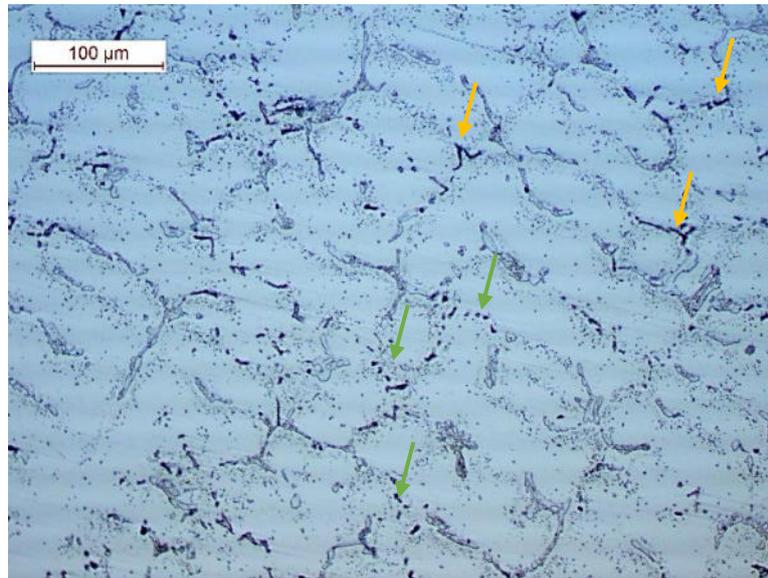


Figura 5: Microestructura de la Zona B, revelando la existencia de voids aislados (en verde) y coalescidos (en amarillo) (200X)

### 3.2. Estudio metalográfico de muestras en zona de falla

Se tomaron muestras de dos zonas de falla, tal como se expone en la Figura 6. Una es la zona de fisura por desgarramiento (D) y la otra (C), la punta del tubo muy cerca de la falla. En este último caso, se aprecia una apariencia áspera y de gran rugosidad de la superficie exterior del tubo. Cabe destacar, que los tubos fallados analizados y los tubos fallados que no se retiraron del horno reformador, presentaban esta apariencia de gran deterioro superficial y alta rugosidad.

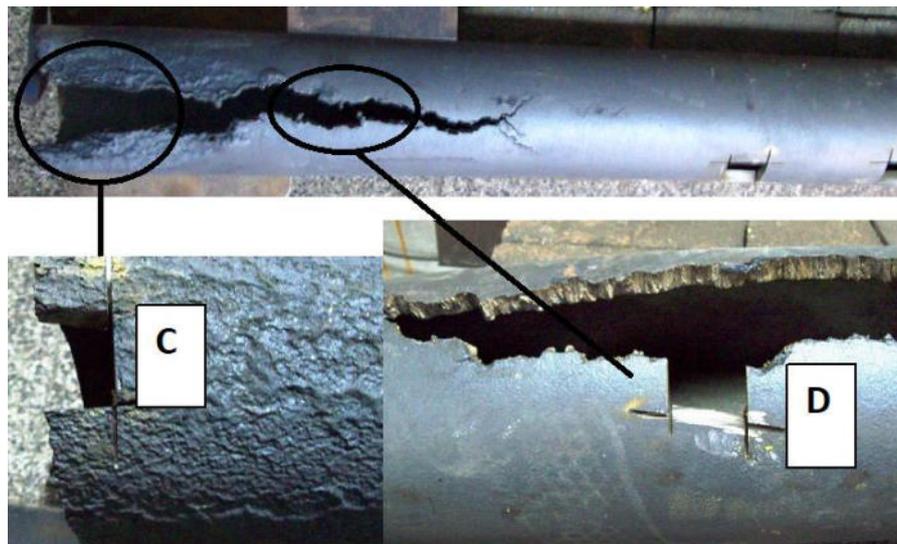


Figura 6: Zonas C y D para extracción de muestras en zonas de falla para análisis metalográfico



Luego de la preparación de la superficie de la muestra en la Zona C y la observación de la microestructura, se encontró la existencia de zonas negras (falta de material) en la misma que dan indicio de la fusión de las fases interdendríticas, hecho que ocurre en el lado interno del espesor de pared del tubo (ver Figura 7) [4]. La fase interdendrítica, consta de carburos primarios y secundarios dentro de la matriz austenítica. Es claro que, conociendo la temperatura a la cual se produce dicha fusión, podemos inferir cuál es la temperatura alcanzada por los tubos que tienen dicha apariencia.

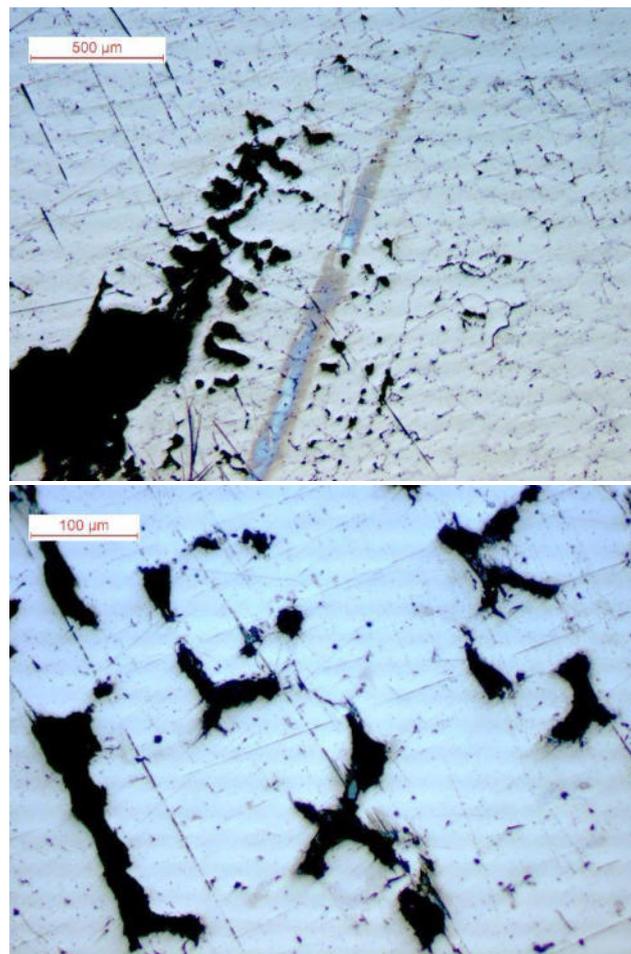


Figura 7: Microestructuras de la Zona C, donde se aprecia la ausencia de fases (200X arriba y 500X abajo)

En cuanto a la superficie de falla (fisura en Zona D), en la Figura 8 se muestra un área señalada en rojo que indica la fusión de las fases interdendríticas, dado que aparecen sitios oscuros. En la Figura 9, se observan los carburos primarios (oscuros e irregulares de mayor tamaño) y los secundarios (más pequeños y claros). La presencia de ambos carburos denota que no fueron disueltos, por lo que no sufrieron thermal aging fuera de la zona del rectángulo

rojo. Esta micrografía con mayor amplificación, corresponde a una zona fuera del área delimitada por el rectángulo en línea punteada de la Figura 8. También, se aprecia claramente la estructura dendrítica propia del proceso de fabricación de los tubos mediante colada centrífuga.

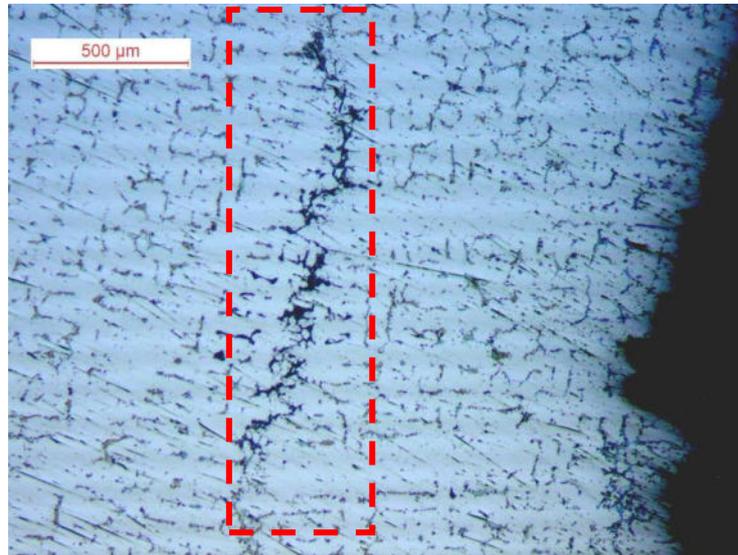


Figura 8: Zona cercana a la superficie de falla del tubo (Zona D) (50X)

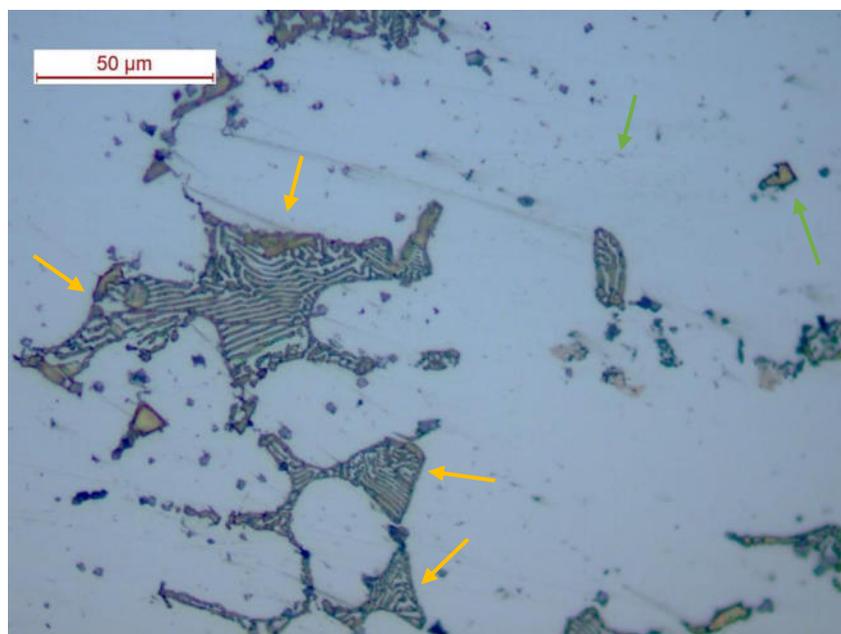


Figura 9: Carburos eutécticos primarios señalados con flechas amarillas y carburos secundarios señalados con flechas verdes en Zona D, fuera de la zona delimitada en rojo (1000X)

Dado lo expuesto anteriormente, se pretende demostrar que hubo fusión de los carburos (Figura 8). Sin embargo, fuera de dicha zona fundida, los carburos se encuentran no disueltos (ver Figura 9), indicando que hubo sobrecalentamiento localizado y por un corto tiempo que dio lugar al desarrollo del fenómeno de thermal aging [1,2]. De hecho, los registros de planta de temperatura en los tubos montados en el horno mostraron un pico cercano a los 1220°C. Habiendo deducido que algunos tubos llegaron a la temperatura de fusión de una de las fases (carburos), lo que produce la falla, resulta posible reforzar esta aseveración al observar el material en forma de “fibra” que une ambos lados de la fisura (ver Figura 10). Por el contrario, las fisuras producidas cuando se supera la resistencia mecánica de un material sin producirse fusión de alguna de sus fases poseen la característica distintiva de que son sin material que vincule ambas caras de la superficie de falla.



Figura 10: Fisura en el tubo, donde se observa el desgarramiento del material

### 3.3. Mediciones de dureza

La Tabla 2 contiene los valores medidos sobre la muestra Zona A sobre el exterior, medio e interior del espesor del tubo. Análogamente, la Tabla 3 muestra los resultados obtenidos de las mediciones en la Zona B. Similarmente, otros estudios sobre fallas en estos materiales hallaron disminución de dureza en zonas cercanas a la falla [12].



Tabla 2. Dureza Brinell (HB) en la Zona A en los puntos interior, medio y exterior del espesor de pared

Medición	Exterior	Medio	Interior
1	191	173	173
2	191	173	173
3	183	173	173

Tabla 3. Dureza Brinell (HB) en la Zona B en los puntos interior, medio y exterior del espesor de pared

Medición	Exterior	Medio	Interior
1	191	183	183
2	191	183	183
3	191	173	183

La Tabla 4 contiene los valores medidos sobre la muestra Zona C, donde se indica el valor de dureza en un sitio cercano a las fases eutécticas primarias fundidas. A su vez, la Tabla 5 muestra los resultados obtenidos de las mediciones en la Zona D.

Tabla 4. Dureza Brinell (HB) en la Zona C. El valor señalado en asterisco, corresponde a un sitio cercano al eutéctico fundido

Medición	HB
1	174
2	167
3	153*

Tabla 5. Dureza Brinell (HB) en la Zona D

Medición	HB
1	160
2	160
3	160



Los valores exhibidos, corresponden a la conversión de la escala Vickers a la escala Brinell. El valor de 153 HB señalado en asterisco corresponde a un punto cercano al eutéctico fundido, y es inferior a aquellos obtenidos al medir en zonas de las microestructuras que no presentan fusión. Todos los valores expuestos anteriormente, están por debajo del valor especificado como máximo de 209 HB para condiciones de fábrica de esta aleación en la norma ASTM B407-01.

#### 4. CONCLUSIONES

El estudio sobre los tubos de la aleación refractaria HP mod fallados, se realizó sobre los puntos A y B alejados de la fisura, en tanto que los puntos C y D se hayan sobre la misma, permitió llegar a las siguientes conclusiones. Según las observaciones microestructurales, si bien se aprecia la posible existencia de voids propia del daño por el fenómeno de creep, aún no se encontrarían en un estadio que pudieran producir fisuración y falla de los tubos analizados. Además, se corroboró la presencia de carburos primarios y secundarios, y en otros casos carburos primarios finamente dispersos, y ausencia de los secundarios por disolución. Esto obedece al fenómeno de thermal aging.

Por otro lado, resultó evidente la fusión de la fase interdendrítica en las zonas de falla analizadas. La temperatura de fusión de dicha fase es ligeramente superior a los 1200°C, por lo que el material ha sido expuesto a dicha temperatura. Esto se corrobora con los datos operativos recopilados durante el servicio del horno reformador. Cabe aclarar, que la temperatura de entrada del gas del horno reformador es del orden de los 710°C, mientras que la de salida es de 845°C. Sin embargo, en las condiciones de servicio real antes de la falla, se registraron temperaturas superiores a los 900°C.

Como resultado de los fenómenos de creep y thermal aging, se produjo un ablandamiento de la aleación dado que los valores medidos son inferiores al máximo especificado según la norma ASTM B407-01, que es de 209 HB.

#### REFERENCIAS

- [1] Cruz Nascimento M. L. *et al.* *Effect of short-time overheating in the morphology of primary carbides network in Nb and NbTi-modified HP stainless steels steam reforming tubes.* Journal of Materials Research and Technology, 22, 382–392, 2023.
- [2] Fuyang C., Gong J., Wang X., Panwisawas C., Chen B. *A physics-based life prediction model of HP40Nb heat-resistant alloy in a coupled creep-carburisation environment.* Materials Science and Engineering A, 860, 144260, 2022.



- [3] Haidemenopoulos G. N., Zervaki A. D., Kamoutsi H., Polychronopoulou K. *Creep rupture in HP-Nb refractory steel tubes due to short-term overheating*. European Journal of Materials, 1, 1, 1–22, 2021.
- [4] Orlikowski J. *et al.* *Investigation of the 0.4C-35Cr-45Ni-Nb alloy after service in high-temperature steam and hydrocarbons environment*. Materials, 14, 20, 2021.
- [5] Dao V. H., Song J. S., Kim J. Y., Yoon K. B. *Creep deformation characteristics of microalloyed HP40Nb steel at 950°C*. Journal of Mechanical Science and Technology, 33, 10, 4813-4821, 2019.
- [6] Song R., Wu S. *Microstructure evolution and residual life assessment of service exposed Cr35Ni45 radiant tube alloy*. Engineering Failure Analysis, 88, 63-72, 2018.
- [7] Fuyang C.-M. *et al.* *Effect of microstructural evolution in thermal exposure on mechanical properties of HP40Nb alloy*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 192, 104391, 2021.
- [8] Vaché N. *et al.* *Microstructural study of the NbC to G-phase transformation in HP-Nb alloys*. Materialia, 9, 100593, 2020.
- [9] Guo X. F. *et al.* *Formation of G-phase in 20Cr32Ni1Nb stainless steel and its effect on mechanical properties*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 30, 9, 829-839, 2017.
- [10] Abbasi M. *et al.* *G-phase formation in twenty-years aged heat-resistant cast austenitic steel reformer tube*. Materials Characterization, 148, 297-306, 2019.
- [11] Cunha Furtado E., Le May I. *High Temperature Degradation in Power Plants and Refineries*. Materials Research, 7, 103-110, 2004.
- [12] Harandi A.N., Eslami A., Bahrami A., Bakhtafrouz A., Yazdan Mehr, M. *Failure Analysis of Two HP-Nb Heat-Resistant Tubes after 46,000 h Exposure to Reformer Service Conditions*. Metals, 13, 228, 2023.



## EFFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE SOLDADURA DE PUNTO POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSSW) EN JUNTA DISÍMIL DE ACERO-ALUMINIO

César Marconi <sup>1</sup>, Víctor F. Pereira <sup>2</sup>, Alex M.S. Costa <sup>3</sup> y Hernán Svoboda <sup>1, 4, 5</sup>

<sup>1</sup> Departamento Metalurgia, Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional, Colon 332 (B2900LWH), San Nicolás, Buenos Aires, Argentina- [cmarconi@frsn.utn.edu.ar](mailto:cmarconi@frsn.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano), Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), Campinas, São Paulo, Brasil- [victor.pereira@lnnano.cnpe.br](mailto:victor.pereira@lnnano.cnpe.br)

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Laboratorio de Análisis Molecular y Elemental. San Lorenzo, Paraguay- [alexmatos1980@gmail.com](mailto:alexmatos1980@gmail.com)

<sup>4</sup> GTSyCM3 – INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Paseo Colon 850 (C1063ACV) CABA, Argentina.

<sup>5</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Godoy Cruz 2290, Ciudad de Buenos Aires, Argentina- [hsvobod@fi.uba.ar](mailto:hsvobod@fi.uba.ar)

### RESUMEN

La Soldadura de Punto por Fricción-Agitación (FSW) es una temática que ha venido creciendo significativamente en el último tiempo, fundamentalmente para aplicaciones en la industria automotriz. Especialmente ha encontrado un fuerte interés en uniones disímiles entre Acero y Aluminio, asociado a las dificultades que encuentran este tipo de uniones en procesos por fusión.

En el presente trabajo se analizó la influencia de las variables del proceso Friction Stir Spot Welding (FSSW) sobre la macroestructura, integridad de la interfaz acero-aluminio y carga de rotura, en uniones solapadas de un acero dual phase (chapa inferior - DP1000) y una aleación de aluminio (chapa superior - AA1050) de 1,2 y 2 mm de espesor, respectivamente. Se utilizó una herramienta con hombro cóncavo construida en una aleación base cobalto. Los parámetros del proceso variados fueron la velocidad de rotación de la herramienta, la indentación y el tiempo de permanencia, mientras se mantuvo constante la velocidad de indentación.

Se observó que las dimensiones del hook (flujo de acero en la chapa de aluminio) aumentaron con la indentación, mientras que su tamaño no se modificó sustancialmente con la variación de la velocidad de rotación y el tiempo de permanencia. Se observó la presencia de una capa de compuestos intermetálicos en la interfaz, cuyo espesor disminuye radialmente desde el hook hacia la parte externa del punto. Dicho espesor está directamente relacionado con el tiempo de permanencia. Para 2000 rpm la carga de rotura aumentó con la indentación. El aumento del tiempo de permanencia de 1 a 2 seg produce un incremento en la carga de rotura, para todos los niveles de indentación. Para 2500 rpm la carga de rotura es superior al de 2000 rpm (aprox. 20%).

**Palabras clave:** Soldadura de Punto por Fricción Agitación (FSSW), Junta Disímil Aluminio-Acero, Indentación, Tiempo de Permanencia.



## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de acero de alta resistencia y tenacidad, así como de aleaciones no ferrosas, ha aumentado notablemente en la industria del automóvil para cumplir con las regulaciones globales de resistencia a impactos y disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>. Por ello, nuevas clases de aceros se han desarrollado durante las últimas dos décadas bajo la amplia categoría de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), dentro de la cual se encuentran los aceros *Dual Phase* (DP).

Por otro lado, las aleaciones de aluminio se han venido aplicando cada vez con mayor frecuencia en la industria del automóvil debido a su excelente resistencia específica. Con el uso creciente de acero DP y aleaciones de Al, estructuras multimateriales son inevitables en la carrocería de los automóviles [1]. Sin embargo, las uniones Aluminio-Acero presentan baja soldabilidad debido a sus diferentes puntos de fusión, resistividad eléctrica, conductividad térmica y coeficientes de expansión térmica. Además, se forma una capa de compuesto intermetálico Al-Fe (IMC) en la interfaz, la cual puede afectar las propiedades mecánicas de la unión [2].

El proceso de soldadura de punto por fricción agitación (FSSW) recientemente recibió considerable atención de la industria del automóvil ya que ha demostrado ser un medio rentable y productivo para unir materiales ligeros como el aluminio, así como aluminio con acero. En este proceso, una herramienta rotante es insertada del lado del aluminio hasta que entra en contacto con el acero, ubicado en el lado inferior de la junta de solape. Durante este proceso el acero es deformado plásticamente, siendo extrudado dentro de la chapa de aluminio, formando un hook que produce un anclaje mecánico. Asimismo, una unión metalúrgica puede formarse en interfaz Al/Acero asociada a la generación del IMC de Al-Fe [3]. Sin embargo, los tiempos de soldadura, la vida de la herramienta y la calidad de la soldadura son todavía evaluados con fines comerciales generalizados [4].

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la velocidad de rotación de la herramienta, la indentación y el tiempo de permanencia (Dwell Time), manteniendo constante la velocidad de indentación, en uniones disimiles de acero DP de 1000 MPa de resistencia a la tracción de 1,2 mm de espesor con aleación AA1050 de 2 mm, soldadas por FSSW.

## 2. METODOLOGÍA

Como materiales base se utilizaron una chapa de 1,2 mm de espesor de acero DP de 1000 MPa de resistencia a la tracción y una chapa 2 mm de espesor de aleación de aluminio AA 1050, sobre las cuales se determinó la composición química mediante espectrometría de emisión óptica (OES) y se realizó la caracterización microestructural mediante microscopia

óptica. Asimismo, se determinaron las propiedades mecánicas mediante mediciones de microdureza Vickers (HV1Kg) y ensayo de tracción uniaxial. En la Tabla 1 se muestra la composición química de los materiales empleados expresada en porcentaje en peso (wt%).

Tabla 1. Composición química de los metales base (wt%) (\*ppm)

Muestra	Al	Fe	Si	Mg	S	Ti	Mn	Cr
AA1050	99,2	0,43	0,16	0,12	0,018	0,01	-	-

Muestra	C	Mn	Si	P	S	Nb	Ti	V	B*	Al	Cr	Mo	Cu
DP1000	0,14	1,49	0,48	0,009	<0,001	0,016	0,003	0,006	3	0,039	0,03	0,01	0,01

En la Tabla 2 se muestran los resultados de las propiedades mecánicas de los materiales base empleados.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los metales base

HV: Microdureza Vickers. R<sub>UTS</sub>: resistencia a la tracción. R<sub>f</sub>: tensión de fluencia. A: alargamiento a rotura.

Probeta	HV	R <sub>UTS</sub> (MPa)	R <sub>f</sub> (Mpa)	A (%)
AA1050	33	108	100	12
DP1000	309	1032	753	10

Se observa que el acero corresponde a un material de alta resistencia, superando los 1000 MPa de resistencia a la tracción con una relación de R<sub>UTS</sub> / R<sub>f</sub> de 1,37, con un buen alargamiento a rotura.

En la Figura 1a se muestra la microestructura del acero base. Se aprecian las islas de martensita en una matriz de ferrita y tamaño de grano fino uniforme de 2 a 3 μm de diámetro en todo el espesor de la chapa. El contenido de cada fase corresponde con un 57 % de ferrita y un 43 % de martensita. En la Figura 1b se muestra la microestructura de la aleación de aluminio base de la serie 1000, la misma corresponde a una solución sólida de aluminio endurecida por deformación.

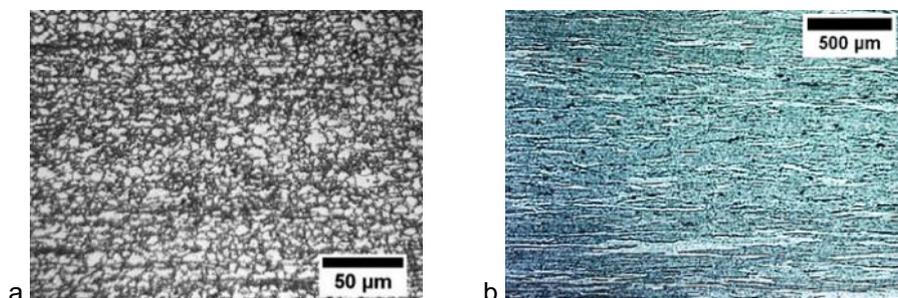


Figura 1: Microestructura: a) del acero base DP 1000 y b) de la aleación de aluminio AA1050

Para la ejecución de los puntos de soldadura se utilizó una máquina RM-1 - Transformation Technologies Inc., con capacidad de carga de 0 - 80 KN, velocidades de rotación de 0 - 3000

rpm y una precisión de 0,01 mm, la cual se muestra en la Figura 2a. Inicialmente se realizaron pruebas preliminares a fin de definir la matriz de ensayos a analizar, a partir de información de trabajos previos [5].

Se trabajó con una herramienta cóncava a base de cobalto con un pin de 1,7 mm y un hombro de 11 mm de diámetro, con el diseño de la Figura 2b. Los parámetros del proceso variados fueron la velocidad de rotación de la herramienta (2000 y 2500 rpm), la indentación de la herramienta (2,2; 2,45; 2,6 y 2,7 mm), y el tiempo de permanencia o Dwell time (1, 2, 3 y 5 s), mientras se mantuvo constante la velocidad de indentación (40 mm/min). En la Tabla 3 se resume la matriz de ensayos.

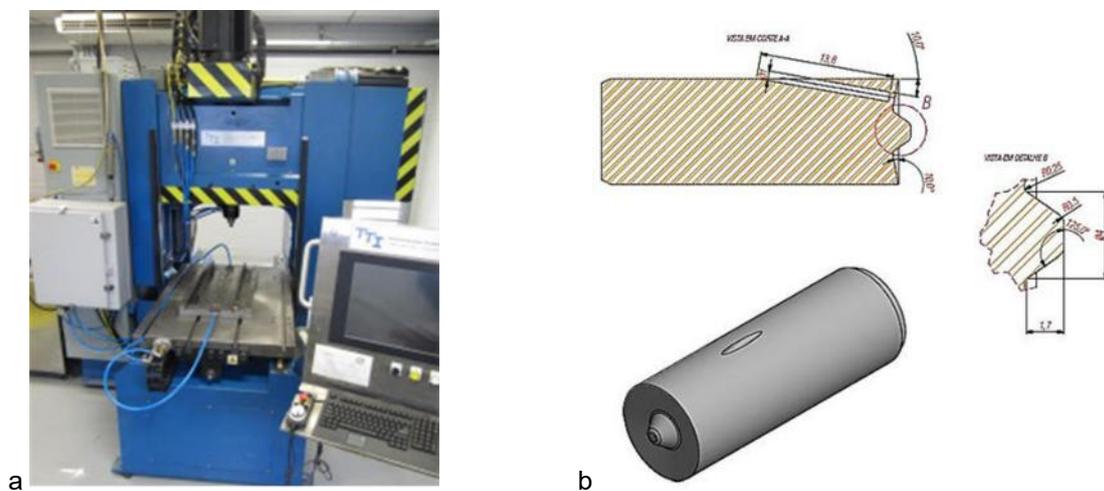


Figura 2: a) Equipo experimental empleado, b) Esquema de la herramienta base Co empleada

Tabla 3. Identificación de los puntos de soldadura y los parámetros utilizados

Identificación	Penetración (mm)	Vel. rotación (rpm)	Dwell time (s)
B-2000-1	2,2	2000	1
B-2000-2	2,2	2000	2
B-2500-1	2,2	2500	1
B-2500-2	2,2	2500	2
M-2000-1	2,45	2000	1
M-2000-2	2,45	2000	2
M-2500-1	2,45	2500	1
M-2500-2	2,45	2500	2
A6-2500-1	2,6	2500	1
A6-2500-3	2,6	2500	3
A6-2500-5	2,6	2500	5
A7-2000-1	2,7	2000	1
A7-2000-2	2,7	2000	2
A7-2500-1	2,7	2500	1
A7-2500-2	2,7	2500	2



Sobre las uniones soldadas se realizó una inspección visual y se evaluó el aspecto superficial de los puntos. Asimismo, se prepararon probetas para observación metalográfica. Se realizaron cortes transversales de cada unión y se analizó la macroestructura. Todas las muestras se desbastaron con papeles abrasivos de carburo de silicio hasta grado 600, el pulido final se realizó utilizando pasta diamantada de 6 y 1  $\mu\text{m}$ . La macroestructura de soldadura se reveló con Nital 2% para el caso del acero, y con ácido fluorhídrico 0,5% para el aluminio, y se obtuvieron imágenes con lupa estereoscópica Olympus SX61. Sobre las macrografías de cada punto soldado se evaluó la presencia de defectos y se realizó un análisis dimensional empleando el software de análisis de imágenes libre ImageJ, relevando las dimensiones mostradas en el esquema de la Figura 3.



h Al: altura del aluminio; h ind: profundidad de la indentación; h SZ: profundidad de la Zona Agitada (SZ); Y: altura del Hook; X: ancho del Hook

Figura 3: Esquema de las mediciones tomadas en la sección transversal de los spots FSSW

La evolución microestructural en las distintas zonas de la junta se analizó mediante LM y SEM, tanto para el lado del acero, como para el lado del aluminio. Se establecieron 4 zonas para cada material: Zona de Metal Base (MB), Zona Afectada por el Calor (HAZ), Zona Termomecánicamente Afectada (TMAZ) y la Zona Agitada (SZ). Además, mediante SEM y EDS, se analizó la presencia de intermetálicos (IMC) en la interfaz entre el aluminio y el acero DP 1000. Se tomaron mediciones de espesor y longitud de la capa continua de IMC a lo largo de la interfaz, y se realizaron perfiles de composición química semicuantitativo atravesando la misma, en diferentes zonas a distancias regulares del hook.

Se realizaron ensayos de arranque del tipo Shear Test (ST) y Cross Tension Test (CTT). Para ello se repitieron los puntos con los mismos parámetros utilizados para la caracterización macroestructural. De cada unión soldada se hicieron tres probetas, de acuerdo con el esquema de la Figura 4.

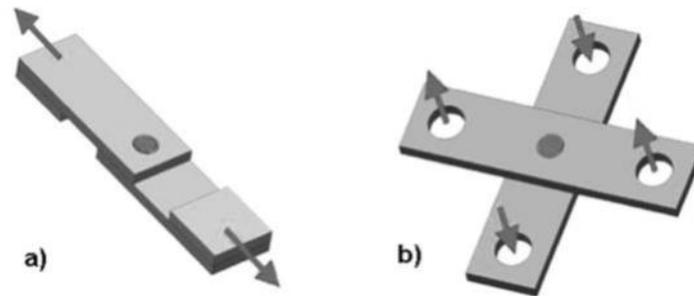


Figura 4: Esquema de las probetas para los ensayos de arrancamiento: a) ST y b) CTT

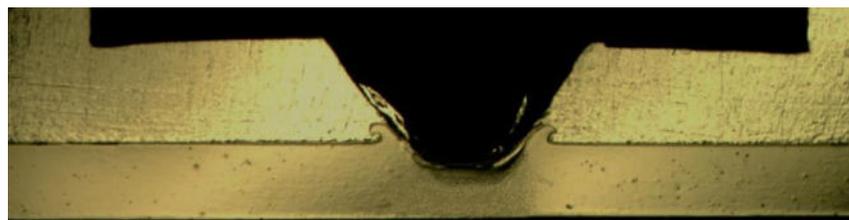
Las mismas fueron ensayadas con una máquina de tracción universal servo hidráulica MTS de 250 kN y los resultados de carga máxima fueron promediados para las distintas condiciones analizadas.

Se analizaron las superficies de fractura en cada caso y se realizaron cortes longitudinales de las muestras ensayadas, a fin de analizar los mecanismos de fractura actuantes.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Inspección Visual, Análisis Dimensional y Macrografía

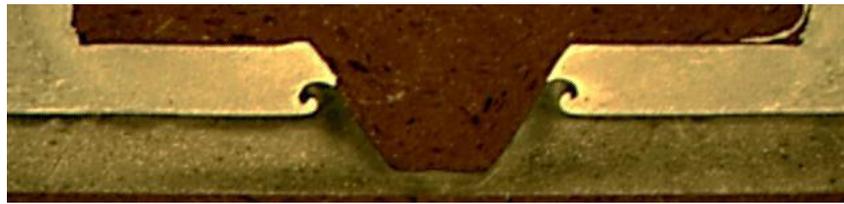
La Figura 5 muestra las macrográficas de los distintos puntos soldados a 2500 rpm y 2 s de Dwell Time con las diferentes profundidades de indentación (2,2; 2,45 y 2,7 mm). En las mismas se aprecian las distintas zonas de las juntas soldadas, la morfología de estas y aspectos dimensionales.



B-2500-2



M-2500-2



A7-2500-2

Figura 5: Macrografías de los puntos con diferentes profundidades de indentación

En la Tabla 4 se muestran las mediciones realizadas de los aspectos geométricos de cada punto soldado. Además, se agrega la medición de la longitud promedio de la capa de intermetálicos (IMC) en la interfaz a cada lado de los hooks izquierdo y derecho, y el espesor promedio de la misma.

Tabla 4. Mediciones geométricas ( $\mu\text{m}$ ) de los puntos soldados

	<b>h Al</b>	<b>h Ind</b>	<b>Y prom</b>	<b>X prom</b>	<b>Long. IMC prom</b>	<b>Esp. IMC prom</b>
<b>B-2000-1</b>	1520	370	278	435	3430	--
<b>B-2000-2</b>	1563	390	355	520	2418	--
<b>B-2500-1</b>	1385	345	323	640	4425	--
<b>B-2500-2</b>	1410	335	310	540	4100	--
<b>M-2000-1</b>	1210	590	403	718	3970	--
<b>M-2000-2</b>	1180	560	388	655	4750	--
<b>M-2500-1</b>	1313	540	455	783	2835	--
<b>M-2500-2</b>	1170	590	435	798	4700	--
<b>A6-2500-1</b>	1023	700	445	795	3500	1,5
<b>A6-2500-3</b>	1055	680	455	805	3800	1,7
<b>A6-2500-5</b>	1080	720	448	848	4100	1,9
<b>A7-2000-1</b>	1191	780	576	700	3450	1,3
<b>A7-2000-2</b>	1235	682	483	634	4250	1,7
<b>A7-2500-1</b>	1144	858	513	866	3135	--
<b>A7-2500-2</b>	1032	856	536	816	3530	--

En cuanto al espesor de Al por encima del flujo de acero dentro de la chapa superior ( $h$  Al), puede verse que disminuye a medida que la indentación de la herramienta aumenta. Si sumamos la altura de Al y la profundidad de la indentación ( $h$  Ind) para todos los puntos soldados, se encuentra una longitud promedio de  $1850 \mu\text{m}$  con una dispersión  $\pm 100 \mu\text{m}$ . Esto indica que el perfil de la herramienta se mantiene prácticamente constante y la aleación base cobalto se comporta muy bien, en cuanto a la resistencia al desgaste. Respecto a las dimensiones del hook de acero dentro de la chapa de Al, se observa un aumento de este con la profundidad de la indentación. El tamaño de este, para una misma profundidad de indentación, no se modifica sustancialmente con la variación de la velocidad de rotación y el Dwell time.

### 3.2 Caracterización de la Capa de Intermetálicos

La longitud y el espesor de la capa de IMC está directamente relacionada con el Dwell time, la profundidad de la indentación y el calor generado por fricción debido a la velocidad de rotación [6,7]. De todos esos parámetros el Dwell time tiene la mayor incidencia debido a que la formación de los IMC es producto de un efecto difusional de aluminio y hierro a ambos lados de la interfaz. En la Figura 6 se muestra un corte de un punto de soldadura y las zonas donde se realizaron los barridos de composición química mediante EDS atravesando la interfaz a distancias regulares del hook para el punto soldado A6-2500-1.

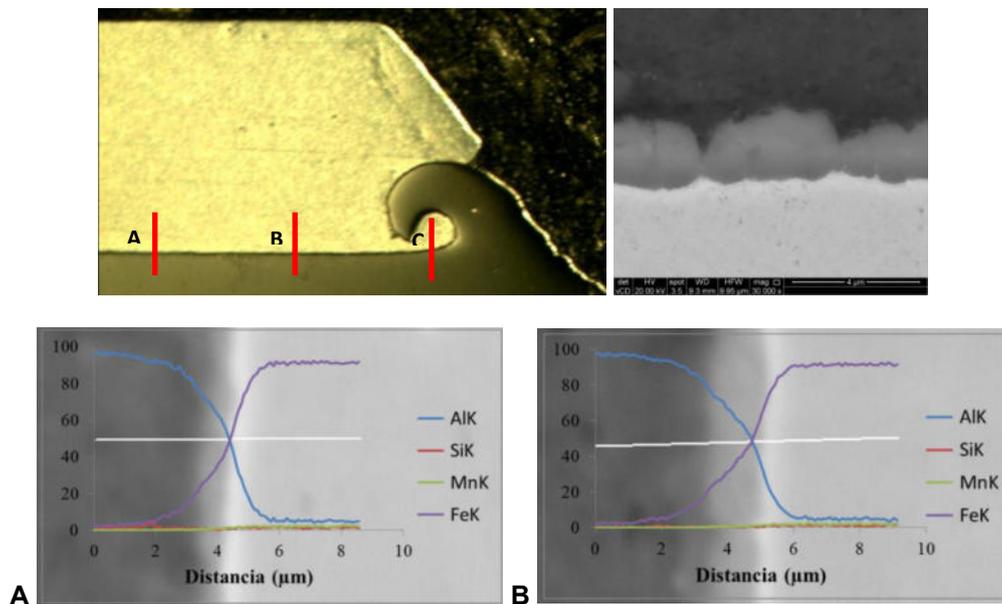


Figura 6: Barridos de composición química a través de la interfaz en las zonas A y B

Se observa que el espesor de IMC crece hacia el hook, por efecto de la mayor temperatura y presión en esa zona. Asimismo, puede verse que el perfil de concentración de Fe en Al alcanza una mayor profundidad (5 micrones aprox.), que el de Al en Fe (1 micrón aprox.), en ambos casos. En general, la condición de 50%Al-50%Fe se alcanza en la zona cercana a la interfaz IMC-acero, mientras que el IMC pareciera crecer desde el acero hacia el Al. Para las condiciones de los puntos A6 con 3 y 5 seg se observa el mismo comportamiento, pero con un espesor de IMC mayor en cada zona, debido al aumento de temperatura local producto del mayor tiempo de permanencia de la herramienta en la junta.

La Figura 7 muestra la evolución del espesor de IMC a lo largo de la interfaz para los diferentes DT de los puntos A6. Puede verse que en la zona del hook, en todos los casos se tiene un espesor similar de IMC (2,5 μm aprox.), mientras que el efecto del DT se hace evidente hacia mayores distancias del hook. Para 2 mm de distancia al hook, dicho espesor aumenta de 1 a 1,5 micrones con el DT.

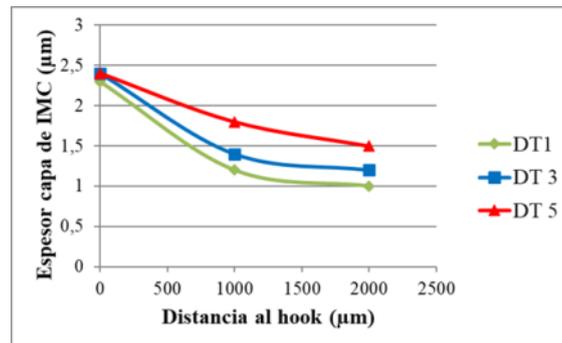


Figura 7: Evolución del espesor capa IMC a lo largo de la interfaz para diferentes DT

### 3.3 Ensayos de Arrancamiento

Los gráficos de la Figura 8 muestran como varía la carga de rotura en el ensayo de corte (shear test) con la profundidad de la indentación para 2000 y 2500 rpm.

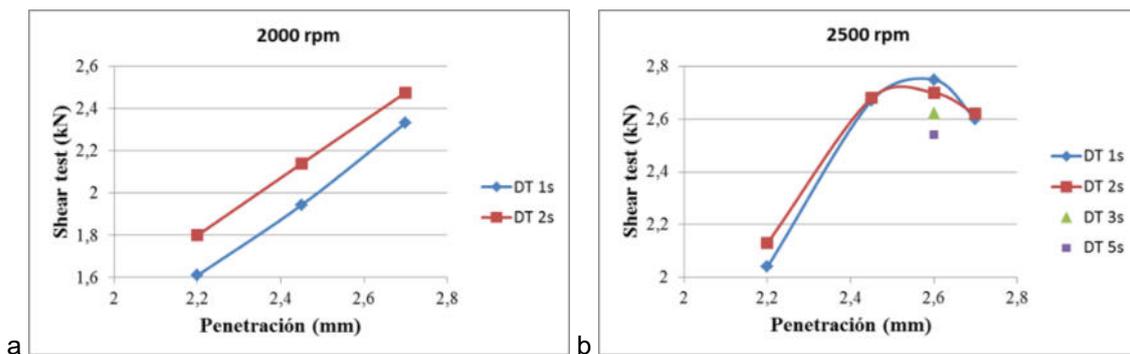


Figura 8: Carga de rotura en función de la indentación para: a) 2000 rpm y b) 2500 rpm.

Se observa que para 2000 rpm la carga de rotura aumenta con la profundidad de la indentación, para ambos DT analizados. En cuanto al efecto del DT se observa que el aumento del mismo de 1 a 2 seg produce un incremento en la carga de rotura, para todos los niveles de indentación.

Para 2500 rpm la carga de rotura es superior al de 2000 rpm (aprox. 20%). A baja indentación el comportamiento se repite, aumentando la carga de rotura con la indentación, hasta alcanzar un máximo en aprox. 2,5 mm. El DT no presenta un impacto significativo. Para las mayores indentaciones, el aumento del DT va en detrimento de la carga de rotura por corte, lo que podría estar asociado a las mayores longitudes y espesores de la capa de IMC frágiles en la interfaz.

En la Figura 9 se muestran los gráficos de evolución de la carga de rotura en los ensayos de ST y CTT en función del DT, para 2000 y 2500 rpm.

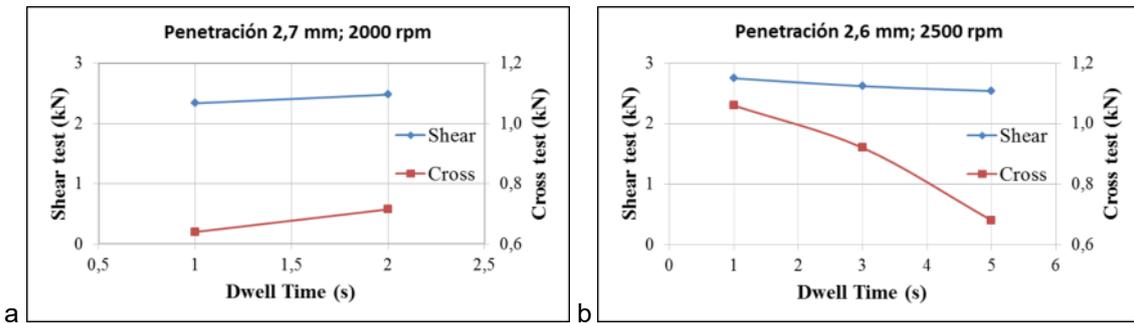


Figura 9: Carga de rotura (ST y CTT) en función del DT para: a) 2000 y b) 2500 rpm

Para 2000 rpm la carga de rotura de ambos ensayos aumenta con el DT. En cambio, a 2500 rpm, si bien se parte de valores más elevados para DT 1 seg, luego va en detrimento sobre todo en el ensayo de CTT para mayores tiempos. Esto podría estar asociado a las razones descriptas anteriormente.

La Figura 10 muestra el aspecto superficial de dos tipos de fractura diferentes en las probetas ensayadas de ST.

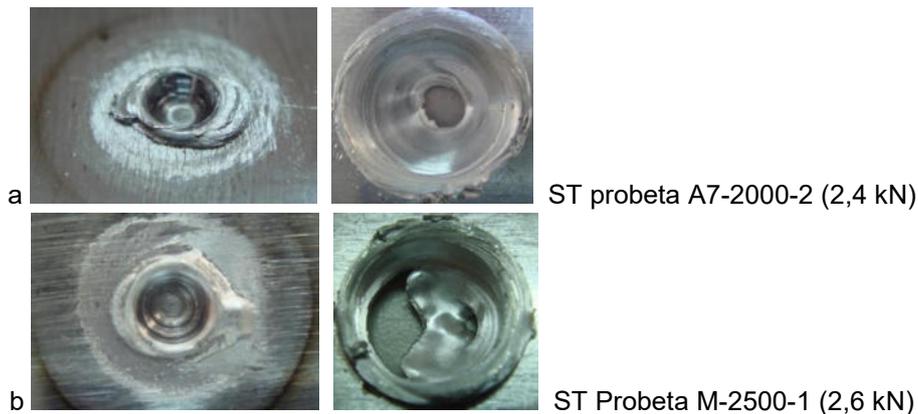


Figura 10: Aspecto superficial de dos tipos de fractura en el ensayo de corte

Se observa que en la probeta con mayor indentación A7 (Fig. 10a) la rotura se produce circunferencialmente en el aluminio a una distancia de aprox. 1 mm del hook. En cambio, para la probeta M con menor indentación, la rotura comienza circunferencialmente en la misma zona, pero se aprecia una segunda zona de inicio de fisura en el aluminio a la altura del borde del punto. Esta diferencia puede estar asociada a la mayor altura de aluminio sobre el hook producto de la menor indentación, siendo por lo tanto mayor la sección resistente, de acuerdo con lo reportado por otros autores [7].

La Figura 11 muestra el corte transversal de la fractura para la probeta A7-2000-2. Se observa el aro de aluminio unido al hook y a la zona no deformada del acero DP, con una extensión de

aproximadamente 1 mm a cada lado del hook. Esto evidencia una mayor integridad de la interfaz en dichas zonas, no solo asociada al anclaje mecánico del hook, sino también a la unión entre el aluminio y el acero.

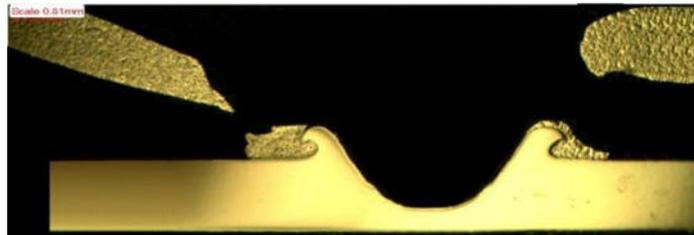


Figura 11: Corte transversal de la fractura por corte de la probeta A7-2000-2

La Figura 12 muestra el aspecto superficial de las fracturas en el ensayo de cross.

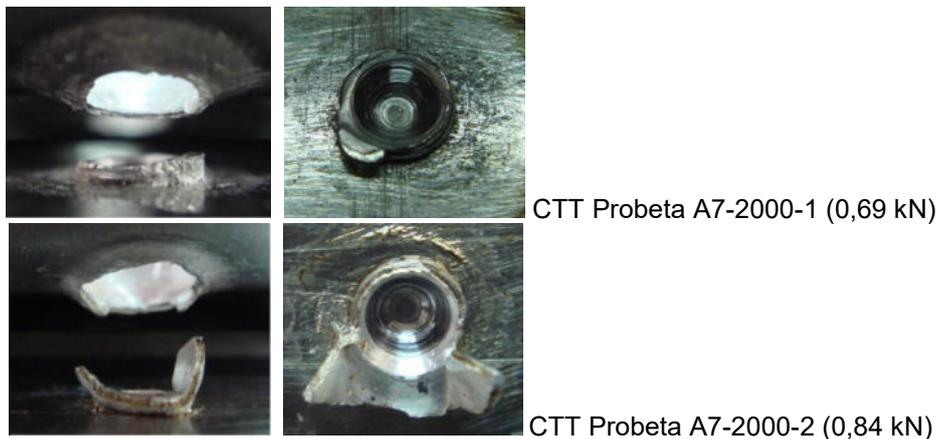


Figura 12: Aspecto superficial de la fractura de los ensayos de CTT

La Figura 13 muestra el corte transversal de la fractura para la probeta A7-2000-2. Se observa el aro de aluminio soldado al hook con una extensión de aproximadamente 1 mm sobre la chapa de acero a ambos lados de los hooks, similar a lo observado anteriormente. En este caso, dado el tipo de ensayo la integridad de la interfaz se encuentra más solicitada, poniendo de manifiesto una buena integridad en dicha zona.

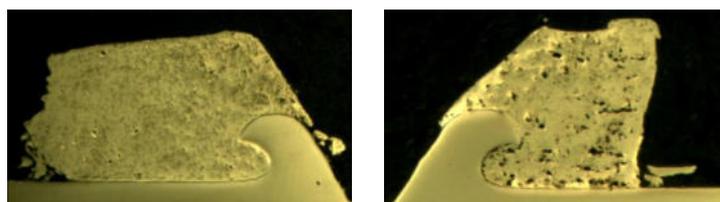


Figura 13: Corte transversal de la fractura de CTT de la probeta A7-2000-2.



#### 4. CONCLUSIONES

Se analizaron nuevos diseños y materiales de herramientas para FSSW, así como de los parámetros del proceso a fin de optimizar las propiedades mecánicas en uniones Aluminio-Acero y disminuir los tiempos de soldadura. El diseño propio de la composición de la herramienta cóncava base cobalto (LNNano – CNPEM) para esta etapa, tiene gran potencial para ser aplicado en la soldadura FSSW de juntas disímiles Al-Acero en la industria automotriz. De todos los parámetros analizados, el DT tiene la mayor incidencia sobre la formación de los compuestos intermetálicos en la interfaz aluminio-acero. La longitud de una capa continua de IMC y el espesor de esta junto con la composición química influyen en las propiedades mecánicas resultantes de la junta soldada. A velocidades de rotación de la herramienta altas (2000 y 2500 rpm) con profundidades de indentación media y altas (entre 2,45 y 2,7 mm) y DT bajos (1 a 2 seg) se obtuvieron los mejores resultados para la unión disímil AA1050 - DP 1000.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al LNNano-CNPEM (Campinas, Brasil) por la ejecución de las soldaduras y los ensayos mecánicos. También el apoyo financiero de la FRSN-UTN.

#### REFERENCIAS

- [1] Bhushan, R.K. and Sharma, D. *Green welding for various similar and dissimilar metals and alloys*. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2019.
- [2] Shome, M., *Metal inert gas (MIG) brazing and friction stir spot welding of advanced highstrength steels (AHSS)*. Welding and joining of advanced high strength steels (AHSS), Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2015, pp. 137-165.
- [3] Haghshenas, M. and Gerlich, A.P., *Joining of automotive sheet materials by friction based welding methods: A review*. Engineering Science and Technology 21, 2018, p. 130–148.
- [4] Schneider, J. and Radzilowski, R., *Welding of very dissimilar materials (Fe-Al)*. JOM; vol. 66 n° 10, September 2014, p. 1123–9.
- [5] Marconi, C. et al., *Soldadura FSSW de Juntas Disímiles de AA1050 y Acero DP1000*. XLIII CONSOLDA; 6 a 9 de Noviembre 2017; Joinville-SC, Brasil.
- [6] Figner, G. et al. *Friction stir spot welds between aluminium and steel automotive sheets: Influence of welding parameters on mechanical properties and microstructure*. Welding in the World, Vol. 53, n° 1/2, Research Supplement p. 13-23, 2009.
- [7] Kang, M., Yoon, J. & Kim, C. *Hook formation and joint strength in friction stir spot welding of Al alloy and Al-Si-coated hot-press forming steel*. Int J Adv Manuf Technol 106, 2020.



## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN ACERO ACERO TRIP Y SU RELACIÓN CON LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL DURANTE ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Valeria de la Concepción M. <sup>1</sup>, Luciano Buglioni <sup>1</sup>, Leonardo Tufaro <sup>1</sup>, Hernán Svoboda <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Soldadura SOMyL – Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Av. Gral. Paz 5445, San Martín, Buenos Aires, Argentina. [vdelaconcepcion@inti.gov.ar](mailto:vdelaconcepcion@inti.gov.ar);  
[buglioni@inti.gov.ar](mailto:buglioni@inti.gov.ar); [ltufaro@inti.gov.ar](mailto:ltufaro@inti.gov.ar)

<sup>2</sup> Grupo de Tecnología de la Soldadura y Comportamiento Mecánico de Materiales Metálicos, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Av. Gral. Las Heras 2214, CABA, Argentina.

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Av. Godoy Cruz 2290, CABA, Argentina. [hsvobod@fi.uba.ar](mailto:hsvobod@fi.uba.ar)

### RESUMEN

La microestructura de los aceros TRIP contiene cierto porcentaje de austenita retenida (fase dúctil), que se transforma progresivamente en martensita (fase dura y resistente) al alcanzar cierto nivel de deformación plástica. Este efecto, denominado “efecto TRIP”, más la partición de tensiones y deformaciones entre fases, hace que los TRIP presenten alta tasa de endurecimiento por deformación, y una buena combinación entre resistencia y ductilidad. Para realizar una caracterización mecánica, los ensayos de compresión permiten introducir un alto nivel de deformación, aunque se genera una distribución no uniforme de la deformación en la probeta por efecto de la fricción. Un acero TRIP experimenta un aumento de dureza a medida que es deformado, tanto por el aumento en la densidad de dislocaciones, como por la transformación de la austenita en martensita. Es escasa la información disponible sobre el comportamiento mecánico de aceros TRIP en compresión. El objetivo del presente trabajo fue analizar la evolución de la austenita retenida y el endurecimiento durante ensayos de compresión. Se obtuvieron muestras de distintos aceros TRIP mediante tratamientos térmicos, a partir de barras de acero al C-Mn-Si. Las probetas fueron deformadas por compresión a distintos niveles de deformación. Para cada nivel de deformación se cuantificó la fase austenita mediante Difracción de Rayos X sobre la sección transversal media y se realizó un mapeo de microdureza Vickers. Asimismo, a partir de un modelo FEM cuasi estacionario y axil-simétrico del ensayo de compresión desarrollado por los autores, se calcularon las deformaciones localizadas en cada punto de dicha sección. Se obtuvieron expresiones que relacionan la dureza local con la deformación local y la fracción de transformación de la austenita en función de la deformación aplicada. A partir de un análisis los aspectos mencionados anteriormente se discutió la contribución de la transformación de la austenita en el endurecimiento general del material.

**Palabras Clave:** *Ensayo de Compresión, Aceros TRIP, Aceros Avanzados de Alta Resistencia, Microestructura*



## 1. INTRODUCCIÓN

Los aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High Strength Steels, AHSS), constituyen una familia de aceros ampliamente aplicados en la industria automotriz, cuya combinación de propiedades de resistencia y deformabilidad permite reducir espesores, y consecuentemente reducir costos y emisiones nocivas para el ambiente. A su vez, la alta tasa de endurecimiento por deformación que presentan estos aceros y la alta absorción de energía ante un impacto resulta en un aumento en la seguridad de los vehículos. [1]

Dentro de los AHSS podemos encontrar varios tipos de aceros según su microestructura, destacando los aceros de plasticidad inducida por transformación (Transformation Induced Plasticity, TRIP). La microestructura de los aceros TRIP consiste en partículas de austenita retenida, en un porcentaje mayor al 5%, más distintas fracciones de otros microconstituyentes como ferrita, bainita y martensita. Al ser deformados, la austenita retenida va transformándose progresivamente en martensita, haciendo que estos aceros presenten una buena combinación entre resistencia y ductilidad, y una alta tasa de endurecimiento por deformación [1,2]. En los últimos años se desarrollaron los aceros TRIP-TBF, cuya microestructura presenta una matriz de ferrita bainítica, lo que aumenta la resistencia y tenacidad respecto de los aceros TRIP convencionales [3].

En general, los TRIP se obtienen a partir de aceros con cierto contenido de silicio o aluminio, mediante la aplicación de un tratamiento térmico en dos etapas: austenización (total o parcial) seguida de un tratamiento isotérmico a temperatura de transformación bainítica. Durante dicho tratamiento isotérmico se produce ferrita bainítica, a la vez que el silicio o aluminio inhibe la precipitación de carburos, enriqueciendo en carbono a la austenita y estabilizándola. Se obtiene así una microestructura con austenita retenida a temperatura ambiente [4].

Dado que la austenita retenida se transforma progresivamente en martensita al aplicarse una deformación plástica, es conveniente introducir el mayor nivel de deformación posible a fin de estudiar dicha transformación. En este sentido, el ensayo de compresión presenta una ventaja respecto al ensayo de tracción: en este último se produce una deformación localizada (necking), limitando la deformación total uniforme que es posible introducir en el material. El ensayo de compresión permite introducir un mayor nivel de deformación. La desventaja que presenta es que la dicha deformación no es uniforme en toda la muestra. Esto se debe a la fricción entre las caras de la muestra y los platos de la máquina de ensayo, que limita el desplazamiento del material en los extremos, produciendo un “abarrilamiento” de la probeta. En el corte longitudinal de una muestra ensayada por compresión pueden diferenciarse tres zonas con distintos niveles de deformación [5]: una zona de baja deformación (también denominada “cono de fricción”) próxima a las caras de la muestra, una zona de grandes deformaciones en forma de equis, y una



zona de deformación moderada, hacia la mitad de la altura de la probeta, en la periferia de la misma (Figura 1).

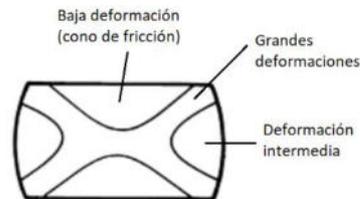


Figura 1: Identificación de diferentes zonas (según nivel de deformación) en la sección media longitudinal de una muestra deformada por compresión.

Durante el ensayo de compresión de un acero TRIP, se produce el endurecimiento del material por dos motivos: por deformación, debido al movimiento y acumulación de dislocaciones [6], y por la transformación de la austenita (fase relativamente dúctil y de baja resistencia) en martensita (fase de alta resistencia). Para que dicha transformación se produzca, la deformación aplicada debe ser mayor al 10%, en caso contrario, la fracción de austenita que se transforma puede considerarse despreciable [7].

El objetivo de este trabajo fue estudiar la transformación de la austenita retenida y el endurecimiento del material durante ensayos de compresión.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la obtención de aceros TRIP, se empleó como material de partida un acero con la siguiente composición química (en %wt): 0,63 C; 0,89 Mn; 2,22 Si. Sobre varias muestras de dicho material, con geometría cilíndrica de diámetro 16 mm y altura 20 mm, se realizaron tratamientos térmicos en dos etapas: un calentamiento a 900°C y permanencia a dicha temperatura durante 20 minutos, seguido de un tratamiento isotérmico en baño de sales, durante 15 minutos, empleando diferentes temperaturas: 300, 350 y 400°C, obteniendo distintos grados de aceros TRIP.

Sobre las muestras obtenidas se realizaron ensayos de compresión [8], aplicando diferentes niveles de deformación: 10, 20, 30, 40 y 50% (este último aplicado sólo a las muestras tratadas a 350 y 400°C). Las caras de cada muestra en contacto con la máquina de ensayo fueron previamente rectificadas, y se empleó lubricación para disminuir el efecto de fricción.

Se realizaron caracterizaciones microestructurales sobre la sección media longitudinal de cada una de las muestras, antes y después de realizado el ensayo de compresión. Para ello se aplicó un revenido a 300°C durante 2 horas, a fin de diferenciar posteriormente las fases austenita y



martensita. Se empleó un ataque químico basado en el procedimiento descrito en [9], para revelar la estructura. Fueron caracterizadas microestructuralmente las distintas zonas de cada sección que se indican en la Figura 2: zona de deformación baja o nula (A), zona de grandes deformaciones (B), y zona de deformación moderada o intermedia (C).

Asimismo, se realizó una cuantificación de la austenita mediante difracción de rayos x, sobre la sección media transversal de cada una de las muestras, empleando el método de comparación directa [10].

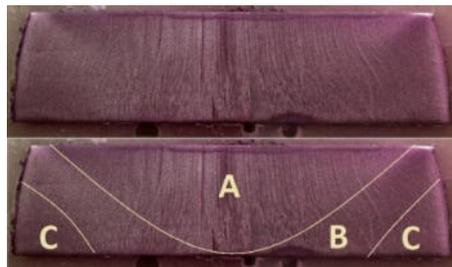


Figura 2: Identificación de diferentes zonas (según nivel de deformación) en la sección media longitudinal de la muestra tratada a 350°C, deformada un 50% por compresión.

Se efectuaron mapas de microdureza Vickers [11], sobre el cuadrante superior derecho de la sección central de cada una de las muestras (considerando la simetría). Se realizaron improntas formando una grilla, como se muestra en la Figura 3. Se empleó una carga de 300 g.

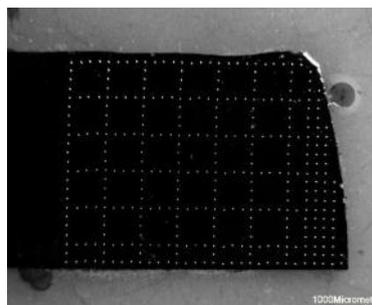


Figura 3: Improntas de microdureza Vickers realizadas sobre la muestra tratada a 400°C y deformada un 30%

A partir de un modelo FEM bidimensional axil-simétrico del ensayo de compresión, realizado por los autores, sobre un octavo de la probeta y considerando un material multilínea, se calcularon los valores de deformación equivalente de Von Mises en cada punto de la sección media longitudinal, los cuales han sido comparados con los valores de microdureza obtenidos en el mapeo.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Microestructura de muestras sin deformación

En la Figura 4 se muestran micrografías correspondientes a los aceros TRIP obtenidos. Las microestructuras resultaron coincidentes con aceros TRIP-TBF (aceros TRIP con matriz de ferrita bainítica). Se observaron los diferentes microconstituyentes coloreados de la siguiente forma: ferrita bainítica (ab) en azul, bainita (B) en marrón oscuro, martensita (M) en marrón claro y austenita retenida (RA) en blanco, consistentes con el ataque químico empleado [9]. La austenita retenida se presentó tanto en forma de bloque como en forma “interlath” (entre placas de ferrita bainítica). Se destaca el aumento de la austenita retenida, y la disminución de la fase martensita, conforme al aumento de la temperatura de tratamiento. No obstante, se observó que las microestructuras correspondientes a los aceros TRIP obtenidos a 300 y 350°C resultaron similares en cuanto a porcentaje de RA, lo cual se confirmó posteriormente mediante la cuantificación de dicha fase mediante difracción de rayos x. Asimismo, se observó una mayor fracción de microconstituyentes duros y resistentes (martensita y bainita) para dichas temperaturas de tratamiento.

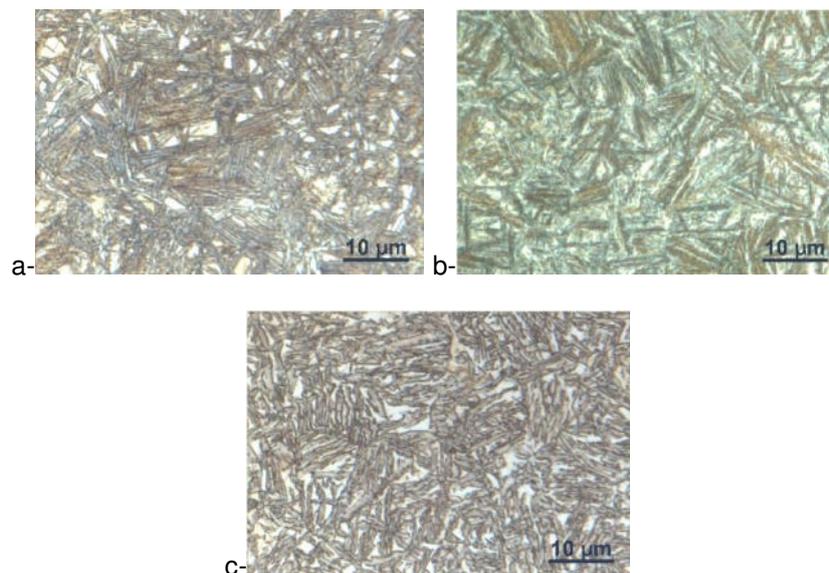


Figura 4: Micrografías correspondientes a las muestras tratadas a las temperaturas: a- 300°C; b- 350°C, c- 400°C, sin deformación plástica.

En la Figura 5 se observan los espectros de difracción de rayos x correspondientes a los aceros TRIP obtenidos. Se observó un aumento de RA con dicha temperatura, teniendo las muestras tratadas a 300 y 350°C una fracción similar de dicha fase, y la muestra tratada a 400°C una fracción mayor, lo cual resultó coincidente con las microestructuras observadas en la Figura 4.

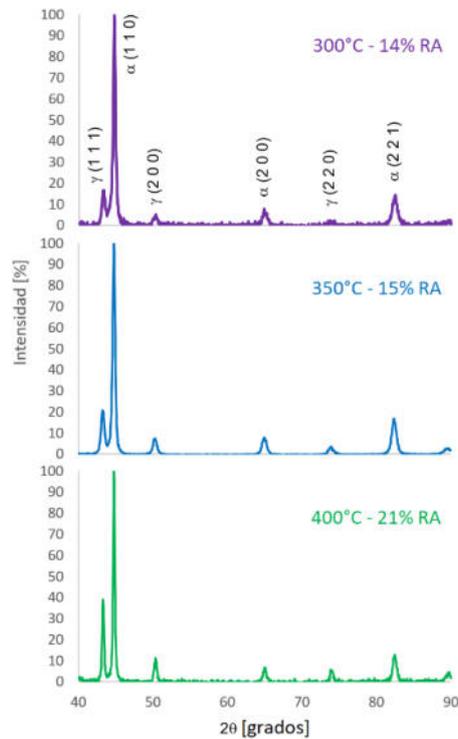
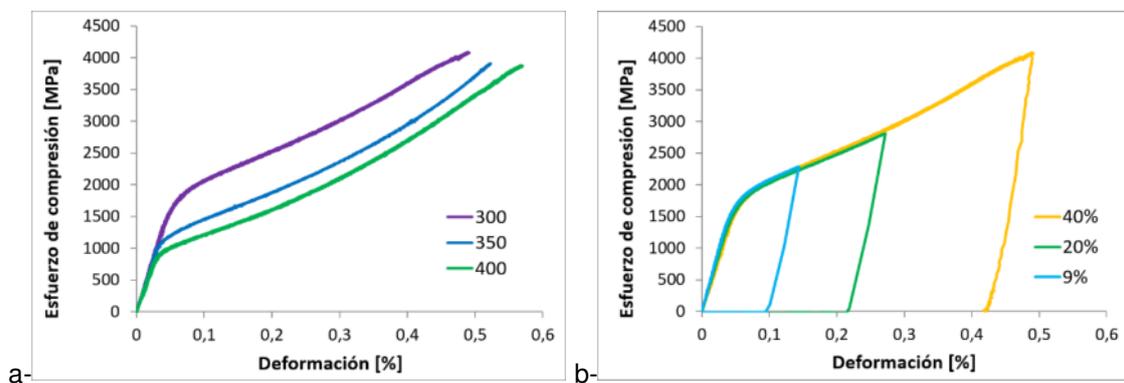


Figura 5: Espectros de difracción de rayos x correspondientes a los aceros TRIP obtenidos. Se indica la temperatura de tratamiento y el porcentaje de RA.

### 3.2 Ensayos de Compresión

En la Figura 6 se muestran las curvas obtenidas del ensayo de compresión de los aceros TRIP obtenidos a las diferentes temperaturas de tratamiento y para cada porcentaje de deformación aplicado. En la Figura 6a se presenta una comparación de las curvas obtenidas para los diferentes aceros TRIP hasta la máxima deformación (40-50%). En las Figuras 6 b, c y d, se presentan las curvas correspondientes a cada acero TRIP con los diferentes niveles de deformación.



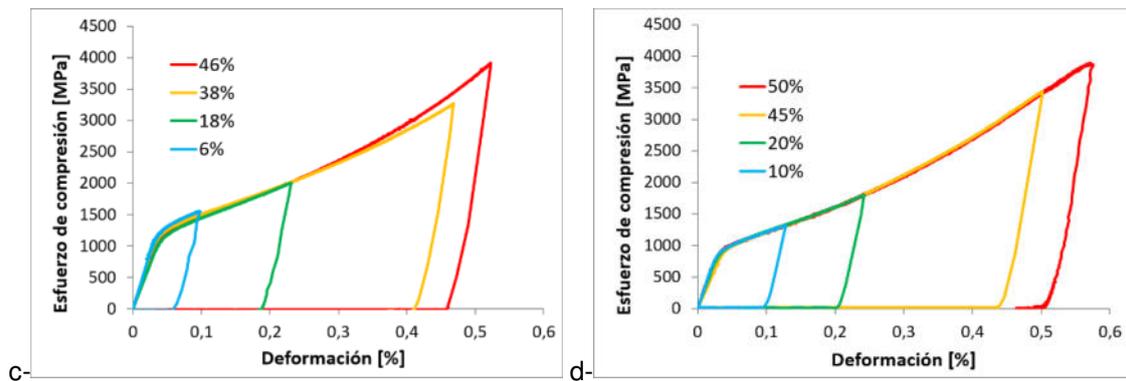


Figura 6: Curvas obtenidas experimentalmente a partir del ensayo de compresión de: a- muestras tratadas a diferentes temperaturas, deformadas entre 40 y 50%; b, c y d: muestras tratadas a 300, 350 y 400°C respectivamente, ensayadas a distintos niveles de deformación.

Pudo verse que las muestras tratadas a 350°C presentaron propiedades en compresión intermedias respecto de las muestras tratadas a 300 y 400°C. También se observó una buena repetibilidad en las muestras parcialmente deformadas (las curvas resultaron muy similares para todas las muestras tratadas a una misma temperatura).

En la Tabla 1 se muestran los valores de la tensión al límite 0,2%, obtenidos mediante el ensayo de compresión de los aceros TRIP. Se observó que dichos valores disminuyeron con el aumento de la temperatura de tratamiento, en concordancia con las microestructuras observadas en la Figura 4.

Tabla 1. Valores de tensión al límite proporcional 0,2% correspondientes a los aceros TRIP obtenidos

Temp. de tratamiento [°C]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]
300	1443 ± 49
350	960 ± 83
400	844 ± 29

### 3.3 Microestructuras de muestras deformadas

En la Figura 7 se muestran las microestructuras correspondientes a las distintas zonas, descritas en la Figura 2, de la sección media longitudinal de la muestra tratada a 350°C y deformada por compresión un 46% (Figura 7 a, b y c) y de la muestra tratada a 400°C y deformada un 50% (Figura 7 d, e y f). En las zonas de baja deformación y deformación intermedia se observaron fracciones similares de RA y martensita, para la muestra tratada a 350°C. Para la muestra tratada

a 400°C, fue mayor la fracción de martensita y menor la de RA en la zona de deformación intermedia, comparada con la zona de baja deformación. Para ambas muestras se observaron menores fracciones de RA y un aumento en la fase martensita en la zona de grandes deformaciones, respecto de las otras zonas analizadas. Esto puede deberse a una mayor fracción de austenita transformada en martensita durante la deformación por compresión, en dicha zona.

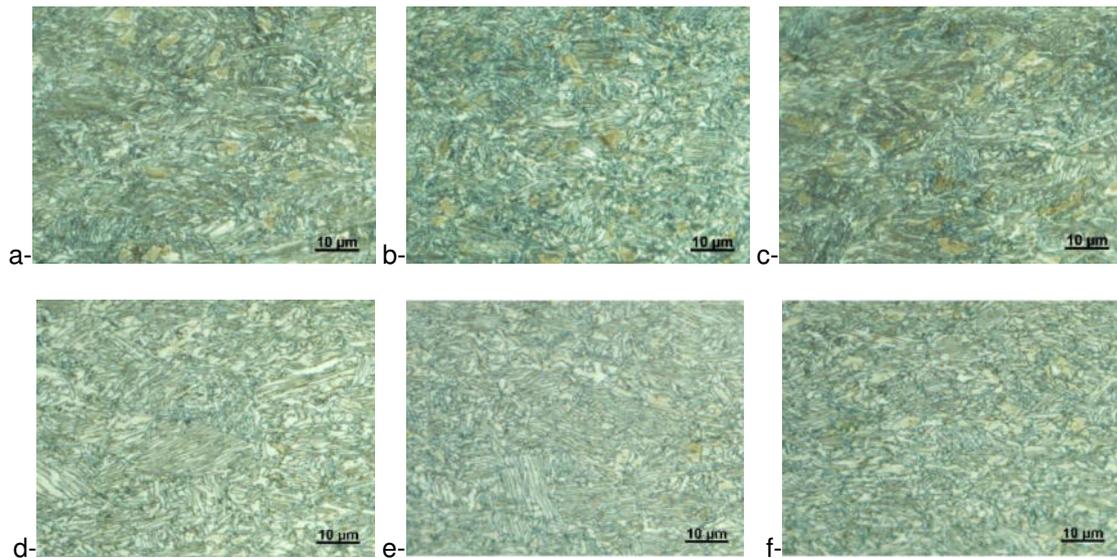


Figura 7: Micrografías correspondientes a las muestras tratadas a 350°C (a, b y c) y 400°C (d, e y f) deformadas un 46% y 50% respectivamente, en cada una de las zonas de la sección media longitudinal: a,d- zona de baja deformación; b,e- zona de deformación intermedia; c,d- zona de grandes deformaciones.

En la Figura 8 se muestra el porcentaje de austenita transformada vs. la deformación plástica aplicada, para los aceros TRIP obtenidos a 300 y 400°C. Se corroboró que para deformaciones menores al 10% se transformó un muy bajo porcentaje austenita.

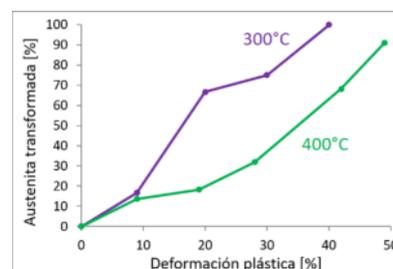


Figura 8: Porcentaje de austenita transformada vs. deformación por compresión, correspondiente a los aceros TRIP estudiados.

Se puede observar que el acero 400 presenta una mayor estabilidad de la RA en comparación con el 300, que para una dada deformación presenta un mayor porcentaje de transformación de RA. En todos los casos para la máxima deformación aplicada (40-50%) se alcanza más del 90% de transformación de la RA.

### 3.4 Mapas de microdureza

En la Figura 9 se muestran los mapas de microdureza Vickers correspondientes a las muestras tratadas a 300°C, con diferentes porcentajes de deformación por compresión. Se observó que, a medida que aumentó dicha deformación, se hicieron más evidentes las zonas con diferentes niveles de dureza, las cuales se asocian a la distribución de la deformación dentro de la probeta, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 2.

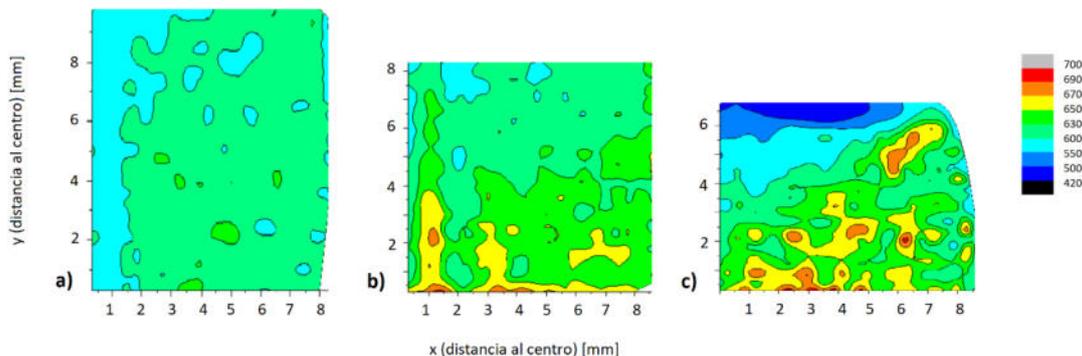


Figura 9: Mapas de microdureza Vickers de las muestras tratadas a 300°C, deformadas por compresión: a) 10%; b) 20%; c) 30%.

Dado que, al aumentar la deformación global de la probeta, el efecto de la fricción se hace más relevante, se observó que el endurecimiento por deformación es menor en aquellas zonas de baja deformación como el cono de fricción en la zona de contacto de la probeta con el plato. De la misma manera la zona de alta deformación presenta también un mayor nivel de dureza, lo que indica un mayor endurecimiento.

En la Figura 10a, se observa el mapa de deformaciones de la muestra tratada a 350°C, deformada un 46%. A su vez, en la figura 10b, se observa el mapa de microdureza Vickers correspondiente a la misma muestra.

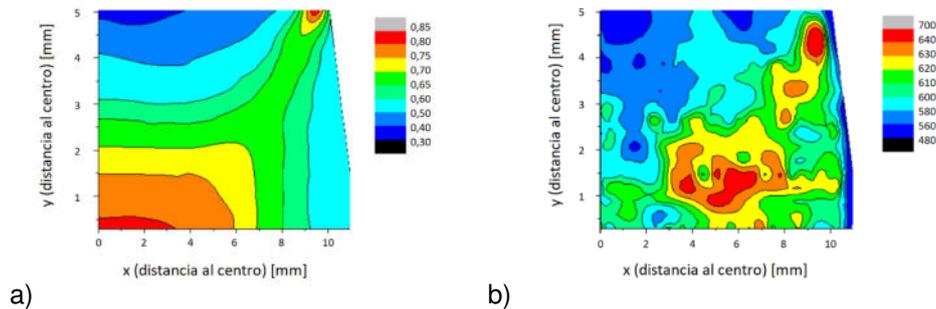


Figura 10: a) Mapa de deformaciones sobre la sección media longitudinal de la muestra tratada a 350°C y deformada por compresión un 46%, obtenidas mediante la simulación del ensayo; b) Mapa de microdureza Vickers, medida sobre la misma muestra

Ambos mapas (tanto el mapa de deformaciones como el de microdureza), respondieron a la distribución mostrada en la Figura 2. Las zonas de menores deformaciones coincidieron con las de menor dureza y viceversa. Los valores de microdureza, además de estar asociados con la deformación, también se corresponden con las microestructuras observadas en la Figura 7: en las zonas donde se observó mayor porcentaje de martensita y menor fracción de RA, dichos valores de microdureza resultaron mayores. Asimismo, los valores de deformación localizada resultaron mayores a 30%. Esto puede explicar la mayor presencia de martensita en todas las micrografías observadas en la Figura 7, respecto de las muestras sin deformación aplicada (Figura 4), teniendo en cuenta que el porcentaje de deformación necesario para que se produzca una transformación apreciable de RA es 10%. Observando el porcentaje de RA transformada según la deformación aplicada (Figura 8), puede verse que, para 30% de deformación, el porcentaje de RA transformada resulta menor para muestras tratadas a 400°C, esto puede estar asociado a la mayor fracción de RA, y menor porcentaje de martensita, observados en la zona de baja deformación de la muestra tratada a 400°C. Asimismo, a partir de 30% y hacia mayores deformaciones, existe una mayor fracción de RA a ser transformada en dichas muestras. Esto puede explicar la mayor diferencia en las fracciones de RA y martensita, entre las zonas de baja deformación y deformación intermedia, para el acero tratado a 400°C, que se observa en la Figura 7.

En la Figura 11 se muestra la correlación entre los valores locales de dureza vs. Deformación para el acero tratado a 350°C con una deformación de 46%. Puede corroborarse que, dentro de la misma sección, al aumentar los valores locales de deformación, aumentan también los valores de microdureza Vickers. En futuros trabajos se profundizará el análisis de estas relaciones, ya que podrían analizarse los mecanismos de endurecimiento.

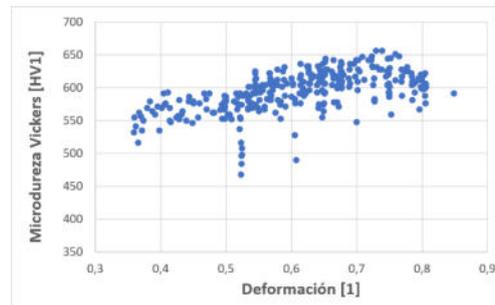


Figura 11: Microdureza medida vs. deformación obtenida mediante el modelo FEM, sobre la muestra tratada a 350°C, deformada por compresión un 50%.

#### 4. CONCLUSIONES

A fin de estudiar la transformación de la austenita durante ensayos de compresión uniaxial de aceros TRIP y su efecto en el endurecimiento del material, se obtuvieron aceros TRIP de distinto grado, mediante la realización de tratamientos térmicos a distintas temperaturas. Los aceros obtenidos fueron deformados por compresión con distintos porcentajes de deformación en altura. Se estudió la microestructura y fracción de austenita retenida antes y después de la deformación, y se realizaron mapas de microdureza sobre la sección media longitudinal de las muestras ensayadas. A su vez, se calcularon los valores de deformación equivalente de Von Mises en cada punto de dichas secciones longitudinales, mediante un modelo FEM del ensayo de compresión.

La microestructura de los aceros obtenidos resultó compatible con la de aceros TRIP-TBF, con matriz de ferrita bainítica. El porcentaje de austenita retenida aumentó con la temperatura de tratamiento. A su vez, para las menores temperaturas de tratamiento se observó una mayor fracción de fases duras y resistentes como martensita y bainita.

En las curvas obtenidas del ensayo de compresión, se observó una buena repetibilidad en el comportamiento de las muestras tratadas a igual temperatura. La tensión al límite 0,2% disminuyó con la temperatura de tratamiento, en concordancia con las microestructuras observadas.

En las microestructuras de las muestras deformadas, se observaron distintas fracciones de las fases según las diferentes zonas de una misma sección media longitudinal. Se observó una escasa transformación de la austenita para valores de deformación menores que 10%, y una mayor estabilidad de la austenita con la deformación para la muestra tratada a la mayor temperatura (400°C). Los mapas de microdureza y deformación tuvieron una distribución similar. A su vez, en las zonas de una misma sección donde resultaron más altos los valores de microdureza y deformación, también se observó una mayor fracción de la fase martensita, y



menor austenita retenida, lo que puede deberse a la transformación de austenita en martensita debida a la deformación, lo que contribuiría a aumentar el valor de microdureza en dichas zonas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Silvana Arroyo, del Instituto Nacional de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería (INTECIN), por su contribución para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Word AutoSteel, AHSS Application Guidelines. <https://ahssinsights.org/>. Junio 2023
- [2] De Cooman B. C. *Structure - properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite*. Current Opinion in Solid State and Materials Science 8, 285–303, 2004.
- [3] Sugimoto K., Hojo T., Srivastava A. *Low and Medium Carbon Advanced High-Strength Forging Steels for Automotive Applications*. Metals 9 (12), 1263, 2019.
- [4] Jacques P., Girault E., Catlin T., Geerlofs N., Kop T., van der Zwaag S., Delannay F. *Bainite transformation of low carbon Mn–Si TRIP-assisted multiphase steels: influence of silicon content on cementite precipitation and austenite retention*. Materials Science and Engineering A 273-275, 475-479, 1999.
- [5] ASM Metals Handbook Vol. 14 - Forming and Forging. ASM International. 1988.
- [6] Reed Hill R. E., Physical Metallurgy Principles. Cengage Learning. 2009.
- [7] Neslušán M., Pitoňák M., Čapek J., Kejzlar P., Trško L., Zgútová K., Slota J. *Measurement of the rate of transformation induced plasticity in TRIP steel by the use of Barkhausen noise emission as a function of plastic straining*. ISA Transactions 125, 318-329, 2022
- [8] ASTM E9. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. ASTM International. 2019.
- [9] Girault E., Jacques P., Harlet Ph., Mols K., Van Humbeeck J., Aernoudt E., Delannay F. *Metallographic Methods for Revealing the Multiphase Microstructure of TRIP-Assisted Steels*. Materials Characterization, 40, 111-118, 1998.
- [10] Cullity B. D., *Elements of X Ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1978
- [11] ASTM E384. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. ASTM International. 2017.



## DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA Y LA RESISTENCIA RESIDUAL EN MATERIALES COMPUESTOS FIBRA-METAL

Maximiliano Paiva<sup>1</sup>, Juan Ríos<sup>1</sup>, Eduardo Asta<sup>1</sup>, Juan Balderrama<sup>1</sup> y Adrián Cambiasso<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GIMF UTN Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional.  
Calle Paris.N°580, Haedo, Argentina

correo-e: paiva.maximiliano@gmail.com; jcrios@frh.utn.edu.ar; asta.eduardo@gmail.com;  
balderra@cnea.gov.ar; ingcamb@yahoo.com.ar.

### RESUMEN

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, FML (Fiber Metal Laminates), consisten en láminas delgadas de aluminio en forma alternada con capas de fibra unidireccionales embebidas en una matriz de resina epoxi. En este trabajo se utiliza un modelo elástico no lineal de cálculo por elementos finitos (FEM) que desarrolla una predicción del comportamiento de tenacidad a la fractura. Para la simulación de la propagación de la fisura en la probeta de FML se aplicó un modelo 2D con elementos cohesivos. Se utilizaron dos tipos diferentes de formulación de elementos cohesivos, para simular el mecanismo de falla que presentan los materiales compuestos híbridos, en presencia de la propagación de la fisura.

Los resultados obtenidos con los modelos FEM que predicen el avance de la fisura, en términos del gráfico carga-desplazamiento, han sido comparados con los resultados de ensayos de mecánica de la fractura elasto-plástica, aplicando el criterio de la integral J de acuerdo con la norma ASTM E-1820. En los ensayos como en el modelo FEM se utilizaron probetas C(T) de material compuesto CARALL, fabricadas a partir de aluminio 1050 y fibras de carbono NCT-301 unidireccionales impregnadas en resina epoxi. Se utiliza un arreglo 4/3 (Al-0-Al- 90-Al-0-Al), siendo 0 y 90 la orientación de la fibra de carbono respecto a la dirección de laminación de la aleación de aluminio. Por su parte, a partir de los resultados de J, en términos del parámetro de tenacidad a la inestabilidad ( $J_c$ ), tanto del modelo predictivo de simulación FEM como del ensayo J, se calcula la resistencia residual en placa plana con geometría de fisura superficial y totalmente pasante.

**Palabras Claves:** *Materiales, Ensayos, Tratamiento de datos, Fractura, Tracción*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, FML (Fiber Metal Laminates), consisten en láminas delgadas de aluminio colaminadas en forma alternada con capas de fibra unidireccionales embebidas en una matriz de resina epoxi. En caso de utilizar fibra de carbono, el compuesto se denomina CARALL (CARbon Reinforced ALuminum Laminates). Los materiales compuestos FML se utilizan en la industria aeronáutica [1], naval y en otros vehículos de transporte por ser materiales livianos, con elevada resistencia a la propagación de fisuras, resistencia al daño acumulado y baja absorción de humedad.

Por otra parte, los constructores de aviones evalúan que la sustitución del aluminio tradicional por FML podría ser ventajoso por sus excelentes propiedades mecánicas y que permiten además un 20 % de ahorro en peso comparado con aluminio tradicional utilizada en el campo aeroespacial. Hoy en día, los FML se utilizan en varias aplicaciones, tales como: estructuras de alas, fuselaje y protección balística [2].

Estos materiales compuestos tienen como característica que en ellos la propagación de fisuras tiene lugar mediante el mecanismo de puente de fibra (Fiber-Bridging) [3] como se indica en la Figura 1.

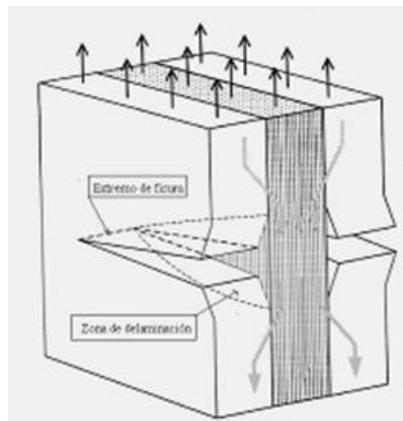


Figura 1: Probeta C(T) [4] (Fiber Bridging) [3]

En el mecanismo de propagación llamado puente de fibra se diferencian dos zonas que son las siguientes:

- ZONA COHESIVA: zona de proceso por delante de la fisura
- ZONA FIBER-BRIDGING [3]: zona de puente de fibras detrás de la fisura. Ver Figura 3 (ambos proporcionan incremento de la tenacidad a la propagación de una fisura. Figura 2

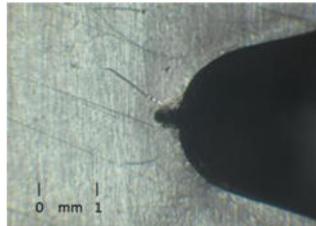


Figura 2: Boca de fisura

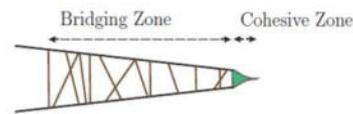


Figura 3: Boca de fisura y Bridging zone

## 2. MATERIAL Y METODO

### 2.1 Material

La probeta de mecánica de la fractura compacta C(T) [4] ensayada corresponde a un laminado para uso experimental el cual se elaboró en placas cuadradas de 120 mm de lado según las secuencias de apilamiento o arreglo representada por medio de la indicación  $m/n$  ( $m = n + 1$ ), siendo  $m$  la cantidad de capas de aluminio y  $n$  la cantidad de capas de fibras impregnadas en resina. En este trabajo se utiliza un arreglo 4/3 (Al- 90-Al-90-Al-90-Al), siendo 0 y 90 la orientación de la fibra de carbono respecto a la dirección de laminación de la aleación de aluminio.

Se ha utilizado un compuesto FML fabricado con láminas metálicas de aluminio 1050 con fibra de carbono NCT-301 unidireccional, impregnada en resina epoxi. Se utilizó la resina presente en la fibra de carbono en la colaminación entre las capas de fibra unidireccional y aleación de aluminio para fabricar el material compuesto.

En el laboratorio se determinó además la curva tensión- deformación obtenida del ensayo de tracción de probetas correspondientes a un laminado con idénticas características al que se utilizó en la fabricación de la probeta de mecánica de la fractura como la indicada en la Figura 4. En el gráfico de la Figura 5 se observa la curva constitutiva tensión-deformación del laminado 4/3.



Figura 4: Probetas de Tracción

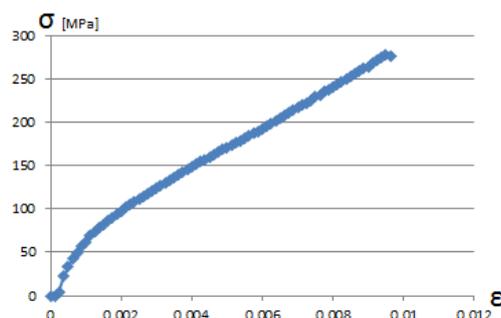


Figura 5: Curva constitutiva tensión deformación



## 2.2 Código Numérico

Para el trabajo se utilizó la versión de distribución académica del código ANSYS, denominada ANSYS-Academic. ANSYS aplica el método de los elementos finitos para resolver problemas en diversas áreas de la ingeniería, entre ellos el área estructural. El programa permite resolver el sistema de ecuaciones que surgen de aplicar el método de los elementos finitos al problema que se está analizando. El programa cuenta con herramientas que permiten la creación de una geometría y su posterior mallado, en este caso se representa la geometría de una probeta de mecánica de la fractura C(T) [4] indicada como CTS “Compact Test Specimen”. El detalle de la malla y la conectividad, así como la forma de los elementos, se puede observar en la Figura 6.

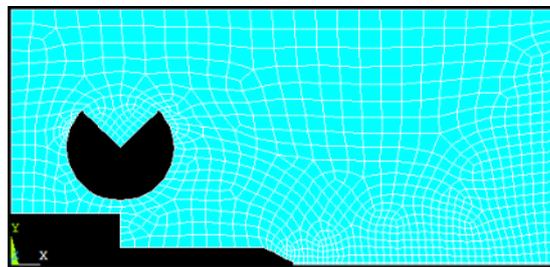


Figura 6: Discretización de la geometría de la probeta C(T)

## 3. MODELO NUMERICO

### 3.1 Probeta CTS “Compact Test Specimen”

Para estimar el valor de carga vs desplazamiento, se realizó un análisis no lineal en un modelo numérico 2D de una probeta de mecánica de la fractura compacta C(T) [4] simulando un estado plano de tensión compatible con el espesor de la probeta ensayada. En la Figura 7 se detalla las dimensiones de la probeta C(T) [4] modelada, cuyas características geométricas coinciden con las de las probetas ensayadas.

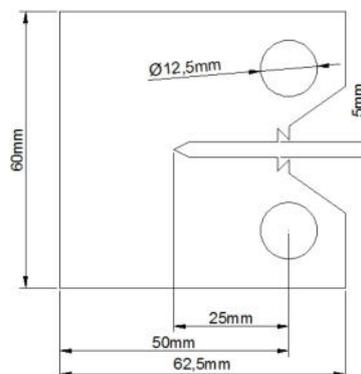


Figura 7: Probeta C(T)

La geometría se diseñó por simetría, desarrollando solo una mitad de la probeta. Dentro de la geometría se utilizaron dos tipos de elementos PLANE 182 e INTER 202 [5].

PLANE 182 es utilizado para el modelado de estructuras sólidas en 2D, este se puede utilizar como elemento plano para: estado plano de tensión, estado plano de deformación o estado plano de deformación generalizado. Este es definido por 3 o 4 nodos, teniendo 2 grados de libertad en cada nodo (traslación en X y traslación en Y).

INTER 202 es un elemento cohesivo que simula la superficie de interfaz y el proceso de delaminación posterior, donde la separación se representa por un desplazamiento creciente entre nodos. Se utiliza como elemento plano para: estado plano de tensión o estado plano de deformación. Este es definido por 4 nodos, teniendo 2 grados de libertad en cada nodo (traslación en X y traslación en Y).

### 3.2 Formulación de elementos Cohesivos

Para simular el grado de deformación y el daño acumulado en el extremo de la fisura se utilizó en el modelo numérico una zona de elementos cohesivos próximos a la zona donde se produciría el avance de la fisura. El modelo constitutivo de los elementos cohesivos tiene dos parámetros que caracterizan el proceso de descohesión, tal como se muestra en la Figura 8:

- La tensión máxima (tensión de superficie del elemento continuo),  $\sigma_{max}$ , también denotada como fuerza cohesiva.
- La separación donde el elemento cohesivo falla,  $\delta_0$

Cuando la componente normal  $\delta_0^N$  alcanza su valor crítico, los elementos continuos inicialmente conectados por los elementos cohesivos, se desconectan lo que significa que el material en este punto ha fallado.

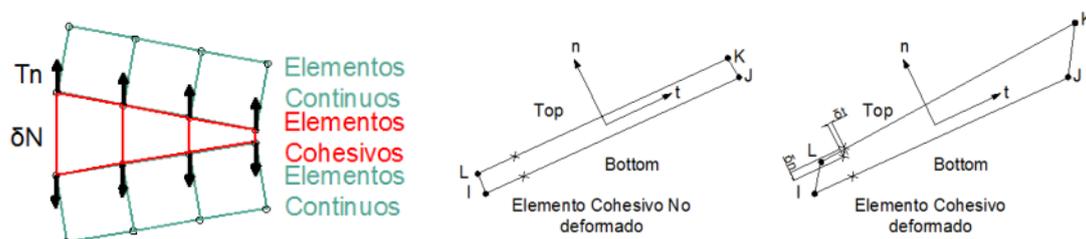


Figura 8: Representación de elementos cohesivos sometidos a esfuerzo normal

Se utiliza una ecuación constitutiva para relacionar, la tensión  $T$  con el desplazamiento relativo ( $\delta$ ) en la interfaz.



La forma de la ley cohesiva está dada por la función  $T(\delta)$ . La tensión máxima establece la resistencia local del material y desempeña un papel crítico en el desarrollo de la deformación plástica del material que se encuentra en el entorno del vértice de la fisura.

El área bajo la curva ( $T(\delta)$ ), representa la energía absorbida por el elemento cohesivo,  $G_o$ , y se define como la energía cohesiva.

El parámetro  $G_o$  (Energía total disipada por la fractura), se representa a través de la integral definida en la ecuación (1)

$$G_o = \int_0^{\delta_0} T(\delta) d(\delta) \quad (1)$$

Si se conoce o presume la forma de la curva ( $T(\delta)$ ), dos parámetros son suficientes para caracterizar la ecuación y permitir el ajuste con valores experimentales.

La energía de fractura  $G_c$  Cuando el material tiene una respuesta lineal elástica se iguala con el trabajo local de separación (el cual queda determinado por la rigidez del material). El valor de  $G_o$  puede obtenerse de ensayo, ya que coincide bien con la *integral J* en el inicio de la fisura,  $J_i$ .

Cuando el material deforma plásticamente,  $G_c$  se eleva por sobre  $G_o$ , pero sigue siendo energía cohesiva  $G_o$ , se corresponde aproximadamente a la *integral J* en el inicio de la fisura, y puede ser la primera estimación para  $G_o$ . El parámetro cohesivo puede ser diferente en la dirección normal y la tangencial, pero se define que la energía de separación es igual en ambos modos de falla,  $G_o^N = G_o^T$ [6].

La necesidad de una ecuación constitutiva apropiada en la formulación del elemento cohesivo es fundamental para una simulación precisa del proceso de fractura. El modelo que representa el comportamiento cohesivo del material y sus parámetros de entrada a menudo se eligen de la forma más simple posible por razones numéricas, en lugar de tener significado físico.

Básicamente, se asume que ( $T(\delta)$ ) es una curva de tensión-desplazamiento con una forma bilineal. Más recientemente se han propuesto diferentes formas del modelo cohesivo, a saber, la forma trapezoidal y las formas exponenciales. Las ecuaciones (2) y (3) describen el comportamiento exponencial del elemento cohesivo, que se observa en la Figura 9

$$T_n = \sigma_n \cdot \left( \frac{\Delta_n}{\delta_n} \right) \cdot e^{(1-\Delta_n/\delta_n)} \quad (2)$$

$$G_c = e \cdot \sigma_{max} \cdot \delta_n \quad (3)$$

La curva Tensión desplazamiento de la Figura 9 representa la respuesta de un elemento cohesivo que sigue la ecuación constitutiva de forma exponencial.

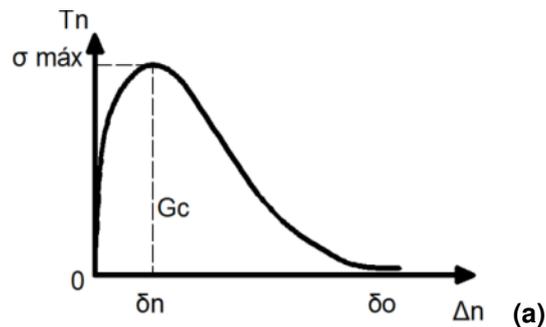


Figura 9: Modelo constitutivo. Elemento Cohesivo Exponencial

Las ecuaciones (4) y (5) describen el comportamiento bilineal del elemento cohesivo, que se observa en la Figura 10.

$$T_n = \begin{cases} \frac{\sigma_{max}}{\delta_n} \cdot \Delta_n & \Delta_n \leq \delta_n \\ \frac{\sigma_{max}}{\delta_n - \delta_o} \cdot (\Delta_n - \delta_o) & \Delta_n \geq \delta_n \end{cases} \quad (4)$$

$$G_c = e \cdot \sigma_{max} \cdot \frac{\delta_o}{2} \quad (5)$$

La curva tensión desplazamiento de la Figura 10 representa la respuesta la ecuación constitutiva de forma bilineal propia del elemento cohesivo que responde a las ecuaciones (4) y (5).

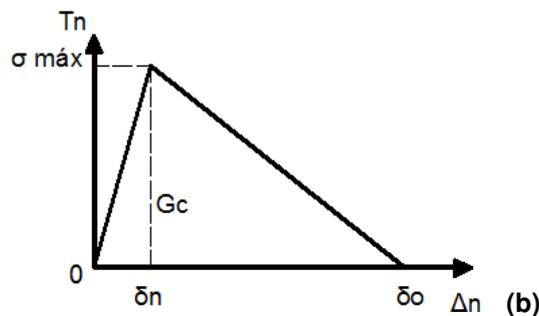


Figura 10: Modelo constitutivo. Elemento Cohesivo Bilineal

### 3.3 Condiciones de Borde

Para simular la simetría de la probeta se aplicaron restricciones de desplazamiento  $U_Y=0$ , para los nodos inferiores de los elementos cohesivos. Por otro lado, se simuló en el punto de aplicación de la carga un camino incremental de desplazamientos equivalente al impuesto por el cabezal móvil del dispositivo de ensayo, para ello se le dio un valor de desplazamiento al Nodo 94. A partir de dicha condición de contorno, se estimó mediante el modelo numérico el valor del esfuerzo equivalente que produce cada incremento de desplazamiento en el punto de aplicación



carga. Para cada punto de paso incremental del análisis no lineal se determinó el valor del desplazamiento en el nodo que simula el punto donde se monta el elemento de medición de la apertura de la boca de la fisura (COD) por medio de un extensómetro del tipo “clip gauge”, ver Figura 11.

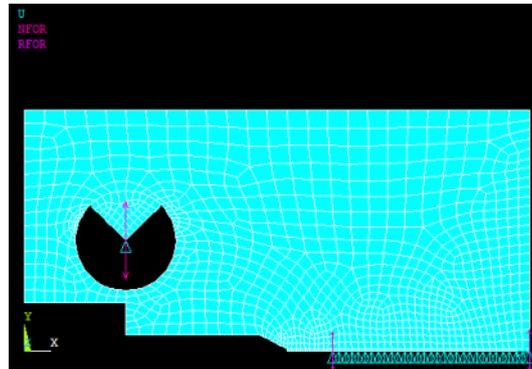


Figura 11: Elementos y condiciones de borde extraídos del modelo en ANSYS.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Gráficos P vs. Desplazamiento $V_{II}$

En el siguiente gráfico se representan los valores de Carga vs desplazamiento del modelo exponencial que fue el que mejor se ajustó a los resultados experimentales.

#### 4.1.1. Gráfico con Modelo Exponencial

En el gráfico de la Figura 12 se observan las curvas de carga vs. Desplazamiento para elementos cohesivos con una formulación exponencial.

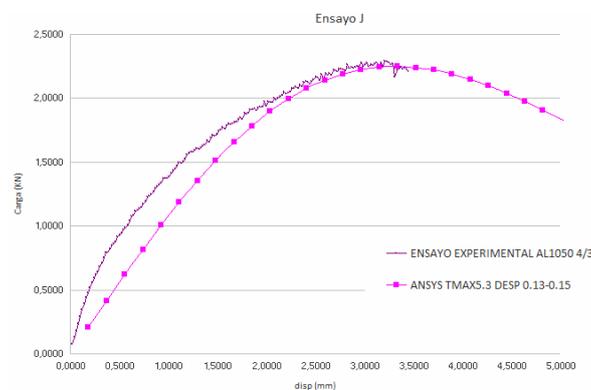


Figura 12: Resultado de modelo exponencial con mayor aproximación al ensayo experimental



En la Figura 12 se observa el comportamiento del elemento cohesivo exponencial en la proximidad del borde de la fisura, caracterizada por un primer tramo con incremento de carga hasta alcanzar  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , para luego mantener el campo de tensión con valores próximos a la tensión máxima. Se eligieron los valores de  $\sigma_{m\acute{a}x}$  y  $G_{m\acute{a}x}$  que permitieron ajustar el resultado del modelo numérico con los valores experimentales.

## 4.2 Resultados

### 4.2.1 Resultados de $J_c$ según Norma ASTM E1820

Utilizando las expresiones de la norma ASTM E-1820, para la probeta compacta C(T) [4], junto con los valores numéricos obtenidos del modelo de elementos finitos desarrollado en ANSYS permitieron obtener la estimación del parámetro  $J$ . El valor de la integral  $J$  se calcula de acuerdo con ASTM E-1820 como la suma de las componentes elástica y plástica. Ecuación (6).

$$J_c = J_{el} + J_{pl} \quad (6)$$

Donde  $J_{el}$  y  $J_{pl}$  se obtienen según las ecuaciones (7) y (8) respectivamente:

$$J_{el} = \frac{K_I^2}{E} \quad (7)$$

$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{b_0 B} \quad (8)$$

Siendo:  $b_0 = W - a_0$ ,  $B =$  Espesor de probeta,  $A_{pl} =$  Área Plástica,  $\eta = 2 + 0,522 b_0/W$ .

El criterio para determinar la integral  $J$  ha sido la utilización del valor de inestabilidad o crítico en términos de  $J_c$ . Ecuación (9) según la técnica de la norma ASTM E1820.

$$J_c = \frac{K_C^2}{E} \quad (9)$$

En la Tabla 1 se observan los valores obtenidos de  $J_c$  y su conversión a  $K_c$ .

Tabla 1. Parámetros Fractomecánicos

	<b><math>K_c</math></b> <b>[MPa <math>\sqrt{m}</math>]</b>	<b><math>J_c</math></b> <b>[kJ/m<sup>2</sup>]</b>
Ensayo	85,9	114
Simulación	80,8	100,9
Error %	5,9	11,5

#### 4.2.2 Determinación de tensión residual en panel con fisura central pasante

Se define la resistencia residual de un material laminado como la resistencia remanente frente a la presencia de daño acumulado en el material, por ejemplo, la presencia de una fisura. Este valor varía en función de la geometría, la tenacidad a la fractura y el tamaño de fisura. Para este análisis se mantiene constante el espesor del panel estructural y la propiedad fractomecánica. En la figura 13 se observa el panel de ensayo en un componente estructural similar al indicado en la norma ASTM E561 [7]. A partir de esta geometría se determina la resistencia residual ( $\sigma_{res}$ ) variando el ancho de placa y el largo de fisura, manteniendo constante el espesor del panel el cual coincide con el espesor y secuencia del laminado correspondiente a la probeta C(T) [4]. El valor de la resistencia residual para la geometría bajo análisis se expresa utilizando la ecuación (10). [8 y 9]

$$\sigma_{res} = \frac{K_c}{\sqrt{\pi \cdot a_{eff} \cdot \sec\left(\frac{\pi \cdot a_{eff}}{W}\right)}} \quad (10)$$

Siendo:  $\sigma_{res}$ : Resistencia residual,  $K_c$ : Tenacidad a la fractura,  $a_{eff}$ : Ancho efectivo,  $W$ : Ancho de la Placa.

El valor de  $K_c$  (ver Tabla 1) utilizado en la ecuación anterior es el que se determina por ensayo de  $J_c$  con probeta compacta C(T) [4], tanto de manera experimental como a través de la simulación del ensayo por elementos finitos. (Ver tabla 1)

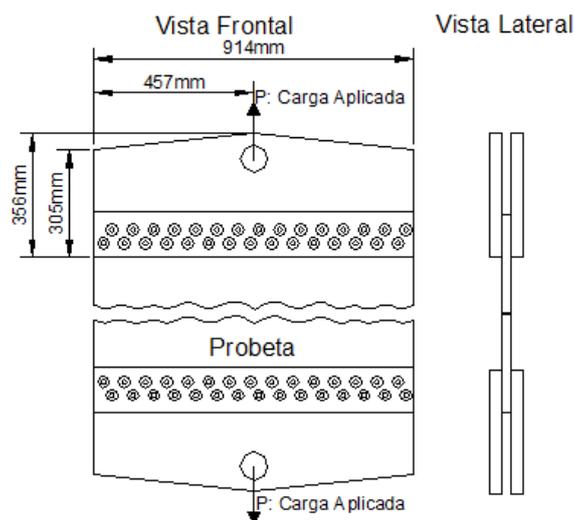


Figura 13: Fisura central pasante

En las Figuras 14 y 15 se representa la tensión residual  $\sigma_{res}$  a partir de la generación de una serie de curvas paramétricas en función del largo de fisura. En la Figura 14 los cálculos fueron



realizados con los valores de  $K_c$  obtenidos de ensayo experimental en probetas C(T) [4], mientras que en la Figura 15 los cálculos fueron realizados con los valores obtenidos del modelo numérico.

De la comparación de los resultados obtenidos para el valor de la tensión residual con el valor de tensión admisible del laminado Figura 5. Se observa que el valor de  $\sigma_{adm}$  es mayor que el  $\sigma_{res}$  por lo que se concluye que el modo de falla del panel corresponde a un mecanismo de deformación plástica, antes de alcanzar el valor necesario para propagar una fisura por daño acumulado.

Valores de  $\sigma_{res}$  para arreglo 4/3 (Al- 90-Al-90-Al-90-Al) Espesor: 2,6mm

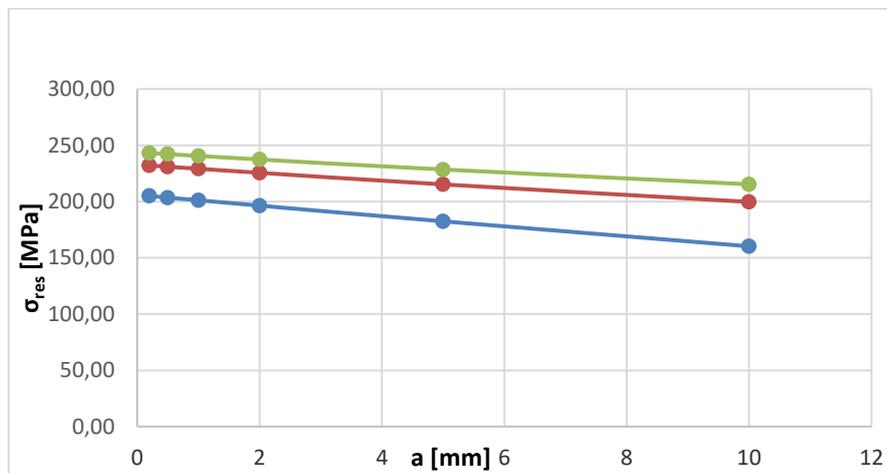


Figura 14: Gráfico obtenido con valores de Ensayo

Valores de  $\sigma_{res}$  para arreglo 4/3 (Al- 90-Al-90-Al-90-Al) Espesor: 2,6mm

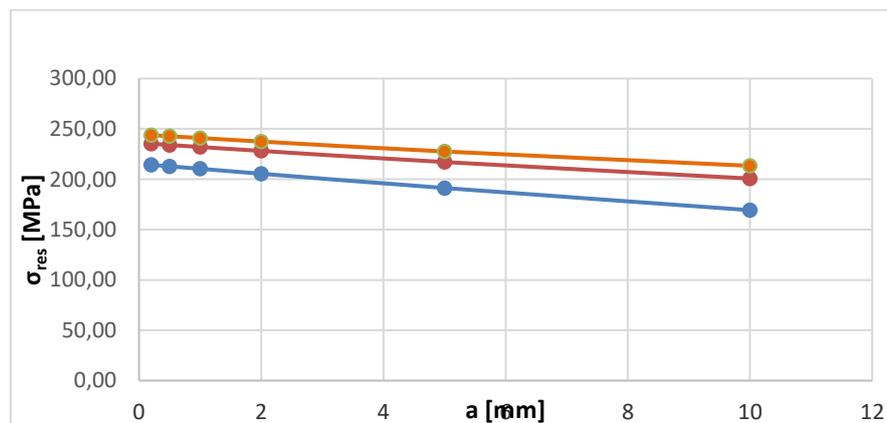


Figura 15: Gráfico obtenido con valores de Modelado.



## 5. CONCLUSIONES

En el ámbito del transporte, la construcción de paneles utilizando este tipo de material compuesto híbrido FML tipo CARALL permite obtener mejores propiedades mecánicas de los componentes y una reducción en peso para el mismo espesor, por tal motivo es preciso poder determinar la capacidad de estos materiales a resistir la propagación de fisuras, la tenacidad a la fractura, debido a los esfuerzos mecánicos a los que están sometidos en servicio. En el presente trabajo se estimaron los valores de tensión residual  $\sigma_{res}$  en paneles con una fisura central, construidos a partir de laminados híbridos tipo CARALL (Laminas de fibra de carbono reforzadas con Aluminio) partiendo del parámetro fractomecánico del material compuesto,  $K_c$ , considerando diferentes anchos de placa  $W$ . Se realizó una comparativa de los valores de tensión residual con diferentes valores de  $K_c$  obtenidos de ensayo según norma ASTM E1820 y del predicho de la simulación numérica del ensayo utilizando el programa de elementos finitos Ansys Mechanical.

## REFERENCIAS

- [1] L. B. Vogelesang. *Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structure*. Delft University of Technology, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 22, p. 492-496, 1983.
- [2] Riccardo Rodi. *The Residual Strength Failure Sequence in Fibre Metal Laminates*. Institutional Repository (doctoral thesis), ISBN 9789077172803, 2012.
- [3] ASTM E1820, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM, 2011.
- [4] C. T. Lin, P. W. Kao. *Effect of fiber bridging on the fatigue crack propagation in carbon fiber-reinforced aluminum laminates*. Materials Science & Engineering A, 190: p. 65-72, 1995.
- [5] F. Javidrad, M. Mashayekhy. *A Cohesive Zone Model for Crack Growth Simulation in AISI 304 Steel*. Journal of Solid Mechanics, 6 (4): p. 378-388, 2014.
- [6] Waqas Asghar, Muhammad Ali Nasir, Faisal Qayyum, Masood Shah. *Investigation of fatigue crack growth rate in CARALL, ARALL and GLARE*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 40(7), July 2017.
- [7] ASTM E561, Standard Practice for R-Curve Determination, ASTM, 1998.
- [8] Rodi R, Alderliesten, R.C., Lazzeri, L. *Analytical Modeling of Fiber Metal Laminate Stiffened by Bonded Straps: The effect of external stiffening elements on the fatigue crack growth in Fibre Metal Laminate*. VDM Verlag Dr. Müller, ISBN 978-3-639-21534-2, December 2009.
- [9] E.M. Castrodeza, F.L.Bastian, J.E.Perez Ipiña. *Critical fracture toughness,  $J_C$  and  $\delta 5C$ , of unidirectional fibre-metal laminates*. Thin-Walled Structures Volume 41, Issue 12, Pages 1089-1101, December 2003.



## IRAM 11575: AJUSTE Y PUESTA A PUNTO DE UN EQUIPO DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL FUEGO DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS - ENSAYOS PRELIMINARES

Pablo Martina<sup>1</sup>, Raquel Aeberhard<sup>1</sup>, Sergio Borchichi<sup>1</sup>, Franco Milich<sup>1</sup>, Gabriel Corvalán<sup>1</sup> y Juan Corace<sup>1</sup>

<sup>1</sup> G.I.D.E.R.-Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables - Depto. de Termodinámica– Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Nordeste  
Av. Las Heras 727, Resistencia, Chaco, Argentina - pablo@ing.unne.edu.ar ;  
raquelaeberhard@gmail.com, sergio.borchichi@gmail.com, francomilich@hotmail.com,  
gabrielcorvaa@yahoo.com.ar, jjcorace@gmail.com

### RESUMEN

El análisis del comportamiento ante el fuego, de los elementos constructivos, es un procedimiento que permite determinar las características que posee un material, para hacerlo más peligroso que otro ante un incendio. Esto permite establecer criterios de clasificación, para incluir a los materiales en un rango o escala que proporcione la comparación entre ellos.

En este trabajo se describe la construcción y puesta a punto de un equipo de medición, para determinar el grado de resistencia al fuego de materiales constructivos, de acuerdo a la Norma IRAM 11575.

En un principio se propuso construir un dispositivo nuevo, pero tras varios intentos fallidos y errores de diseño, se optó por adaptar una mufla eléctrica, ya existente, para realizar los ensayos. Luego de un período de puesta a prueba se realizaron las primeras mediciones.

En el presente estudio se exponen los resultados de las 3 primeras muestras ensayadas: cemento espumado de baja densidad, madera de quebracho blanco y placa de yeso cubierta de papel.

Los resultados alcanzados en esta primera etapa, son altamente promisorios y pueden utilizarse como referencia para saber si el material examinado es combustible o no, y en qué medida, por lo que se pretende continuar perfeccionando el equipo de medición y ensayar nuevos materiales biomásicos, construidos por el grupo G.I.D.E.R.

Conocer el comportamiento ante el fuego de los materiales utilizados en la edificación, permitiría disminuir los riesgos de incendio, impediría la propagación del mismo y reduciría el riesgo de daños a las personas y a los materiales.

**Palabras Clave:** Resistencia al Fuego; Equipo de Medición; Mufla Eléctrica; Combustibilidad de los Materiales



## 1. INTRODUCCIÓN

La resistencia al fuego de los materiales es una cualidad decisiva en la construcción de edificios y estructuras. Esta propiedad se refiere a la capacidad de un material para resistir la propagación del fuego y el calor, así como para mantener su integridad estructural en caso de un incendio.

Existen diferentes ensayos y normas que se utilizan para evaluar la resistencia al fuego de los materiales [1,2]. Una de las pruebas más comunes es la de resistencia al fuego estándar, que evalúa la capacidad de un material para soportar un fuego durante un período determinado de tiempo. Esta prueba establece la capacidad del material para resistir el fuego y la propagación de calor, así como la emisión de gases tóxicos. Estos estudios permiten clasificar a los materiales en diferentes clases de resistencia al fuego según su capacidad para soportar el mismo.

Algunos de los materiales más comunes utilizados en la construcción que tienen una alta resistencia al fuego son el concreto, el ladrillo y la piedra. Estos materiales son muy densos y no son inflamables, lo que les permite soportar altas temperaturas sin perder su integridad estructural.

Por otro lado, los materiales inflamables como la madera y los plásticos son menos resistentes al fuego y pueden arder fácilmente, propagando el fuego rápidamente y causando daños significativos a la estructura.

Es importante tener en cuenta que la resistencia al fuego de un material no garantiza que un edificio sea totalmente seguro contra incendios. La instalación adecuada de sistemas de detección y extinción de incendios, así como la capacitación del personal en la prevención de incendios, son fundamentales para minimizar los riesgos de incendios y maximizar la seguridad en las construcciones [3].

Por lo tanto, se puede establecer que el estudio del comportamiento de los elementos constructivos, ante la presencia de fuego, es una técnica que permite determinar las características que posee un material, para hacerlo más peligroso que otro ante un incendio. Esto permite establecer criterios de clasificación, para incluir a los materiales en un rango o escala que proporcione la comparación entre ellos.

El presente trabajo, se enmarca dentro del proyecto de Investigación denominado “Estudio integral de Residuos Biomásicos del Nordeste, desde el punto de vista constructivo y energético: Conductividad Térmica, Resistencia al Fuego, Gases Contaminantes desprendidos en la combustión, Briquetas, Poder Calorífico”, desarrollado por el grupo G.I.D.E.R. de la Facultad de Ingeniería de la UNNE.



Se describe la construcción y puesta a punto de un equipo de medición, para determinar el grado de resistencia al fuego de materiales constructivos, de acuerdo a la Norma IRAM 11575, exponiendo los resultados de las 3 primeras muestras ensayadas: cemento espumado de baja densidad, madera de quebracho blanco y placa de yeso cubierta de papel.

## 2. METODOLOGÍA

En el marco del proyecto mencionado con anterioridad y sabiendo que en la región no se cuenta con un dispositivo para realizar estudios del comportamiento al fuego de materiales constructivos, se planteó la posibilidad de diseñar y construir un aparato para dicho fin.

La búsqueda de bibliografía sobre el tema fue muy extensa, llegando incluso a aprovechar una visita técnica al Laboratorio del Fuego de la Escola Politècnica Superior d' Edificació de la Universitat Politècnica de Catalunya, en la ciudad de Barcelona, España, para intercambiar ideas y pedir asesoramiento sobre el tema.

Los estudios sobre la metodología de trabajo, llevaron al grupo a considerar la viabilidad de comprar un dispositivo nuevo (exportador INELTEC, marca IMO FTFC Part 1), pero los costos imposibilitaron la adquisición del equipo de medición.

Por el motivo anterior se planteó la posibilidad de fabricar un equipo que cumpla las características del equipo indicado en las Normas IRAM 11.575 "MÉTODO DE ENSAYO DE RESISTENCIA AL FUEGO" y la Norma Española UNE-EN-ISO 1182: "ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD"

### 2.1. Características de los Dispositivos según Normas IRAM: 11.575 y UNE-EN-ISO 1182

#### 2.1.1. Norma IRAM 11.575 "MÉTODO DE ENSAYO DE RESISTENCIA AL FUEGO"

Las características del dispositivo y de las muestras del equipo de medición de resistencia al fuego de acuerdo a la norma argentina IRAM 11575 - MÉTODO DE ENSAYO DE RESISTENCIA AL FUEGO [1], son las siguientes:

- ✓ Cilindro de 25 cm de altura
- ✓ 7,6 cm de diámetro interno
- ✓ Material refractario
- ✓ Temperatura de ensayo: 750 °C
- ✓ Probetas en forma de prismas de sección cuadrada.



### **2.1.2. Norma Española UNE-EN-ISO 1182: “ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD”**

Las características del dispositivo y de las muestras del equipo de medición de resistencia al fuego de acuerdo a la norma española UNE-EN-ISO 1182: ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD [2]:

- ✓ Cilindro de 25 cm de altura
- ✓ 7,6 cm de diámetro interno
- ✓ Material refractario
- ✓ Temperatura de ensayo: 750 °C
- ✓ Probeta cilíndrica

### **2.2. Prototipo Construido**

Para la fabricación del equipo se tuvieron en cuenta las normas IRAM 11575 y UNE-EN-ISO 1182, planteándose dos opciones:

*Opción A:* armar un equipo de medición de resistencia al fuego de acuerdo a la norma española UNE-EN-ISO 1182: ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD. Este equipo consiste en un cilindro hueco vertical de 25 cm de alto por 7,6 cm de diámetro interno hecho de material refractario. Alrededor del mismo existe una resistencia eléctrica cuya intensidad de corriente (y por lo tanto la temperatura dentro del cilindro) puede ser regulada mediante reóstatos externos de control. Mediante estos controles se regula la temperatura interior a 750°C. Luego se coloca una muestra cilíndrica (previamente pesada) del material a ensayar dentro del cilindro. Un medidor de temperatura colocado dentro de la muestra registra la temperatura, que varía en función del material, es decir, según su resistencia al fuego. Se debe observar también si se produce una llama y en caso afirmativo el tiempo de duración de la misma. Al finalizar el ensayo se extrae la muestra y se pesa nuevamente. En función de los valores obtenidos se clasifica el material como combustible o no combustible y entre esos 2 extremos existen valores intermedios. En este equipo el pasaje de aire se efectúa en un solo sentido.

*Opción B:* armar un equipo de medición de resistencia al fuego de acuerdo a la norma argentina IRAM 11575 - Método de ensayo de resistencia al fuego. A pesar de la pequeña diferencia entre los 2 nombres (Ensayo de No Combustibilidad la Norma ISO Española y de Resistencia al Fuego la Norma IRAM Argentina) en esencia es el mismo ensayo. El equipo argentino tiene la diferencia de que tiene doble pasaje de aire para lograr un mejor calentamiento, lo que lo hace más complicado de fabricar.

En base a estas dos opciones se decidió fabricar el equipo de acuerdo a la norma española, es decir un cilindro hueco de simple pasaje de aire, vertical, calentado por una resistencia eléctrica externa regulable. La forma y medidas del equipo se indican en el siguiente esquema (Figura 1):

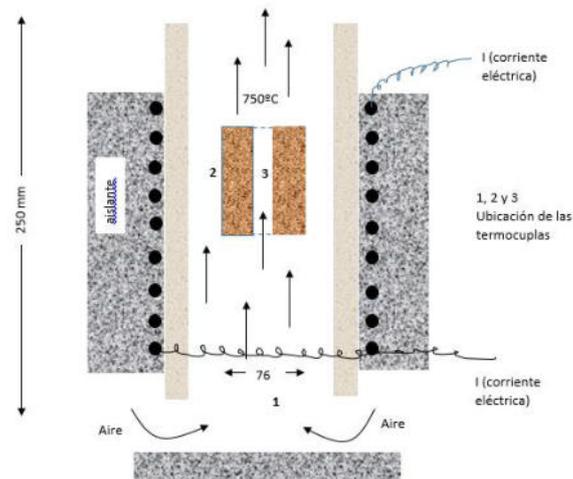


Figura 1: Esquema del dispositivo y ubicación de la muestra, según UNE-EN-ISO 1182

Para la fabricación del cilindro núcleo, en cuyo interior se colocan las muestras, se realizó un molde matriz en el cual realizar la colada de la mezcla de material refractario. Este molde fue diseñado con 2 caños concéntricos de 25 cm de longitud colocados sobre una base de madera como se observa en las siguientes imágenes (Figura 2):



Figura 2: Molde matriz para fabricación del cilindro núcleo

La mezcla para el cilindro, se realizó con polvo de arcilla adhesiva refractaria mezclada con agua según la siguiente proporción: 1 kg arcilla + 0,2 kg de agua.

Esta mezcla se volcó al molde, se vibró para que no queden espacios huecos ni bolsas de aire y se dejó secar durante 6 días (Figura 3).



Figura 3: Fabricación del cilindro núcleo

Al momento de desmoldar el cilindro se produjo una rotura, evidenciando ser un material quebradizo. Luego de varios intentos, modificando la cantidad de agua respecto a la proporción inicial, y mezclando muy intensamente para lograr una mezcla muy homogénea, el cilindro fabricado se rompió nuevamente al manipularlo (Figura 4):



Figura 4: Rotura del cilindro núcleo

### 2.3. Adaptación de la Mufia

Ante los reiterados fracasos, se abandonó la idea de hacer un núcleo refractario, ya que se debía contar con los insumos adecuados (la arcilla refractaria utilizada no parecía ser el material correcto) y también dominar la técnica de la mezcla, colado y desmolde de piezas complejas. Además, en caso de lograr un buen cilindro núcleo, se debían realizar las acanaladuras externas para arrollar la resistencia eléctrica, lo cual también es una operación difícil y de cierta dificultad técnica.

Finalmente, ante la imposibilidad de comprar un equipo nuevo, las dificultades técnicas y la falta de insumos para la fabricación del dispositivo, se decidió adaptar una mufla eléctrica para realizar los ensayos de resistencia al fuego.

Si bien la forma de la cámara interna del equipo utilizado (prisma) no coincide con la establecida por la Norma IRAM 11575, ya que en la misma el dispositivo es cilíndrico, las dimensiones internas de la Mufla, la temperatura de trabajo de la misma y la ubicación de las termocupas, permitieron establecer la similitud en las condiciones de medición respecto a la Norma [1], por lo que los valores obtenidos durante los ensayos fueron tomados como válidos para estudiar el comportamiento al fuego de los diferentes materiales.

La mufla eléctrica es un equipo de laboratorio de 5,2 litros de capacidad, base rectangular de 19 cm x 29 cm, con una pared de techo ligeramente abovedado de 10 cm de altura máxima. La disposición del espacio es horizontal con apertura frontal mediante puerta abisagrada, permitiendo que ésta baje, facilitando el acceso de las muestras.

Para poder registrar las temperaturas, como indica la Norma, se colocaron dos termocupas, una situada en el centro de la cámara interna de la mufla y otra colocada en la probeta [1]. Para ello se perforó la cara posterior de la mufla y la puerta delantera. Ambas termocupas fueron conectadas a un registrador automático adosado al equipo.

El conjunto está montado sobre un gabinete de chapa totalmente rodeado de una gruesa capa de aislante térmico, dentro de la cual está colocada la resistencia eléctrica. En el frente bajo la puerta se encuentra una manivela deslizante para regular la temperatura. La mufla está fabricada para alcanzar los 980 °C. En las siguientes imágenes se observa la mufla y la resistencia eléctrica que la compone (Figura 5):



Figura 5: Mufla y resistencia eléctrica

### **2.3.1. Preparación de las probetas**

Para la realización de las experiencias, se construyeron probetas en forma de prismas de base cuadrada de 4 cm x 4 cm, con un largo lateral de 5 cm.

Cada muestra contiene un orificio, en el centro de la sección cuadrada, de 8 mm de diámetro donde se ubica la termocupla que registra la temperatura interna del material.

Para permitir el ingreso de las muestras a la mufla, las mismas fueron modificadas con un pequeño chaflán curvo.

### 2.3.2. Ubicación de las probetas

Para dar inicio al estudio de resistencia al fuego, una vez que el equipo alcanzó la temperatura de ensayo de 750 °C, se depositó la probeta, con la termocupla, dentro de la mufla como indica la figura:

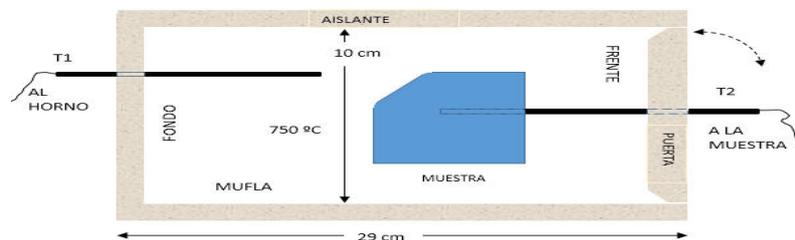


Figura 6: Ubicación de la muestra a estudiar

### 2.4. Ensayos realizados

Los primeros ensayos se realizaron con muestras de cemento espumado de baja densidad, de madera de quebracho blanco y de placa de yeso con cubierta de papel en ambos lados. Las características de las muestras se exponen a continuación (Tabla 1):

Tabla 1: Características de las muestras estudiadas

Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
<p><u>Material:</u> cemento espumado de baja densidad. <u>Densidad:</u> 714 kg/m<sup>3</sup>. <u>Color/aspecto:</u> blanco tiza, muy liviano, fácil de rayar y marcar, aspecto poroso y aireado.</p> 	<p><u>Material:</u> madera de quebracho blanco. <u>Densidad:</u> no se especifica (no es determinante) <u>Color/aspecto:</u> marrón claro-superficie lisa y firme.</p> 	<p><u>Material:</u> placa de yeso con cubierta de papel <u>Color/aspecto:</u> blanco tiza (yeso interno) y marrón claro (papel). Muestra con chaflán curvo en un extremo.</p> 



Para dar inicio a los ensayos, se colocaron 2 termocupas, una que registra la temperatura del horno, T1, y permanece constante durante todo el ensayo, y otra ubicada dentro de la probeta, T2, que varía de acuerdo al material constituyente de la misma (Figura 6).

A continuación se aumentó la temperatura de la mufla hasta que se estabilizó en 750 °C. Se introdujo la probeta, previamente secada a 60 °C durante 24 h, con la termocupla en su interior para registrar su temperatura.

Las temperaturas se registraron mediante termocuplas tipo K con controlador electrónico marca TC 6003, a intervalos de no menos de 11 mediciones por minuto, durante los primeros 5 minutos, aproximadamente, debido al cambio brusco de temperatura [2]. Una vez que la muestra alcanzó los 750 °C, se continuó midiendo en forma frecuente para obtener una curva continua durante el tiempo que duró el ensayo.

Las Figuras 6, 7 y 8 indican el comportamiento de cada muestra. Si bien las temperaturas se registraron desde el momento en que se ubicaron las probetas en la mufla, sólo se representaron en forma gráfica cuando éstas alcanzaron la temperatura de 750 °C, debido a que, para observar el comportamiento de las mismas ante el calor, sólo es necesario conocer la diferencia de temperatura entre la máxima alcanzada por el material y la temperatura ambiente en la mufla.

A continuación se representan las temperaturas en función del tiempo, de las muestras ensayadas:

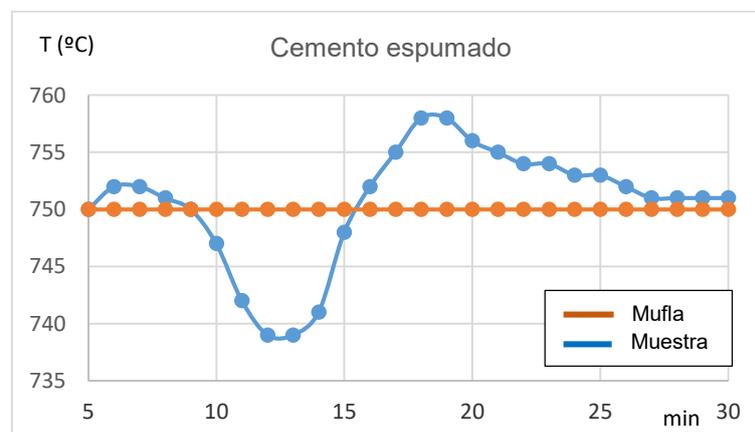


Figura 7: Variación de la temperatura respecto al tiempo para la muestra de Cemento espumado de baja densidad

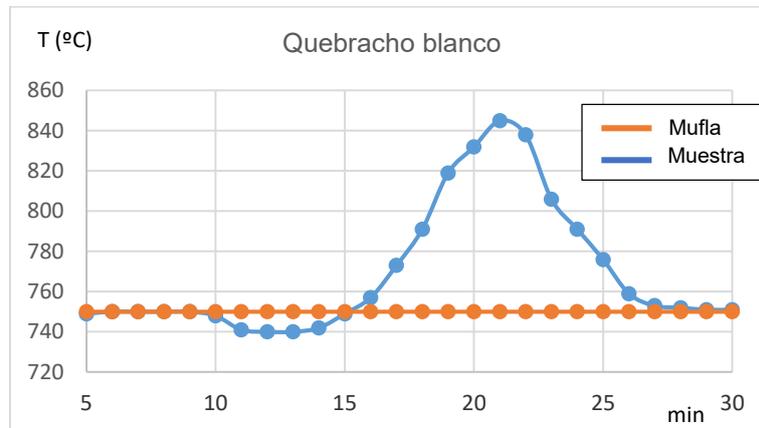


Figura 8: Variación de la temperatura respecto al tiempo para la muestra de Quebracho blanco

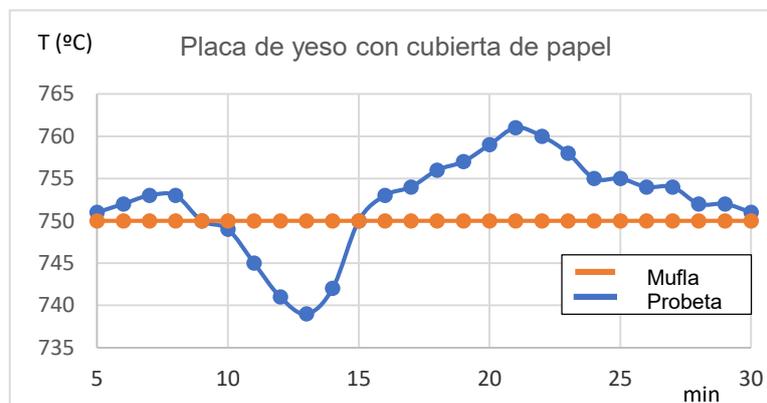


Figura 8: Variación de la temperatura respecto al tiempo para la muestra de Placa de yeso con cubierta de papel

De las gráficas se desprende que existe, previo al aumento de temperatura, una disminución de la misma, siendo incluso inferior a los 750 °C. Este comportamiento puede deberse a varios factores, por ejemplo, es posible que a pesar de haber sido secado previamente, el material contenga aún una pequeña cantidad de humedad residual que podría evaporarse rápidamente disminuyendo la temperatura antes de que comience su calentamiento debido al fuego. Otra de las causas podría ser que durante la combustión se generen gases que tendrían un efecto refrigerante sobre la superficie del material ya que pueden absorber calor y, en consecuencia, provocar una disminución inicial de la temperatura.

De las curvas se puede observar que el salto máximo de temperatura para el cemento espumado fue de 8 °C, para el quebracho blanco de 95 °C y para la placa de yeso de 11 °C.



Los materiales estudiados se clasificaron como **no combustibles** cuando las temperaturas en el interior de las muestras no se elevaron 11,5 °C por encima de la temperatura del aire ambiente en ningún momento y si no se observaron llamas en las probetas luego de 30 segundos de iniciado el ensayo [1].

Los resultados obtenidos se presentan a continuación (Tabla 2):

Tabla 2: Resultados de las muestras ensayadas

CARACTERÍSTICAS	MATERIAL		
	Cemento espumado de baja densidad	Madera de quebracho blanco	Placa de yeso con cubierta de papel en ambos lados
Aumento de temperatura	8°C	95°C	11°C
Existencia de llama	No hubo	Hubo	Sólo el papel
Pérdida de masa	7,8%	93,8%	26,5%
Calificación	No combustible	combustible	No combustible

#### 2.4.1. Ensayos futuros

Dado el buen funcionamiento del dispositivo, y contando actualmente con las Normas IRAM 11910-2 [4] y 11910-3 [5], se prevé realizar y caracterizar los materiales estudiados según las siguientes clases (Tabla 3):

Tabla 3: Clasificación de los materiales según Normas IRAM 11910-2 y 11910-3

CLASE	DENOMINACIÓN	NORMA IRAM
RE 1	Incombustibles	<b>11910-2</b> [4]
RE 2	Muy baja propagación de llama (0-25)	<b>11910-3</b> [5]
RE 3	Baja propagación de llama (26-75)	<b>11910-3</b> [5]
RE 4	Mediana propagación de llama (76-150)	<b>11910-3</b> [5]
RE 5	Elevada propagación de llama (151-400)	<b>11910-3</b> [5]
RE 6	Muy elevada propagación de llama (> 400)	<b>11910-3</b> [5]



### 3. CONCLUSIÓN

Las primeras experiencias, con materiales cuyos comportamientos ya fueron estudiados por otros autores [6], permitieron calibrar las temperaturas y adaptar la mufla eléctrica según las condiciones establecidas en la Norma IRAM 11.575, y otorgó al grupo de investigación mayor conocimiento para realizar ensayos de no combustibilidad.

La norma IRAM 11.575 sólo plantea 2 variables para calificar al material (la aparición de llama y la variación de temperatura), mientras que la norma española UNE-EN-ISO 1182 propone, además de estas 2 variables, la pérdida de masa. En los ensayos realizados se midieron las 3 variables.

Si bien el equipo adaptado no tiene exactamente las especificaciones constructivas de la Norma IRAM 11.575, los resultados obtenidos se consideran satisfactorios ya que los mismos son coincidentes con la bibliografía. Esto permite tener una aproximación válida del comportamiento al fuego de un material dado, y adquirir mayor experiencia en los ensayos, optimizando el procedimiento, lo que permitirá al grupo GIDER ser un referente en cuanto a estudios de no combustibilidad en nuestro medio.

En futuros ensayos se clasificarán las muestras como lo establecen las Normas IRAM 11910-2 /3 según su combustibilidad y el índice de propagación superficial.

### AGRADECIMIENTOS

El grupo GIDER (Grupo de investigación y desarrollo en Energías Renovables), agradece a la Secretaría General de Ciencia y Técnica, Universidad Nacional del Nordeste, por el apoyo económico recibido para la realización del proyecto: "Estudio integral de Residuos Biomásicos del Nordeste, desde el punto de vista constructivo y energético: Conductividad Térmica, Resistencia al Fuego, Gases Contaminantes desprendidos en la combustión, Briquetas, Poder Calorífico", llevado a cabo en la Facultad de Ingeniería.

### REFERENCIAS

- [1] IRAM 11575, Materiales de Construcción. Método de ensayo de resistencia al fuego. Diciembre de 1971.
- [2] UNE-EN-ISO 1182, Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad (Asociación Española de Normalización y Certificación). Mayo de 2021.
- [3] Andrew Furness, M. M. *Introduction to Fire Safety Management*. Jordan Hill, Oxford: Elsevier, (2007).



- [4] IRAM **11910-2**: Materiales de Construcción. Reacción al fuego. Ensayo de combustibilidad. Diciembre de 1993.
- [5] IRAM **11910-3**: Materiales de Construcción. Reacción al fuego. Determinación del índice de propagación superficial de llama. Método del panel radiante. Mayo de 1994.
- [6] Lange, D., Sjöström, J., Schmid, J. *et al.* *A Comparison of the Conditions in a Fire Resistance Furnace When Testing Combustible and Non-combustible Construction.* *Fire Technol* **56**, 1621–1654 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00946-6>



## TOMOGRFIA COMPUTADA DE RAYOS X APLICADA A ESTUDIOS DE POROSIDAD EN FUNDICIONES DE ALUMINIO

Martín Felcaro <sup>1</sup>, Felipe Díaz <sup>2</sup> y Matías Peralta <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Industrial – UTN Facultad Regional Rafaela  
Acuña 49, Rafaela, Argentina - martinfelcaro8@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Electromecánica – UTN Facultad Regional Rafaela - CONICET  
Acuña 49, Rafaela, Argentina – felipe.diaz@frra.utn.edu.ar

<sup>3</sup> Departamento de Validación de Equipos y Componentes – INTI Centro Litoral  
Ruta Nacional N°34 km 227, Rafaela, Argentina - meperalta@inti.gov.ar

### RESUMEN

La tomografía computada de rayos X es una compleja técnica no-destructiva que, a partir de la generación de una imagen 3D del sólido evaluado, brinda información digital muy precisa tanto de las heterogeneidades como de la geometría de dicho sólido. A modo de ejemplo, este trabajo presenta, empleando esta técnica, una metodología para analizar la porosidad cercana a la zona de fractura en una muestra de fundición de Al-Si, solicitada a flexión de 3 puntos. Un total de 1106 poros fueron examinados en 6 regiones de interés, 2 de las cuales contienen a las superficies de fractura. El software utilizado en el pos-procesamiento de las imágenes obtenidas posibilitó el diseño de una estrategia para analizar y comparar la porosidad en dichas regiones (tanto simétricas como adyacentes), lo cual a su vez permitió evaluar la correlación entre la porosidad y el plano de fractura. Los resultados obtenidos muestran que la mayoría de los poros examinados tienen valores medios de compacidad (rango de 0,3-0,6). Por otra parte, las regiones de interés que contienen a las superficies de fractura muestran marcadas asimetrías en cuanto al conteo general de poros, y también, en cuanto al conteo de poros de diámetro pequeño. Finalmente, a partir de las imágenes 3D de dichas zonas de interés, es posible advertir que la fractura inicia y se desarrolla en un plano de transición entre una zona de elevada porosidad y otra de menor densidad, siendo dicho plano, necesariamente, aquel cuyo momento de inercia es mínimo.

**Palabras Clave:** Tomografía Computada; Aleación Al-Si; Porosidad; Fractura.



## 1. INTRODUCCIÓN

La tomografía computada de rayos X (TC) es una técnica no-destructiva que posibilita evaluar la estructura interna de una componente o muestra, con elevada resolución [1-3]. Esta técnica utiliza un especial software para la generación de un modelo 3D del sólido evaluado y para el pos-procesamiento de los datos obtenidos, posibilitando la evaluación cuantitativa de tamaño, forma, cantidad y distribución espacial de defectos, fisuras, poros y/o inclusiones generadas a partir de diferentes procesos de fabricación.

Por otra parte, las aleaciones Al-Si de moldeo, usadas en la producción de componentes industriales con diferentes niveles de resistencia y tenacidad, brindan un amplio rango de propiedades mecánicas, las cuales dependen de la composición química, las condiciones de fundición, la velocidad de solidificación y el tratamiento térmico [4]. Sin embargo, estas aleaciones pueden contener mayor o menor porosidad, lo cual va en detrimento de dichas propiedades. Es importante destacar que estas dependen, fuertemente, de la cantidad, tamaño, forma, y distribución espacial de los poros. En los últimos años, la TC ha sido una importante herramienta no-destructiva para el estudio de los mismos [5]. Cabe destacar que, a partir del pos-procesamiento de una imagen tomográfica 3D, es posible evaluar las características morfológicas de los poros y, además, el número de los mismos por unidad de volumen, la distribución del tamaño real, las distancias vecinas más cercanas y la estructura de distribución espacial, con elevada precisión.

En este trabajo, la TC se aplica al análisis de una muestra de aleación de Al-Si obtenida por moldeo de arena. Es importante destacar que, durante este proceso, se genera porosidad tanto por burbujas de diferentes gases, atrapadas durante el proceso de solidificación, como por cavidades inter-dendríticas causadas durante la contracción asociada a la solidificación [6].

El estudio de como la porosidad afecta las propiedades mecánicas de las fundiciones de aluminio puede darse a partir de diferentes enfoques. Por ejemplo, analizando la porosidad volumétrica global y/o evaluando la porosidad cercana al plano de fractura. En el presente estudio, se evalúan pequeños volúmenes cercanos al plano de fractura y, además, pequeños volúmenes adyacentes a éstos. En este trabajo, la generación de la fractura fue llevada a cabo a partir de un ensayo de flexión de 3 puntos, sumando, de esta manera, la singularidad de esta sollicitación a los estudios previos llevados a cabo a partir de la sollicitación axial [7].

En los volúmenes mencionados, denominados regiones de interés (ROI), se evaluó la distribución espacial, conteo, tamaño y forma de los poros; se compararon gráficos de dispersión de parámetros de forma versus tamaño, y gráficos de conteo en función del diámetro equivalente. Además, a partir de la distribución espacial de los poros y de los diagramas de momento flector y esfuerzo de corte inherente al ensayo de flexión, fue posible evaluar la influencia de la

porosidad en las secciones transversales más exigidas por la sollicitación externa. Finalmente, este trabajo propone un procedimiento, vía tomografía, que posibilita determinar la resistencia mecánica de componentes con diferentes grados de porosidad, a partir del decrecimiento del momento de inercia ( $I_z$ ) [8] en las secciones transversales críticas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Material y ensayo de flexión

La muestra evaluada en este trabajo es de aleación de Al-Si obtenida vía fundición por moldeo de arena. La dimensión longitudinal es de 40 mm y su sección transversal (no uniforme) de ~ 8,5 x 7,5 mm. La Tabla 1 muestra su composición química, la cual fue obtenida usando un espectrómetro de chispa por emisión óptica Brucker (Q4 Tasman).

Tabla 1. Composición química de la aleación investigada

Composición química (% peso)								
Al	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Ti	Cr
Base	5,23	0,66	0,59	0,36	0,36	0,14	0,05	0,03

Dicha muestra fue ensayada a flexión de 3 puntos hasta su fractura, empleando una prensa hidráulica AMOB Group (PH4C 60T). La Figura 1 muestra una representación esquemática de dicho ensayo. La carga de rotura resultó ser  $P = 784$  N. Cabe destacar que, la flexión de 3 puntos genera tanto momento flector ( $M$ ) como esfuerzo de corte ( $Q$ ) [8] en las secciones transversales de la muestra entre ambas cargas  $P/2$ .  $M$ , a su vez, genera compresión en la mitad superior de la muestra y tracción en la mitad inferior. Por lo tanto, la tensión normal que produce la fractura de la muestra será compresiva si la misma ocurre en la mitad superior, o bien de tracción, si ocurre en la mitad inferior. Por otra parte,  $Q$  representa la tendencia al deslizamiento vertical relativo entre secciones transversales próximas. Cabe destacar que las tensiones asociadas a  $Q$  son tensiones de corte [8].

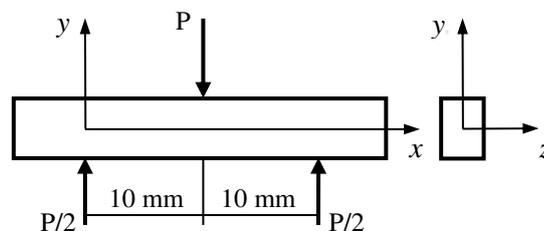


Figura 1: Representación simplificada del ensayo de flexión por 3 puntos



La Figura 2 muestra como varía  $M$  para las secciones transversales ubicadas entre ambas cargas  $P/2$ . La variación es simétrica con respecto a la sección transversal donde se aplica la carga  $P$ . Los valores para las secciones transversales asociadas a las cargas  $P/2$  son nulos. Por otra parte, la Figura 3 muestra como se distribuye  $Q$  para las diferentes secciones transversales. En este caso,  $Q$  toma valores constantes para ambas mitades de la muestra. El cambio de signo de  $Q$  provocará el cambio de signo de las tensiones de corte asociadas a  $Q$ . Es importante destacar que, debido a que estas tensiones son de muy bajo valor, la falla de la muestra será generada por tensiones normales asociadas a  $M$  [8].

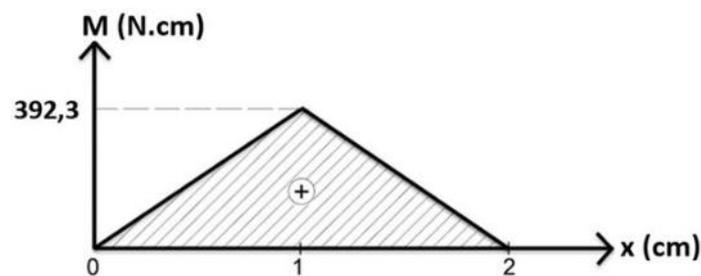


Figura 2: Distribución de momento flector

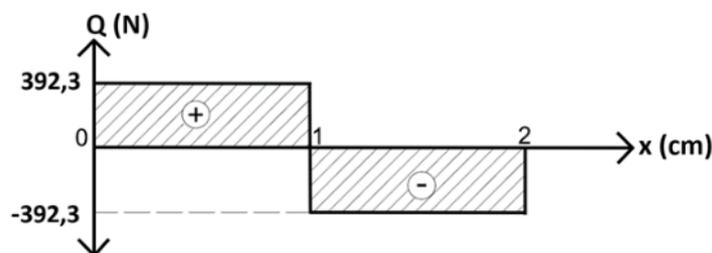


Figura 3: Distribución de esfuerzo de corte

## 2.2. Parámetros de tomografía y generación de ROIs

Las imágenes de la muestra se obtuvieron empleando un tomógrafo General Electric (Phoenix V |tome| x S 240), usando un voltaje de aceleración de 85 kV y una corriente de filamento de 60  $\mu$ A. Por otro lado, los parámetros de resolución, magnificación y punto focal fueron 20,6  $\mu$ m/vóxel, 9,7x y 5,1  $\mu$ m, respectivamente; con un total de 1000 proyecciones, 3 fotogramas promediados por cada proyección, y un tiempo de escaneo de aproximadamente 1 h. Cabe destacar que, antes de tomografiar la muestra, se llevó a cabo un ajuste dimensional empleando un patrón de distancias del tipo *ball bar* [9,10].

Luego del proceso de tomografiado, reconstrucción y generación del modelo 3D, se llevó a cabo el pos-procesamiento de dicho modelo a fin de generar diferentes ROIs, a partir de las cuales fue posible evaluar la morfología y distribución espacial de los poros. Dicho pos-procesamiento, llevado a cabo usando el software VGSTUDIO MAX 3.0 [11], permitió realizar un estudio exhaustivo de las condiciones de la muestra en las cercanías de la fractura, a fin de establecer una correlación entre los datos de porosidad y la misma.

Las ROIs evaluadas fueron 6 en total, 3 de cada lado de la fractura. La Figura 4 muestra la identificación y espesor de cada ROI. Como muestra esta figura, las ROIs 1A y 1B contienen a las superficies de fractura.

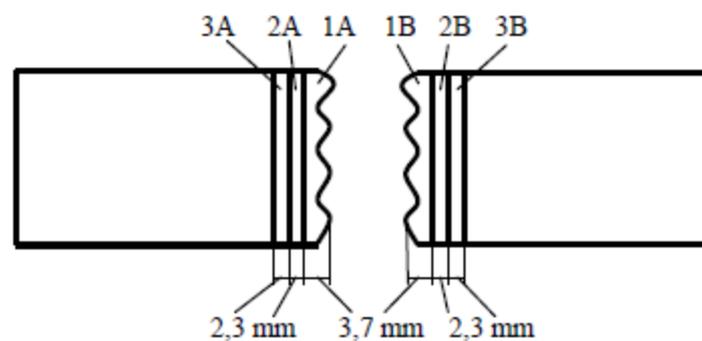


Figura 4: Identificación y espesor de las ROIs

El análisis del tamaño, forma y distribución de los poros en cada ROI se basó en dos parámetros: diámetro equivalente (D) y compacidad (C). D es el diámetro de una esfera que circunscribe al poro. En cuanto a C, esta se define como la relación entre el volumen del poro (V) y el volumen de la esfera circunscripta en dicho poro (V<sub>s</sub>), como se presenta en la Ecuación (1) [12]

$$C = \frac{V}{V_s} \quad (1)$$

Si consideramos el tamaño de los poros en función de D, es posible definir tres subpoblaciones para cada ROI: S1, S2 y S3, asociadas a poros pequeños, medianos y grandes, respectivamente. Las Tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 muestran los valores asociados a cada ROI.

Tabla 2. Subpoblaciones en ROI 1A

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
S1	0-1	0-0,4	64	26	249
S2	0-1	0,4-0,6	128	51	
S3	0-1	0,6-1,4	57	23	



Tabla 3. Subpoblaciones en ROI 1B

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
S1	0-1	0-0,4	14	9	159
S2	0-1	0,4-0,6	98	61	
S3	0-1	0,6-1,4	47	30	

Tabla 4: Subpoblaciones en ROI 2A

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
1	0-1	0-0,4	43	25	175
2	0-1	0,4-0,6	99	56	
3	0-1	0,6-1,4	33	19	

Tabla 5: Subpoblaciones en ROI 2B

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
1	0-1	0-0,4	18	11	157
2	0-1	0,4-0,6	111	71	
3	0-1	0,6-1,4	28	18	

Tabla 6: Subpoblaciones en ROI 3A

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
1	0-1	0-0,4	45	25	177
2	0-1	0,4-0,6	85	48	
3	0-1	0,6-1,4	47	27	

Tabla 7: Subpoblaciones en ROI 3B

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
1	0-1	0-0,4	32	17	189
2	0-1	0,4-0,6	113	60	
3	0-1	0,6-1,4	44	23	

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis cuantitativo de porosidad

La Figura 5 muestra gráficos de dispersión de poros, donde se evalúa C (forma) en función de D (tamaño). Esta figura muestra que, para las ROIs evaluadas, la mayoría de los poros son de compacidad media (0,3-0,6) y de tamaño medio (0,4-0,6 mm de diámetro).

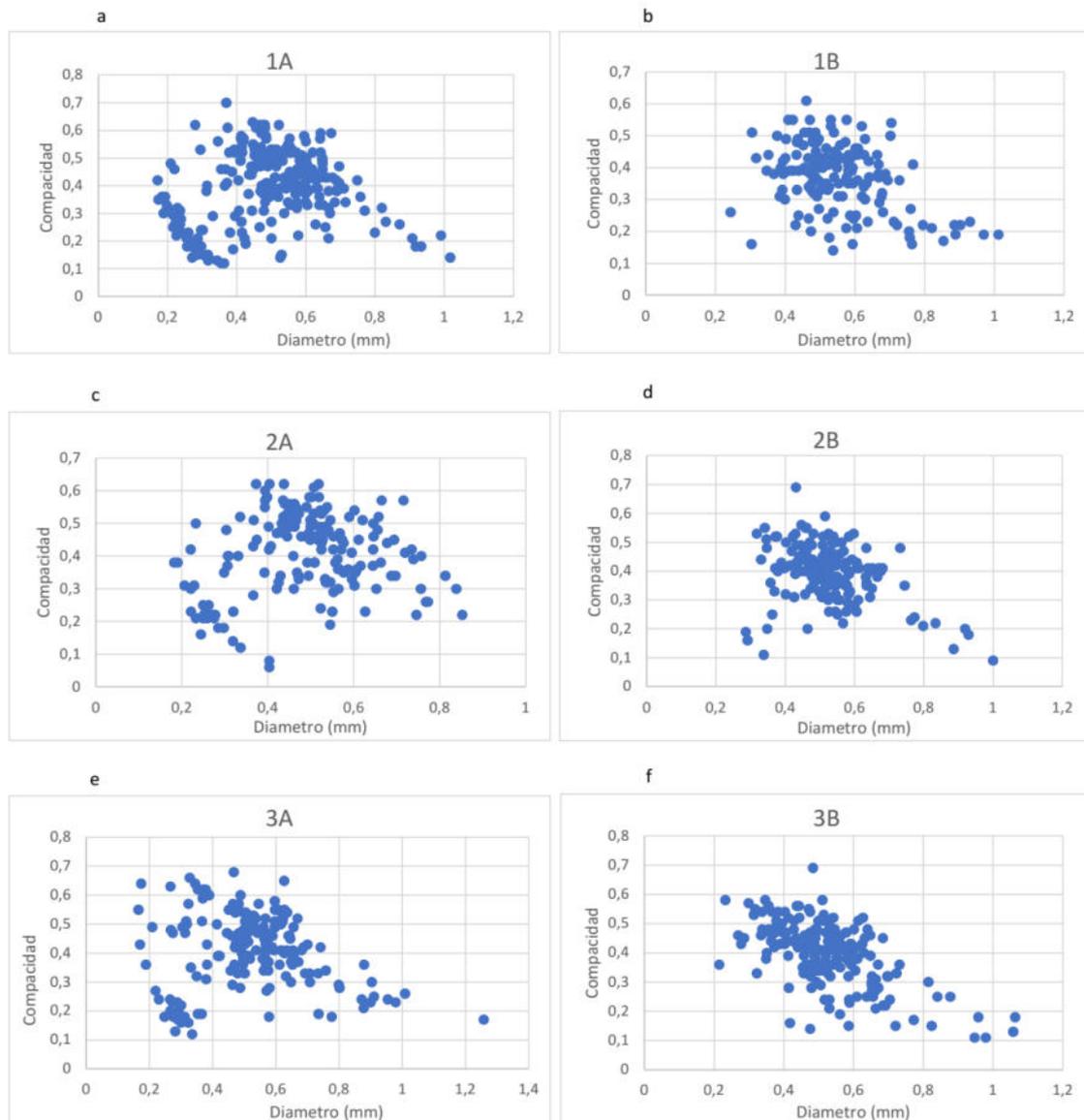


Figura 5: Distribución de compacidad vs diámetro en las diferentes ROIs

Con respecto a los poros pequeños, se detectó una asimetría al comparar el volumen A (Figuras 5a, c y e) con el B (Figuras 5b, d y f). Las ROIs del volumen A muestran mayor concentración y conteo de poros pequeños con relación a las del volumen B. La diferencia de conteo es máxima en las zonas cercanas a la superficies de fractura (ROIs 1A y 1B). Además, la población de poros pequeños aumenta, en el volumen B, con la distancia al plano de fractura.

En cuanto a los poros grandes, la mayoría de los mismos se encuentran en el rango de 0,6 a 0,8 mm, siendo una población muy pequeña la asociada a poros con valores mayores a dicho rango,



y prácticamente nula aquella que sobrepasa el valor de 1 mm. El comportamiento es similar para las ROIs que corresponden a ambos volúmenes (A y B).

Es importante notar que, la ROI 1A, adyacente a la superficie de fractura, contiene el mayor número de poros (249). La diferencia con el resto de las ROIs es relevante ya que la misma se halla en el rango de 60-90 poros (el conteo de estas ROIs se halla en el rango de 157-189 poros). La diferencia mencionada estaría asociada a la población de poros pequeños, la cual es elevada en ROI 1A.

Este análisis se confirma a partir de la Figura 6, la cual muestra, para cada ROI, el conteo en función de D. Esta figura muestra la diferencia de conteo para poros pequeños entre las ROIs del volumen A y las del B. El comportamiento para los poros de mayor tamaño es similar en ambos volúmenes.

### 3.2. Correlación entre porosidad y fractura

Para llevar a cabo una evaluación que posibilite explicar el plano donde se produce la fractura, es necesario analizar la porosidad cercana a la misma. La ROI 1A, de elevado conteo, incluye al plano de fractura, el cual sería atravesado por un número elevado de poros.

Ocurre que, en un plano (sección transversal de la muestra) que contenga gran cantidad de poros que lo atraviesen, su  $I_z$  disminuirá sensiblemente. Es importante notar que  $I_z$  representa la rigidez de la forma de dicha sección transversal [13]. La Ecuación (2) muestra la influencia del  $I_z$  en cuanto a la generación de tensiones normales asociadas a  $M$  [14]

$$\sigma_x = -\frac{M \cdot y}{I_z} \quad (2)$$

En esta expresión,  $y$  es la ordenada del punto a evaluar con respecto al eje  $z$  de la sección transversal, el cual es baricéntrico (ver Figura 1). Por lo tanto, despreciando las tensiones de corte por ser de muy bajo valor, la fractura siempre iniciará en la zona más alejada del eje  $z$ , necesariamente en el borde superior o inferior de la sección transversal. Por lo tanto, interesa en particular, la porosidad cercana a dichos bordes para la estimación del valor máximo que alcanza  $\sigma_x$ . En cuanto al plano de fractura, será aquel más afectado por la combinación de  $M$  elevado e  $I_z$  bajo, como es posible deducir de la Ecuación (2). El plano más afectado será entonces aquel cuyo  $M$  sea elevado y, además, cuya porosidad más alejada al eje  $z$  sea máxima, ya que, para tal caso,  $I_z$  disminuirá una cantidad elevada, como es posible deducir a partir de su expresión [8]

$$I_z = \int_A y^2 \cdot dA \quad (3)$$

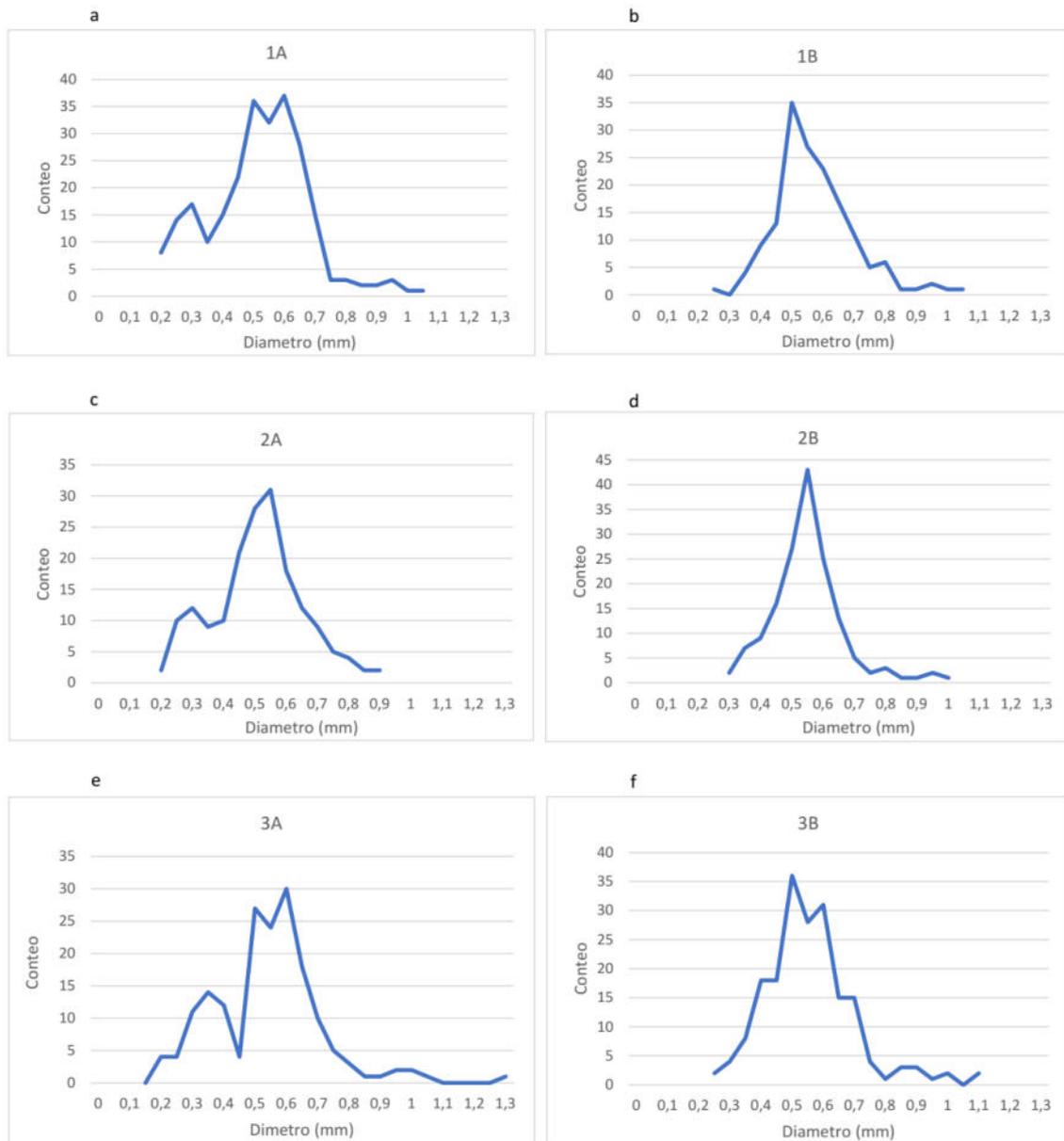


Figura 6: Conteo en función del diámetro de poro para las diferentes ROIs

Cabe mencionar que, como muestra la Figura 2,  $M$  disminuye linealmente a partir del plano de aplicación de la carga  $P$ , donde el mismo es máximo. En cambio, la modificación de  $I_z$  a lo largo de la muestra es más compleja, ya que depende de la cantidad, tamaño y ubicación de los poros.

A partir de la distribución, tamaño, forma y posición precisa de los poros con respecto a un sistema de ejes coordenados, lo cual puede llevarse a cabo empleando el software de procesamiento de la presente técnica, sería posible estimar la variación de  $I_z$  con respecto al eje

$x$ , y como consecuencia, conocer los valores de  $\sigma_x$  generados en las secciones transversales críticas.

La Figura 7 muestra la distribución espacial de los poros en las ROIs evaluadas. La ROI 1A muestra que la porosidad se halla muy concentrada en la zona cercana al plano de fractura. En particular, hay una singular concentración de poros en el borde superior, lo cual genera una elevada disminución en el  $I_z$ . Es altamente probable que la falla haya iniciado en dicho borde superior, donde la densidad de poros es elevada, en particular, de poros pequeños. La ROI 1B indicaría, debido a que contiene menor porosidad, que la falla estaría ocurriendo en un plano límite, de transición, donde de un lado hay elevada densidad de poros (ROI 1A) y del otro, baja densidad (ROI 1B), en especial en los bordes.

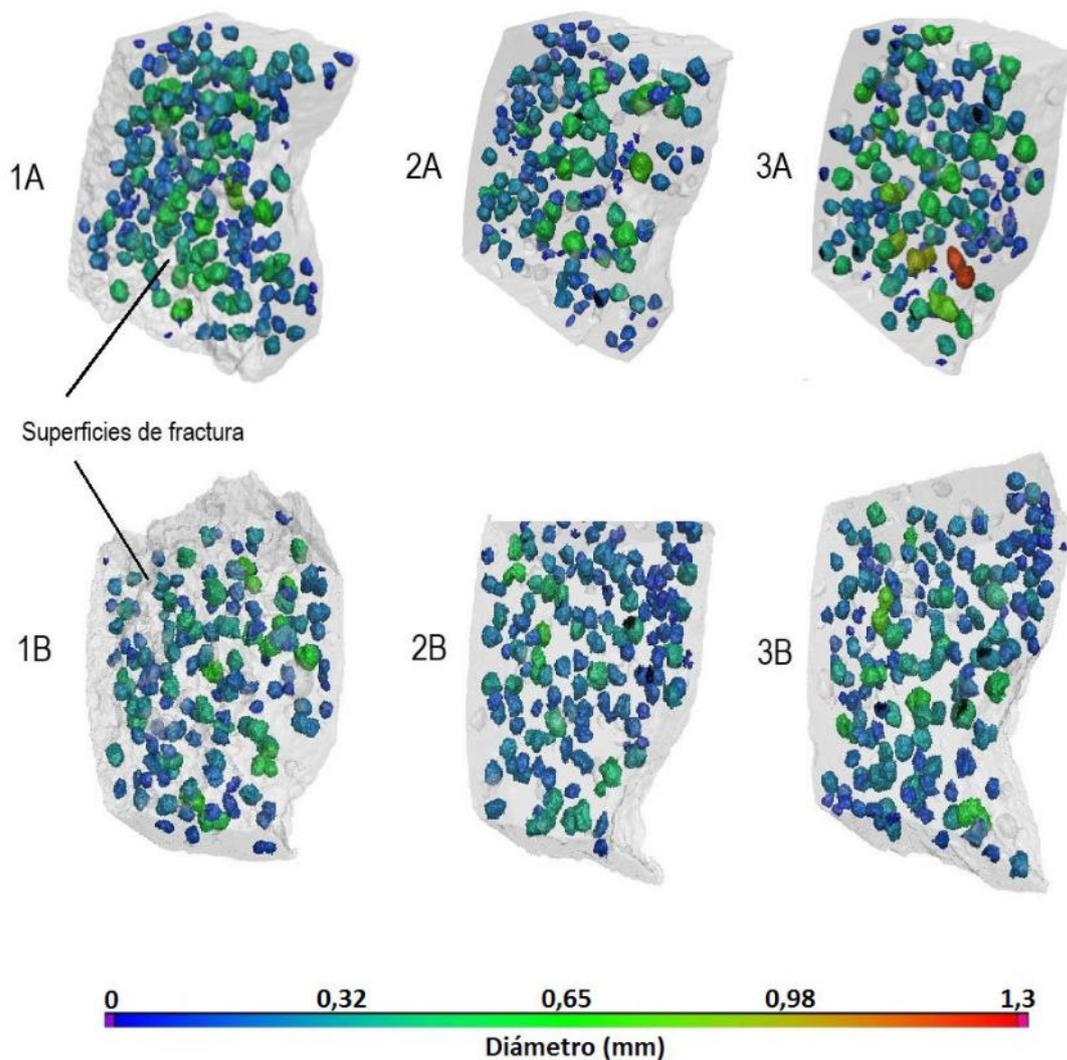


Figura 7: Distribución de porosidad en cada ROI



#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se utiliza TC para evaluar la porosidad cercana a la fractura, en una muestra de fundición de Al-Si solicitada a flexión de 3 puntos. El software de pos-procesamiento empleado posibilitó la segmentación del volumen evaluado en 6 ROIs, 2 de las cuales contienen a las superficies de fractura. Los resultados obtenidos muestran en la mayoría de los poros, de cada ROI evaluada, valores medios de compacidad (rango de 0,3-0,6), y también, valores medios de tamaño (0,4-0,6 mm de diámetro). Por otra parte, en las ROIs asociadas a las superficies de fractura, es posible advertir marcadas asimetrías en cuanto al conteo general de poros, al conteo de poros de diámetro pequeño y, además, a su distribución espacial. Estos resultados posibilitaron evaluar la fractura, la cual ocurriría en un plano de transición entre una zona de alta densidad de poros y otra de menor densidad, necesariamente en un plano donde la porosidad, sobre todo la cercana a los bordes, hace mínimo al  $I_z$ . Por otra parte, la fractura iniciaría en el borde superior de dicho plano, donde  $\sigma_x$  es máximo.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos es posible advertir la gran utilidad de la técnica propuesta para examinar cuantitativamente la porosidad cercana a superficies de fractura, lo cual podría llevarse a cabo en cualquier tipo de material poroso.

Como trabajo futuro, se plantea el desarrollo de una rutina que posibilite, a partir de datos de TC, la obtención del  $I_z$  para secciones trasversales críticas, lo cual a su vez permitirá obtener la resistencia mecánica en piezas fracturadas y, además, los valores de  $\sigma_x$  asociados a la sollicitación externa, para piezas no fracturadas.

#### REFERENCIAS

- [1] Hanke R., Fuchs T., Salamon M., Zabler S. *X-ray microtomography for materials characterization*. In: Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods, Eds.: Hübschen G., Altpeter I., Tschuncky R., Herrmann H., 45-79, 2016.
- [2] Maire E., Withers P.J. *Quantitative X-ray tomography*. Int. Mater. Rev., 59, 1-43, 2014.
- [3] Rueckel J., Stockmar M., Pfeiffer F., Herzen J. *Spatial resolution characterization of an X-ray microCT system*. Appl. Radiat. Isot., 94, 230-234, 2014.
- [4] Glazoff M.V., Khvan A., Zolotarevsky V.S., Belov N.A., Dinsdale A. *Casting Aluminum Alloys: Their Physical and Mechanical Metallurgy, 2<sup>nd</sup> edition*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2018.
- [5] Mathew J., Williams M.A., Srirangam P. *X-ray computed tomography studies on porosity distribution in vacuum induction cast Al-7Si alloys*. JOM, 73, 3866-3872, 2021.
- [6] Osmond P., Le V.D., Morel F., Bellett D., Saintier N. *Effect of porosity on the fatigue strength of cast aluminium alloys: from the specimen to the structure*. Proc. Eng., 213, 630-643, 2018.



- [7] Cuyás J.C., Mugica G. W., Tovio D. O., Gonzales A. C. *Relación entre porosidad y propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio de moldeo. Estado del conocimiento*. Rev. Metal. Madrid, 38, 139–149, 2002.
- [8] Gere J.M., Goodno B.J. *Mechanics of Materials*. Cengage Learning, Toronto, 2009.
- [9] Zwanenburg E.A., Williams M.A., Warnett J.M. *Performance testing of dimensional X-ray computed tomography systems*. Precision Eng., 77, 179-193, 2022.
- [10] Hiller J., Maisl M., Reindl L.M. *Physical characterization and performance evaluation of an x-ray micro-computed tomography system for dimensional metrology applications*. Meas. Sci. Technol., 23, 1-18, 2012.
- [11] Volume graphics. Disponible en: <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio-max.html>. Se accedió el 6 de junio de 2023.
- [12] Díaz F.V., Peralta M.E., Fernandino D.O. *Study of sphericity and compactness parameters in spheroidal graphite iron using X-ray micro-computed tomography and image processing*. J. Nondestruct. Eval., 40, 1-10, 2021.
- [13] Hibbeler R. *Engineering Mechanics: Statics, 14<sup>th</sup> Edition*. Pearson, London, 2015.
- [14] Hibbeler R. *Mechanics of Materials*. Pearson, London, 2016.



## EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE TRASLACIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTES DE ACERO ESTRUCTURAL OBTENIDOS POR MANUFACTURA ADITIVA POR ARCO ELECTRICO CON ALAMBRE (WAAM)

Alejandro O. Miranda <sup>1</sup>, Hernan G. Svoboda <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> GTSyCM3, INTECIN - Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Las Heras 2214,  
(C1127AAR) CABA, Argentina - [amiranda@fi.uba.ar](mailto:amiranda@fi.uba.ar)

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Godoy Cruz 2290,  
Ciudad de Buenos Aires, Argentina- [hsvobod@fi.uba.ar](mailto:hsvobod@fi.uba.ar)

### RESUMEN

La manufactura aditiva en metales (MAM) es una novedosa tecnología emergente que está impactando fuertemente en el diseño y fabricación de componentes estructurales, en los cuales las propiedades mecánicas son el aspecto controlante. Dichas propiedades quedarán definidas por el nivel de defectos, la evolución microestructural y eventualmente otras características como las tensiones residuales.

La tecnología de MAM conocida como Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) utiliza como fuente de calor un arco eléctrico para depositar material en forma controlada a través del uso de un manipulador, con una trayectoria predefinida, permitiendo obtener componentes de tamaño casi ilimitado, con una alta tasa de deposición y bajo nivel de defectos. Como limitaciones se tiene una relativamente baja resolución dimensional y complejidad geométrica. En este sentido, la estabilidad dimensional de las capas de material depositado, así como los espesores de pared están definidos por parámetros de proceso como velocidad de alimentación del alambre, velocidad de traslación, modo operativo, entre otros. El objetivo del presente trabajo fue analizar el efecto de la velocidad de traslación en un proceso WAAM sobre la estabilidad dimensional, el nivel de defectos, la microestructura y propiedades mecánicas de paredes de acero estructural.

A este fin se obtuvieron probetas empleando el proceso Gas Metal Arc Welding Pulsed (GMAW-Pulsado) con un alambre del tipo ER-70S6 de 1,2 mm de diámetro variando la velocidad de traslación entre 142 y 333 mm/min. Sobre las mismas se realizó una inspección visual y sobre cortes transversales se analizaron la estabilidad dimensional, nivel de defectos, microestructura y perfiles de microdureza.

No se detectaron defectos superficiales ni internos macroscópicos. Se determinaron parámetros de deposición adecuados y velocidades límite para el procedimiento empleado. Se observó una estructura ferrítica con carburos, típica de este tipo de depósitos uniforme a lo largo de toda la probeta. La microdureza se mantuvo relativamente uniforme en la altura promediando los 154HV aumentando en la última capa a un promedio de 177 HV debido a que la misma no fue recalentada por capas posteriores.

La técnica de WAAM para acero estructural presentó excelentes resultados en cuanto estabilidad dimensional y a propiedades mecánicas, las cuales fueron uniformes en el componente, trabajando con niveles de 50 in/min de alimentación de alambre, y hasta 250 mm/min como velocidad de soldadura.

**Palabras Clave:** *Manufactura Aditiva, WAAM, Acero Estructural, Propiedades Mecánicas.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva (AM) es una tecnología que ha revolucionado los procesos de fabricación en los últimos 20 años. Para el caso de materiales poliméricos ya es una tecnología madura, mientras que en el caso de su aplicación a materiales metálicos es aún un área de fuerte desarrollo. En este sentido, técnicas como Selective Laser Melting (SLM) o Electron Beam Melting (EBM) han sido las más estudiadas. Métodos de Deposición por Energía Directa (DED), entre los que se emplean fuentes de calor como el Láser o un arco eléctrico para la fusión de polvos o alambres son de más reciente desarrollo, apuntando a componentes de mayor tamaño [1].

En los últimos años la manufactura aditiva por arco eléctrico con alambre (WAAM) ha cobrado una gran relevancia en distintas ramas de la industria debido al enorme potencial que presenta como tecnología de fabricación digital [1]. Esta tecnología permite fabricar componentes de gran tamaño, con una alta tasa de deposición, bajo costo de equipamiento, permitiendo el uso de diversos tipos de aleaciones metálicas. Comparada con tecnologías tradicionales de manufactura sustractiva, el proceso de WAAM permite reducir los tiempos de fabricación entre un 40 y 60% y los tiempos de post procesado en un 15-20% dependiendo del tamaño de la pieza a fabricar [1;2].

El proceso WAAM tiene la ventaja de poder llevarse a cabo mediante fuentes de soldadura semiautomática (GMAW/FCAW) o soldadura GTAW, con el movimiento de la torcha mecanizado mediante manipuladores mecanizados o robotizados, sin requerir de equipos específicos, como si son necesarios en otras técnicas de AM. Este hecho, junto con el aumento global del uso de robots y otros manipuladores, hacen que este proceso de fabricación tenga un gran potencial. Uno de los mayores desafíos radica en la especificación de la gran cantidad de variables del sistema, de forma de tal de poder obtener componentes de calidad. Es por este motivo que el estudio de la influencia de estas variables de proceso sobre las propiedades finales del componente impreso resulta de gran interés ya que las mismas no solo tienen efectos en la geometría de la pieza sino también en las propiedades mecánicas del componente [3].

El objetivo del presente trabajo fue analizar el efecto de la velocidad de traslación en el proceso de manufactura aditiva WAAM, empleando GMAW-Pulsado, sobre la estabilidad dimensional, nivel de defectos, microestructura y propiedades mecánicas de paredes de acero estructural.



## 2. METODOLOGIA

A fin de alcanzar el objetivo propuestos se imprimieron probetas de acero estructural con distintas velocidades de traslación, empleando el proceso GMAW-Pulsado, sobre una placa de acero al carbono de 150 X 50 x 6 mm, montada sobre una base metálica enfriada por agua. Se utilizó una fuente multipropósito (Lincoln Power Wave 350) con módulo de procesos avanzados, desde la cual se realizó la adquisición de los parámetros de proceso. Para la manipulación de la torcha se utilizó un router CNC StarCam 6090. En la Figura 1 se muestra el montaje experimental empleado.

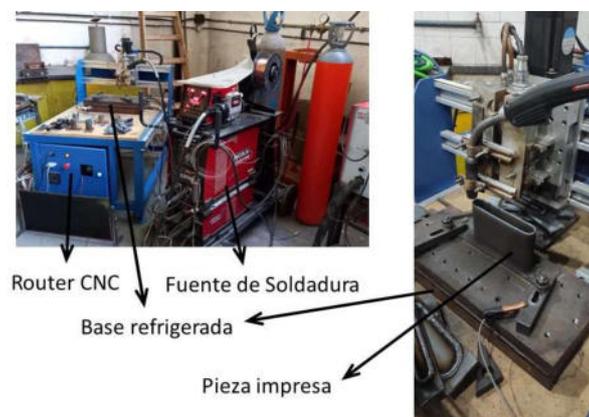


Figura 1: Montaje experimental empleado

La geometría de las probetas impresas consta de dos tramos rectos de 80 mm de longitud, cerrados a través de dos medias circunferencias de 15 mm de radio (Figura 2). De esta manera se obtienen 2 paredes planas de 80 mm x 20-30 mm las cuales fueron utilizadas para la caracterización realizada. En el punto “A” se inicia la trayectoria y se enciende el arco eléctrico, con una altura de pico-pieza de 15 mm, se sigue la trayectoria por la media circunferencia hasta llegar al punto “B”, desde este punto se aumenta la altura progresivamente hasta llegar al punto “C”, punto al que se llega con una altura 1,6 mm mayor a la que se tenía en el punto “B”, y esta altura se mantiene hasta cerrar la trayectoria en el punto “A”. Esto se repite en forma continua hasta completar 18 ciclos llegando a una altura de 28.8 mm.

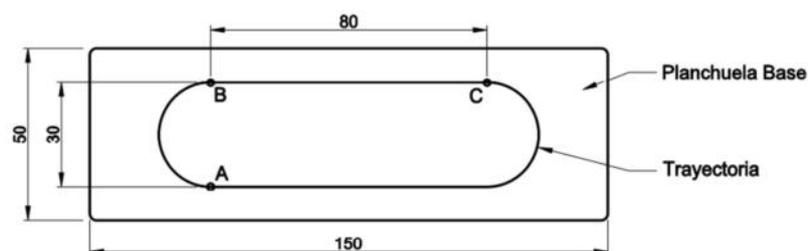


Figura 2: Vista superior, planchuela base y trayectoria



En cuanto a los parámetros de soldadura, se utilizó el modo GMAW-pulsado, con alambre ER70S6 de 1,2 mm de diámetro. Como gas de protección se utilizó una mezcla Ar-20%CO<sub>2</sub>, con un caudal de 12 lts/min. La probeta se inicia con una velocidad de alambre de 100 in/min, velocidad que se mantiene durante la primera capa, en la segunda capa se reduce a 75 in/min, y a partir de la tercera capa en la que se utiliza 50 in/min hasta finalizar la probeta. De esta forma se obtuvieron 9 probetas manteniendo los parámetros de la fuente de soldadura y variando la velocidad de traslación, según indica la Tabla 1. Asimismo, se indica el tiempo total de impresión en cada caso.

Tabla 1. Probetas Obtenidas

Probeta	Velocidad (mm/min)	Tiempo (min)
1	142	30,10
2	154	27,75
3	166	25,75
4	181	23,62
5	200	21,40
6	222	19,23
7	250	17,11
8	285	15,0
9	333	12,83

Inicialmente se realizó una inspección visual de las probetas impresas. Posteriormente, de cada una de ellas se extrajo un corte transversal de la zona de la pared recta (Figura 3b), el cual se preparó para observación metalográfica. El mismo se incluyó, desbastó y pulió, finalmente se atacó con Nital 2% para revelar la estructura. Se realizó un análisis macrográfico empleando una lupa estereoscópica, a partir del cual se evaluó la presencia de defectos y un análisis dimensional. Finalmente, se realizó una caracterización microestructural a fin de analizar las fases presentes y se determinaron los perfiles de microdureza Vickers (HV0,5kg) a lo largo de la altura de la probeta sobre la línea media del espesor.

### 3. RESULTADOS

En la Figura 3a se pueden observar las probetas generadas. En la Figura 3b se observa la extracción de cortes transversales y en la Figura 3c y d se muestran vistas superior y lateral de una de las probetas impresas (200 mm/min).

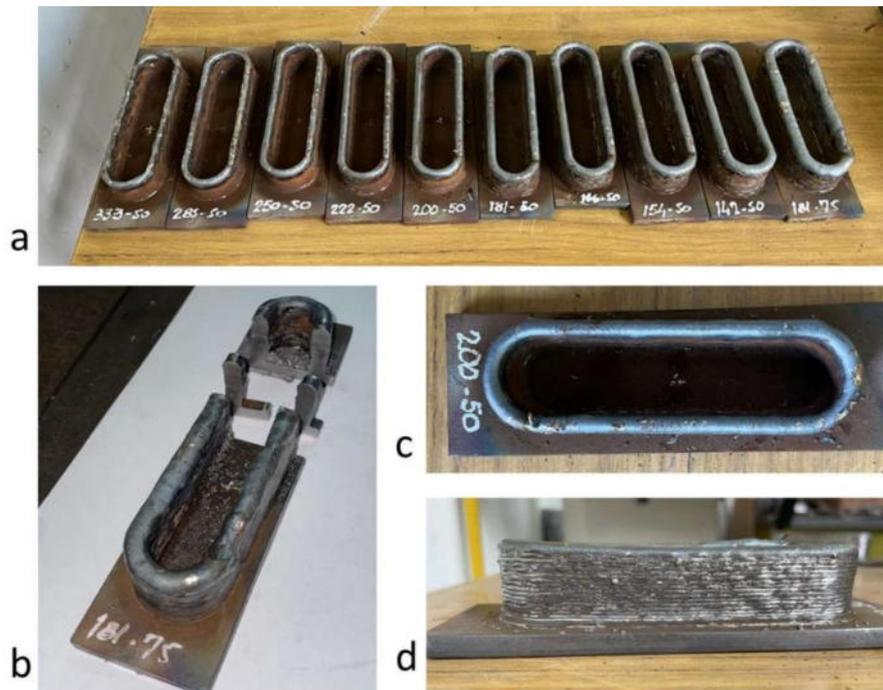


Figura 3: a, muestras impresas; b, Probeta cortada para extracción de muestra; c y d, Vista superior y lateral de una de las probetas generadas (200 mm/min)

Durante la soldadura de las probetas no se observó un cambio significativo de los valores de corriente (41-43 A) y tensión (19,8-19,9 V) promedios para todas las probetas. En la Figura 4 se pueden observar las señales de corriente y tensión adquiridas durante la soldadura en modo pulsado.

Puede verse que los valores de tensión de base oscilan entre 17,5 y 18,9 V, mientras que la tensión de pico alcanza valores de 35,6 V. En cuanto a la corriente, se observan valores de corriente de base de 17,2 A, y corriente de pico de 400 A aprox. Asimismo, pueden observarse detalles de la forma de los pulsos de tensión y corriente.

En la Figura 5 se observa una vista lateral de cada una de las probetas obtenidas. En general se obtuvieron buenos resultados en cuanto al aspecto superficial, las probetas impresas a 285 y 333 mm/min, mostraron ciertas irregularidades en el espesor, debido a la inestabilidad del proceso a estas velocidades. Esta observación define que la estabilidad dimensional para este procedimiento se mantiene hasta 250 mm/min, siendo esta la velocidad límite.

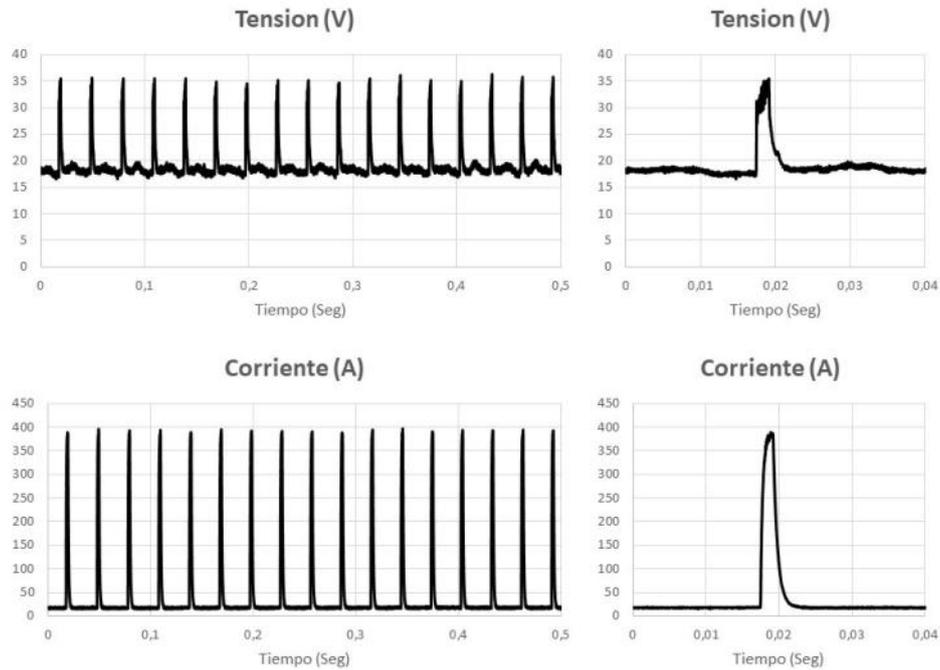


Figura 4: Señales de tensión y corriente durante la soldadura.

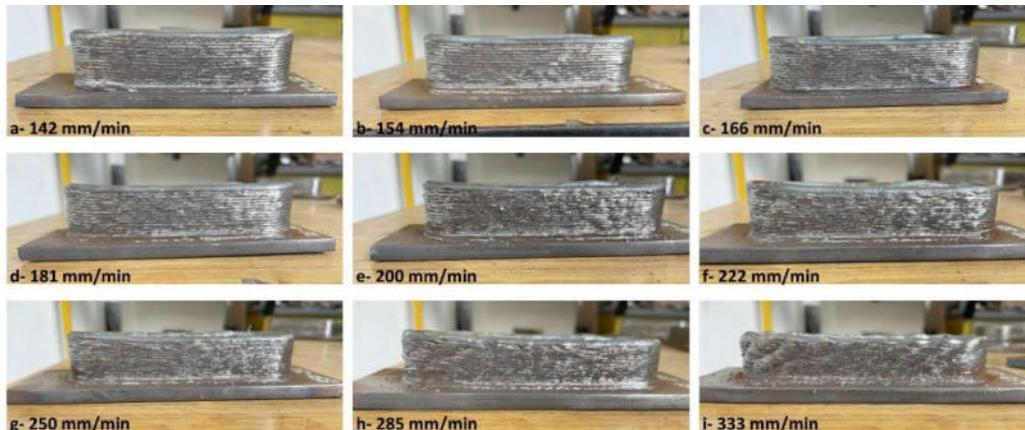


Figura 5: Vista lateral de las probetas obtenidas.

En la Figura 6 se observan las macrografías de las paredes obtenidas. Puede verse un ensanchamiento de la pared en la zona inferior de la misma, lo cual se debe a la mayor velocidad de alambre seteadada en los dos primeros cordones, a partir de esta zona se observan paredes estables de espesor uniforme, salvo la pared correspondiente a 333 mm/min de velocidad de soldadura, donde se observa una inestabilidad geométrica, ya que el espesor varía en función a la altura de la probeta, si bien este efecto también se detectó en menor medida en la probeta impresa a 285 mm/min, esto no se observó en el corte realizado.

En ningún caso se observaron defectos como falta de fusión, porosidad u otros defectos macroscópicos.

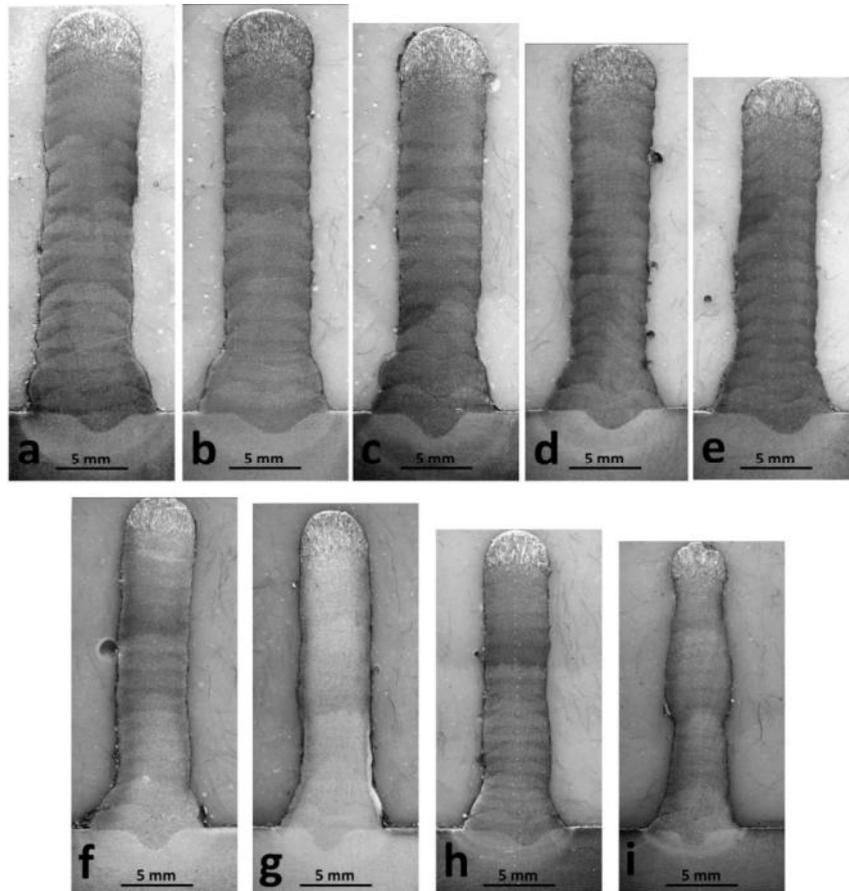


Figura 6: Macrografías de las paredes obtenidas: a, 142 mm/min; b, 154 mm/min; c, 166 mm/min; d, 181 mm/min; e, 200 mm/min; f, 222 mm/min; g, 250 mm/min; h, 285 mm/min; i, 333 mm/min.

Sobre las macrografías presentadas se relevaron los perfiles de espesor en función de la altura de la probeta, determinándose los espesores máximos y mínimos que se obtuvieron en la pared (descartando la zona inferior correspondiente a los primeros dos cordones). Los resultados se muestran en la Figura 7. Se observa que tanto el espesor máximo como mínimo tienden a disminuir a medida que aumenta la velocidad de soldadura. En la Figura 8 se observa que la diferencia entre los espesores máximos y mínimos, se mantienen entre 0,43 y 0,91 mm, mientras que para la probeta a 333 mm/min esta diferencia es de 1,6 mm, efecto que se podía observar a simple vista en la probeta. A su vez, los espesores que pueden obtenerse en forma estable empleando el presente procedimiento se encuentran entre 4,5-5 mm y 6-6,5 mm. Estos aspectos son de relevancia a la hora de diseñar elementos estructurales y posibilidades de fabricación.

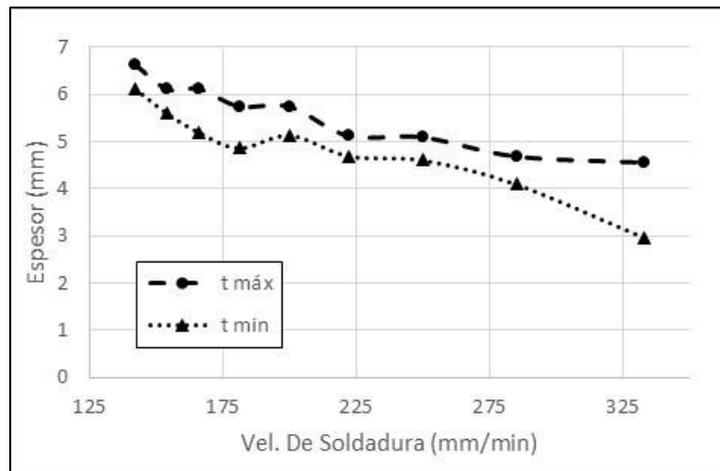


Figura 7: Espesor máximo y mínimo vs velocidad de soldadura

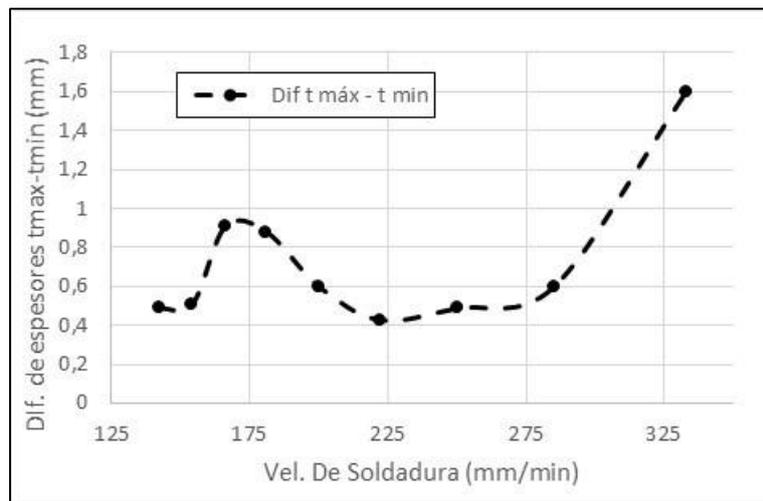


Figura 8: Diferencia entre espesor máximo y mínimo vs velocidad de soldadura

Por otro lado, para cada una de las probetas obtenidas se midió la altura de la misma, mostrando los resultados obtenidos en la Figura 9. Puede verse una reducción lineal del alto de la pared con el aumento de la velocidad de traslación. En este sentido, dado que el desplazamiento vertical nominal de la torcha fue de 28,8 mm, puede verse que para las velocidades más bajas la altura de la probeta se encuentra cercana a este valor. Sin embargo, para las mayores velocidades la altura final es significativamente menor (20 mm aprox.). Esta observación es consistente con que, dado que la velocidad de alimentación del alambre es constante, al aumentar la velocidad de traslación el tiempo requerido para completar la cantidad de capas establecida es menor, por lo que la cantidad de material aportado total disminuye.

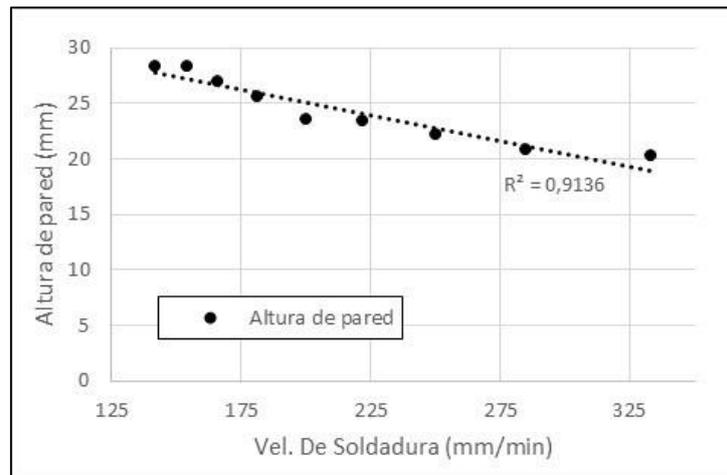


Figura 9: Altura de la pared vs velocidad de soldadura

Así, a partir de las macrográficas mostradas en la Figura 6, se graficó el contorno de la pared, y a partir de esto se midió el área de la misma (Figura 10). Esta área es proporcional al volumen de material aportado para cada caso. Estos resultados se muestran en la Figura 11.

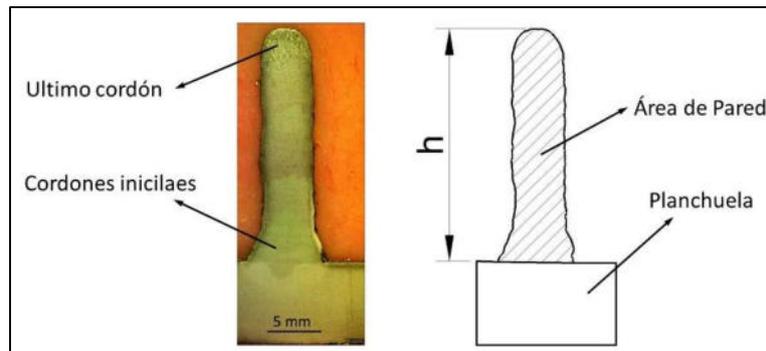


Figura 10: Esquema medición de área de la pared.

Puede verse que el área disminuye en un factor 2,35 igual al factor que aumenta la velocidad en el rango analizado ( $333/142=2,34$ ). Esta información es relevante para la estimación y predicción de secciones (altura y espesor) esperadas para los distintos parámetros de impresión empleados.

En la Figura 12 se muestran los perfiles de las probetas realizadas con la máxima y mínima velocidad (142 y 333 mm/min).

En la Figura 13 se presentan los valores de dureza promedio y máximos medidos en función de la velocidad de las distintas probetas analizadas. Se observa que los valores de microdureza se mantienen sensiblemente estables en torno a los 155 HV.

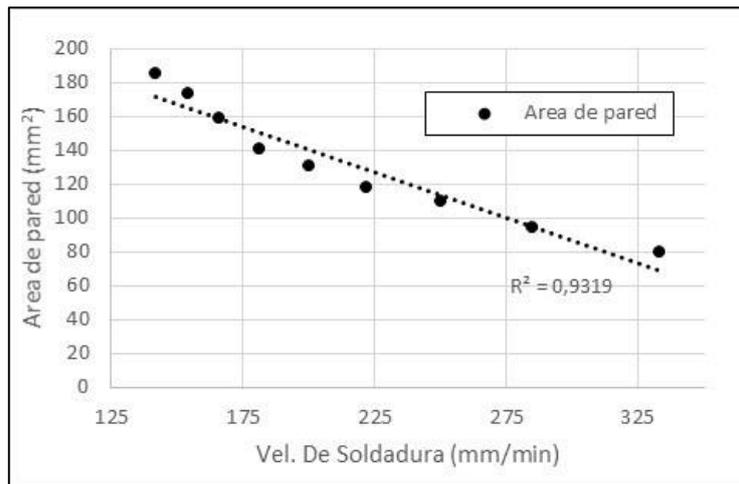


Figura 11: Área de la pared vs velocidad de soldadura

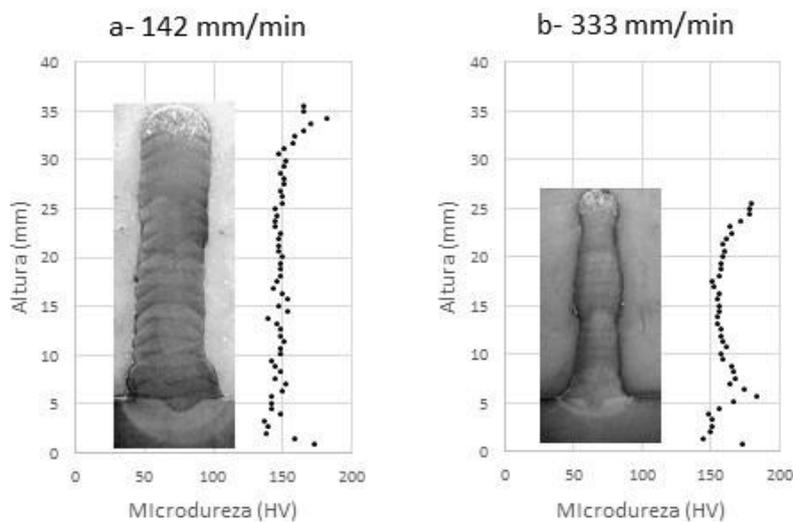


Figura 12: Perfiles de microdureza sobre probetas realizadas a 142 y 333 mm/min

Se ve también un leve incremento de la dureza promedio con la velocidad, asociada a una mayor velocidad de enfriamiento y un menor recalentamiento. En relación al valor de dureza máxima, alcanzada en general en el último cordón que no sufre el recalentamiento de los siguientes cordones, se encuentra en torno a los 180 HV.

En cuanto a la macroestructura, para todas las condiciones estudiadas se observaron las distintas capas, donde se detectan la zona afectada por el calor (ZAC) de cada cordón, sin observarse la zona columnar, que ha sido refundida por los cordones sucesivos.

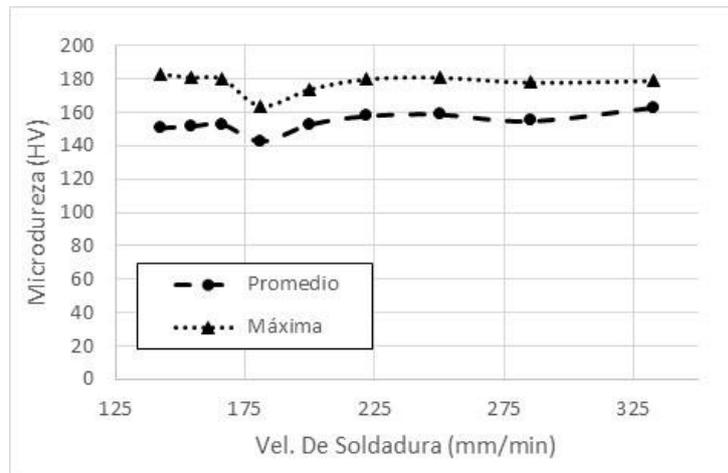


Figura 13: Valores promedio y máximo de microdureza vs velocidad de soldadura

Esta ZAC sustancialmente uniforme a lo largo de la altura de la probeta, presenta una microestructura de granos equiaxiales (recristalizados) con tamaño de grano variable (zona de grano fino y zona de grano grueso). El último cordón, debido a que no experimenta recalentamiento, presenta una microestructura de granos columnares. La geometría de este último cordón representa la forma de cada uno de los cordones anteriores. En la Figura 14 se observan micrografías representativas de las distintas zonas de las probetas obtenidas, cordones con recalentamiento (a), zona de transición entre granos equiaxiales y granos columnares (b) y micrografía del último cordón de granos columnares (c). En el caso de la zona recristalizada, se observa una estructura ferrítica equiaxiada, mientras que en la zona de granos columnares se observan otros constituyentes ferríticos como ferrita acicular y ferrita con segundas fases, responsables de la mayor microdureza medida en esta zona.

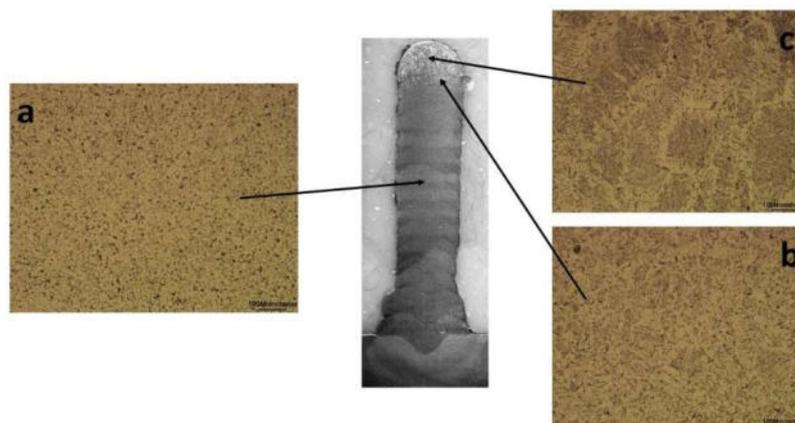


Figura 14: Micrografías de las distintas zonas de la probeta.



#### 4. CONCLUSIONES

Se generaron paredes cerradas en forma continua, variando la velocidad de traslación en el rango de 142 a 333 mm/min, manteniendo el resto de los parámetros constantes. En las probetas se observó un buen aspecto superficial hasta una velocidad de impresión de 250 mm/min, observando cierta inestabilidad geométrica en las probetas generadas a 285 y 333 mm/min.

En cuanto las dimensiones de las mismas se observa una marcada relación lineal en la reducción del área de pared (proporcional al material aportado) al aumentar la velocidad de soldadura. Observando también esta disminución tanto en la altura como en el espesor de la misma. No se detectaron defectos internos.

Al caracterizar las probetas microestructuralmente, se observó el mismo patrón en todos los casos, una microestructura ferrítica de granos equiaxiales (ZAC) desde el inicio hasta el último cordón, debido al recalentamiento producido por los cordones posteriores. El último cordón sobre el cual no hay un efecto de recalentamiento, se observa una microestructura de granos columnares con estructuras de ferrita acicular y ferrita con segundas fases. La dureza se mantiene relativamente constante para las distintas condiciones promediando los 155 HV, y se observa un aumento de la dureza al llegar al último cordón donde la dureza promedia los 180 HV, debido a la presencia de las fases mencionadas.

Se generó información relevante para el diseño de componentes estructurales obtenidos por manufactura aditiva por WAAM, así como procedimientos de impresión robustos.

#### REFERENCIAS

- [1] Binta Wu, Zengxi Pan, Donghong Ding, Dominic Cuiuri, Huijun Li, Jing Xu, John Norrish. *A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement*. Journal of Manufacturing Processes 35 (2018) 127-139
- [2] Mohsen Attaran. *The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. Business Horizons (2017) 60, 677-688
- [3] Nor Ana Rosli, Mohd Rizal Alkahari, Mohd Fadzli bin Abdollah, Shajahan Maidin, Faiz Redza Ramli, Safarudin Gazali Herawan. *Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process*. Journal of Materials Research and Technology (2021) 11, 2127- 2145



## CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES DE ALEACIONES DE ALUMINIO OBTENIDAS POR MANUFACTURA ADITIVA MEDIANTE FUSIÓN DE CAMA DE POLVO POR LÁSER (L-PBF)

Hernán Svoboda <sup>1,3</sup>, Alejandro Miranda <sup>1</sup>, Adrián Dunky <sup>2</sup>, Guillermo Rubino <sup>2</sup>

<sup>1</sup> GTSyCM3 – INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Paseo Colón 850 (C1063ACV) CABA, Argentina – [amiranda@fi.uba.ar](mailto:amiranda@fi.uba.ar).

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Tecnología Industrial – Centro Regional Litoral Sede Rafaela, Rafaela, Argentina -

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Godoy Cruz 2290, Ciudad de Buenos Aires, Argentina- [hsvobod@fi.uba.ar](mailto:hsvobod@fi.uba.ar)

### RESUMEN

La manufactura aditiva en metales (MAM) por fusión de cama de polvo por láser (L-PBF) es una novedosa tecnología que permite la generación de componentes estructurales de geometría compleja, con buen acabado superficial y adecuado ajuste dimensional, en comparación con otras técnicas de MAM. Las propiedades mecánicas quedarán definidas por el nivel de defectos, la evolución microestructural y eventualmente otras características como las tensiones residuales. La homogeneidad e isotropía de las mismas son aspectos que suelen cuestionarse en estos productos. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el nivel de defectos, la evolución microestructural y las propiedades mecánicas en componentes de aleación de Al-Si-Mg obtenidos mediante L-PBF. A este fin se obtuvieron probetas de 80x60x5 mm empleando un equipo EOS M 290. A una de las muestras impresas se le realizó un tratamiento térmico de solubilizado y envejecido (SE). Se midió la rugosidad superficial y se extrajeron cortes transversales para caracterización macro y microestructural y determinación de perfiles de microdureza Vickers. Asimismo, se extrajeron probetas para ensayos de tracción de diferentes zonas y orientaciones. La rugosidad superficial Ra fue de 15,7 micrones. No se detectaron defectos superficiales ni internos macroscópicos. Se observó la presencia de microporosidad y otros defectos asociados a falta de fusión del polvo de escala microscópica (20-60 micrones). Cada capa presenta un ancho de unos 500 micrones y una penetración de unos 250 micrones. En la condición como impresa (AP) se analizó la estructura de solidificación y las fases presentes. La microdureza se mantuvo uniforme en la altura (93-108 HV). Los valores obtenidos de los ensayos de tracción fueron similares para las distintas posiciones y orientaciones, lo que indicaría una buena homogeneidad e isotropía en relación a estas propiedades. Para la condición SE, se eliminó la estructura de solidificación observándose una estructura uniforme. La resistencia disminuyó levemente, alcanzando una mayor ductilidad.

**Palabras Clave:** *Manufactura Aditiva de Metales (MAM), Aleaciones de Aluminio, Propiedades Mecánicas*



## 1. INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva (MA), en los últimos años, ha impactado fuertemente en los procesos de fabricación de componentes de diversos materiales. Para el caso de componentes metálicos es una tecnología que se encuentra en pleno desarrollo, siendo en la actualidad un tópico de gran actividad, tanto científico-tecnológica como industrial. Sin embargo, existen aún numerosos desafíos por resolver y en nuestra región es aún incipiente su aplicación. Los componentes metálicos obtenidos por manufactura aditiva (MAM) deben presentar características al menos similares a los obtenidos mediante otras técnicas de fabricación. En ciertas aplicaciones se cuestiona el desempeño de este tipo de componentes. En este sentido, a fin consolidar el desarrollo de estas tecnologías es relevante aportar información en relación al desempeño de los componentes impresos. El nivel de defectos, las tensiones residuales, la estructura de solidificación, entre otros aspectos pueden afectar el mismo [1].

Dentro de las tecnologías disponibles para aleaciones metálicas se presentan la de Fusión de Cama de Polvo (PBF) cómo la más consolidada. El proceso conocido como Fusión Selectiva por Laser (SLM) es el más ampliamente utilizado habiendo mostrado excelentes resultados en relación a la complejidad geométrica que puede alcanzarse en las partes impresas, así como la calidad superficial y las tolerancias dimensionales, entre las distintas tecnologías disponibles para MAM [1].

Las aleaciones de aluminio son una familia de materiales metálicos ampliamente utilizada en MAM, siendo la aleación Al-Si-Mg la más habitual. Las condiciones de impresión pueden afectar la generación de defectos, las tensiones residuales y aspectos microestructurales y consecuentemente las propiedades mecánicas finales [2]. La aleación de Al con 10% de Si y 0,3% Mg presenta una resistencia en condición "como impresa" (AP) de alrededor de entre 350-450 MPa. En este sentido, se reporta cierto efecto de la orientación de la probeta sobre las propiedades resultantes [3,4]. Asimismo, en general puede llevar un tratamiento térmico post-impresión a fin de ajustar las propiedades mecánicas [2]. Sin embargo, son escasos los estudios sistemáticos disponibles en la literatura que aborden estos aspectos.

El objetivo del presente trabajo es analizar el nivel de defectos, las características microestructurales y las propiedades mecánicas en distintas direcciones de muestras impresas mediante el proceso SLM en aleación de Al-10Si-0,3Mg, así como evaluar el efecto del tratamiento térmico post-impresión.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

A fin de alcanzar los objetivos planteados se imprimieron muestras de aleación de Al-Si-Mg de 80x60x5 mm mediante el proceso SLM empleando un equipo EOS E290. De acuerdo a lo indicado por el fabricante la composición química del polvo es la mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del polvo (wt%) [3].

Polvo	Si	Mg	Fe	Ti	Mn	Zn	Al
Al-10Si-Mg	9-11	0,25-0,45	0,55	0,15	0,45	0,10	Bal.

Las condiciones de impresión incluyen, entre otros aspectos, diámetros de spot 70-80  $\mu\text{m}$ , espesor de capa de construcción 30 $\mu\text{m}$ , ángulo de rotación de capa 67° y un ancho de recorrido "Stripe Width" de 5mm, todo en atmósfera de argón. Se utilizó el procedimiento EOS Parameter set AISi10Mg\_200C [3]. Sin embargo, en el último tiempo el fabricante generó un nuevo procedimiento de impresión AISi10Mg\_FlexM291 2.01 [4].

Sobre una de las muestras impresas (AP) se realizó un tratamiento térmico de solubilizado a 530°C durante 30 min seguido de un enfriamiento en agua. Luego se realizó un envejecido a 165°C, durante 6 hs (SE) [4].

Sobre la muestra en condición AP se midió rugosidad superficial en diferentes direcciones.

De las muestras impresas en ambas condiciones AP y SE, se extrajeron cortes transversales que se prepararon metalográficamente para la caracterización macro y microestructural y medición de perfiles de microdureza. Adicionalmente, se mecanizaron probetas de tracción en diferentes posiciones (arriba, centro y abajo) y orientaciones (vertical y horizontal), para ambas condiciones AP y SE. En la Figura 1 se observa un esquema de la extracción de las muestras mencionadas.

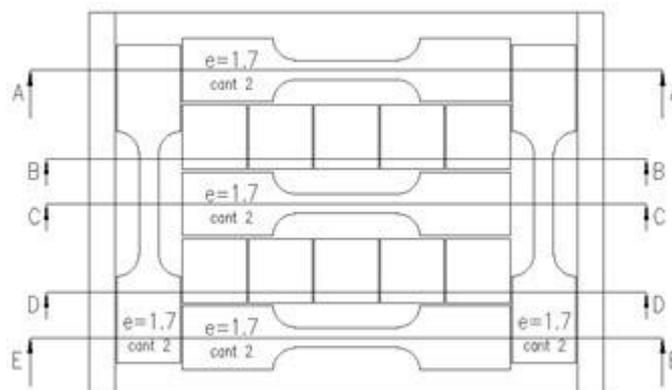


Figura 1: Esquema de extracción de muestras de probetas impresas.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Rugosidad

En la Figura 2 se muestra la condición superficial de las muestras impresas. En la Tabla 2 se presentan los resultados de la medición de rugosidad (Ra) en ambas direcciones (longitudinal y transversal) junto con la dispersión determinada.

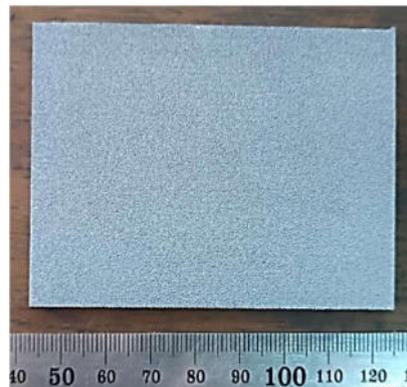


Figura 2: Condición superficial de probetas impresas.

Tabla 2. Rugosidad (Ra) en ambas direcciones medidas

Ra ( $\mu\text{m}$ )	
Longitudinal	Transversal
15,25 (2,10)	16,58 (1,30)

La rugosidad (Ra) presenta valores bajos para procesos de MA, aunque superiores a lo obtenido por mecanizado, siendo semejantes a lo obtenido por forjado o colado. Asimismo, los valores obtenidos son mayores a lo reportado para esta aleación [3,4]. No se observan variaciones significativas en función de la dirección, si bien es algo superior en la dirección transversal.

#### 3.2 Defectos y Macroestructura

En la Figura 3 se muestra una macrografía del corte transversal de la probeta AP, junto con un detalle de la zona superior de la probeta.

Se puede observar la estabilidad dimensional a lo largo de toda la altura de la muestra, así como la ausencia de defectos macroscópicos (Fig. 3a). A su vez, puede verse la secuencia de cordones en la parte superior de la probeta (Fig. 3b). Debe tenerse en cuenta que durante la impresión la

trayectoria del láser se rota  $60^\circ$  entre las distintas capas, esto produce en un corte transversal como el mostrado, que los cordones se observen con diferentes dimensiones en cada capa. En la última capa se ve cada uno de los cordones asociados a la fusión del polvo por el láser que genera una pileta líquida que funde parte de la capa anterior, y al solidificar presenta la geometría observada. Las dimensiones de cada uno de los cordones son de 0,5 mm de ancho y 0,25 mm de penetración, aproximadamente.

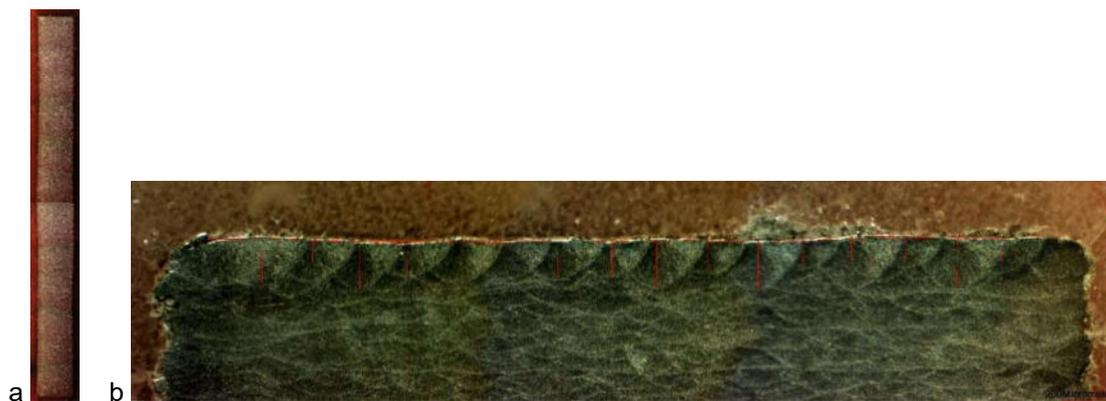


Figura 3: Macrografía: a- corte transversal de la probeta AP; b- zona superior de la probeta AP

En la Figura 4 se muestran imágenes de las superficies laterales de la probeta AP, así como de defectos en el interior de la misma.

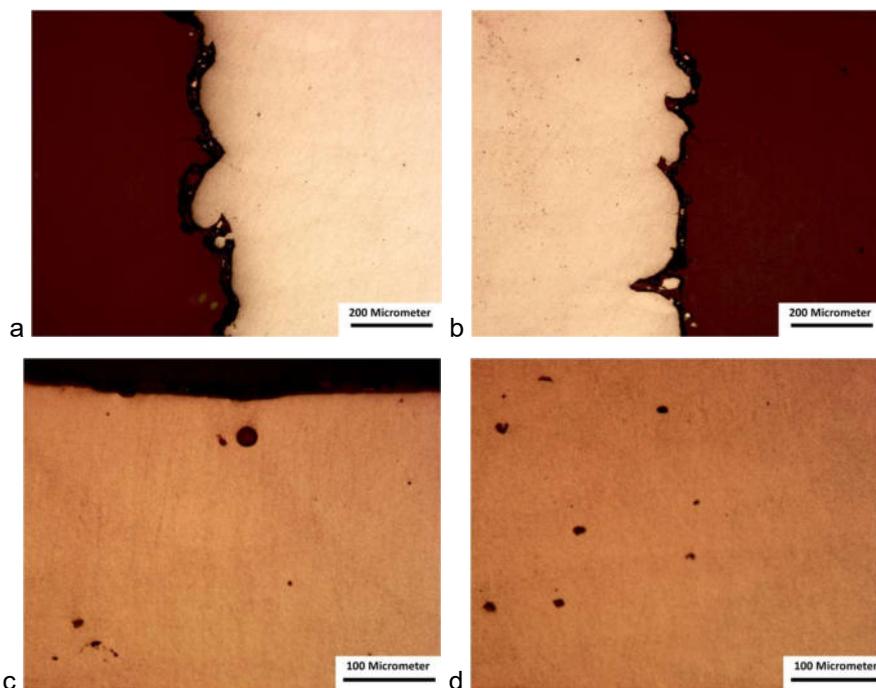


Figura 4: Imágenes de las superficies laterales (a y b) y defectos en el interior de la probeta AP (c y d)

Sobre las superficies laterales (Fig. 4 a y b) se observan los efectos de borde asociados a polvo sin fundir, flujo de líquido, etc., que definen la rugosidad final de la superficie y podrían considerarse defectos para condiciones de carga cíclica. La rugosidad en la superficie superior es menor que la observada sobre las superficies laterales. Asimismo, se observa la presencia de ciertos microdefectos (de hasta 20 micrones aprox.) asociados a porosidad o faltas de fusión entre cordones.

Para el caso de la muestra en condición SE la estructura se observa uniforme sin identificarse aspectos macroestructurales significativos.

### 3.3 Microestructura y Perfiles de microdureza

En la Figura 5 se muestran micrografías de la microestructura correspondientes a distintas alturas de la probeta AP.



Figura 5: Microestructura de la probeta AP correspondientes a distintas posiciones en altura: a- Zona superior ( $z=60$  mm), b- 2/3 de la altura ( $z=40$  mm); c- 1/3 de la altura ( $z=20$  mm) y d- zona inferior ( $z=0$  mm)

Puede verse la sucesión de cordones mencionada anteriormente, así como la uniformidad de la misma a lo largo de toda la probeta. Asimismo, se observan algunos microdefectos como se mencionó anteriormente.

En la Figura 6 se muestran micrografías correspondientes a la zona superior derecha de ambas condiciones (AP y SE) con la misma magnificación. La imagen de la condición SE fue atacada con un reactivo más agresivo a fin de revelar aspectos microestructurales. Con el reactivo empleado en la muestra AP (Keller) no se logró revelar la microestructura debido a su mayor homogeneidad, de acuerdo a lo reportado [4].

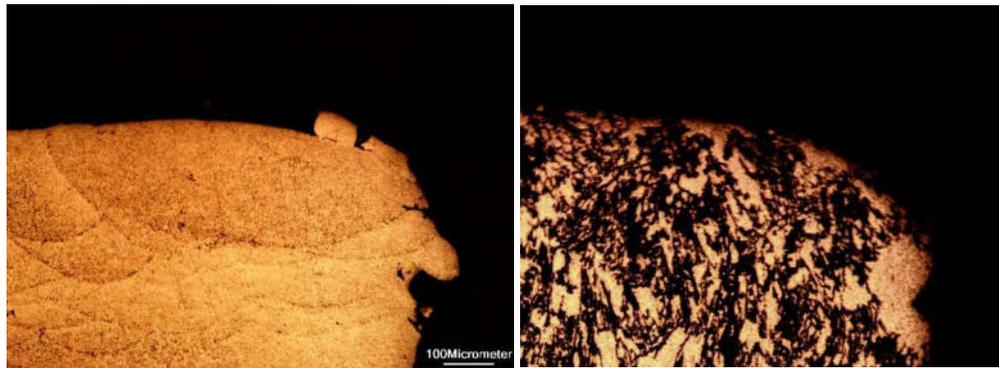


Figura 6: Microestructura de las probetas AP y SE correspondientes a la zona superior derecha de la probeta

En la Figura 7 se muestra una micrografía de la zona central de la probeta SE. Pueden observarse aspectos asociados a la morfología de los cordones originales.

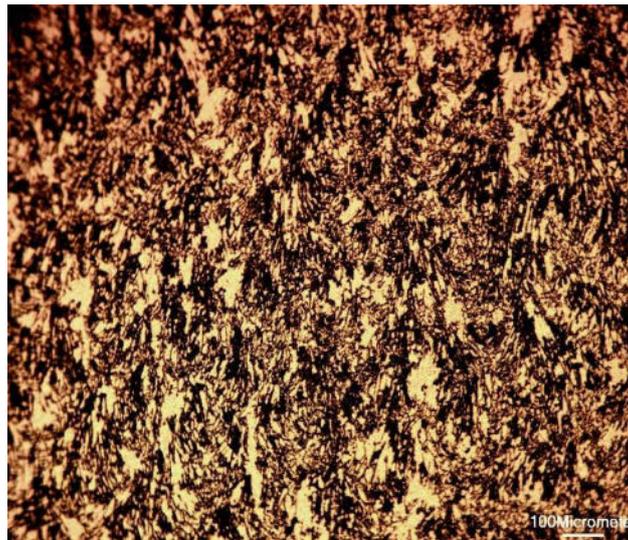


Figura 7: Microestructura de la probeta SE en la zona central

En la Figura 8 se muestran los perfiles de microdureza medidos a lo largo de la línea central de espesor de las probetas, en la dirección de la altura (Z).

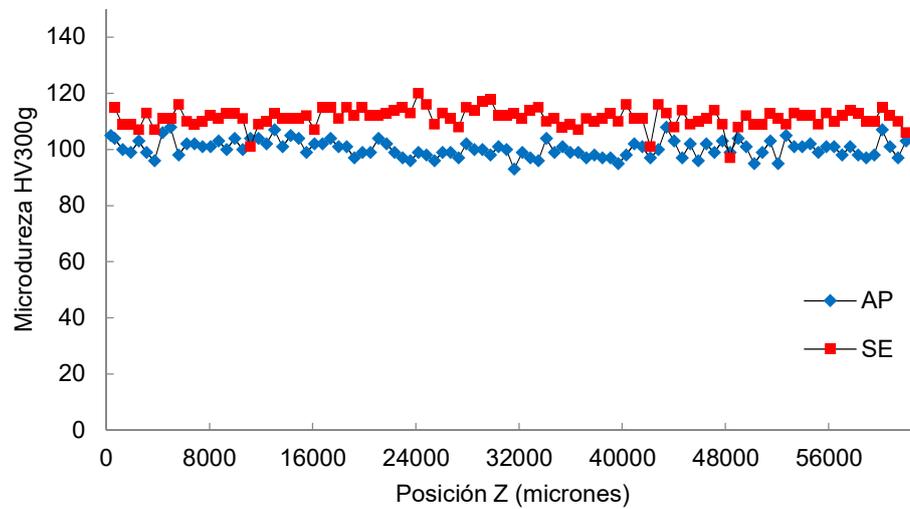


Figura 8: Perfiles de microdureza en la dirección de la altura (Z) de las probetas AP y SE

Puede verse que la dureza se mantiene sensiblemente uniforme a lo largo de toda la altura de ambas probetas. Asimismo, la probeta SE presenta una dureza levemente superior ( $HV_{prom}=111$ ) que la AP ( $HV_{prom}=100$ ), lo cual se asocia al tratamiento térmico aplicado.

### 3.3 Ensayos de tracción

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los ensayos de tracción obtenidos para las diferentes posiciones y orientaciones en las probetas AP y SE.

Tabla 3. Resultados de ensayos de tracción

Probeta	AP		SE	
	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\epsilon_{rot}$	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\epsilon_{rot}$
1TV1	344	0,092	322	0,083
1TV2	317	0,050	312	0,083
1TH3	307	0,067	325	0,083
1TH4	309	0,075	319	0,075
1TH5	311	0,067	325	0,083
<b>Prom</b>	<b>317</b>	<b>7,0</b>	<b>321</b>	<b>8,1</b>



La probeta AP presenta una resistencia mecánica de entre 307 y 344 MPa y una deformación a rotura en el rango de 5 a 9 %. No se detectan diferencias significativas en el comportamiento en tracción en función de la posición (H3, H4, H5). En cuanto a la orientación, la resistencia en la dirección vertical (HVv=330) fue algo superior a la medida en la dirección horizontal (HVh=309), consistentemente con lo reportado [3,4].

En cuanto a la muestra SE se midieron valores de resistencia similares a los obtenidos para la probeta AW, con un incremento marginal. Se observó una menor dispersión en los resultados obtenidos, probablemente asociada a menor inhomogeneidad microestructural. Asimismo, se midió una deformación a fractura levemente superior a la determinada para la condición AP, consistentemente con lo reportado [3,4]. Estos valores también presentaron una menor dispersión. En general, no se detectó efecto de la orientación o de la posición.

Al comparar estos valores con los informados por el fabricante para este material (Tabla 4), respecto de la condición de impresión empleada, los valores de resistencia obtenidos son algo inferiores. En comparación con la última versión del procedimiento desarrollado, la diferencia en la condición AP es más significativa.

Para el caso de la condición SE, los valores de resistencia mecánica no difieren significativamente de los reportado por el fabricante [4], lo cual puede deberse a que el tratamiento térmico aplicado minimiza el efecto de las condiciones de impresión, dada la homogeneización que genera sobre la microestructura original.

Tabla 4. Resultados de ensayos de tracción informados para este material [3,4].

		AP		SE	
Procedimiento	Probeta	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\epsilon_{rot}$	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\epsilon_{rot}$
AlSi10Mg_200C	Vertical	390	0,08	-	-
	Horizontal	360	0,06	-	-
AlSi10Mg_Flex	Vertical	460	0,063	310	0,110
	Horizontal	450	0,102	320	0,110

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizaron la estructura, nivel de defectos y las propiedades mecánicas de una aleación de Aluminio-Silicio-Magnesio obtenida por el proceso de manufactura aditiva SLM en dos condiciones de post-procesamiento.



La rugosidad superficial de las caras laterales de las probetas impresas es de alrededor de 16 micrones, detectándose la presencia de ciertos defectos superficiales. Asimismo, se detectó un bajo nivel de microdefectos (<20 micrones) en la sección del material.

En la muestra “como impresa” (AP) se observa la estructura de cordones, los que presentaron dimensiones de alrededor de 0,5 mm de ancho y 0,25 mm de penetración. Para la muestra con solubilizado y envejecido (SE) esa estructura de solidificación fue eliminada, observándose una estructura homogénea.

La microdureza fue uniforme en la altura de la probeta en ambos casos, siendo levemente superior (10% aprox.) para el caso de la probeta SE (111 HV).

Las propiedades mecánicas no mostraron variaciones significativas en función de la posición, detectándose un leve incremento de la resistencia para las probetas ensayadas en la dirección de crecimiento de la probeta. La probeta SE mostró una resistencia mecánica y deformación a rotura levementes superiores a la AP, consistentemente con lo determinado en las mediciones de microdureza.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Tec. Fabián Stilo por su colaboración en la preparación de las muestras para metalografía y ensayos mecánicos.

## REFERENCIAS

- [1] T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang. *Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties*. Progress in Materials Science 92 (2018) 112–224.
- [2] Mohsen A. *The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. Business Horizons (2017) 60, 677-688.
- [3] EOS Aluminium AISi10Mg\_200C. Material Data Sheet. EOS. 2013.
- [4] EOS Aluminium AISi10Mg. Material Data Sheet. EOS. 2021.



## CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS TERMOPLÁSTICAS IMPRESAS POR DISTINTAS ESTRATEGIAS EN PROCESO MODELADO POR DEPOSICION FUNDIDA

Fabian Claudio Nessier <sup>1</sup>, Rodrigo Lerurino <sup>1</sup>, Nicolas Raviolo <sup>1</sup>, Italo Ruben Tocci <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento Mecánica - Facultad Regional Santa Fe – Universidad Tecnológica Nacional  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina - [fnessier@frsf.utn.edu.ar](mailto:fnessier@frsf.utn.edu.ar).

### RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de caracterización y simulación de probetas producidas en materiales termoplásticos que vincula resultados de ensayos a través de distintas metodologías de impresión logradas por método de modelado por deposición fundida (FDM) y que las mismas sean verificadas mediante simulación por el Método de los Elementos Finitos (MEF) permitiendo de esta manera que diseños en piezas y productos producidos con estas metodologías puedan simularse y validarse a través de la información expuesta en este trabajo.

Se presentarán las caracterizaciones de los ensayos de tensión/deformación obtenidos en una Máquina Universal de Ensayos en probetas confeccionadas con distintos tipos de relleno orientándose a la búsqueda de los mejores comportamientos en estas. Luego, una vez obtenidos los datos experimentales se analizarán a través de procesos de simulación por MEF con softwares de utilización industrial, hasta encontrar el modelo de probeta que mejor se ajuste a la lograda en la caracterización.

Finalmente, se mostrarán los modelos de simulación con los diferentes diseños de rellenos en las probetas donde se verifican estos comportamientos mecánicos para los cuales estos datos puedan utilizarse como base para el diseño posterior de piezas y productos de utilización.

**Palabras clave:** *Modelado por deposición fundida, Simulación por Método de los Elementos Finitos, Materiales termoplásticos.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva, o comúnmente denominada como impresión 3D, se define como “aquellas tecnologías que crean objetos físicos mediante la adición sucesiva de material” [1].

A través de distintos métodos de adición de materiales se lograron completar una amplia gama de ellos comenzando con polímeros termoplásticos hasta llegar a metales, pasando también por materiales cerámicos [2] y compuestos [3].

Este trabajo se centrará en la impresión 3D de materiales poliméricos, usando concretamente, ácido poliláctico (PLA) debido a su difusión; empleado como técnica de fabricación, la deposición de material fundido o FDM.

Evolutivamente este método ha sido el más utilizado y desarrollado para una infinidad de tipos de materiales y al momento es uno de los procesos más económicos y difundidos [4].

La originalidad de este trabajo consiste en analizar la geometría interna de una pieza impresa, conceptualizando las mismas para un análisis posterior utilizando como concepto el elemento volumétrico representativo o RVE (Representative Volume Element) [5], que se trata de la unidad básica de una estructura que se repite de forma periódica dentro de un cuerpo.

En este trabajo, se buscará y posteriormente se validará, a través de la caracterización mecánica de probetas y ensayos normalizados a tracción según ASTM D 638 [6] e IRAM 13316 [7] y flexión según ASTM D790 [8] e IRAM 13338 [9] definidas con diferentes estructuras impresas 3D, que parámetros de diseño y simulación numérica con softwares disponibles o accesibles industrialmente son verificables para un diseño de piezas.

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Para poder controlar la mayoría de las variables en el análisis, procesado y validación del trabajo se buscó un material que por sus características mecánicas puedan verificar que las propiedades en bruto de los polímeros donde estas dependen en gran medida de factores como el proceso de fabricación, el tipo de cadena del polímero o los aditivos y, por lo tanto, aunque puedan variar entre diferentes proveedores [10], el material utilizado sea lo más homogéneo posible a través de los diferentes proveedores.

La materia prima utilizada en este trabajo fue PLA para impresión 3D, el cual se comporta como un material isotrópico con propiedades mecánicas  $E = 3.600 \text{ MPa}$  y  $\nu = 0.38$  [11]. Sin embargo, debido al procedimiento de impresión por FDM, las piezas finales impresas en 3D no se deberían comportar de forma isotrópica; exhiben notables propiedades mecánicas ortotrópicas [12] debido a las características propias de la multiplicidad de orientaciones de disposición del filamento en del proceso de impresión 3D según se muestra en la Figura 1.

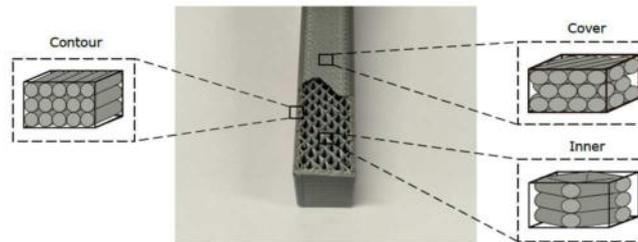


Figura 1: Diferentes orientaciones del filamento en una pieza/probeta impresa

Motivo por el cual y a través de las distintas comparaciones y análisis sobre distintas probetas impresas con diferentes estrategias de impresión y su posterior verificación mediante el MEF para comparar las soluciones numéricas y los resultados experimentales.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para caracterizar completamente el comportamiento del material PLA, se realizaron ensayos de tracción para obtener las propiedades mecánicas, y por otro lado se utilizaron ensayos de flexión para verificar las propiedades obtenidas. En todas las probetas se tomó como variable fundamental la incidencia del relleno utilizando distintas configuraciones.

Todas las probetas se fabricaron con la misma impresora estándar de mercado según se muestra en la Figura 2 y con los parámetros de impresión que se indican en la Tabla 1.



Figura 2: Impresora 3D

Tabla 1. Parámetros de impresión de las probetas

Parámetro de impresión	Valor
Extrusión temperatura (°C)	200
Temperatura de cama (°C)	60
Velocidad de impresión de la primera capa (mm/s)	20
Velocidad de impresión del contorno (mm/s)	40
Velocidad de impresión de la capa superior (mm/s)	25
Velocidad de impresión del relleno (mm/s)	50



### 3.1 Probetas para ensayos a tracción

Se realizaron ensayos a tracción de acuerdo con la norma ASTM D 638 [6], e IRAM 13316 [7] y se imprimieron múltiples probetas de acuerdo con el tipo normalizada y con las medidas que se detallan en la Figura 4.

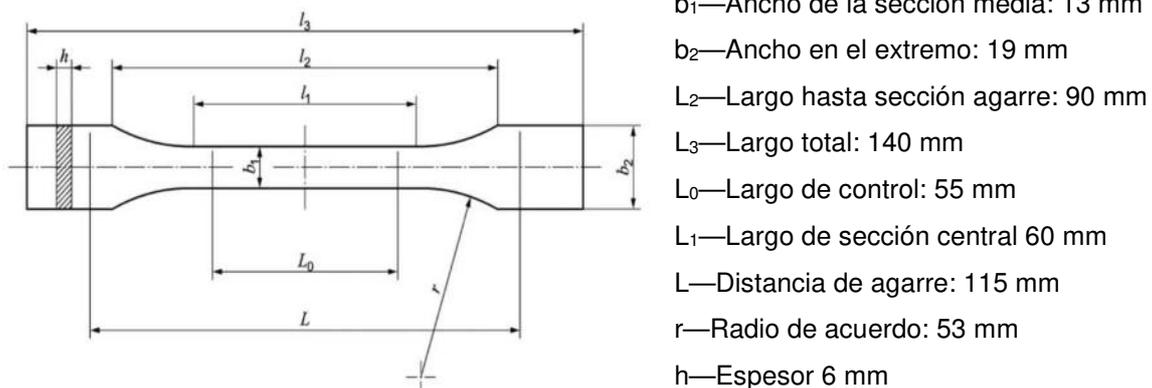


Figura 4: Dimensiones de la probeta

La elección de las medidas para las probetas se basó en que estas tengan un relleno, porcentualmente hablando, suficientemente elevado respecto de las partes de contención o áreas de contorno. Se realizaron en 3 tipos diferentes de rellenos para poder orientar el análisis y validación de los ensayos de simulación donde la caracterización de las distintas opciones de impresión sea de uso normal en piezas impresas 3D por FDM, lo que se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de relleno de las probetas

Tipo de relleno	% del relleno según configuración del laminador de impresión	% en volumen del material respecto al volumen total
Estrella	35	68
Triangular	35	60
Panal de abeja	35	78

Para asegurar la repetibilidad, se produjeron 5 probetas de cada tipo, en un total de 15 probetas impresas. Para la caracterización de la cubierta se fabricaron en patrón cruzado a 45°, en la cubierta y la base en un total de 3 capas asegurando un espesor de 0,6 mm y en el contorno un total de 2 capas, asegurando una cascara de 0,8 mm en todo su perímetro.

Los 3 tipos de rellenos permiten una orientación de estos con las mejores ventajas para la distribución de cargas (eso significa que estas sean multidireccionales), con las mismas variables de impresión y todas impresas simultáneamente en la misma impresora como se indica en la Figura 5.

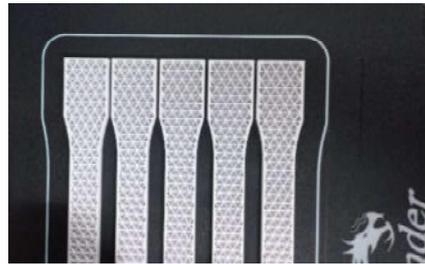


Figura 5: Impresión de probetas

Los ensayos se realizaron en máquina universal de ensayos con disposición de probetas según las indicaciones de IRAM 13316 [7], disposición de extensómetro LVDT como se muestra en la Figura 6.



Figura 6: Disposición de probeta a ensayar.

### 3.2 Probetas para ensayos a flexión

Se realizaron ensayos a flexión de acuerdo con la norma ASTM D790 [8] e IRAM 13338 [9] y se imprimieron múltiples probetas de acuerdo con el tipo normalizada que se detalla en la Figura 7.

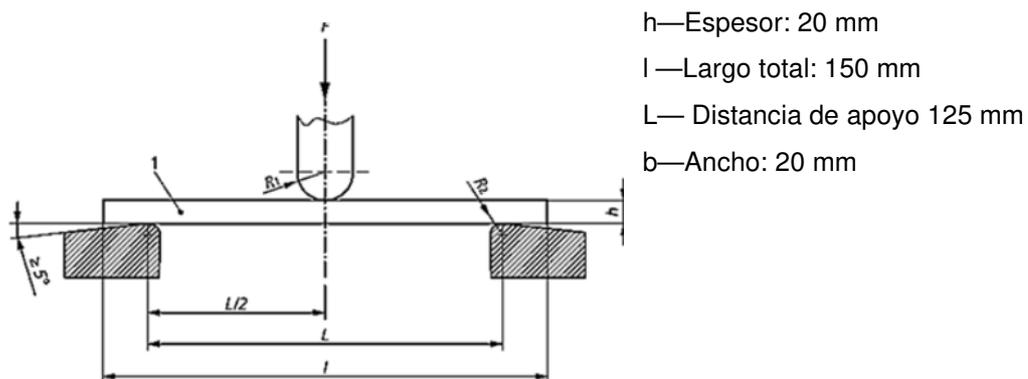


Figura 7: Dimensiones de la probeta

Se utilizó un criterio semejante al utilizado para la elección de medidas de las probetas de tracción. Si bien los criterios de relleno resultaron semejantes, las relaciones volumétricas fueron

totalmente diferentes debido a la geometría de estas. En la Tabla 3 se detallan las distintas opciones de relleno de estas probetas.

Tabla 3: Parámetros de relleno de las probetas de flexión

Tipo de relleno	% del relleno	% en volumen
Estrella	35	42
Triangular	35	43
Panal de abeja	35	54

Los ensayos se realizaron en la misma máquina universal de ensayos que los realizados para tracción con disposición de probetas según las indicaciones de IRAM 13338 [9], disposición de extensómetro LVDT según se indica en la Figura 8.

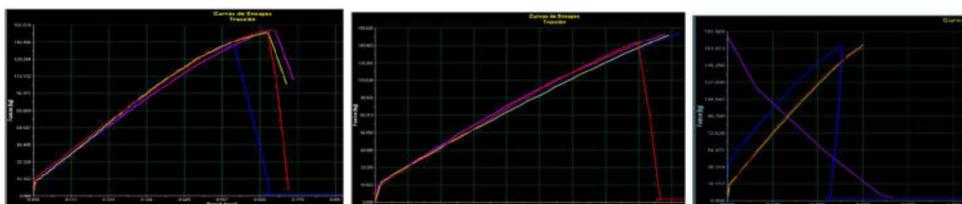


Figura 8: Disposición de probeta a ensayar

## 4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

### 4.1 Ensayos de tracción

Las curvas de tensión-deformación de los ensayos de tracción descritos en la Sección 3.1 se representan en la Figura 9. Los gráficos muestran un comportamiento casi lineal o newtoniano del material, no observándose períodos de fluencia o zonas de deformación plástica en los tres grupos de probetas ensayadas.



Patrón estrella

Patrón triangular

Patrón panal de abeja

Figura 9: Resultados ensayos de tracción

Los resultados a rotura de estos ensayos se detallan en la Tabla 4

Tabla 4: Carga de rotura en cada tipo de probeta

Tipo de relleno	Estrella [N]	Triangular [N]	Panal de abeja [N]
Probeta 1	1526,2	1369,5	1686,2
Probeta 2	1511,5	1377,8	1810,1
Probeta 3	1401,7	1377,3	(*)
Probeta 4	1539,3	(*)	1625,6
Probeta 5	(*)	1402,2	1729,3
<b>Promedio</b>	<b>1494,7</b>	<b>1381,7</b>	<b>1712,8</b>
Desv prom %	3,1%	0,7%	3,3%
(*) Fallo en el proceso de ensayo			

Por otro lado, se pudo observar que todas fallaron en las mismas zonas más allá del tipo de relleno utilizado según se observa en la Figura 10.



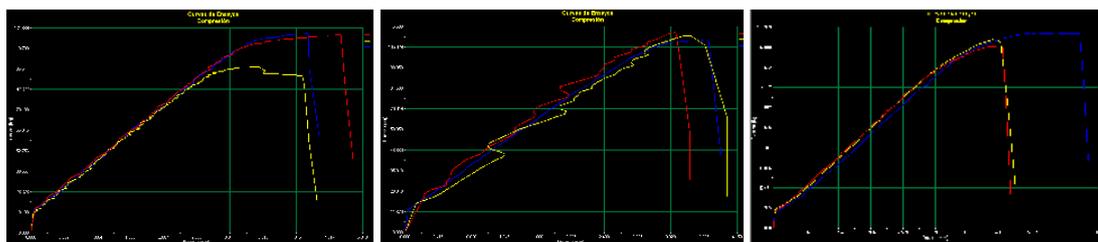
Figura 10: Zona de rotura de las probetas testeadas

## 4.2 Ensayos de flexión

Las curvas de tensión-deformación de los ensayos de flexión descritos en la Sección 3.2 se representan en forma independiente de acuerdo con la posición de ensayo u orientación del relleno dentro de éstas. Los gráficos muestran un comportamiento casi lineal o newtoniano del material, observándose períodos de fluencia o zonas de deformación plástica en los tres grupos ensayadas, en un corto periodo y variaciones u oscilaciones en la aplicación de la carga.

### 4.2.1 Patrón de relleno Vertical

En la Figura 11 se presentan los resultados del ensayo y en la Tabla 5 se presentan estos valores.



Patrón estrella

Patrón triangular

Patrón panal de abeja

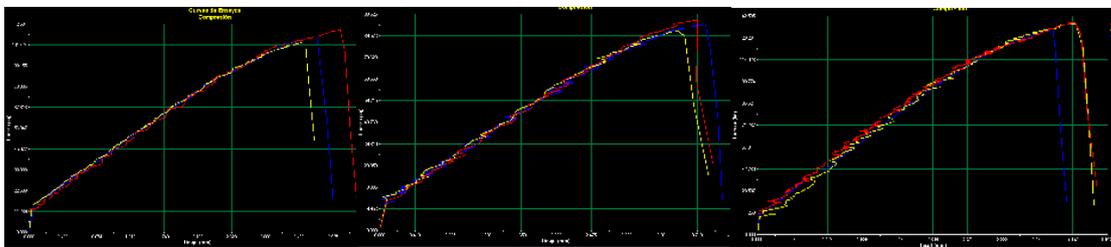
Figura 11: Resultados ensayos a flexión con patrón de relleno en posición vertical

Tabla 5. Carga de rotura en cada tipo de probeta

Tipo de relleno	Estrella [N]	Triangular [N]	Panal de abeja [N]
Probeta 1	1252,1	1064,4	1449,9
Probeta 2	1050,7	1086,0	1516,0
Probeta 3	1256,2	1114,4	1555,9
<b>Promedio</b>	<b>1186,3</b>	<b>1088,3</b>	<b>1507,3</b>
Desv prom %	7,6%	1,6%	2,5%

#### 4.2.2 Patrón de relleno horizontal

En la Figura 12 se presentan los resultados del ensayo y en la Tabla 6 se presentan estos valores.



Patrón estrella                      Patrón triangular                      Patrón panal de abeja  
Figura 12: Resultados ensayos a flexión con patrón de relleno en posición horizontal

Tabla 6. Carga de rotura en cada tipo de probeta

Tipo de relleno	Estrella [N]	Triangular [N]	Panal de abeja [N]
Probeta 1	1073,3	947,9	1357,5
Probeta 2	1005,2	901,0	1350,3
Probeta 3	1034,9	929,8	1307,1
<b>Promedio</b>	<b>1037,8</b>	<b>926,2</b>	<b>1338,3</b>
Desv. Prom. %	2,3%	1,8%	1,6%

Por otro lado, se pudo observar que todas fallaron en las mismas zonas más allá del tipo de relleno utilizado según se observa en Figura 13, donde no se observó delaminación de capas.



Figura 13: Zona de rotura de las probetas testeadas

## 5. VERIFICACION Y VALIDACIÓN DE LOS ENSAYOS POR SIMULACION

Como primer paso para el desarrollo de las simulaciones se desarrollaron los modelos 3D en base a los mismos parámetros de fabricación de las probetas impresas sometidas a tracción y flexión, tanto de las dimensiones de espesores de contorno como de las geometrías de relleno.

Para las simulaciones se analizaron y utilizaron softwares de diseño que aplican análisis por elementos finitos de uso extendido en el mercado, a los cuales se cargaron geometrías, características físicas de los materiales y cargas a rotura los ensayos experimentales y se evaluaron resultados de simulación.

En todos los casos, son observable puntos de falla en las mismas áreas que en las probetas físicas; y para la visualización de estos en el presente artículo solo se muestran los resultados de uno de los softwares de referencia y en cada tipo de probeta.

### 5.1 Ensayos a tracción

Los modelos de las probetas simuladas para cada tipo de relleno mostraron que los valores numéricos de tensión de rotura a la tracción y los lugares donde estos se producen son iguales a los ocurridos en las probetas ensayadas según se observa en la Figura 14.

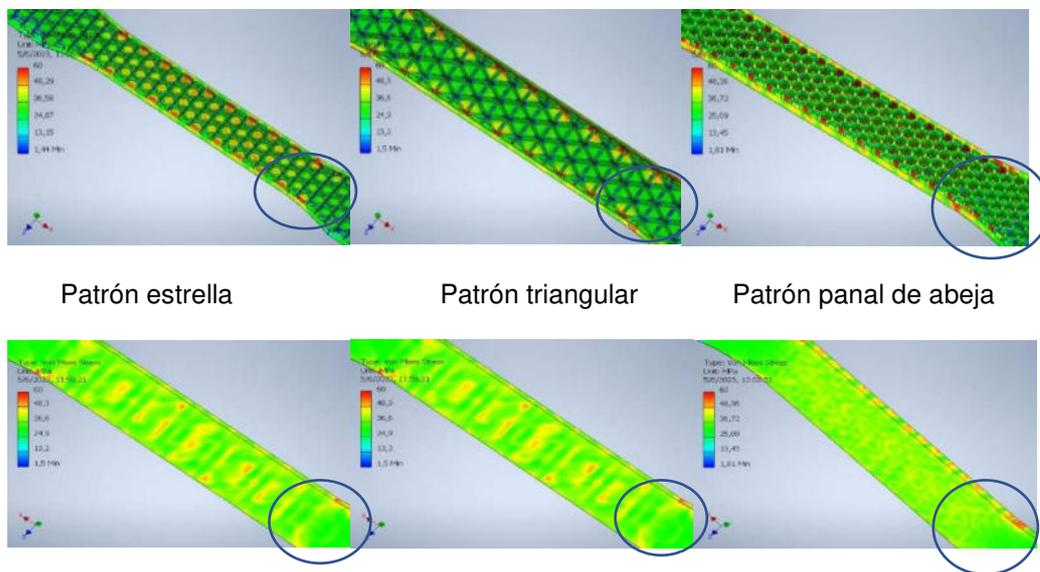


Figura 14: Resultado de simulaciones

Además, se verificó el comportamiento isotrópico del material en los modelos de piezas impresas en 3D.

Por otro lado, se observa que hay varios lugares a lo largo de la sección media donde podrían ocurrir las fallas si el relleno tuviera menor densidad geométrica y/o no estuviere centrada la impresión en el eje de la pieza (poco probable con los slicer o generadores de laminado).

## 5.2 Ensayos a flexión

Los modelos de las probetas simuladas para cada tipo de relleno mostraron que los valores numéricos de tensión de rotura a la flexión y los lugares donde estos se producen son iguales a los ocurridos en las probetas ensayadas según se observa en la Figura 15 y 16 en ambos casos de orientación de patrón de relleno.

### 5.2.1 Patrón de relleno con orientación vertical a la carga

Para los patrones de relleno en posición vertical a la carga de rotura se observan en la Figura 15

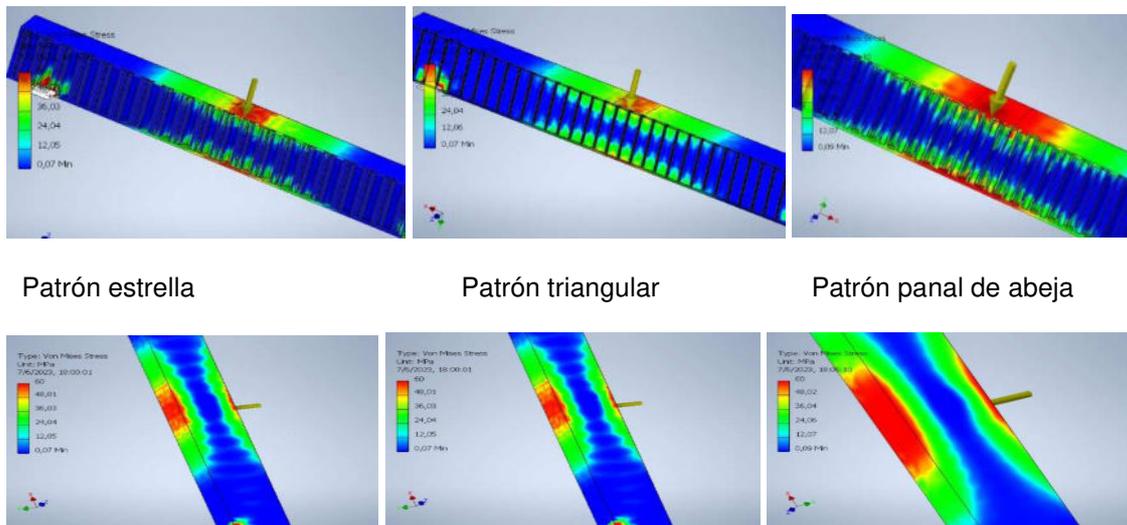


Figura 15: Ensayos con la orientación del relleno en posición vertical

### 5.2.2 Patrón de relleno con orientación horizontal a la carga

Para los patrones de relleno en posición horizontal a la carga de rotura se ven en la Figura 16.

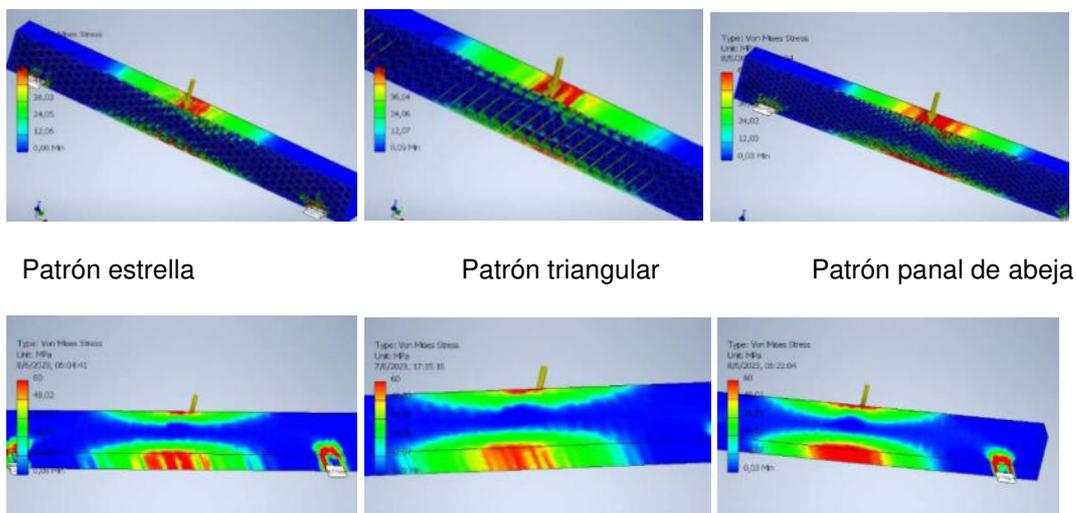


Figura 16: Ensayos con la orientación del relleno en posición horizontal



Los resultados en ambos casos se observaron con las mismas conclusiones que las observadas en los ensayos a tracción.

### 5.3 Aspectos especiales

La adhesión entre capas que se observa en la Figura 17 con el uso de imágenes de microscopía, evalúa el resultado de adhesión o unión entre capas impresas observadas después de los ensayos a rotura; las mismas se presentaron en al menos una muestra de cada patrón de relleno.

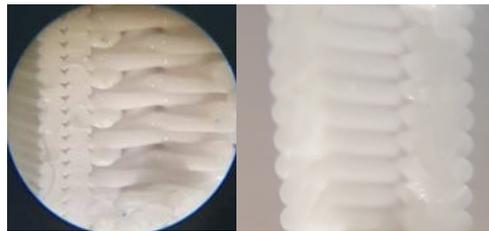


Figura 17: Ejemplo de microscopía en las capas de las probetas

Investigaciones realizadas sobre la temática, indican que los principales factores que influyen en la resistencia entre capas son una combinación de procesos de difusión y contacto entre estas [13]. En el caso de los polímeros termoplásticos la adhesión se puede describir particularmente como una combinación entre la difusión térmica que asegura una homogeneidad a través de las capas y una cuantificación de la influencia del contacto entre estas [14]. Este enfoque permite relacionar la influencia de la resistencia entre estas y observar el comportamiento isotrópico del material, que permite relacionar los resultados de ensayos con la validación por simulaciones.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo, las propiedades mecánicas de piezas impresas en 3D se caracterizaron experimental y computacionalmente. Los resultados informados ponen en evidencia que el modelo fue una aproximación confiable para la caracterización de piezas impresas en 3D y confirmó el impacto directo de los parámetros del proceso, en lo referente al patrón de impresión. Los resultados de los ensayos de tracción y flexión en ambas orientaciones de ensayo sobre el tipo de relleno confirmaron que la rotura de las probetas era independiente del tipo de patrón de impresión y que el material tuvo un comportamiento isotrópico más allá de todas las variables de impresión y de las propiedades del material intrínsecamente analizados.

Se concluyó además que los aspectos de adhesión de capas que está presente en la utilización de este tipo tecnología de impresión tiene un efecto relativo o nulo en tanto las variables de impresión sean adecuadamente controladas.

La línea de investigación se orientará a la utilización de otros materiales como el caso de materiales compuestos y aglutinados en material metálico, con el fin del logro de piezas de uso de ingeniería de mayor logro específico.



## REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 52900. Fabricación aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario. 2015.
- [2] F. Zhang, Z. Li, M. Xu, S. Wang, N. Li, and J. Yang, *A review of 3D printed porous ceramics*, J. Eur. Ceram. Soc., vol. 42, no. 8, pp. 3351–3373, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.02.039>.
- [3] N. van de Werken, H. Tekinalp, P. Khanbolouki, S. Ozcan, A. Williams, and M. Tehrani, *Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective* Addit. Manuf., vol. 31, p. 100962, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100962>.
- [4] A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, M. Irfan Ul Haq, *3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0*, Sustainable Operations and Computers, Vol.3, 2022, Pag 33-42, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>.
- [5] F. Zhang, Z. Li, D. Jia, *Lattice impeller design and multi-scale stress-deformation analysis based on conventional cubic lattice*. Mech. Adv. Mater. Struct. 2020, 1–17, doi: <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1855681>
- [6] ASTM D 638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2014
- [7] IRAM 13316 Plásticos. Ensayos de tracción. 1969
- [8] ASTM D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 2017
- [9] IRAM 13338 Plásticos. Método de ensayo de flexión. 1970
- [10] Bierögel, C.; Grellmann, W. *Quasi-Static Tensile Test—Poisson Ratio of Thermoplastic Materials—Data*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014.
- [11] [https://www.nth.com.ar/es/monofilamentos/73-filamento-pla-p-impresoras-3d.html?search\\_query=pla&results=68](https://www.nth.com.ar/es/monofilamentos/73-filamento-pla-p-impresoras-3d.html?search_query=pla&results=68) 6/2023
- [12] Casavola, C.; Cazzato, A.; Moramarco, V.; Pappalettere, C. *Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory*. Mater. Des. 2016, 90, 453–458. Doi, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.009>
- [13] Lepoivre, A.; Boyard, N.; Levy, A.; Sobotka, V. *Heat transfer and adhesion study for the FFF additive manufacturing process*. Procedia Manuf. 2020, 47, 948–955.
- [14] Coogan, T.; Kazmer, D. *Prediction of interlayer strength in material extrusion additive manufacturing*. Addit. Manuf. 2020, 35.



## VIDA A LA FATIGA DE COILED TUBING. INFLUENCIA DE LA TENSIÓN MEDIA Y LA TENSIÓN EN EL CARRETEL

Jorge Palavecino<sup>1,2</sup>, Federico Verdeal<sup>1</sup>, Agustín Suarez<sup>1</sup>, Juan Cruz Rodriguez<sup>1</sup>,  
Juan Perez Ipiña<sup>3</sup> y Jessica Wainsten<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Ensayos Industriales – Facultad de Ingeniería - UNPSJB

Ruta Prov. N.º 1, Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina – [mecanica@unpsjb.edu.ar](mailto:mecanica@unpsjb.edu.ar)  
[fede.verdeal@gmail.com](mailto:fede.verdeal@gmail.com) - [agustin.suarez118@gmail.com](mailto:agustin.suarez118@gmail.com) - [juancruz-.97@hotmail.com](mailto:juancruz-.97@hotmail.com)

<sup>2</sup>CIMEC CONICET – UNL - Santa Fe, Santa Fe, Argentina – [jpala.doc@gmail.com](mailto:jpala.doc@gmail.com)

<sup>3</sup>CONICET Cipolletti, - Metalmat, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil - [pipina@gmail.com](mailto:pipina@gmail.com)

<sup>4</sup> CIC Golfo San Jorge – UNPA – FBiol UNER – CONICET - [jessica.wainstein@uner.edu.ar](mailto:jessica.wainstein@uner.edu.ar)

### RESUMEN

La vida a la fatiga del *Coiled Tubing* (CT) está controlada por ciclos de flexión causados por el enrollado y desenrollado del mismo en el carretel y su paso por el cuello de ganso. Además, el CT está sometido a tensiones circunferenciales introducidas por la presión interna y tensiones axiales producidas por el peso de la cañería dentro del pozo, la presión interna, y la acción de un motor hidráulico que tracciona la línea. Sin embargo, solo durante la flexión estas sollicitaciones exceden la tensión de fluencia. La vida a la fatiga de bajo ciclo de los CT puede ser estimada utilizando modelos que tengan en cuenta deformaciones elastoplásticas, tensión media y tensiones multiaxiales. En el presente trabajo, se estudia la vida a la fatiga de bajo ciclo del CT utilizando los modelos Manson-Coffin, Manson-Halford y Smith-Watson-Topper analizando la influencia de la tensión media y la tensión ejercida por el carretel. Las estimaciones realizadas se comparan con resultados experimentales publicados en la bibliografía, obteniéndose un excelente acuerdo.

**Palabras clave:** *Coiled Tubing, Fatiga de Bajo Ciclo, Fatiga.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los *Coiled Tubing* (CT) son tubos de acero de diámetros que varían entre 25 y 90 mm, con espesores de 2 a 7 mm cuya longitud puede alcanzar más de 3000m. Se encuentran enrollados en bobinas de 3m de diámetro externo y se fabrican a partir de flejes soldados de acero *HSLA*, para conformar una bobina continua, que luego es deformada y soldada longitudinalmente para obtener un tubo. Estos tubos se utilizan para llevar “servicios” al fondo del pozo. Las operaciones que se realizan en el pozo pueden estar vinculadas al bombeo, la acidificación o el cableado eléctrico, las cuales deben realizarse sin estorbar al resto del equipamiento y actividades [1]. El estudio del comportamiento mecánico de los CT resulta de vital importancia debido a los costos económicos, de seguridad y ambientales que se presentan en el caso de una rotura imprevista de la cañería.

Una unidad de servicio de CT (Figura 1.a) se compone principalmente de un camión que transporta el equipo, un carretel impulsado por un motor hidráulico donde se almacena la cañería y una cama (denominada “cuello de ganso”) la cual direcciona al CT hacia la unidad inyectora que finalmente lo introduce hacia el interior del pozo. Una vez completada la operación, el tubo es retirado del pozo y enrollado en el carretel para ser transportado a la siguiente posición de trabajo. Generalmente, la vida a la fatiga de los CT está controlada por ciclos de flexión causados por desenrollar y enrollar el tubo en el carretel junto con su paso por el cuello de ganso. La presencia de un motor de fondo, el transporte de ácidos en diferentes operaciones como también el rozamiento de la cañería contra el encamisado del pozo u otros factores influyen en la vida útil del CT [2,3].

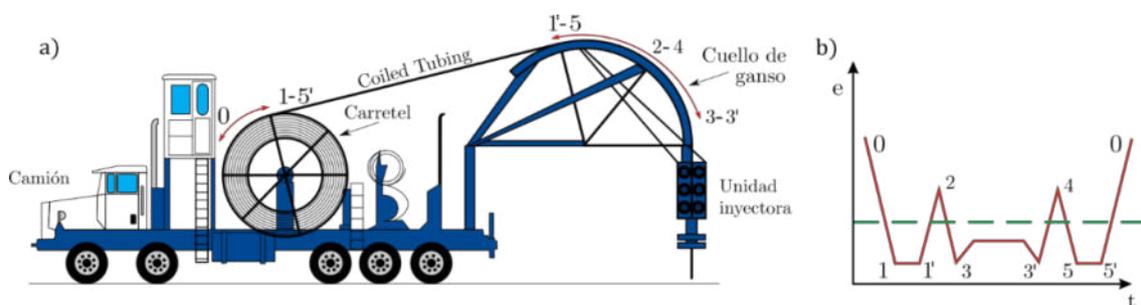


Figura 1: a) Esquema de una unidad convencional de CT. b) Ciclos de flexión en un CT.

Los datos experimentales de vida a la fatiga de bajo ciclo de un *Coiled Tubing* se pueden obtener a partir de dos tipos de ensayos: ensayos de campo en condiciones reales de uso y ensayos de laboratorio [4]. Pese a que son preferibles los ensayos de campo realizados en condiciones reales de uso, estos presentan solicitaciones adicionales que escapan de los alcances de los modelos estudiados. Los datos que comúnmente se encuentran en bibliografía corresponden a ensayos de laboratorio, los cuales son más rápidos y económicos debido a que



requieren pocos metros de cañería. Las pruebas de fatiga de CT de escala real en condiciones reales de uso permiten obtener resultados con mayor fidelidad. La principal desventaja que presenta es la necesidad de una unidad completa para servicio dedicada al ensayo lo cual resulta muy costoso.

Durante los años 90, Tipton y Newborn [5, 6] realizaron un primer análisis de la fatiga de ciclo bajo de CT. Los autores utilizaron datos de deformación recopilados durante pruebas a escala completa como entrada con varias teorías de predicción de vida útil de fatiga basadas en deformaciones locales. Las predicciones que realizaron fueron bastante precisas cuando se asumió la existencia de una tensión media, mientras que cuando se consideraron despreciables se presentaron mayores discrepancias [7]. Más tarde, Tipton y Brown [8] desarrollaron un modelo predictivo aplicado en el software CoilLIFE ®, que determina la vida útil del CT en el punto de máxima deformación acumulada. Aunque en este modelo no consideró la tensión media, se presentó una muy buena correlación con los comportamientos de campo y de laboratorio.

Posteriormente, Tipton, Carlson y Sorem [9] estudiaron la influencia de la rotación de fondo, cuando se utiliza una herramienta de perforación. Esta rotación impone esfuerzos adicionales de torsión-flexión de alta frecuencia a la tubería. Se consideraron tensiones medias residuales, aproximadas por un análisis de deformación cíclica elasto-plástica, utilizando la ecuación de Manson-Halford. Emplearon modelos de fatiga de ciclo bajo y alto, evaluando también el daño por fatiga producido por la rotación en el régimen de alta frecuencia de ciclo, especialmente cuando el ángulo de la trayectoria del pozo cambia más de 90°. Sus resultados mostraron que este daño puede ser descartado en comparación con el daño por fatiga de ciclo bajo fuera del pozo.

Por otro lado, Bi y Xian en 2013 [10] desarrollaron un modelo para predecir el comportamiento de fatiga del CT sujeta a condiciones variables de deformación total basado en una regla de daño acumulativo no lineal de disipación de energía de histéresis efectiva. La energía de deformación plástica cíclica se mide por el área de la curva de tensión-deformación cíclica. Los parámetros relacionados se obtuvieron a partir de pruebas de fatiga que se realizaron bajo amplitud de deformación constante. Los resultados obtenidos son consistentes con los hallados experimentalmente. Más recientemente en 2019, Shaohu et al. [11] desarrolló un esquema de cálculo para la vida útil de fatiga de CT bajo presión interna basado en la combinación de investigación teórica, estudio experimental y cálculo numérico, utilizando una tensión equivalente en la ecuación de Manson-Coffin. Sus resultados estuvieron en buena concordancia con los datos experimentales de vidas de ciclo de fatiga bajo diferentes presiones, pero despreciaron la presencia de tensiones medias.



En este trabajo se busca analizar la influencia de la tensión media en la vida a la fatiga del CT producida por la presión interna y el esfuerzo de tracción que produce el motor hidráulico que impulsa el carretel. El análisis se realiza a través de los modelos de estimación de vida Manson-Coffin (MC), Manson-Halford (MH) y Smith-Topper-Watson (SWT) [12, 13, 14]. Los resultados experimentales corresponden con datos disponibles en la bibliografía.

## 2. MARCO TEÓRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE VIDA A LA FATIGA

Para la estimación de la vida a la fatiga de bajo ciclo del CT es importante caracterizar los ciclos en los cuales se produce deformación plástica. Las mayores tensiones debido a la flexión que presenta el tubo se producen durante su paso por el carretel (Figura 1.b, 0-1 y 5-0) y por el cuello de ganso (Figura 1.b, 2-3 y 3-4). En cada una de estas instancias, el tubo es flexionado hasta un radio de curvatura determinado por la estructura y luego enderezado superando la tensión de fluencia y, repitiéndose el proceso cada vez que el tubo es colocado y retirado de un pozo. La deformación  $e$  impuesta sobre el CT se calcula a partir de la Ecuación (1) donde  $D_e$  es el diámetro externo del CT,  $t$  es el espesor de pared y  $R$  es el radio de flexión correspondiente a la instancia en la que se está evaluando ( $R_c$  para el carretel y  $R_g$  para el cuello de ganso). Las tensiones axiales  $\sigma_{af}$  dependientes de la deformación impuesta durante la flexión pueden calcularse a través de la Ecuación de Ramberg-Osgood (Ec. (2)) donde  $K'$  y  $n'$  son parámetros del material caracterizados en un ensayo de tracción simple [15].

$$e = \frac{D_e - t}{2R} \quad (1)$$

$$\sigma_{af} = K'(e)^{n'} \quad (2)$$

Las tensiones axiales, circunferenciales y radiales ( $\sigma_{ap}$ ,  $\sigma_{cp}$  y  $\sigma_{rp}$ ) debidas a la presión interna se calculan utilizando la hipótesis de tubo de pared delgada. Además, dentro de las tensiones axiales  $\sigma_a$  se considera la producida por la flexión en la deformación impuesta ( $\sigma_{af}$ ). Por lo tanto, la tensión equivalente de Von Mises  $\sigma_{eq}$  para el estado de máxima sollicitación resulta:

$$\sigma_a = \sigma_{ap} + \sigma_{af}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_a - \sigma_{cp})^2 + (\sigma_{cp} - \sigma_{rp})^2 + (\sigma_{rp} - \sigma_a)^2} \quad (3)$$

A partir de esta tensión equivalente se calcula la deformación plástica equivalente utilizando nuevamente la Ecuación (2) pero despejando  $e_p$ :

$$e_p = \left( \frac{\sigma_{eq}}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (4)$$



Pese a que el CT sometido a presión interna no alcanza valores de deformación plástica en las direcciones radiales y circunferenciales, el estado multiaxial analizado si lo alcanza produciendo un estado de plastificación. El endurecimiento por deformación no es tenido en cuenta en este trabajo. La deformación equivalente del estado multiaxial se considera a través de la ecuación de Prandtl-Reuss que tiene mejor soporte experimental en metales [16]:

$$e_{eq} = \frac{2}{3}e_p \quad (5)$$

## 2. 1. Modelos de estimación de vida a la fatiga

La amplitud de la deformación equivalente  $\varepsilon_p$  que ocurre en cada ciclo de flexión se utiliza en los modelos de predicción de vida a la fatiga. El modelo Basquin-Manson-Coffin (BMC), que se muestra en la Ecuación (6), estima los  $N$  ciclos de vida a la fatiga a partir de cinco propiedades del material: el módulo elástico  $E$ , el coeficiente de resistencia a la fatiga  $\sigma'_f$ , el exponente de resistencia a la fatiga  $b$ , el coeficiente de ductilidad  $\varepsilon'_f$  y el exponente de ductilidad  $c$ .

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma'_f}{E}(N)^b + \varepsilon'_f(N)^c \quad (6)$$

El modelo BMC en su formulación original no considera la influencia de la tensión media durante los ciclos de servicio de pozo. El modelo MC propuesto por Shaohu et al. [11], en el cual se utiliza únicamente el segundo término de la Ecuación (6) (parte plástica) y que es utilizado en este trabajo considera la influencia de la tensión media a través de formulación de la tensión equivalente (Ecuación (3)) del estado multiaxial. Por otro lado, el modelo de Manson-Halford (MH), que se muestra en la Ecuación (7), presenta una modificación adicional en la cual se considera la existencia de una tensión media  $\sigma_m$  explícitamente en el cálculo de la vida a la fatiga. Cabe aclarar que solo se hará uso de los términos de deformación plástica de ambos modelos.

$$\varepsilon_p = \varepsilon'_f \left( \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{\frac{c}{b}} (N)^c \quad (7)$$

El modelo SWT (Ecuación (8)) puede ser aplicado reemplazando el parámetro que considera la amplitud de la tensión por la amplitud de la deformación [17]. El producto de la tensión máxima  $\sigma_{max}$  y la amplitud de deformación,  $\varepsilon_a$ , otorga una idea de la influencia de ambas magnitudes en la vida a la fatiga. El valor de la tensión máxima es la suma de la amplitud de tensiones y de la tensión media. En el modelo SWT se asume que el producto  $\sigma_{max}\varepsilon_a$  se mantiene constante para diferentes combinaciones de tensiones y deformaciones.

$$\sigma_{max}\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E}(N)^{2b} + \sigma'_f\varepsilon'_f(N)^{b+c} \quad (8)$$



Por otro lado, para considerar la influencia del daño acumulado de las diferentes etapas de flexión en cada ciclo, se utiliza la regla de daño acumulado Palgrem-Miner [18] que se muestra en la Ecuación (9) en donde  $N_t$  es el número de ciclos de vida a la fatiga considerando la influencia de los ciclos de vida por el paso en el cuello de cisne  $N_g$  y el paso por el carretel  $N_c$ .

$$N_t = \frac{1}{N_c} + \frac{2}{N_g} \quad (9)$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio de los modelos presentados se aplica a diferentes CT comerciales: QT 700, QT800, HS90 y HS110. Las propiedades mecánicas (Tabla 1) y datos experimentales sobre la vida a la fatiga de los CT se pueden encontrar en la bibliografía [2, 19, 20, 21].

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material estudiado [22].

	$\sigma_y$ [MPa]	$E$ [GPa]	$K$ [MPa]	$n$	$\sigma'_f$ [MPa]	$e'_f$	$b$	$c$
<b>HS-110</b>	<b>758.42</b>	<b>167.14</b>	<b>898.32</b>	<b>0.0749</b>	<b>1291.87</b>	<b>0.5</b>	<b>-0.1205</b>	<b>-0.75</b>
<b>QT-800</b>	<b>551.58</b>	<b>155.22</b>	<b>765.46</b>	<b>0.0957</b>	<b>966.58</b>	<b>0.7857</b>	<b>-0.1064</b>	<b>-0.7549</b>
<b>QT-700</b>	<b>482.63</b>	<b>157.96</b>	<b>665.83</b>	<b>0.0673</b>	<b>1025.73</b>	<b>1.0902</b>	<b>-0.143</b>	<b>-0.1757</b>

Para una primera validación de los modelos propuestos, se estudia un QT700 [19] con un diámetro externo de 1.5" y un espesor de pared de 0.109 pulgadas. El ensayo se considera realizado en escala real siendo el radio del carretel 60" y el radio del cuello de ganso 50", para. En la figura 2 puede observarse la buena concordancia de los valores estimados a partir de la regla de acumulación de daño para los modelos MC y SWT. El modelo MH presenta estimaciones cercanas a los resultados experimentales siendo más conservador que los demás modelos. Además se muestran los resultados obtenidos para la formulación original del modelo MC (Modelo MCU) donde no se analiza el estado multiaxial propuesto de tensiones obteniendo valores muy lejanos a los ensayados.

En el siguiente caso de aplicación se utilizan los datos experimentales en laboratorio publicados por Valdez et al. [20] para un CT HS-110 con un diámetro externo 2" y un espesor 0.204". El radio de la cama de flexión es de 100". Para este caso, no se requiere la aplicación de un modelo de daño acumulado. En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos para los 3 modelos de estimación de falla propuestos y los resultados experimentales obtenidos. Nuevamente, puede observarse un muy buen ajuste de los modelos MC y SWT.

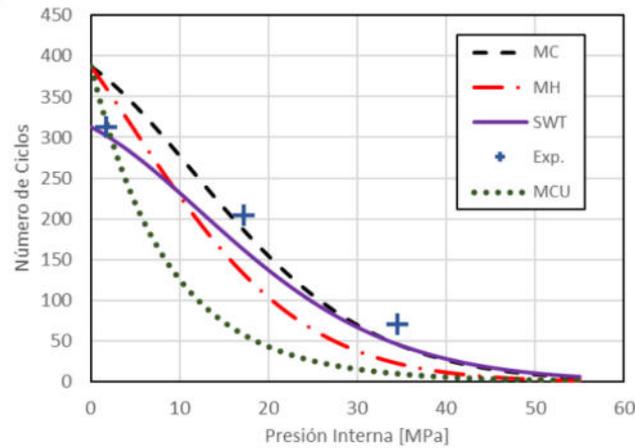


Figura 2: Resultados obtenidos para QT 700 [19].

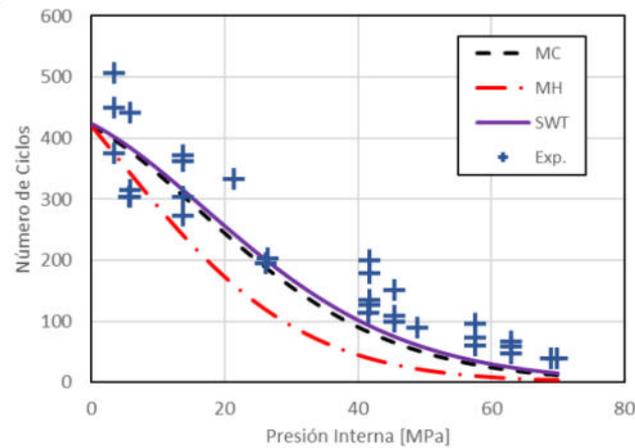


Figura 3: Resultados obtenidos para el HS 110 [20].

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos para un CT HS 110 [21] ensayado en condiciones reales de pozo de operación con un radio de carretel de 96" y radio de cuello de gancho de 120". El diámetro externo del tubo es de 2.375" y su espesor es de 0.204".

Por otro lado, cuando se evalúan las tensiones axiales  $\sigma_a$  se puede considerar el efecto de la tracción del motor hidráulico del carretel ( $\sigma_{am}$ ) entonces la tensión axial en la ecuación 3 estaría dada por:

$$\sigma_a = \sigma_{ap} + \sigma_{am} + \sigma_{af}$$

En la figura 5 puede observarse la influencia de una tracción constante del carretel en la vida a la fatiga del CT. Esta influencia se evalúa a través de los modelos SWT y MC ya que fueron los que mejor aproximación mostraron en los estudios anteriores. La tensión de tracción del carretel se utiliza considerando una unidad convencional de servicio de CT y en función del



porcentaje de uso de dicha fuerza calculada por estimación del torque del motor hidráulico del mismo. Actualmente no se encuentran datos experimentales que permitan constatar la influencia de la tensión aplicada en el carretel, ni se pueden obtener registros sobre la magnitud de la carga utilizada en los ensayos debido a la confidencialidad de las empresas de servicio petrolero.

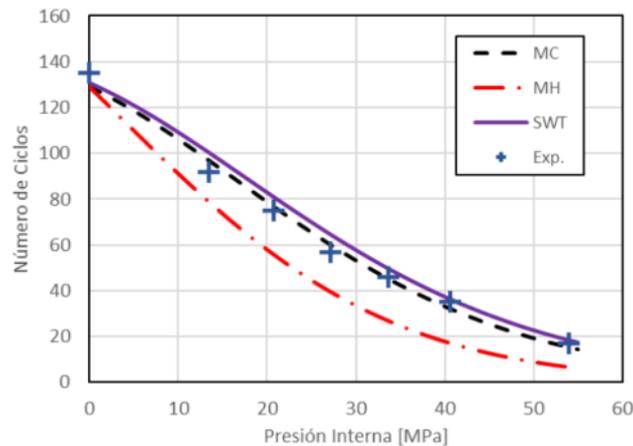


Figura 4: Resultados obtenidos para HS 110 [21].

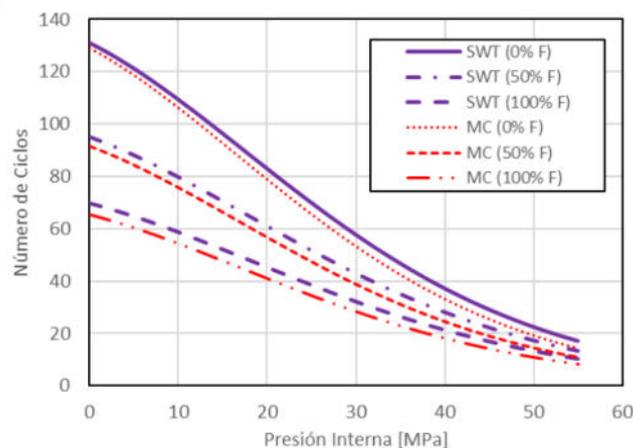


Figura 5: Resultados obtenidos para HS 110 considerando influencia del carretel.

De los casos estudiados puede observarse como los modelos MC y MH presentan comportamientos similares con un valor bajo de tensión media mientras que para valores mayores comienzan a mostrar mayores discrepancias. El modelo SWT en cambio presenta un comportamiento diferente para cada una de las situaciones analizadas presentando una mejor correlación con los datos experimentales encontrados en la bibliografía.



#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se realizó un estudio del estado del arte en cuanto a la estimación de la vida a la fatiga de bajo ciclo en CT. Se analizó el comportamiento para diferentes CT a partir de modelos empíricos de estimación de vida a la fatiga de bajos ciclos. Los modelos MC y SWT fueron los que presentaron mejor concordancia con los resultados experimentales disponibles. La modificación implementada para el modelo MC para considerar el estado multiaxial de tensiones otorga resultados que ajustan muy bien a los diferentes casos estudiados. El uso de esta modificación en el modelo MH tiende a sobreestimar el daño debido a la tensión media generando discrepancias más notorias. El posterior análisis de la tensión del carretel nos da indicios de como una tensión media aplicada en todo el proceso influye en la vida del CT. Estos resultados nos sirven para poder proponernos como trabajo futuro el diseño de un dispositivo capaz de realizar ensayos de fatiga de bajo ciclo para la validación y el estudio de sollicitaciones aún más complejas.

#### REFERENCIAS

- [1] Wainstein J., Perez Ipiña J "Fracture toughness of HSLA coiled tubing used in oil well operations" Journal of Pressure Vessels Technology, Vol. 134, Issue 1, 2012.
- [2] V.A. Avakov, J.C. Foster, E.J. Smith, "Coiled tubing life prediction" 25 Annual OTC, Houston, Texas, USA, 1993.
- [3] K. Newman, S. David, and A. Mick, "Rotation of Coiled-Tubing" Proceedings of SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, Texas, Society of Petroleum Engineers, Paper ID: SPE-60737-MS , 2000.
- [4] D. C. Headrick, y R. S. Rosine. "Full-Scale Coiled Tubing Fatigue Tests with Tubing Pressures to 15,000 Psi." Paper presented at the SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, Texas, May 1999.
- [5] D. Newburn, S. Tipton, *Plasticity and Fatigue Damage Modeling of Severely Loaded Tubing*, ASTM International, 1992.
- [6] D. Newburn, *Strain measurement and damage analysis in low-cycle multiaxial fatigue*. (Retroactive coverage), Fatigue 90 (1990) 417–422
- [7] D. F. Socie, "Multiaxial fatigue Damage models" Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of ASME, Vol 109, 1987, pp 293-298.
- [8] S.M. Tipton, P.A. Brown, "Monitoring Coiled tubing Fatigue Life" 2°International Conference on Coiled Tubing Operations, Gulf Publishing Company and World Oil, Texas (1994)



- [9] S.M. Tipton, G.H. Carlson, J.R. Sorem, "Fatigue Integrity analysis of rotating Coiled tubing, SPE 100068, 2006.
- [10] Z. Y. Bi, L. Y. Xian, Lcf life prediction model of coiled tubing based on fatigue damage accumulation 699 (2013) 426–431
- [11] L. Shaohu, G. Feng, W. Xianjin, X. Hui, W. Zhen, Y. Ting, Theoretical and experimental research of bearing capacity and fatigue life for coiled tubing under internal pressure, Engineering Failure Analysis, 104, 1133–1142, (2019)
- [12] S. S. Manson, "Behavior of materials under conditions of thermal stress." (1953).
- [13] Manson, S.S., Halford, G.R. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage. Int J Fract 17, (1981).
- [14] Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. H. A stress-strain function for the fatigue of materials. J. Mater. 5, 767–778 (1970)
- [15] A.E. Matusevich, R.A. Mancini, J.C. Massa, "Determinación del exponente n de endurecimiento por deformación mediante un algoritmo de mínimos cuadrados ponderados", II CAIM 2010, (2010)
- [16] J. Lubliner: Plasticity Theory, Macmillan Publishing Company, (1990)
- [17] A. Ince and G. Glinka, A modification of Morrow and Smith–Watson–Topper mean stress correction models, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, (2011)
- [18] H.A. Miner, Cumulative Damage in Fatigue, J. of Applied Mechanics, ASME, V (1945)
- [19] Newman, K.R., and D.A. Newburn. "Coiled-Tubing-Life Modeling." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October (1991)
- [20] M. Valdez, C. Morales, R. Rolovic, B. Reichert, The Development of High-Strength Coiled Tubing with Improved Fatigue Performance and H<sub>2</sub>S Resistance (2015).
- [21] Blue Coil Technology Version 02, Tenaris, (2017)
- [22] S. M. Tipton, Achilles 4.0 CT fatigue life prediction algorithm (1998)



## CABLES DE ACERO: MONITOREO DE SU INTEGRIDAD MEDIANTE LA TÉCNICA DE EMISIÓN ACÚSTICA

Pablo G. Varela <sup>1</sup>, Rodrigo E. de Prada <sup>2</sup>, Leandro D. Giorgetti <sup>3</sup>,  
Martín A. Kunusch Micone <sup>4</sup>, Diego D. Gallo <sup>5</sup>, Ariel H. Manelli <sup>6</sup>

Laboratorio de Ensayos de Materiales – Fac. de Ingeniería – Universidad Nac. de Río Cuarto

<sup>1</sup> pvarela@ing.unrc.edu.ar.

<sup>2</sup> rodrigodeprada@ing.unrc.edu.ar

<sup>3</sup> lgiorgetti@ing.unrc.edu.ar

<sup>4</sup> mkunusch@ing.unrc.edu.ar

Laboratorio de Máquinas Térmicas – Fac. de Ingeniería – Universidad Nac. de Río Cuarto

<sup>5</sup> dgallo@ing.unrc.edu.ar

<sup>6</sup> amanelli@ing.unrc.edu.ar

Ruta Nac. 36 km. 601, Río Cuarto (Cba.), Argentina

### RESUMEN

Los cables de acero utilizados para izaje son elementos estructurales que tienen diversas aplicaciones tanto en el ámbito de la ingeniería industrial, como la marítima y civil. En general, consisten de varios alambres de acero trenzado que forman una estructura con enormes propiedades mecánicas que combinan resistencia axial, rigidez y flexibilidad.

En la mayoría de sus aplicaciones, los cables se encuentran sometidos a diferentes esfuerzos y sollicitaciones, los cuales pueden provocar la prematura avería de los componentes del cable y consecuentemente, la falla repentina e inesperada del mismo.

La rotura de un cable implica problemas serios de seguridad, que pueden afectar la vida de personas, como así también provocar daños en los elementos que son izados.

El presente trabajo propone el empleo de la técnica de Emisión Acústica (EA) para realizar el monitoreo y la detección de fallas en cables de acero durante ensayos de tracción. Para ello se efectuaron diferentes experiencias que involucraron someter probetas de cables de acero a ensayos de tracción, y simultáneamente realizar el monitoreo mediante la técnica de Emisión Acústica.

Las experiencias permitieron comprobar las enormes ventajas del empleo de la Técnica de Emisión Acústica ya que posibilita efectuar el monitoreo en tiempo real y predecir el instante en que ocurre la rotura de diversos alambres componentes del cable de acero; lo que puede provocar la falla de todo el cable, pudiéndose evitar esto último, y las nefastas consecuencias que ello puede acarrear.

**Palabras Clave:** Cables de acero, Cables de Izaje, Emisión Acústica



## 1. INTRODUCCIÓN

El uso efectivo de los cables de acero se remonta al año 1836 gracias a los trabajos del ingeniero Wilhelm Albert. Desde entonces, el uso de estos cables ha experimentado un gran crecimiento y ha tenido efectos significativos en diversas aplicaciones industriales, como la elevación de cargas, puentes colgantes, ascensores, remolques de embarcaciones, etc. Tienen enormes propiedades mecánicas que combinan una capacidad para soportar importantes cargas axiales, una rigidez torsional y flexibilidad a la flexión [1]. Además, a diferencia de otras estructuras como las barras, los cables metálicos constan de varios elementos; su composición ofrece la ventaja de no romperse repentinamente [2]. Por lo tanto, pueden cumplir su tarea a pesar de tener algún daño en uno o más componentes. Este punto es muy importante para asegurar que el cable sea resistente en el sentido de que sea tolerable a sufrir daños locales que se manifiestan, principalmente, en hilos o hebras rotos [3].

Tradicionalmente, los cables de acero se ponen en marcha con la aplicación de una carga de prueba de pretensado inicial y se recalifican mediante una inspección periódica de prueba. Durante el servicio, el operador utiliza el cable a la carga de trabajo segura (SWL - Safe Working Load) predeterminada, normalmente el 50 % de la carga de prueba, durante un período de tiempo específico. Luego se lleva a cabo una inspección periódica, seguida de la aplicación adicional de una carga de prueba. La práctica industrial actual establece que si un cable resiste un porcentaje de sobrecarga establecido de su SWL, entonces ese cable se considera "adecuado para el propósito" y seguro para un uso continuado [4].

El principio general de la carga de prueba se basa en la idea de que, si una estructura contiene una falla críticamente significativa, durante la aplicación de una carga de prueba, la estructura fallará catastróficamente. En razón de ello, si la prueba se realiza a intervalos periódicos, se puede usar para eliminar estructuras débiles. La literatura varía ampliamente en su opinión sobre las pruebas de calidad, puesto que hay autores que aseguran que las pruebas a menudo proporcionan una sensación de confianza infundada en una estructura; mientras que otros investigadores informan que las pruebas periódicas aumentaron sustancialmente la vida útil a la fatiga, en Cables de Acero [4].

Existe un factor adicional relacionado con lo expuesto. Efectivamente, las propiedades mecánicas y la vida útil de los cables de acero están determinadas por las condiciones en las que se operan los dichos cables. El empleo de cables de acero como componentes clave de varios equipos marinos ha traído además de la amplia gama de beneficios también una serie de nuevos problemas. Una preocupación son los problemas asociados a la corrosión que surgen debido al ambiente agresivo en el que trabajan los cables de acero. El comportamiento mecánico de los cables expuestos a ambientes corrosivos, como agua de mar o productos químicos, puede verse alterado por la corrosión en la medida en que dejen de ser fiables bajo carga y su fallo



puede acarrear graves consecuencias. Los cables de acero se utilizan a menudo en entornos corrosivos, por ejemplo ambiente costero o marino, donde es común el deterioro por humedad del aire, y agua de mar agresiva. Además, los cables expuestos a la corrosión también están muy solicitados mecánicamente. Debido a la corrosión los cables sufren una rápida degradación y es necesario conocer su comportamiento frente a agentes corrosivos, para garantizar su funcionamiento seguro. La corrosión y degradación de los materiales de acero ha sido objeto de varios estudios y proyectos de investigación.

Para la realización de las pruebas mecánicas, existen normas nacionales e internacionales. Por ejemplo, en normas nacionales: Norma IRAM 3923-1, relacionada con la seguridad en equipos de izaje; inspecciones, métodos de ensayo y mantenimiento [5]; y Norma IRAM 3920:1999, que trata sobre seguridad en equipos de izaje, condiciones generales para la operación y la calificación del personal [6]. Ejemplos de normas internacionales son: Norma ASME B30.10-2005, relacionada con seguridad para cablecarriles, grúas, derrick (cabrias), elevadores, ganchos, gatos y eslingas [7]; y Norma ISO 4344, que establece requisitos mínimos para cables de acero para ascensores [8].

Además de las pruebas con la aplicación de cargas mecánicas mencionadas precedentemente, otras técnicas han sido desarrolladas. Un ejemplo de ello es la técnica de ensayo de medición de flujo magnético. Este método se usa ampliamente para la inspección de acero pretensado y postensado y para la verificación de cables de acero, a los efectos de determinar el número de alambres dañados. Este método asegura alta precisión y sensibilidad y es una técnica de inspección muy confiable para cables de acero. Sin embargo, la técnica solo es aplicable a la prueba de cables de acero relativamente delgados (de diámetros de hasta unos pocos centímetros) y es muy sensible a la forma en que se ha magnetizado el cable de acero.

Un método prometedor para la inspección de cables de acero puede ser la aplicación de ondas guiadas ultrasónicas (UGW - Ultrasonic Guided Waves), ya que se propagan largas distancias incluso en materiales de alta atenuación y son sensibles a los defectos superficiales e internos [9]. Los cambios en las propiedades de los cables metálicos afectan las formas de onda de las señales ultrasónicas capturadas desde la estructura. Aun así, la investigación ultrasónica de cables de acero es una tarea desafiante de Ensayo No destructivo (END) que es bastante complicada. Múltiples capas y diferentes números de alambres en distintas cuerdas pueden causar fenómenos como la dispersión y la existencia de muchos modos de onda diferentes; Resolver el problema requiere una comprensión de la propagación de ondas en estructuras helicoidales cilíndricas complicadas e interacciones de ondas con defectos. Determinar si solo se inspecciona la capa externa o las capas externa y más profunda del cable depende de cómo se excitan las ondas en una hebra.



Otro método muy interesante para verificación de cables, perteneciente al grupo de ensayos no destructivos, es la técnica de Emisión Acústica. Efectivamente, se han efectuado pruebas de carga ascendente y pruebas de fatiga en cables de acero, y se encontró que se podía obtener advertencia de falla inminente en ambas condiciones [4]; realizándose al mismo tiempo, esfuerzos tendientes a discriminar entre las señales de emisión acústica genuinas y el ruido de fondo. Se concluyó que las señales de Emisión Acústica de gran amplitud podrían estar asociados con fracturas, obteniéndose una correlación entre dichas señales y las roturas de cables. Además, se sugirió que el contenido de energía de las señales de los transductores acústicos resultantes de roturas de cables no se atenuaría mucho a lo largo de un cable y debería ser detectable desde una distancia de 30 m. Sin embargo, los estudios de emisión acústica en cables metálicos se ven complicados por los diversos modos de propagación de ondas elásticas, asociado con que la fricción entre hebras en los cables podría causar un ruido de baja amplitud excesivo y, por lo tanto, interferencia. Sin embargo, las técnicas modernas de procesamiento de señales, pueden resolver el problema, logrando separar aquellas señales que no acarrean información útil.

La literatura reporta numerosas experiencias realizadas en laboratorio, con equipamiento de Emisión Acústica destinado para tal fin. En virtud de lo expuesto, la investigación experimental expresada en este documento buscó mejorar los procedimientos de prueba de calidad al incluir equipamiento de laboratorio, y equipamiento portátil de Emisión Acústica. Se realizaron experiencias sometiendo a varios cables a estado tensional de tracción, monitoreando el procedimiento con dichos equipos de Emisión Acústica, empleando diversos transductores acústicos situados en la máquina de ensayos. El objetivo inicial era establecer vínculos entre las señales acústicas durante un ensayo de carga de prueba y la presencia de defectos en el cable.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

A los efectos de cumplir con el objetivo planteado, la parte experimental consistió en la realización de ensayos de tracción sobre muestras de cables de aluminio y de acero. Dichos cables fueron situados en una máquina universal de ensayos marca Amsler, modelo 6PZD 1406, para aplicar esfuerzos de tracción, tal como se muestra en la Figura 1.

Se procedió entonces a la realización de los ensayos de tracción, en cada cable; y al mismo tiempo, la instrumentación con equipos de Emisión Acústica.

Para la obtención de señales de Emisión Acústica, fueron utilizados dos equipos: uno de laboratorio y otro portátil.

El equipo de laboratorio utilizó a su vez, dos sensores comerciales de EA para este estudio, los modelos R15I y WDI de Physical Acoustics Corporation. Los sensores fueron anclados al sistema



de mordazas de la máquina de ensayo utilizando cera sintética para asegurar una fijación adecuada. Los sensores fueron conectados a un sistema de adquisición de datos para Emisión Acústica marca Physical Acoustics Corporation, modelo "PCI-2 Based AE System". El sensor R15I fue conectado directamente a la placa, mientras que el sensor WDI requirió de un preamplificador externo.



Figura 1: Montaje del cable en la máquina de ensayos. Se observan los sensores de EA

El equipo portátil utilizó un sensor comercial de EA modelo GIS35 de QingCheng AE Institute (Guangzhou) Co., Ltd. Dicho sensor también fue anclado a la máquina de ensayo con en los anteriores para asegurar una fijación adecuada. El sensor fue conectado a un equipo de la citada marca QingCheng AE Institute (Guangzhou) Co., Ltd., modelo SVLD1, que es un equipo originalmente desarrollado para la detección de fugas en válvulas. El mencionado sensor fue conectado directamente al equipo portátil. El equipo empleado se puede apreciar en la Figura 2.



Figura 2: Equipo portátil de EA para detección de fugas en válvulas



Un evento de Emisión Acústica (hit) idealizado se muestra en la Figura 3. Características tales como: conteo de ondas, conteo de eventos, análisis de frecuencia y análisis de amplitud, han sido utilizados a los efectos de decodificar la información que posiblemente los eventos de Emisión Acústica lleven con ellos.

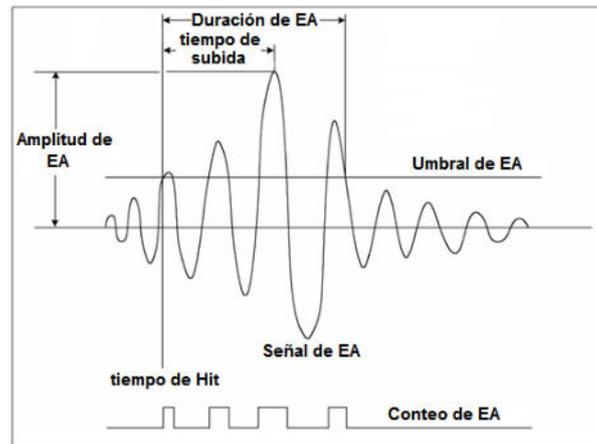


Figura 3: Diagrama de extracción de características de un Hit de Emisión Acústica

Con esta configuración y empleando el equipo de laboratorio, se pudo registrar en un ordenador personal, el número de eventos, sus amplitudes y el número de ondas de cada evento. Las ondas elásticas generadas cuando la muestra reacciona a los efectos de disminuir su energía interna, viajan como señales acústicas en todas las direcciones y pueden detectarse por los sensores instalados, los cuales convierten las ondas acústicas en tensión eléctrica de baja amplitud. Las señales de ambos sensores fueron pre-amplificadas. El contenido no correlacionado debido a ruido asociado a defectos de acoplamiento en el montaje, vibraciones mecánicas de la máquina de ensayos, ruido electrónico y ambiente, etc., fue filtrado.

El procesamiento de las señales de Emisión Acústica obtenidas con el equipo de laboratorio, fue realizado con el software "AEWIN", que almacena los datos en forma digital, en función del tiempo. El sistema provee información sobre amplitud de hit y número de ondas por evento.

Cada evento se define cuando se cumplen las condiciones de superar el umbral de tensión establecido, y un tiempo muerto fijo (por ejemplo, el tiempo transcurrido sin superar el umbral de tensión, con el cual se evita la medición de reflexiones y ondas de arribo tardío, mientras que el cruce de umbral próximo define el comienzo de un nuevo evento). De esta manera cada vez que la señal de Emisión Acústica excede el umbral de tensión, se registra un evento, y el siguiente evento será registrado si dentro de la duración del hit establecida y del tiempo de rearmado del sistema de adquisición no hay otro cruce de umbral. El sistema tiene una memoria que cuenta y registra la cantidad de eventos, mientras que otra almacena las amplitudes máximas.



Por su parte, el equipo portátil cuenta con alarma sonora y visual, que cuando se supera el umbral pre-fijado, es accionada, y permite la detección en tiempo real de la aparición de eventos de Emisión Acústica, lo cual refleja la aparición y propagación de defectos en la pieza estudiada, en este caso el cable.

### 3. RESULTADOS

Con la configuración ya mencionada, fueron registradas las actividades de Emisión Acústica producidas por la carga de las probetas. El monitoreo de los eventos de EA de las muestras bajo carga, puede dividirse en dos etapas. En la primera etapa, el daño (una discontinuidad activa) dentro de la muestra produce un evento acústico (la emisión de energía acústica) que propaga a través del material y llega al transductor (sensor). En la segunda etapa, la onda acústica se convierte en una señal electrónica equivalente, y finalmente en una cuenta de Emisión Acústica. Para el caso de los cables analizados, por efecto de la carga tensional aplicada, sería de esperar que aparezca una primera fisura en la hebra del cable, cuya propagación produciría la rotura de dicha hebra. Este fenómeno sobrecargaría las restantes hebras, repitiéndose el fenómeno anterior en cada hebra, hasta la rotura total del cable. Todos estos fenómenos mencionados generan ondas mecánicas que pueden ser detectadas por los sensores de Emisión Acústica, con los equipos debidamente calibrados.

La máquina universal de ensayos, por el esfuerzo aplicado de tracción, permite obtener las curvas de esfuerzo/deformación correspondientes. Al mismo tiempo, el equipo de Emisión Acústica de laboratorio registrar los conteos acumulados de Emisión Acústica. Por su parte, el equipo de Emisión Acústica portátil, es capaz de registrar una sumatoria instantánea importante de eventos de Emisión Acústica.

En todos los casos, se sujetó el cable en la máquina universal de ensayos, mediante las mordazas adecuadas. Como se ha expresado precedentemente, los sensores fueron anclados a la máquina universal de ensayos utilizando cera sintética. Si bien las ondas mecánicas son originadas por eventos que ocurren en el interior del cable, las ondas se propagan a las mordazas, y de allí al resto de la parte de acción de la máquina de ensayos, razón por la cual son detectadas por los sensores. Las muestras fueron ensayadas con 200 mm. de distancia entre mordazas, y en todos los casos las roturas se produjeron en el tercio central de la probeta, sin influencia de las mordazas. Fueron realizadas tres experiencias, como se detalla a continuación:

#### 3.1. Experiencia #1: Cable de acero de 3 hebras

Se realizó la carga de tracción de un cable de acero de 3 hebras confeccionado de acuerdo a la Norma NBR 8121 [10] (diámetro de hebras: 3,26 mm.), obteniéndose las curvas que se pueden



observar en la Figura 4. En este caso, una vez que rompió una hebra, se detuvo la aplicación de la carga, y también el registro de conteo de Emisión Acústica.

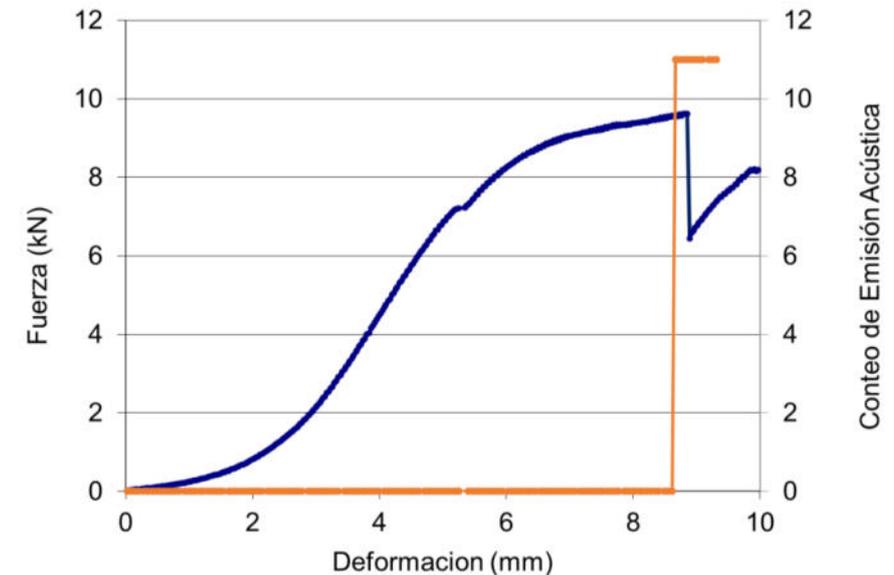


Figura 4: Curva esfuerzo/deformación y conteo de EA de cable de acero de 3 hebras

### 3.2. Experiencia #2: Cable de aluminio de 3 hebras

Se realizó la carga de tracción de un cable de aluminio de 3 hebras según Norma ASTM B549-22 [11] (diámetro de hebras: 3,27 mm.), obteniéndose las curvas que se pueden observar en la Figura 5. En este caso se continuó aplicando la carga hasta la rotura total de la segunda hebra del cable, registrándose también el conteo de Emisión Acústica correspondiente.

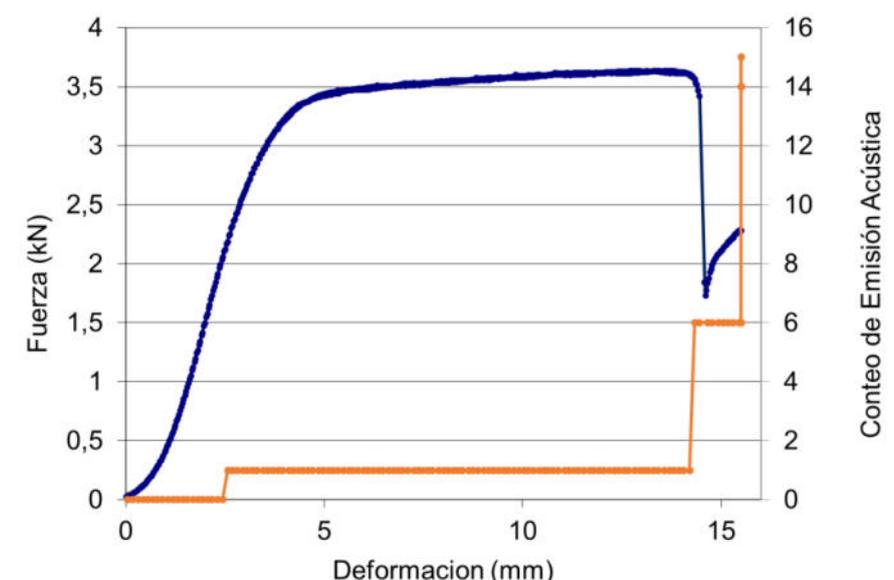


Figura 5: Curva esfuerzo/deformación y conteo de EA de cable de aluminio de 3 hebras

### 3.3. Experiencia #3: Cable de acero de 6 hebras

Se realizó la carga de tracción de un cable de acero de 6 hebras, según Norma IRAM 547 [12] (diámetro de hebras: 2 mm.), obteniéndose las curvas que se pueden observar en la Figura 6. Como en el caso anterior, se continuó aplicando la carga hasta la rotura total del cable.

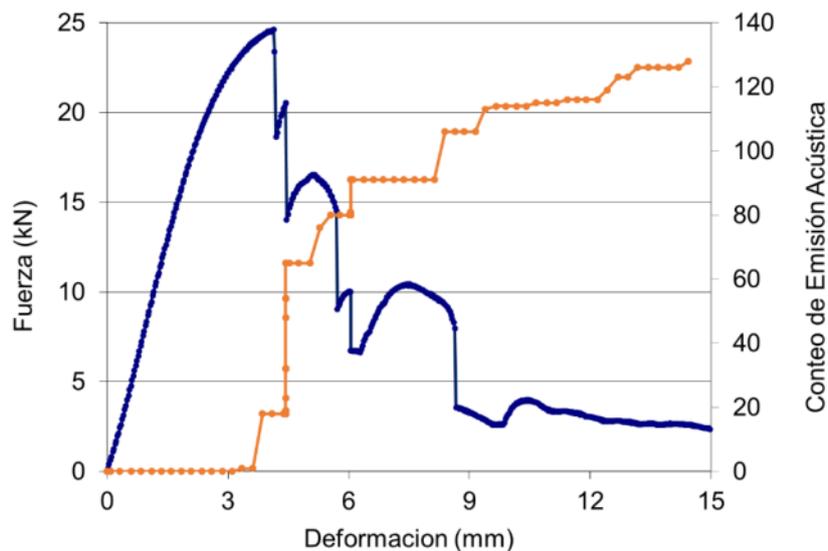


Figura 6: Curva esfuerzo/deformación y conteo de EA de cable de acero de 6 hebras

## 4. DISCUSION

Observando la Figura 4, se puede apreciar que la primera hebra rompió con un estiramiento del cable de algo menos de 9 mm., y con un esfuerzo aplicado de aproximadamente 9,5 kN. La rotura queda puesta de manifiesto por la caída del esfuerzo aplicado, puesto que todos los ensayos fueron realizados con incremento de deformación a velocidad constante. También se puede observar en la citada figura, que antes de que ocurra la rotura de la hebra, ya aparece un importante conteo de Emisión Acústica. Es decir, los instrumentos de Emisión Acústica son capaces de anticipar la rotura de una hebra. Ello se debe a que se produce un acomodamiento de dislocaciones en la hebra, lo cual da origen a una pequeña fisura, la cual se propaga. Todos estos hechos producen ondas mecánicas que son detectadas por los sensores. El equipo de laboratorio de Emisión Acústica es el que registra los datos y permite realizar la gráfica. Por su parte, el equipo portátil de Emisión Acústica acciona en esas instancias, la alarma correspondiente.

Analizando cuidadosamente la Figura 5, se puede apreciar, como en el caso anterior, que el instrumental de Emisión Acústica es capaz de predecir con una pequeña anticipación, la rotura de una hebra del cable. Como este cable tiene 3 hebras, se estudió hasta la rotura de la segunda



hebra. Como en el caso anterior, las roturas quedan en evidencia por la caída del valor del esfuerzo aplicado, y además, por el aumento del conteo de Emisión Acústica.

Por su parte, la Figura 6, que representa el ensayo de un cable de acero de 6 hebras, permite aseverar lo expresado en los ensayos anteriores.

Se han ensayado cables de acero y de aluminio, con comportamientos mecánicos diferentes, y sin embargo se evidencian comportamientos similares de Emisión Acústica.

Sumado a lo anteriormente expuesto, y teniendo en cuenta que el equipo portátil conectado con un pequeño sensor, puede accionar alarma, se tiene un conjunto que puede estar destinado al monitoreo de la integridad de cables sometidos a tensión mecánica.

## 5. CONCLUSIONES

Han sido ensayados tres cables diferentes, incluso de distinto material (acero y aluminio), sometiéndolos a esfuerzo de tracción; y simultáneamente se ha registrado la actividad de Emisión Acústica que dichas probetas generaban, con dos tipos de equipos: uno de laboratorio y otro portátil.

En todos los casos, los equipos de Emisión Acústica fueron capaces de predecir la rotura de una hebra del cable, puesto que se incrementaba notablemente el conteo, en instantes previos a la falla.

Se comprueba las ventajas de la utilización de Emisión Acústica, puesto que dicha técnica permite predecir con una ligera anticipación, la pérdida de integridad mecánica de un cable sometido a tensión.

Se puede afirmar que el empleo de la técnica de Emisión Acústica, utilizando equipos de laboratorio o portátiles, permite realizar un monitoreo de la integridad mecánica de un cable sometido a tensión, lo cual redundará en una mayor seguridad de su operación, y a la vez puede complementar perfectamente a los ensayos de rutina que se realizan en los cables.

En un trabajo futuro se podrían realizar ensayos sobre otros tipos y medidas de cables, lo cual permitirá extender la validez de los ensayos realizados en este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] H. Mouradi, A. El Barkany, A. Biyaali. *Investigation on the main degradation mechanisms of steel wire ropes: a literature review*, J. Eng. Appl. Sci. 11, 6, 1206–1217, 2016. [docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/jeasci/2016/1206-1217.pdf](https://docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/jeasci/2016/1206-1217.pdf).



- [2] M. Giglio, A. Manes. *Life prediction of a wire rope subjected to axial and bending loads*. Eng. Fail. Anal. 12, 4, 549–568, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.09.002>.
- [3] Houda Mouradi, Abdellah El Barkany, Ahmed El Biyaali. *Steel wire ropes failure analysis: Experimental study*, Engineering Failure Analysis, 91, 234–242, 2018.
- [4] G. Drummond, J.F. Watson, P.P. Acarnley. *Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatigue testing*, NDT&E International, 40, 94–101, 2007.
- [5] Norma IRAM 3923-1. *Seguridad en equipos de izaje. Inspecciones, métodos de ensayo y mantenimiento. Parte 1 - Grúas móviles y su construcción y operación*. Instituto Argentino de Normalización. 2009.
- [6] Norma IRAM 3920. *Calificación del personal de equipos de izaje y de equipos de elevación de cargas o de personas*. Requisitos. Instituto Argentino de Normalización. 2022.
- [7] Norma ASME B30.10-2019. *Ganchos. Normas de seguridad para cablecarriles, grúas, derricks (cabrias), elevadores, ganchos, gatos y eslingas*. The American Society of Mechanical Engineers. 2019.
- [8] Norma ISO 4344:2022. *Steel wire ropes for lifts — Minimum requirements*. The International Organization for Standardization. 2022.
- [9] Renaldas Raisutis, Rymantas Kazys, Liudas Mazeika, Egidijus Zukauskas, Vykintas Samaitis, Audrius Jankauskas. *Ultrasonic guided wave-based testing technique for inspection of multi-wire rope structures*. NDT&E International 62, 40–49, 2014.
- [10] Norma Brasileira ABNT NBR 8121. *Cabos de fios de aço revestidos de cobre, nus, para fins elétricos – Especificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021.
- [11] Norma ASTM B549-22. *Standard Specification for Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Aluminum-Clad Steel Reinforced for Use in Overhead Electrical Conductors*. American Society for Testing and Materials. 2022.
- [12] Norma IRAM 547. *Cables de acero para usos generales*. Instituto Argentino de Normalización. 2013.



## MONITOREO DEL PROCESO DE TEMPLE DEL ACERO UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE EMISIÓN ACÚSTICA

Rodrigo E. de Prada <sup>1</sup>, Pablo G. Varela <sup>1</sup>, Leandro D. Giorgetti <sup>1</sup>,  
Martín A. Kunusch Micone <sup>1</sup>, Diego D. Gallo <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Ensayos de Materiales – Fac. de Ingeniería – Universidad Nac. de Río Cuarto  
[rodrigodeprada@ing.unrc.edu.ar](mailto:rodrigodeprada@ing.unrc.edu.ar); [pvarela@ing.unrc.edu.ar](mailto:pvarela@ing.unrc.edu.ar);  
[lgiorgetti@ing.unrc.edu.ar](mailto:lgiorgetti@ing.unrc.edu.ar); [mkunusch@ing.unrc.edu.ar](mailto:mkunusch@ing.unrc.edu.ar)

<sup>2</sup> Laboratorio de Máquinas Térmicas – Fac. de Ingeniería – Universidad Nac. de Río Cuarto  
[dgallo@ing.unrc.edu.ar](mailto:dgallo@ing.unrc.edu.ar)  
Ruta Nac. 36 - km. 601, Río Cuarto, Córdoba, Argentina

### RESUMEN

Este trabajo presenta un método no destructivo para el monitoreo y evaluación del proceso de temple del acero por inmersión utilizando la tecnología de Emisión Acústica. El procedimiento de temple por inmersión está ampliamente difundido en la industria en general, para endurecer el acero y lograr las propiedades mecánicas requeridas.

Durante el temple, ocurren varias etapas de transferencia de calor, cada una de ellas caracterizada por sus propios fenómenos dinámicos de termofluido. Para garantizar una alta calidad de las piezas templadas y la repetibilidad del proceso de producción, se requiere un método de control de calidad, para lo cual se propone la utilización de la tecnología de Emisión Acústica.

La experiencia se llevó a cabo con varias muestras de acero, las cuales fueron inicialmente calentadas a la temperatura de austenización completa, para luego proceder a los enfriamientos en agua y en aceite. Los procesos de calentamiento fueron monitoreados térmicamente mediante la instalación de termocuplas sensoras de temperatura, y los procesos de enfriamiento fueron monitoreados mecánicamente por intermedio de sensores de Emisión Acústica.

Después del temple, se realizaron determinaciones de dureza de las muestras, y se obtuvieron imágenes de las microestructuras obtenidas. Adicionalmente, se efectuaron inspecciones de posibles defectos, mediante tintas penetrantes y ultrasonidos.

Se pudo establecer una interesante correlación entre las características de las señales de Emisión Acústica y las propiedades mecánicas. En función de los resultados obtenidos, se concluye que la tecnología de Emisión Acústica es una forma razonable de monitorear el proceso de temple de acero y las propiedades mecánicas obtenidas en las piezas a las que se le aplicó dicho proceso.

**Palabras Clave:** *Temple del acero, Emisión Acústica*



## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de temple del acero es un proceso muy utilizado en la industria del tratamiento térmico para aumentar las propiedades mecánicas de las piezas componentes de máquinas y equipos, como la dureza, el límite elástico y la resistencia a la tracción. El procedimiento consiste en calentar la pieza a una temperatura por encima de la crítica superior, durante un período de tiempo que depende del tamaño de la misma y luego enfriar rápidamente, utilizando para ello un medio líquido. Durante el calentamiento, tiene lugar una transformación de fase, surgiendo una microestructura austenítica, la cual es requerida para el endurecimiento por enfriamiento rápido. Si la pieza alcanza una velocidad de enfriamiento suficientemente alta, se produce una transformación de fase de austenita a martensita sin difusión, obteniéndose una gran dureza y resistencia, pero también fragilidad [1]. Adicionalmente a esto último está el riesgo de la aparición y propagación de fisuras inducidas por el brusco cambio de temperatura, lo cual hace que la pieza resulte defectuosa e inapropiada para su utilización como componente en un ensamble de máquina o equipo.

Durante el calentamiento del acero, la fase cambia de ferrita a austenita, es decir, cambia la estructura cristalina de BCC (cúbica centrada en el cuerpo) a FCC (cúbica centrada en las caras). En forma austenítica, el acero puede disolver mucho más carbono. Una vez que el carbono se ha disuelto y se ha homogeneizado la estructura austenítica, llega el momento donde el material debe enfriarse rápidamente. Es importante realizar dicho enfriamiento con una alta velocidad para que el carbono no tenga tiempo de formar precipitados de carburos. Cuando la temperatura es lo suficientemente baja, el acero intenta volver a la estructura cristalina de baja temperatura BCC. Este cambio es muy rápido ya que no depende de la difusión, produciéndose la transformación martensítica. Debido a la sobresaturación extrema de la solución sólida de carbono, la red cristalina se convierte en BCT (tetragonal centrada en el cuerpo) en su lugar. Esta fase se llama martensita y es extremadamente dura y resistente, debido a un efecto combinado de la estructura cristalina distorsionada y el endurecimiento extremo de la solución sólida, ambos mecanismos resisten el deslizamiento por dificultar el movimiento de las dislocaciones [2,3].

Durante el proceso de enfriamiento por inmersión, están presentes etapas de transferencia de calor como el contacto inicial, la etapa de aparición de capa de vapor, la etapa de transición, la etapa de ebullición nucleada y la etapa de convección, cada etapa con su propia cinemática de humectación, fenómenos dinámicos de termofluidos [4,5] y una interesante actividad acústica. Estos fenómenos influyen en la uniformidad, distorsión, agrietamiento y tensiones residuales de las piezas de trabajo. Para garantizar una mejor repetibilidad del proceso y calidad de la pieza, las etapas de transferencia de calor deben monitorearse, evaluarse y correlacionarse con las propiedades mecánicas, preferiblemente de forma no destructiva [6].



Por otra parte, la técnica de Emisión Acústica (EA) es un ensayo no destructivo que cada vez tiene mayor interés en la industria, puesto que permite realizar monitoreo en tiempo real de equipos e instalaciones [7]. Los eventos de Emisión Acústica son ondas elásticas transitorias debidas a una liberación repentina de energía de fuentes localizadas dentro de un material, y pueden ser detectados por sensores acústicos colocados en la superficie de la muestra, o en sectores cercanos. Las mediciones de Emisión Acústica se utilizan en la literatura para investigar las transformaciones martensíticas inducidas térmicamente o por deformación en diferentes aceros [6].

Precisamente, para realizar tal monitoreo y una mejor comprensión de los procesos en curso durante el tratamiento térmico de temple, se propone en este trabajo el empleo de la técnica de Emisión Acústica, a los efectos de obtener mejores detalles de la transformación austenita-martensita, y específicamente, tratar de localizar el surgimiento de otros problemas asociados, como la aparición y propagación de fisuras inducidas por el cambio brusco de temperatura y de fases.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

A los efectos de cumplir con el objetivo planteado, la parte experimental consistió en la realización de tratamientos térmicos de temple sobre aceros al carbono IRAM 1045, bajo diferentes condiciones de calentamiento y enfriamiento.

Fueron empleadas probetas de dicho acero de 10 x 10 x 55 mm., utilizadas habitualmente para ensayos de flexión por impacto Charpy. En la Figura 1 se pueden apreciar 4 probetas utilizadas en este trabajo. Las muestras fueron calentadas en horno eléctrico, a temperaturas de 830 y 950 °C. Los medios de enfriamiento fueron: aceite de temple a 20 °C, y agua natural a una temperatura de 0 °C.



Figura 1: Probetas empleadas en los ensayos



Luego del calentamiento y permanencia a temperatura durante 30 minutos, cada probeta se sumergió en el medio de enfriamiento correspondiente, como se puede apreciar en la Figura 2.



Figura 2: Proceso de enfriamiento de temple

Para la obtención de señales de Emisión Acústica, fue utilizado un equipo de laboratorio, el cual empleó a su vez, dos sensores comerciales de EA para este estudio, los modelos R15I y WDI de Physical Acoustics Corporation. Los sensores fueron anclados al recipiente que contiene el medio de enfriamiento para el tratamiento térmico utilizando cera sintética para asegurar una fijación adecuada. Los sensores fueron conectados a un sistema de adquisición de datos para Emisión Acústica marca Physical Acoustics Corporation, modelo "PCI-2 Based AE System". El sensor R15I fue conectado directamente a la placa, mientras que el sensor WDI requirió de un preamplificador externo.

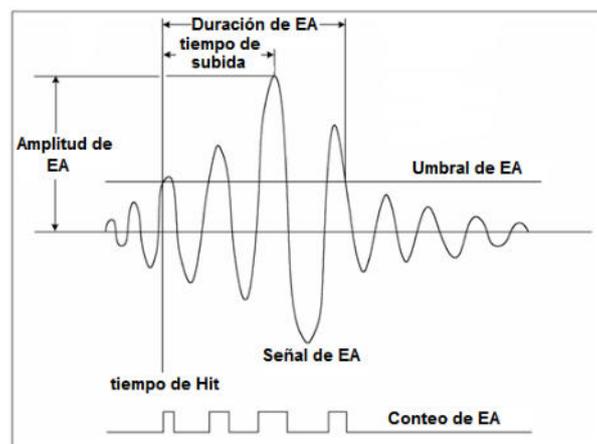


Figura 3: Diagrama de extracción de características de un Hit de Emisión Acústica



Un evento de Emisión Acústica (hit) idealizado se muestra en la Figura 3. Características tales como: conteo de ondas, conteo de eventos, análisis de frecuencia y análisis de amplitud, han sido utilizados a los efectos de decodificar la información que posiblemente los eventos de Emisión Acústica lleven con ellos.

Con esta configuración y empleando el equipo de Emisión Acústica de laboratorio, se pudo registrar en un ordenador personal, el número de eventos, sus amplitudes y el número de ondas de cada evento. Las ondas elásticas generadas viajan como señales acústicas en todas las direcciones, propagándose en el medio de enfriamiento y pueden detectarse por los sensores instalados, los cuales convierten las ondas acústicas en tensión eléctrica de baja amplitud. Las señales de ambos sensores fueron pre-amplificadas. El contenido no correlacionado debido a ruido asociado a efectos del ambiente, vibraciones mecánicas, ruido electrónico, etc., fue filtrado.

El procesamiento de las señales de Emisión Acústica obtenidas fue realizado con el software "AEWIN", que almacena los datos en forma digital, en función del tiempo. El sistema provee información sobre amplitud de hit y número de ondas por evento.

Cada evento se define cuando se cumplen las condiciones de superar el umbral de tensión establecido, y un tiempo muerto fijo (por ejemplo, el tiempo transcurrido sin superar el umbral de tensión, con el cual se evita la medición de reflexiones y ondas de arribo tardío, mientras que el cruce de umbral próximo define el comienzo de un nuevo evento). De esta manera cada vez que la señal de Emisión Acústica excede el umbral de tensión, se registra un evento, y el siguiente evento será registrado si dentro de la duración del hit establecida y del tiempo de rearmado del sistema de adquisición no hay otro cruce de umbral. El sistema tiene una memoria que cuenta y registra la cantidad de eventos, mientras que otra almacena las amplitudes máximas.

A los efectos de la experimentación, fueron utilizadas 20 probetas, divididas en dos series:

**Probetas Serie I:** Fueron calentadas a una temperatura adecuada para el tratamiento térmico de temple del acero empleado, es decir 830 °C, cuya temperatura es sugerida por la NORMA IRAM-IAS 1045, y empleándose para el enfriamiento, un aceite de temple a una temperatura de 20 °C; todo ello con el objetivo de obtener un temple adecuado y una pieza sana.

**Probetas Serie II:** Fueron calentadas a una temperatura excesivamente alta de 950 °C, y enfriada en agua a una temperatura excesivamente baja de 0 °C; con el objetivo de inducir fisuras en la pieza, por el choque térmico y por el medio de enfriamiento, que provoca una transferencia de calor a una velocidad mayor que en la otra serie de probetas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los dos juegos de probetas empleadas fueron observados resultados similares en cada uno de ellas. Todas las probetas alcanzaron un buen temple, obteniéndose estructuras

metalográficas como la que se observa en la Figura 4. Se pudo apreciar en todos los casos, una buena estructura martensítica.

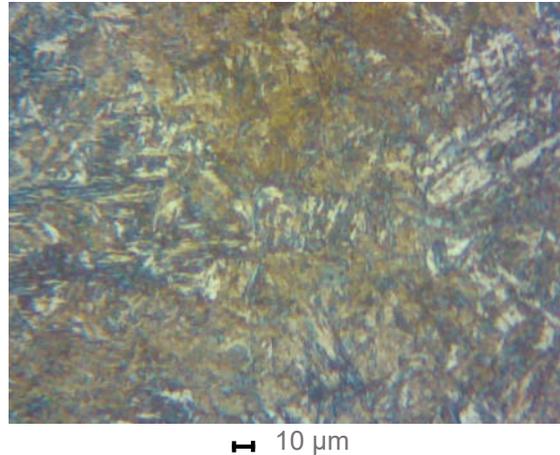


Figura 4: Estructura metalográfica de una probeta templada (300x)

Las probetas correspondientes a la Serie I, que fueron templadas en forma adecuada, con los calentamientos y enfriamientos con medios y temperaturas correctas, obtuvieron una dureza promedio de 44 HRC. En este juego de probetas, una transferencia de calor a velocidad adecuada, reduce las tensiones térmicas y la posibilidad de agrietamiento. Efectivamente, realizando una inspección posterior al tratamiento, con ayuda de microscopio, no fue posible visualizar fisuras emergentes del tratamiento térmico.

Por otra parte, las probetas correspondientes a la Serie II, que sufrieron un temple realizado en forma muy violenta, obtuvieron una dureza promedio 52 HRC, y con altas probabilidades de presentar fisuras. Ello se puso de manifiesto, puesto que todas las probetas de esta Serie II sufrieron la aparición de una o más fisuras, como la que se puede observar en la figura 5.

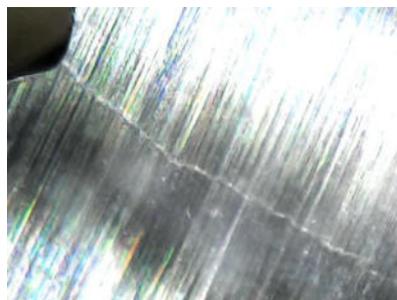


Figura 5: Fisura inducida por temple con parámetros excesivos de calentamiento y enfriamiento

La cinemática de humectación durante el enfriamiento en una pieza que se está templando se detalla a continuación. Inicialmente, ni bien se sumerge la pieza caliente en el medio de



enfriamiento, la temperatura del medio circundante aumenta bruscamente, superándose la temperatura crítica de sobrecalentamiento del mismo, formándose una delgada película aislante de vapor en la superficie de la pieza. En esta etapa, la transferencia de calor ocurre con radiación y conducción a través de la capa de vapor, lo que resulta en una velocidad de enfriamiento lenta e inestable y la posibilidad de puntos blandos en el material.

Seguidamente existe la etapa de transición, que ocurre cuando la temperatura de la superficie de la pieza cae por debajo de la temperatura de rehumectación, también conocida como efecto Leidenfrost. Durante la etapa de transición, la capa de vapor colapsa parcialmente, se rompe y entra en ebullición, humedeciendo temporalmente la superficie de la muestra. La tasa de enfriamiento más alta ocurre cuando la ebullición de transición cambia a ebullición nucleada.

Luego aparece la etapa de transferencia de calor por convección natural. En este estado, la temperatura de la superficie de la muestra disminuye por debajo de la temperatura de ebullición del medio de temple, lo que da como resultado una humectación completa y una velocidad de enfriamiento más lenta.

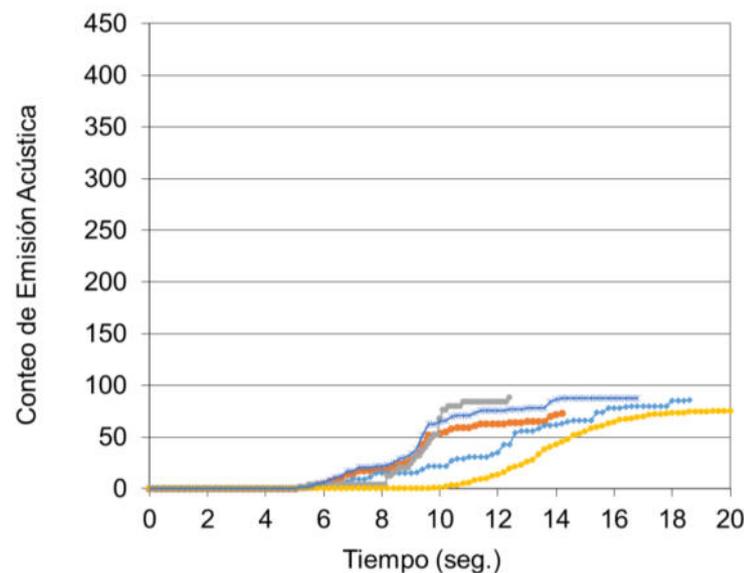


Figura 6: Conteo acumulado de Emisión Acústica, para probetas templadas en aceite

El conteo acumulado de señales de Emisión Acústica se define como el número de veces que la señal de Emisión Acústica supera un umbral de amplitud predeterminado. Dicho conteo para cinco probetas del primer grupo (Serie I), cuyas muestras fueron templadas en forma adecuada, con los calentamientos y enfriamientos con medios y temperaturas correctas, se presenta en la Figura 6. La medición se inicia con la extracción de la muestra del horno de calentamiento. El contacto inicial con el aceite da como resultado un número bajo de paquetes detectados de



señales de Emisión Acústica. La etapa de transferencia de calor de capa de vapor predominante se caracteriza por la detección de un mayor número de paquetes de señal de Emisión Acústica. La transición a la ebullición nucleada se caracteriza por una disminución de la amplitud máxima de la señal. La ebullición nucleada predominante muestra la mayor duración de la señal en comparación con la etapa de capa de vapor o la etapa de transición. La etapa de enfriamiento por convección natural permanece sin ser detectada con el umbral de amplitud máxima de Emisión Acústica establecido, como se evidencia en la mencionada Figura 6, puesto que no crece en forma significativa el conteo acumulado. Estos resultados coinciden con lo publicado en la literatura, para probetas similares [1,3,6].

Por su parte, la Figura 7 es la representación gráfica del conteo acumulado de Emisión Acústica, para una probeta del segundo grupo (Serie II), es decir aquellas que fueron calentadas a una temperatura excesivamente alta de 950 °C, y enfriada en agua a una temperatura muy baja, lo que llevó a la aparición de fisuras en cada probeta. Observando la Figura 7, y comparándola con la Figura 6, se observa una similitud en el conteo de Emisión Acústica, salvo que en la Figura 7 aparece un conteo muy grande en un tiempo próximo a los 8 segundos, lo cual puede estar induciéndonos a pensar que sería por la aparición y propagación de la fisura.

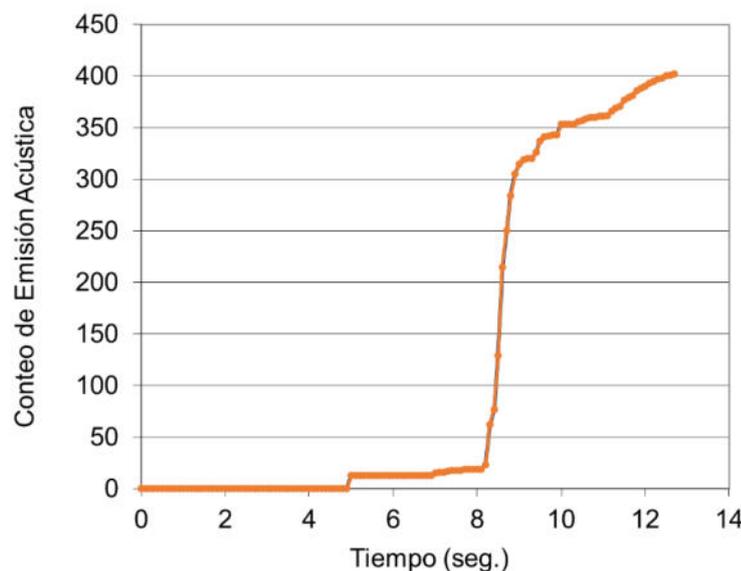


Figura 7: Conteo acumulado de EA, para probetas templadas en agua con sobrecalentamiento

En definitiva, en virtud de los resultados obtenidos, puede afirmarse que la técnica de Emisión Acústica ha sido capaz de detectar una anomalía en el proceso de tratamiento térmico, como lo es la aparición y propagación de una fisura.



#### 4. CONCLUSIONES

Se han efectuado tratamientos térmicos de temple en dos grupos de probetas de acero de forma idéntica, pero en condiciones de calentamiento y enfriamiento diferentes, y simultáneamente se ha registrado la actividad de Emisión Acústica que dichas probetas generaban, durante el proceso de enfriamiento.

El tratamiento térmico de temple del acero fue monitoreado utilizando tecnología no destructiva de Emisión Acústica. Las señales de Emisión Acústica en el enfriamiento por inmersión de una pieza se producen como resultado de una cinemática de humectación específica y fenómenos dinámicos de termofluidos durante las diferentes etapas de transferencia de calor. En un temple normal, sin inconvenientes, apareció un patrón de conteo acumulado de Emisión Acústica, el cual se repitió en todos los temples realizados bajo condiciones normalizadas. Sin embargo, en aquellos temples realizados en condiciones extremas (calentamiento mayor, y enfriamiento más brusco), lo cual indujo la aparición y propagación de fisuras, se obtuvieron otros patrones, con un conteo de Emisión Acústica considerablemente mayor, en un instante preciso.

Se comprueba las ventajas de la utilización de Emisión Acústica, puesto que dicha técnica permite predecir el indeseable fenómeno de la aparición y propagación de fisuras, lo cual implicaría el descarte de la pieza, y ahorraría el tiempo y esfuerzo necesario requerido por una inspección posterior.

#### REFERENCIAS

- [1] Bor Mojskerc, Tomaz Kek, Janez Grum, *Feasibility study of monitoring the steel quenching process using acoustic emission technology*, Applied Acoustics 129,335–345, 2018.
- [2] Alavudeen A., Venkateshwaran N., Winowlin Jappes J.T. *A Textbook of Engineering Materials and Metallurgy*. Laxmi Publications (P) PTD, New Delhi, 2006.
- [3] Nela Polakova, Petr Dostal, Michal Sustr, Jaroslav Zagal, Michal Cerny, *Detection of Hardening Process By Means of Acoustic Emission*, MendelNet, 910-915, 2016.
- [4] Liscic B., Tensi H.M., Canale L.C.F., Totten G.E. *Quenching theory and technology*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, 2010.
- [5] Sinha A.K. *Physical metallurgy handbook*. 1st ed., McGraw-Hill, New York, 2003.
- [6] Bolgar M.K., Nagy E., Daroczi L., Benke M., Mertinger V., and Beke D.L., *Acoustic Emission During Austenite  $\rightarrow$   $\epsilon$  Martensitic Phase Transformation in TWIP/TRIP Steels*, Metallurgical And Materials Transactions A, 50a, 3495-3501, August 2019.



- [7] Aleksandra Krampikowska, Robert Pala, Ihor Dzioba and Grzegorz Swit, *The Use of the Acoustic Emission Method to Identify Crack Growth in 40CrMo Steel*, *Materials*, 12, 2140, 2019; doi:10.3390/ma12132140.



## ANÁLISIS DE FALLA DE UN SOBRECALENTADOR DE UNA CALDERA DE CARBÓN

**Daniela Alessio, Sandra Robles, Mauro Puccinelli, Daniel Ziegler**

Departamento de Ingeniería - Universidad Nacional del Sur  
Avenida Alem 1253, (8000) Bahía Blanca, Argentina - [dalessio@uns.edu.ar](mailto:dalessio@uns.edu.ar);  
[srobles@uns.edu.ar](mailto:srobles@uns.edu.ar); [mauro.puccinelli@uns.edu.ar](mailto:mauro.puccinelli@uns.edu.ar); [dziegler@uns.edu.ar](mailto:dziegler@uns.edu.ar)

### RESUMEN

En el presente estudio se determinan las causas que llevaron a la falla a un sobre calentador de una caldera de carbón del tipo lecho fluidizado para una central de 120 MW, al mes de la puesta en marcha.

En este tipo de caldera cuando se producen pérdidas de vapor, por falla de alguno de los tubos del sobre calentador, la presencia de arena dentro del hogar puede dañar los tubos adyacentes al mismo, afectando la eficiencia y la seguridad de la caldera.

El material de los tubos del sobre calentador es acero del tipo 2 ¼ Cr 1 Mo, dispuesto en 7 paños de 40 tubos, denominados Wingwalls. Para determinar las causas que motivaron la falla se utilizaron varios métodos de análisis, como espectrometría de emisión óptica para determinar las composiciones químicas del metal base y aporte, metalografía óptica y medición de durezas en distintas zonas de los tubos.

Se concluyó que el proceso de soldadura no se realizó siguiendo las normas correspondientes, sin respetar las temperaturas de precalentamiento para la unión entre tubos y en la confección de la pared membrana que forman los paños, lo que generó fisuras prematuras.

**Palabras clave:** Calderas de lecho fluidizado a carbón; Soldadura; Metalografía; Fractura.



## 1. INTRODUCCIÓN

La combustión en las calderas de lecho fluidizado, en su utilización en centrales eléctricas de carbón, se ha mostrado como una alternativa viable, para incrementar la eficiencia del proceso y reducir las emisiones de contaminantes nocivos como NOx y SOx. La combustión se produce a temperaturas en el rango de 800 a 900°C, que es inferior a la correspondiente para la tecnología de combustión del carbón pulverizado. Una temperatura de operación menor significa bajas emisiones y la necesidad de menos equipos para depurar los gases de combustión, mientras se puede quemar una amplia gama de combustibles. Los combustibles quemados en estas calderas incluyen carbón, cáscara de cereales, bagazo y otros residuos agrícolas

En estas calderas la eficiencia de la combustión es mayor que en otros tipos de calderas. Esto se debe principalmente a que las partículas transportadas pasan a un separador compacto o ciclón, donde decantan y retornan al hogar pasando por un conducto de retorno, entrando de nuevo a una zona con alta temperatura y elevada turbulencia en el hogar [1-2].

Sin embargo, las ventajas de la tecnología de estas calderas pueden verse deslucidas por fallos técnicos que se produzcan en la misma. Algunas causas de fallas están vinculadas con la corrosión y otras, a defectos de soldadura y las vibraciones [3-5].

En este trabajo, se presenta el análisis de falla realizado para determinar las posibles causas que condujeron a la rotura en la zona de unión entre tubos que conforman los paños del sobrecalentador de la caldera de lecho fluidizado. Identificar y corregir la causa raíz del fallo de los tubos es fundamental para reducir la posibilidad de problemas futuros.

El sobrecalentador de esta caldera consiste en siete paños denominados pared membrana o Wingwall, cada uno de ellos de 40 de tubos, dispuestos a lo largo de la sección superior de la pared frontal del hogar. Para materializar la pared membrana se vinculan longitudinalmente tubos de 12 m para alcanzar los 18 m y transversalmente, entre ellos, por medio de una cinta para formar el paño. La unión se realiza mediante soldadura con aporte del mismo material que los tubos.

En la Figura 1 se muestra un esquema de la caldera con el sobre calentador. Este diseño es de alto rendimiento con sistema recolector de partículas tipo ciclónico y filtro de mangas. Como se observa en la imagen, en caso de producirse una avería en los Wingwalls, como es un área de difícil acceso, se debe armar una estructura auxiliar o construcción provisional, a partir de la zona indicada como "Lecho Fluidizado".

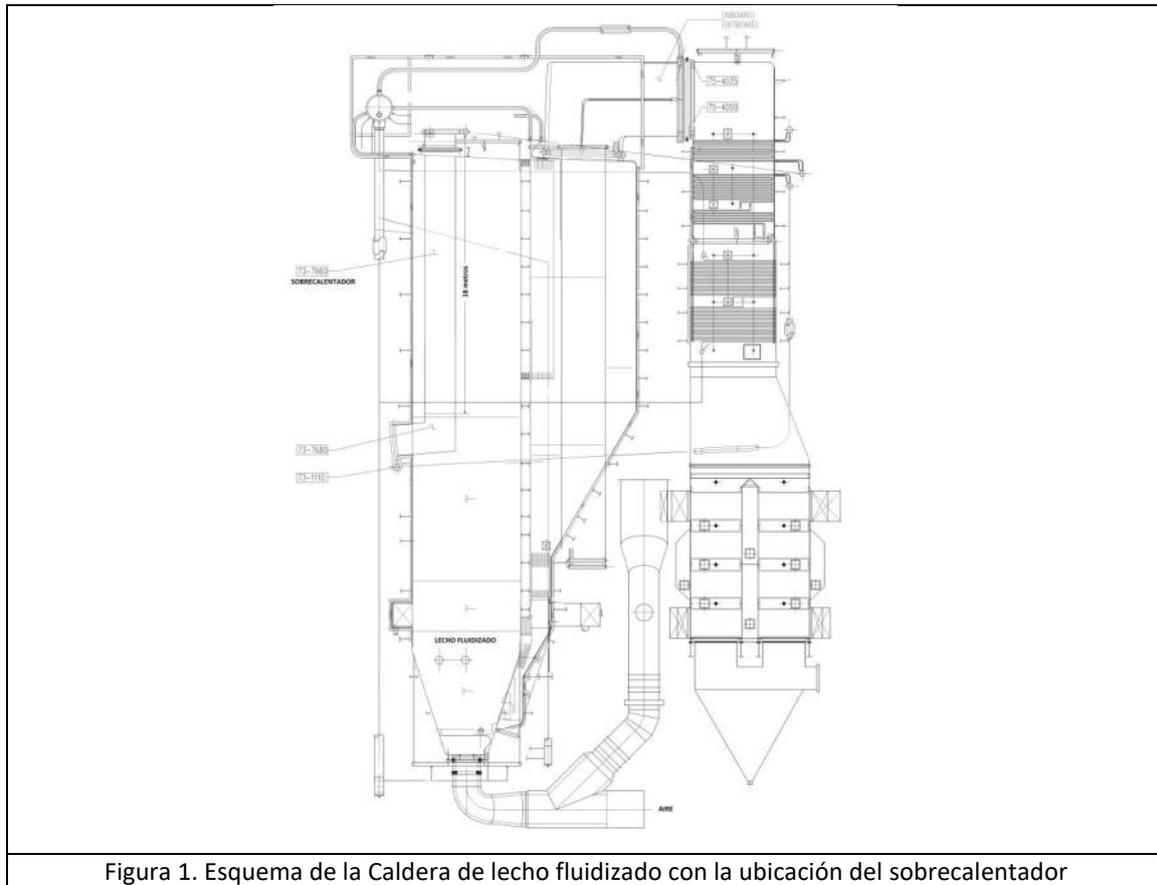


Figura 1. Esquema de la Caldera de lecho fluidizado con la ubicación del sobrecalentador

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar las causas que motivaron la falla se realizó una inspección visual de los paños dañados in situ y se retiraron muestras de los tubos para ser analizados posteriormente en el laboratorio. Se utilizaron varios métodos de análisis, como la espectrometría de emisión óptica, para determinar las composiciones químicas del metal base y del aporte utilizado en el proceso de soldadura, la metalografía óptica para examinar la estructura del metal, y la medición de durezas en distintas zonas de los tubos.

### 2.1 Inspección visual

De los doscientos ochenta tubos del sobrecalentador, aproximadamente, setenta de ellos poseían fisuras en distintas zonas, en su mayoría de dirección longitudinal en la zona de vinculación entre tubos.

En la Figura 2 se muestran las fisuras en las uniones entre tubos en la zona de soldadura. Como consecuencia de este daño se produce la pérdida de vapor a presión, que combinado

con la arena del lecho fluidizado, erosiona la pared de los tubos enfrentados disminuyendo el espesor de los mismos e incrementando la criticidad del daño inicial.

En la Figura 3 se observa la erosión de 10 tubos en la pared enfrentada al paño donde se inició la fisura. En la Figura 4, el estado final de uno de los tubos cuando no tenía pared resistente [6].



Figura 2. Daño en la zona de unión entre tubos



Figura 3. Daño por erosión de los tubos



Figura 4. Tubo erosionado



## 2.2 Metal base y de aporte. Análisis químico

En el diseño de la caldera, el material especificado para los tubos era un acero base Cr-Mo designación según norma ASTM A213 T22. Este material en el código de soldadura se corresponde con el tipo P5A. En la Tabla 1 se consignan los porcentajes en peso de los elementos del acero base según norma **ASTM A213 T22**.

Tabla 1. Composición química del acero ASTM A213 T22 (% en peso)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0.05-0.15	0.30-0.60	0.025 max	0.025 max	0.50 max	1.90-2.60	0.87-1.13

El Código ASME B31.1 (punto 131.4.5) para el material P5A especifica que, cuando se sueldan materiales con resistencia mínima de 413.7 MPa, requieren un precalentamiento de 200°C [7].

En la Tabla 2 se indica la composición química del material de los tubos y de aporte. Se presentan los elementos componentes y las concentraciones (% en peso) que se obtuvieron a partir de un análisis realizado con un espectrómetro de emisión óptica, marca Spectromax modelo X.

Tabla 2. Composición química del metal base y de aporte (% en peso)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
<b>METAL BASE</b>	0.108	0.530	0.370	0.0074	0.0085	2.62	0.860
<b>APORTE</b>	0.080	0.406	0.183	0.0078	0.0076	2.33	0.820

Se comprueba que el material se corresponde con el de diseño

## 2.3 Análisis de la superficie de fractura

Se ensayó uno de los tubos dañados, Tubo 12 de la unidad 1, a flexión mediante una prensa mecánica, con el objetivo de confirmar la resistencia remanente del material. La carga aplicada de baja intensidad provocó una rotura súbita en la zona donde se encontraba la fisura, indicada con un círculo blanco en la Figura 5. Se observa, además que la rotura es plana sin deformación plástica.

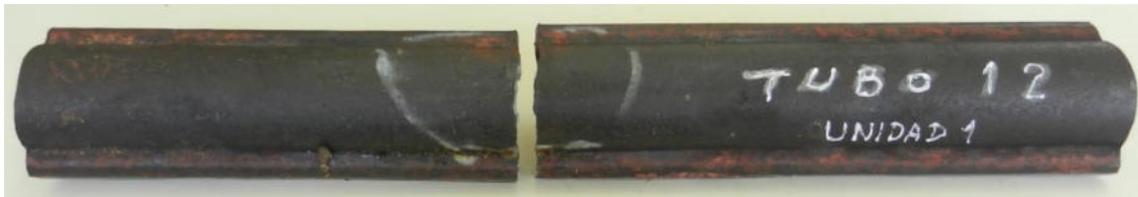


Figura 5 – Vista general del tubo 12 fracturado

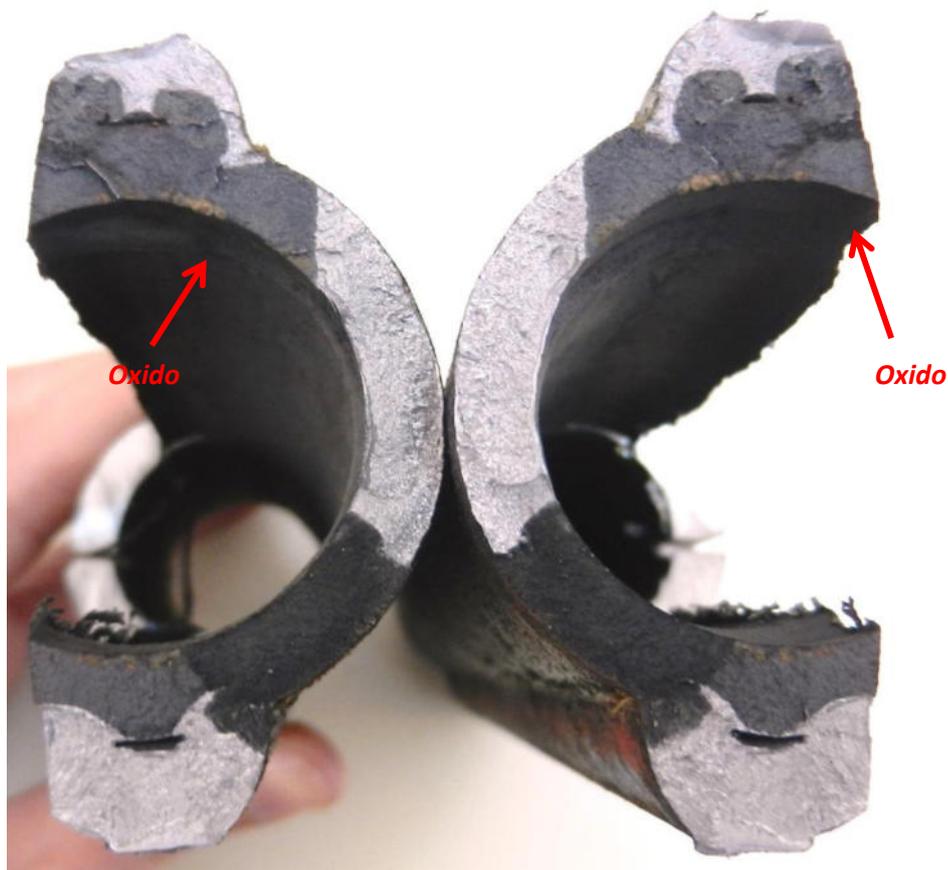


Figura 6 - Vista general de las superficies de fractura

En la Figura 6 se muestra la superficie de fractura. En la misma se pueden identificar dos zonas claramente disimiles. Una de ellas corresponde a fisuras de larga data debido al óxido sobre la superficie de falla, zonas oscuras, revelando que el tubo se encontraba fisurado previo a la fractura final. El área clara, de apariencia cristalina y fibrosa, corresponde a la rotura final de tipo frágil [8, 9].

## 2.4 Estudio metalográfico

Para el estudio metalográfico la muestra se tomó de la zona de unión entre tubos y la pared membrana (Figura 6). Las muestras pulidas fueron tratadas con Nital 2% [10]. Se las observó en un microscopio invertido para aplicaciones de metalografía y control de materiales industriales, marca Leica DM ILM, equipado con una máquina fotográfica digital de la misma marca.

En la zona inferior izquierda de la Figura 7, se aprecia el fibrado del tubo con estructura ferrítica perlítica. En la zona central se distingue el cordón de aporte, con su respectiva pasada de raíz y la recomendada sobre penetración, además de la fisura próxima al mismo. En la misma figura se observan las improntas que corresponden a la determinación de durezas en el material base y en la zona de soldadura.

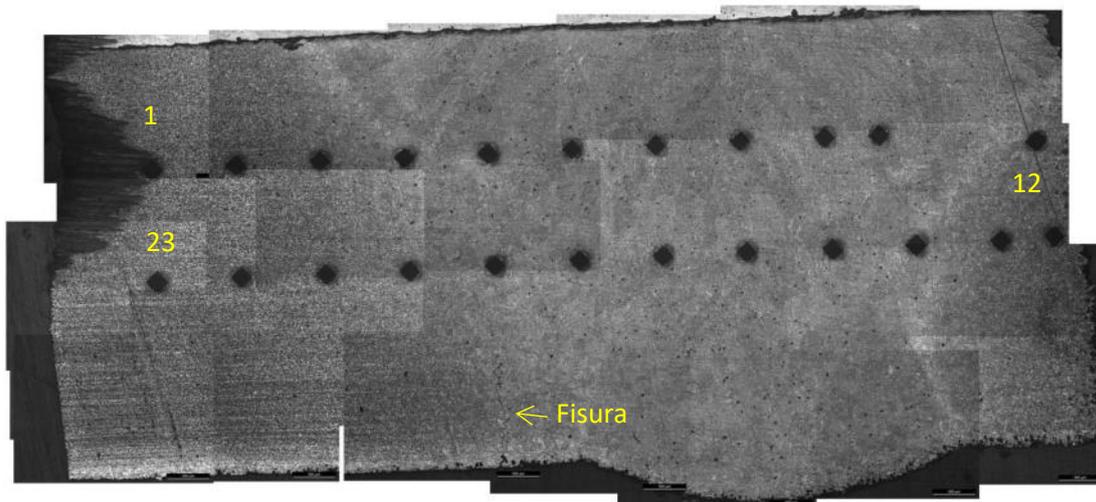


Figura 7. Zona de unión entre tubos y la pared membrana (50x).

Se presenta en la Figura 8, la fisura, indicada en la figura anterior, con aumento 200x. Este tipo de fisura se genera durante la soldadura cuando el material no tiene posibilidades de aliviar tensiones; suele denominarse en la bibliografía reheat cracks [11]. Se puede apreciar en el interior de la fisura, como producto de la corrosión, magnetita ( $F_3O_4$ ).

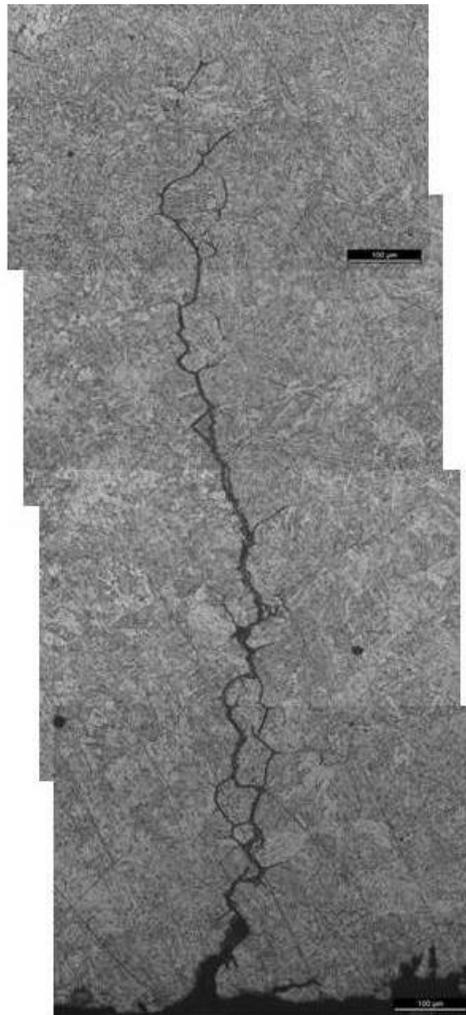


Figura 8. Zona de la fisura (200x)

Debido a las características del flujo que se genera en la combustión, se provocan vibraciones de los paños del sobre calentador y, como consecuencia, estas grietas se propagan hacia el exterior del tubo, hasta que se produce la pérdida de vapor.

## 2.5 Determinación de durezas

Para la determinación de dureza se utilizó un durómetro de mesa marca FRANK, con una carga de ensayo de 10 [Kgf] [12]. Las posiciones de los 23 puntos de medición se muestran en la Figura 7. Los valores de las diagonales de la impronta, relacionados con el valor de dureza Vickers HV10, se midieron con un microscopio metalográfico marca Leica.

Para cañerías de vapor, el valor máximo de dureza recomendado es de 240 HV [12, 13]. Como se puede apreciar en la Tabla 3, los valores obtenidos superan los valores recomendados por



las normas de fabricación. Cuando se sueldan tuberías aleadas al Cr-Mo, aunque el porcentaje de C y demás aleantes sea bajo, el carbono equivalente es elevado. Es por ello, que se recomienda precalentar para evitar que se produzcan estructuras con baja ductilidad. Una manera de evaluar la ductilidad presente en la soldadura es por medio de la dureza. El valor máximo de dureza recomendado está vinculado a minimizar los fenómenos de stress corrosion cracking, reheat cracking o la formación de interfaces con dureza muy distintas, lo cual conlleva a la formación de fisuras.

Tabla 3. Valores de dureza de la muestra metalográfica.

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>HV10</b>	292	289	297	319	319	333	330	333	330	309	304	306
<b>HB</b>	277	275	282	303	303	316	313	316	313	293	289	290

Punto	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
<b>HV10</b>	314	302	324	319	312	312	312	312	319	319	268
<b>HB</b>	298	287	307	303	296	296	296	296	303	303	255

### 3. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados de la inspección visual de la fractura, los estudios metalográficos de la estructura y los valores de dureza, se puede concluir que la fractura se produjo por la omisión del precalentamiento durante el procedimiento de soldadura entre tubos y en la construcción de la pared membrana. Todas las soldaduras que fallaron, tienen durezas elevadas y con grietas por reheat crack.

Por lo que observamos de las muestras obtenidas en la caldera (más de 10) en distintos sectores, esta falla repetitiva y sistemática indica que se utilizó el mismo procedimiento de soldadura en la construcción de todos los paños. De esta manera se interpreta que estas fallas se reiterarán, por lo cual se recomienda el reemplazo total de los sobre calentadores de las unidades.

Para dirimir responsabilidades se consultó los planos constructivos de fábrica, y se confirmó que explícitamente estaba indicado que durante el procedimiento de soldadura no se requería precalentamiento, aun cuando se especificaba P5A en la denominación Weld Code. Esto contradice lo establecido en el Código ASME B31.1 capítulo V (punto 131.4.5).

### AGRADECIMIENTOS

Al personal Técnico del Laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica de la UNS por la Confeción de las Probetas.



## REFERENCIAS

- [1] Basu P. *Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review*. Chemical Engineering Science 54, 5547-5557, 1999.
- [2] Runxia C., Xiwei K., Junfu L., Hairui Y., Zhang M., Guangxi Y. and Wen L. *Progress of circulating fluidized bed combustion technology in China: a review*. Clean Energy, Vol. 1, No. 1, 36–49, 2017
- [3] Suwarno S., Nugroho G., Santoso A., Witantyo. *Failure analysis of air preheater tubes in a circulating fluidized bed boiler*, Engineering Failure Analysis 124, 105380, 2021.
- [4] Bamrotwar S.R., Deshpande V.S. *Root Cause Analysis and Economic Implication of Boiler Tube Failures in 210 MW Thermal Power Plant*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X PP 06-10 [www.iosrjournals.org](http://www.iosrjournals.org) (International Conference on Advances in Engineering & Technology – 2014 (ICAET-2014))
- [5] Kong H., Zhang M., Deng B., Feng Y., Huang Z., Wei G., Yang H. *The mechanism and solving measures for standpipe vibration of the circulating fluidized bed boilers*. Chemical Engineering Research and Design. Vol.173, pp.150-157, 2021.
- [6] David N French, *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> Edition 1993.
- [7] American Society of Mechanical Engineers, ASME B31.1 Chapter V - 131.4.5, 2012
- [8] ASM HANDBOOK, Fatigue and Fracture, By ASM Handbook Committee, ASM International, Volume 19, 1996
- [9] Hertzberg R. W., Vinci R. P., Hertzberg J.L., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, John Wiley & Sons, 5<sup>th</sup> Edition, 2012.
- [10] ASM HANDBOOK, Metallography and Microstructures, Edited by Vander Voort GF., ASM International, Volume 9, 2004.
- [11] Nawrocki J. G. *A study on the stress-relief cracking susceptibility of a new ferritic steel*. These and Dissertation, Lehigh University, Paper 513, 1998.
- [12] NACE MR0175/ISO 15156-2(E), 2003.
- [13] ASM HANDBOOK, Welding, Brazing, and Soldering, Edited by Olson DL., Siewert TA., Liu S., Edwards GR., ASM International, Volume 6, 1993.



## ANÁLISIS DE LA CAUSA DE FALLA DE UNA BIELA SOPORTE DE UNA PALA DE CARGA

**Daniel Ziegler, Sandra Robles, Daniela Alessio, Mauro Puccinelli, Guillermo Berge y Fernando Schlosser**

Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur

Avenida Alem 1253, (8000) Bahía Blanca, Argentina

[dziegler@uns.edu.ar](mailto:dziegler@uns.edu.ar); [srobles@uns.edu.ar](mailto:srobles@uns.edu.ar); [dalessio@uns.edu.ar](mailto:dalessio@uns.edu.ar);

[mauro.puccinelli@uns.edu.ar](mailto:mauro.puccinelli@uns.edu.ar); [luis.berge@uns.edu.ar](mailto:luis.berge@uns.edu.ar); [fernando.schlosser@uns.edu.ar](mailto:fernando.schlosser@uns.edu.ar)

### RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados obtenidos del análisis de falla de una biela fracturada, soporte de una pala de carga de una grúa portuaria, con el objetivo de determinar las posibles causas de la rotura. Para ello, se realizó una inspección visual general de la pala en particular de la zona de rotura, estudios metalográficos y ensayos de impacto.

La inspección visual reveló que debajo de la pintura epoxy de protección se encontraban fisuras en zonas próximas a los ojales de amarre tanto en la biela que presentó rotura como en la mayoría de ellas.

Los estudios metalográficos mostraron que el acero utilizado en la biela era ferrítico-perlítico bajo en carbono. Además, se identificaron maclas dentro de los granos ferríticos que, según fuentes bibliográficas consultadas, se originan a consecuencia de cargas aplicadas a alta velocidad y a bajas temperaturas. Los ensayos de impacto se realizaron para determinar la tenacidad del material, es decir, la capacidad del material para absorber la energía antes de fracturarse. Los resultados mostraron que el material poseía una baja tenacidad, lo que significa que se fracturó con facilidad bajo cargas de impacto.

En conclusión, el análisis de falla reveló que la rotura de la biela fue causada por una combinación de baja tenacidad del material y cargas aplicadas a alta velocidad a baja temperatura. Los resultados de este estudio podrían ayudar a mejorar el diseño y/o la selección de materiales para futuras bielas de soporte de palas cargadoras, lo que a su vez podría mejorar la seguridad y la confiabilidad de estos equipos.

**Palabras clave:** *Sistemas de Carga; Fallas; Selección de Materiales; Fractura.*



## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta el estudio realizado para investigar las posibles causas que condujeron a la rotura de una de las cuatro bielas que sostienen una pala de carga de una grúa portuaria ubicada en el sitio 5 del Puerto de Galván, en la provincia de Buenos Aires, Argentina. La pala de carga se encuentra en la zona del muelle y se utiliza para descargar material a granel desde la bodega de los barcos a dos tolvas.

El estudio realizado del componente y su entorno de trabajo, abarcó la inspección visual detallada de la pieza, la evaluación de los materiales utilizados en su construcción, las condiciones de operación de la grúa y los factores ambientales que pudieron haber contribuido a la falla. Una vez identificadas las posibles causas de la rotura, se analizó cada una de ellas para determinar el origen de la misma.

Es importante destacar que la rotura de la biela tuvo un impacto económico significativo, quedando en el sitio, un solo equipo para la descarga de los barcos. Consecuentemente, los resultados de este estudio han realizado un aporte que sirvió de base para efectuar la reingeniería de la pala, a fin de evitar una situación similar a futuro.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL y RESULTADOS

### 2.1 Inspección visual general de la pala de carga y de la biela rota

La pala de carga, cuchara bivalva mecánica, consta de cuatro bielas articuladas de sección rectangular de 136x75 mm y de aproximadamente 3000 mm de longitud entre centros de articulación, vinculadas a la parte superior de la estructura o bastidor y en el otro extremo a las valvas. De la observación general de la pala de carga, se pudo registrar la ubicación de la biela que presentó la falla y el lugar en que se produjo, parte superior de la biela, aproximadamente a 300 mm del centro del perno de la articulación.

En la Figura 1, se puede apreciar la biela anterior derecha, fracturada en su parte superior, reclinada hacia la izquierda.

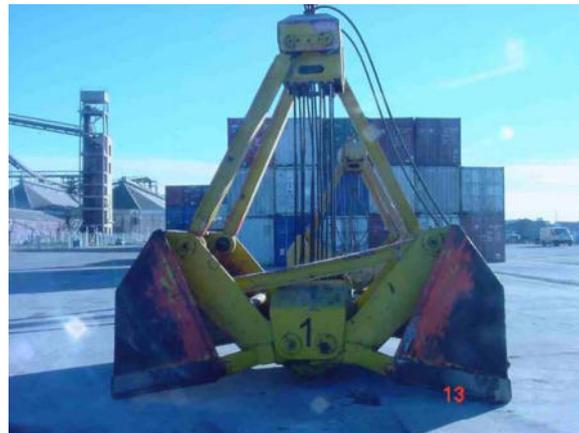


Figura 1: Biela anterior derecha, fracturada en su parte superior, reclinada hacia la izquierda

Concretamente, la zona de fractura de la biela, Figura 2, presenta una superficie rugosa y brillante con la particularidad de un sector oscuro, debido a la presencia de grasa, lo cual indica que ya estaba fisurada antes de la rotura final. Sobre la superficie de fractura se observó óxido de color amarillento, vinculado a las características del medio ambiente del lugar de emplazamiento de la pala.

En la Figura 3 se aprecia el extremo inferior de la biela fracturada, que se encuentra deformada cerca de la unión articulada.



Figura 2: Sección de la biela fracturada



Figura 3: Parte inferior de la biela fracturada



Con la finalidad de confirmar la integridad del estado de las otras bielas, se realizó una inspección visual detallada de las mismas, particularmente en el entorno de la zona de fractura y en la zona de vinculación con las valvas. Se encontraron fisuras en cinco de estas áreas, que no eran observables a simple vista; estaban enmascaradas por la pintura epoxi que las cubría. La presencia de estas fisuras evidenció que la integridad estructural de la totalidad de las bielas estaba comprometida.

Se recomendó que se abordara el problema de manera inmediata y se tomaran las medidas necesarias para reparar o reemplazar las partes afectadas, para prevenir futuras fallas y mejorar la seguridad y la confiabilidad del equipo en cuestión.

## 2.2 Análisis químico de la composición del material de la biela

Se extrajeron muestras de material de la biela para determinar la composición química. Para ello se utilizó un espectrómetro de emisión óptica, marca Spectromax modelo X.

En la Tabla 1 se presenta la composición del acero con que fue elaborada la biela y se señalan las concentraciones (% en peso) de cada elemento.

Tabla 1. Composición del acero empleado en la fabricación de la biela

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
<i>Composición %</i>	0.110	0.321	0.002	0.025	0.037	0.010	0.011	0.003

Estos valores se compararon con la composición química del acero designación AISI-SAE 1010. Se observa que la composición química del metal de la biela se corresponde con los valores medios establecidos en la norma para este acero. En la Tabla 2 se consignan los porcentajes en peso de los elementos de los aceros designación AISI-SAE 1010.

Tabla 2. Composición del acero designación AISI-SAE 1010

Elemento		C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %
AISI-SAE 1010	mín.	0.08	0.30	0.10	0.040	0.050	---	---	---
	máx.	0.13	0.60						

Habiendo comprobado que la composición química del material de la biela correspondía a la de un acero AISI-SAE 1010 [1] y mediando su facilidad para ser soldado, en primera instancia se evaluó la posibilidad de realizar su reparación por soldadura. Sin embargo, se desistió de este procedimiento debido a la presencia de más fisuras en la biela fracturada y el posible efecto de la deformación en la misma. La reparación por soldadura puede introducir tensiones residuales en el material que podrían afectar su funcionamiento seguro y confiable. Además, observando

la presencia de fisuras en las otras tres bielas, dado que ellas son un elemento crítico del equipo, se recomendó reemplazarlas en lugar de repararlas.

### 2.3 Análisis de la superficie de fractura

En la Figura 4, se observan las dos secciones de la biela fracturada, con fractura de aspecto de rotura frágil [2] con textura de grano grueso y sin deformación plástica macroscópica. La mancha oscura que se aprecia en ambas fotografías, se debe al ingreso de grasa e indica que ya estaba fisurada antes de la rotura final.

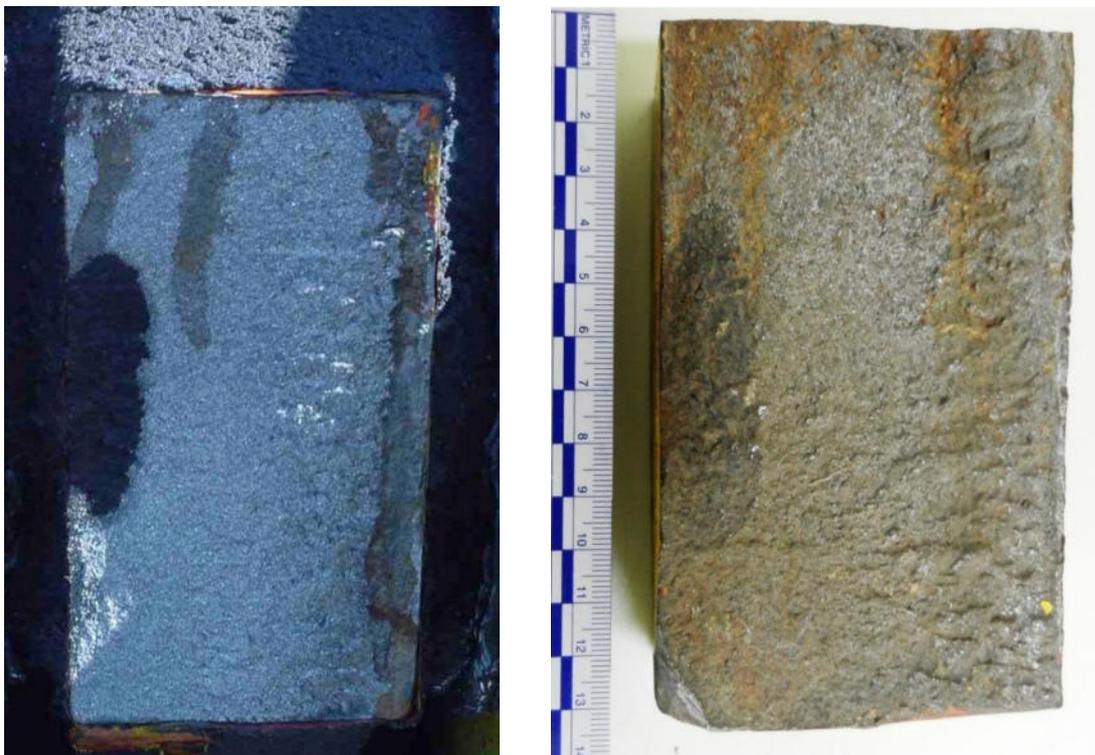


Figura 4. Superficies de ambas secciones de la biela fracturada

### 2.4 Estudio metalográfico

Las muestras de material para realizar el estudio metalográfico se extrajeron del extremo de la biela fracturada. Las muestras pulidas fueron tratadas con Nital 2% y se las observó en un microscopio invertido para aplicaciones de metalografía y control de materiales industriales, marca Leica DM ILM, equipado con una máquina fotográfica digital de la misma marca. Se apreció que la microestructura correspondía a un acero ferrítico perlítico bajo en carbono [3].

En la Figura 5, se muestran dos micrografías en las que se puede observar la perlita de color negro, la ferrita de color blanco y dentro de los granos ferríticos las líneas rectas, son líneas de



maclas. Según la bibliografía consultada [4], las maclas en materiales de estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), como es el caso de este acero, se generan en la microestructura cuando las cargas son aplicadas a alta velocidad, como las cargas de impacto, y a bajas temperaturas.

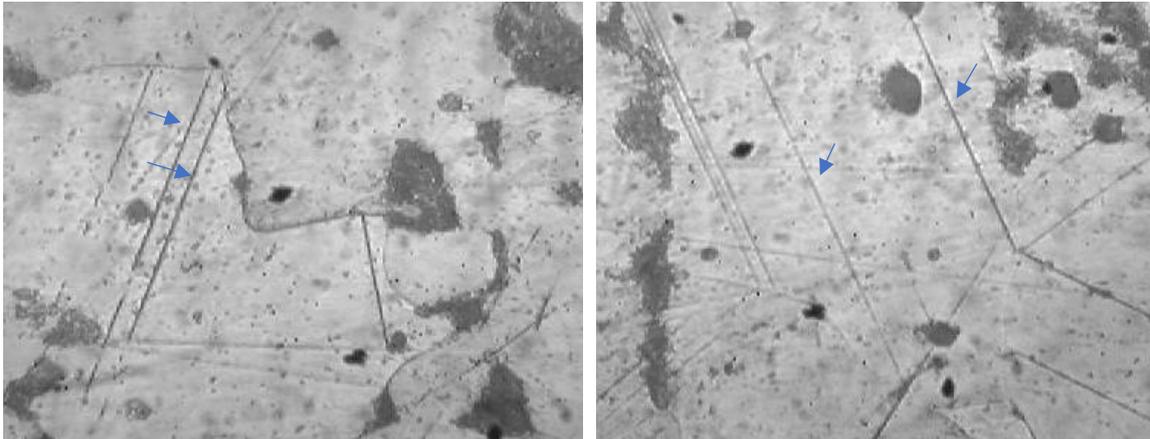


Figura 5: Microestructura con presencia de maclas dentro de los granos (200x)

## 2.5 Análisis de la tenacidad a la fractura

Se evaluó la tenacidad del material utilizado en la fabricación de las bielas. Para ello, se llevaron a cabo ensayos de impacto Charpy según norma IRAM-IAS U500-106 en siete probetas normalizadas de 10x10x55 mm a diferentes temperaturas, en el rango de las que pueden experimentarse en el muelle durante el invierno. Las probetas se llevaron a las distintas temperaturas de ensayo sumergiéndolas en un baño de Kerosene enfriado con nitrógeno líquido. Asimismo, la pinza de colocación de la probeta también se enfrió a la temperatura de ensayo. Los ensayos se realizaron antes de los 5 segundos de retiradas las probetas del baño.

Los resultados obtenidos de los ensayos de impacto Charpy que se muestran en la Tabla 3, revelan que el material utilizado en la fabricación de las bielas de la pala posee baja tenacidad a temperaturas cercanas a cero grados centígrados.

Esta información corrobora que este material no resulta apropiado para las condiciones de temperatura observables durante el invierno en el muelle donde opera la grúa, sumado a los impactos recibidos al realizar operaciones de limpieza de los residuos de material en las bodegas de los barcos, lo cual no está recomendado ni previsto en su diseño.



Tabla 3. Valores de energía absorbida a distintas temperaturas.

Probeta	Temperatura [°C]	Energía Absorbida [kg m]
1	-8	0,5
2	-5,5	0,7
3	-3	0,8
4	-1	0,8
5	1	1
6	4	1,2
7	20	1,8

### 3. CONCLUSIONES

La observación visual de la fractura, los estudios metalográficos y los valores de tenacidad obtenidos en los ensayos de impacto, permiten concluir que la fractura de la biela se debió a la aplicación de carga dinámica (impacto) que provocó una rotura frágil, sin deformación plástica previa, en la zona examinada. Además, se observó que la rotura no se debió a un único evento, ya que la biela presentaba fisuras previas por impactos reiterados.

Para garantizar la seguridad y durabilidad, la reingeniería de la pala debe centrarse en la selección de un material adecuado.

### AGRADECIMIENTOS

Al personal técnico del Laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica de la UNS por la confección de las probetas y al Laboratorio de Estudio y Ensayo de Materiales de la UNS por facilitarnos la Máquina de Impacto Charpy.

### REFERENCIAS

- [1] Instituto Argentino de Siderurgia. Aceros para Construcciones Mecánicas, Hoja de características, acero IRAM 1010, 1981.
- [2] ASM HANDBOOK, Fatigue and Fracture, ASM Handbook Committee, ASM International, Volume 19, 1996.



- [3] ASM HANDBOOK, Metallography and Microstructures, Edited by George F. Vander Voort, ASM International, Volume 9, 2004.
- [4] Hertzberg W., Vinci R.P., Hertzberg J.L. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, Fifth Edition, Ed. John Wiley & Son Inc., 2012.



## IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES ELÁSTICAS EN PIEZAS CONSTRUIDAS POR IMPRESIÓN 3D POLIMÉRICA: ENFOQUE A TRAVÉS DE MÉTODOS DINÁMICOS

Marcelo Piovan<sup>1,2,3</sup> y Pablo Girón<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada – UTN Fac. Reg. Bahía Blanca  
11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina- [mpiovan@frbb.utn.edu.ar](mailto:mpiovan@frbb.utn.edu.ar).

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – UTN Fac. Reg. Bahía Blanca [pgiron@frbb.utn.edu.ar](mailto:pgiron@frbb.utn.edu.ar)  
<sup>3</sup> CONICET

### RESUMEN

La impresión 3D es una de las tecnologías fuertemente disruptivas de la última década que está evolucionando exponencialmente en la construcción de bienes y productos tecnológicos. Por ello es fundamental conocer apropiadamente las características mecánicas que resultan en los componentes funcionales impresos. En el contexto de construcción aditiva, el procedimiento denominado Modelado por Deposición de Filamento (MDF) Polimérico es uno de los más empleados, llegando a cubrir más del 60% de los productos impresos a lo largo del mundo.

Aun cuando se han efectuado incontables estudios de caracterización de propiedades mecánicas y estructurales, entre otras, es de destacar que la gran mayoría se vincula a ensayos estáticos estandarizados (aunque tomados y adaptados de los homónimos para probetas de polímeros inyectados) que eventualmente conducen a la destrucción o inutilización de una probeta. A su vez, tan solo se han hecho caracterizaciones para un grupo reducido de polímeros de impresión como el Acrilo-nitrilo-butadieno-estireno (ABS) o el Poli-ácido láctico (PLA)

En este trabajo se presenta un estudio de caracterización de los módulos de elasticidad flexional en probetas construidas por MDF en diversos materiales de impresión 3D, haciendo énfasis en materiales escasamente estudiados. El procedimiento consiste en capturar las frecuencias naturales de las probetas a través de ensayos con martillo de impacto, filtrando las frecuencias flexionales para luego emplear expresiones de normas internacionales y/o modelos estructurales clásicos para finalmente identificar las propiedades mencionadas

**Palabras Clave:** *Impresión 3D; Propiedades Elásticas; Métodos Dinámicos;*



## 1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de fabricación aditiva (AM), coloquialmente llamadas “Impresión 3D”, aparecieron a mediados de la década de 1970 cuando máquinas de inyección de fluidos de secado rápido y de extrusión de polímeros surgían en los laboratorios de universidades y empresas [1, 2]. Desde aquellos años, la tecnología AM tuvo una evolución constante que se dividió en diferentes procedimientos incorporando distintos materiales (plásticos, resinas, morteros, pastas e incluso metales y cerámicas en polvo). Entre todas las tecnologías competitivas y/o procedimientos constructivos del mercado, la más empleada es la denominada extrusión de materiales (que está ocupando casi el 60% del mercado entre máquinas y construcción de productos [2]), en particular de polímeros termoplásticos, un proceso que según las normas ASTM F2792-12a y/o ISO/ASTM 52900 se identifica como Modelado por Deposición de Filamento (MDF).

Hasta los primeros años de este siglo existía una tendencia marginal en la determinación de propiedades mecánicas y elásticas de piezas construidas aditivamente por MDF [3], debido a que estas últimas tenían usos limitados (básicamente como prototipos visuales de partes que se terminarían construyendo en aluminio o acero u otros). De hecho hasta el año 2000 no había más de una veintena de artículos relacionados con el estudio de propiedades materiales de piezas o partes impresas [4], mientras que los estudios más consistentes sobre el particular comenzaron a circular durante los primeros 10 años de este siglo [5] y a partir de allí se han multiplicado exponencialmente. Sin embargo la mayoría de los estudios estaba vinculada a ensayos estáticos (de tracción mayormente y de flexión) en unos pocos tipos de polímeros, principalmente de Acrilo-nitrilo Butadieno Estireno o de Ácido Láctico Polimerizado (ABS y PLA por sus siglas en inglés).

Hoy en día, la tecnología impresión 3D MDF es una realidad firmemente posicionada en el mercado de bienes y productos, en parte por la reducción de costos de las impresoras y la simplicidad para materializar ideas conceptuales, pero también por la creciente producción e introducción de plásticos y polímeros con mayor calidad, mayor resistencia y también propiedades especiales (e.g., conductivo, magnético). Además, las industrias de alta tecnología (aeronáutica, automotriz y biológica) compiten por hacer productos con mejor calidad y menor tiempo de desarrollo que urge el uso de los procedimientos MDF como una forma factible de construir piezas de máquinas para ser utilizadas en condiciones operativas reales y con propiedades prescritas; lo cual está motivando la investigación para identificar los aspectos constitutivos de las partes impresas en diversos materiales.

Entre la gran cantidad de trabajos (no menos de 250 entre 2015 y 2023, según la revisión de los autores) relacionados con la estimación de propiedades elásticas y mecánicas de partes o



probetas impresas, el uso de técnicas dinámicas es muy escaso. Aunque hay artículos [6,7] relacionados con este tópico, algunos de ellos tienen una extensión limitada [6] pero otros [7] sufren alguna debilidad relacionada con la adopción del modelo físico para calcular las propiedades elásticas. Piovan et al. [3] efectuaron un estudio comparativo sobre distintas metodologías de captura de información dinámica (óptica o inductiva) para la determinación experimental de propiedades elásticas tales como el módulo de elasticidad longitudinal. En tal estudio se han efectuado cálculos predictivos (por elementos finitos y empleando los módulos de elasticidad previamente determinados) en piezas impresas más complejas y ensambladas por pegamento, para luego compararlas con los resultados experimentales correspondientes, obteniéndose una buena correlación. Aunque solo se evaluó polímero tipo PLA.

En este trabajo se presenta un estudio de determinación del módulo de elasticidad longitudinal para dos tipos distintos de material, a saber Poli-Estireno de Alto Impacto (HIPS por sus siglas en inglés), Tereftalato de Poli-Etileno con Glicol (PETG por sus siglas en inglés). Es poco común hallar estudios efectuados sobre esta clase de materiales con la metodología dinámica. Por lo cual en este trabajo se pretende extender los procedimientos desarrollados en la referencia [3] para emplear micro-acelerómetros (en vez de emplear sensores de proximidad inductivos como en [3]) y evaluar mediante un analizador de vibraciones cuya entrada de excitación se hace por martillo de impacto. A su vez se revisará la influencia de algunos parámetros constructivos como el espesor de capa y el trazado angular de deposición.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y MATERIALES

La metodología experimental consiste en la determinación de las frecuencias naturales de vibración para vigas esbeltas, cuya excitación se realiza mediante un martillo de impacto y un acelerómetro montado en la probeta. Los especímenes impresos son paralelepípedos de 240 mm de longitud, 24 mm de ancho y 4 mm de espesor. El tamaño de este espécimen es de fácil manipulación respecto de otros tamaños sugeridos por normas internacionales. A su vez hay evidencia que los tamaños de probeta sugeridos por algunas normas internacionales para materiales compuestos o polímeros inyectados, no se pueden usar apropiadamente para ensayos dinámicos en el caso de piezas impresas [6-8]. Teniendo en cuenta este aspecto, y en base a estudios preliminares efectuados por los autores [3], se ha adoptado el tamaño y características de la probeta para este ensayo. En la Figura 1 se muestra un diagrama del dispositivo experimental, el cual consiste en una base metálica masiva donde está empotrado el montante también metálico y sustancialmente rígido (cuyas frecuencias naturales son superiores 1600 Hz.). Se trata de un montaje empotrado-libre con un micro-acelerómetro (marca Piezotronics PCB) ajustado cerca del empotramiento para no interferir con su masa en la frecuencia de la probeta. La excitación dinámica se efectúa con un martillo dinámico. Tanto

el sensor como el martillo se conectan a un Analizador IDEAR Vibracheck 200 ABGO con Datalogger y filtro de señales que serán analizadas en un sistema computacional para determinar la respuesta en frecuencia y luego capturar las primeras dos frecuencias naturales con modos flexionales.

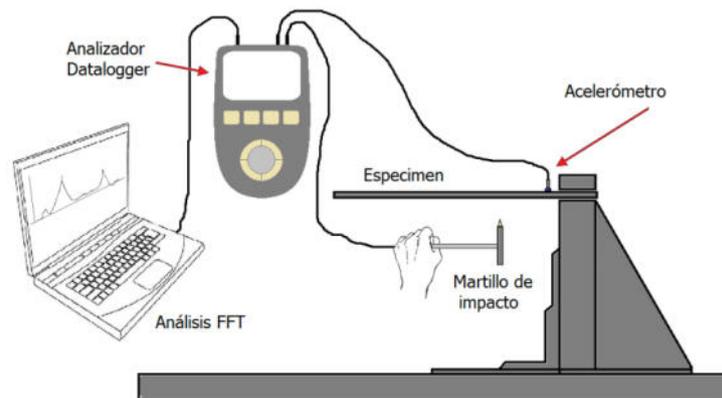


Figura 1: Esquema del banco de ensayo.

El espécimen al estar empotrado en un extremo, tendrá dos posibles longitudes hasta el extremo libre, que son de 175 mm y de 200 mm. Como se puede notar, la esbeltez de la viga definida como la longitud de ensayo respecto del espesor es mayor a 20 en ambos casos. Consecuentemente, el modelo teórico de la estructura se halla dentro del marco de la teoría clásica de vigas o modelo Bernoulli-Euler, con lo cual para la condición de borde establecida las frecuencias naturales de modos flexionales se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$f_n = \frac{(\beta_n L)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}, \forall n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Donde  $f_n$  es la n-ésima frecuencia natural flexional (en hertz),  $E$  es el módulo de elasticidad,  $A$  e  $I$  son área y momento de inercia,  $L$  es la longitud del empotramiento hasta el extremos libre y  $\beta_n$  es un factor para la n-ésima frecuencia, tal que  $(\beta_1 L)=1.8741$ ,  $(\beta_2 L)=4.6941$ , etc. [9], mientras que  $\rho$  es la masa efectiva por unidad de volumen. En la Ecuación (1) se emplean unidades del Sistema Internacional. Es importante recalcar que en este artículo  $\rho$  es la masa efectiva específica para distinguirla de la densidad de masa, como es convencionalmente aceptado. La razón de ello, radica en que una pieza construida por MDF suele dejar algunas pequeñas ranuras de aire (cuya presencia reduce la cantidad de masa), aun con un relleno del 100%. Esto es un efecto espurio del procedimiento, que mediante un apropiado ajuste de parámetros de impresión se puede disminuir sustancialmente, pero difícilmente eliminar por completo [2].



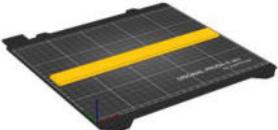
Ahora bien, teniendo en cuenta la Ecuación (1) y las definiciones de las propiedades geométricas de la sección de la probeta, se puede calcular el módulo de elasticidad en términos de datos mensurables tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$E = \frac{(2\pi f_n)^2 12\rho L^4}{(\beta_n L)^4 t^2}, \forall n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Donde  $t$  es el espesor de la probeta.

En virtud de estudios previos sobre la influencia, en el módulo de elasticidad, de los parámetros de ajuste de la impresión de probetas [1-3, 10, 11], para este estudio tan solo se han seleccionado dos parámetros: (a) el trazado angular de deposición (raster-angle en inglés) y (b) el espesor de capa. Tanto para PETG como para HIPS se evalúa la influencia del espesor de capa en dos posibilidades: 2 y 3 décimas de milímetro, mientras que se considerarán tres casos de trazado angular de deposición:  $\{0/0\}_R$ ,  $\{0/90\}_R$ ,  $\{45/-45\}_R$ , nomenclatura empleada a semejanza de la disposición de filamentos en materiales compuestos, siendo los ángulos medidos respecto del eje longitudinal de la probeta (e.g  $\{0/0\}_R$  significaría todos los filamentos depositados longitudinalmente), el subíndice R es el indicativo del número de repeticiones hasta completar el espesor. En la Tabla 1 se muestran los parámetros fijos de impresión (aceptados como los óptimos por los fabricantes de los filamentos y/o impresoras). Todas las probetas fueron impresas en una impresora Prusa MK3 empleando el programa nativo PrusaSlicer para efectuar el diseño de impresión.

Tabla 1. Parámetros de impresión para los filamentos

Parámetro	HIPS	PETG
Temperatura de extrusor [°C]	235	240
Temperatura de plataforma [°C]	100 - 110	85 - 95
Temperatura ambiente [°C]	20 - 25	20 - 25
Velocidad de impresión inicial [mm/s]	30	25
Velocidad de impresión estable [mm/s]	40	30
Perímetros laterales	2	2
Infill o relleno interno [%]	100	100
Superposición entre filamentos [%]	10	10
Superposición lateral de deposición [%]	20	20
Diámetro del extrusor [mm]	0.4	0.4
Diámetro de filamento en crudo [mm]	1.75	1.75
Tipo de aditivo de cama	PVA	PVA
Sentido de construcción		



Siendo que PETG y HIPS son materiales con una importante capacidad hidrófila, se las almacenó en recipiente con desecantes hasta el momento de ensayo para garantizar humedad inferior al 20%. Con relación a algunos parámetros de la Tabla 1, se debe destacar que en base a la experiencia de los autores una superposición (“Overlap” en la jerga) de entre 10% y 20% según sean entre filamentos contiguos o en contacto con los perímetros laterales ayuda a mitigar sustancialmente la presencia de surcos huecos internos en el proceso de impresión.

### 3. CARACTERIZACION EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES ELASTICAS

En primera instancia, es importante prestar atención a la calidad del conjunto completo de especímenes de ensayo. En el apartado anterior se ha mencionado los parámetros que se evalúan, su rango de variabilidad y particularidades respecto al uso del concepto de masa efectiva en reemplazo de la densidad. Así pues en la Tabla 2 se puede apreciar la comparación entre la masa específica del todo el conjunto de muestras (6 para cada material) con respecto a datos suministrados por el fabricante del filamento, en tanto que los especímenes tienen un relleno (infill en la jerga) al 100%. Se aprecia En el caso del filamento en crudo la masa específica se corresponde con la densidad, la cual se ha medido para tener un control de calidad y corroborar trazabilidad con los datos del fabricante.

Tabla 2. Comparación de masa específica de especímenes y densidades de filamentos

Masa específica [Kg/m <sup>3</sup> ]	HIPS	PETG
Filamento en crudo (nominal fabricante)	1020.0	1270.0
Filamento en crudo (medida)	980.6	1254.5
Valor medio (especímenes impresos)	947.6	1207.8
CoV (especímenes impresos)	1.47%	0.51%

Como se puede apreciar en la Tabla 2 la masa específica de los especímenes impresos es algo menor que la homónima correspondiente a los filamentos (entre 3.3% y 4.0% respecto a los medidos), aceptado que los datos de las planillas del fabricante pueden no reflejar la realidad mensurable.

Por otro lado, la regularidad dimensional de los especímenes se puede considerar aceptable para los márgenes de tolerancia propios de la impresión 3D por MDF y teniendo en cuenta que la mayoría de las normas internacionales aceptan hasta  $\pm 5\%$  de diferencia respecto del tamaño nominal (e.g. normas ISO 178, ASTM 1876/1 [8]). En efecto para todo el conjunto de probetas empleadas, se tiene para la longitud  $L \in [239.0; 239.8]$  mm, ancho  $b \in [23.89; 24.06]$  mm, para el espesor  $t \in [4.02; 4.21]$  mm, lo cual implica coeficientes de variación  $CoV < 4.5\%$  para todas las dimensiones, con lo cual la calidad en términos de tolerancia dimensional es aceptable.

En la Figura 2 se observa la evaluación típica de un ensayo con impacto efectuado por martillo dinámico. En la faja superior se muestra la respuesta en frecuencia de la amplitud de aceleraciones registradas con el acelerómetro, en tanto que la faja inferior muestra la fase de la respuesta dinámica asociada. Nótese que en los picos vinculados las frecuencias naturales (remarcadas en círculos rojos) hay consistencia con el cambio de fase de 180°. Así pues, una vez capturados los valores de las frecuencias en los ensayos definidos en el apartado anterior y empleando la Ecuación (2) se obtiene un conjunto de valores del módulo de elasticidad a flexión. En la Tabla 3 se dispone el promedio del módulo de elasticidad para cada material y configuración de impresión, mientras que en las Figuras 3 y 4, se muestra la variación de los resultados para PETG y HIPS, respectivamente.

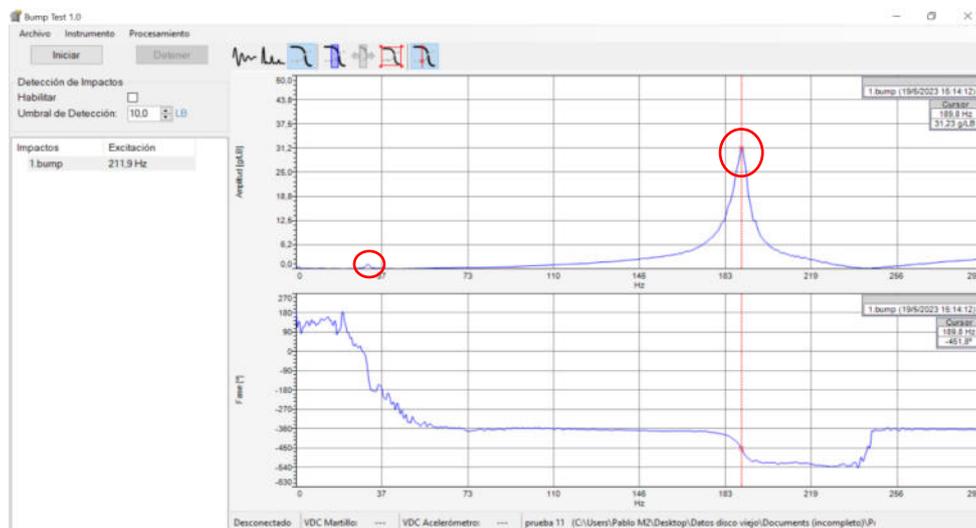


Figura 2: Respuesta en frecuencia registrada por el equipo para una probeta.

Tabla 3. Valores Promedio del Módulo de Elasticidad [GPa]

Espesor [mm]	Tramado angular	HIPS	PETG
0.3	{0/0} <sub>R</sub>	1,876	1,882
	{0/90} <sub>R</sub>	1,729	1,770
	{45/-45} <sub>R</sub>	1,558	1,718
0.2	{0/0} <sub>R</sub>	1,878	1,843
	{0/90} <sub>R</sub>	1,755	1,782
	{45/-45} <sub>R</sub>	1,576	1,689

De la Tabla 3 se puede apreciar que el máximo valor del módulo de elasticidad  $E$  se logra cuando el tramado angular de deposición es {0/0}<sub>R</sub>, y disminuye en la medida que pasa la configuración {45/-45}<sub>R</sub>, a semejanza de lo que ocurre con materiales compuestos de resinas



reforzadas por fibras. Aceptando el tramado  $\{0/0\}_R$  como patrón comparativo, se puede ver que la disminución del módulo elástico a flexión llega al 18% en el caso HIPS a  $\{45/-45\}_R$ , y al 11% en el caso del PETG, también para  $\{45/-45\}_R$ . Por otro lado, de la Figura 3 se colige que la dispersión del módulo de elasticidad no es tan grande, y esto se corrobora con la determinación del coeficiente de variación, cumpliéndose que  $CoV < 2.2\%$ , para cada subgrupo ensayado. Similar comportamiento se puede observar en la Figura 4, con  $CoV < 2.5\%$ , para cada subgrupo ensayado. Con lo cual las muestras se pueden considerar representativas solo con el promedio, pues su dispersión es muy poca. Con relación al efecto del cambio de espesor de capa en los especímenes no se observa una sensibilidad notoria en virtud que la variación de pasar de  $t=0.2$  mm a  $t=0.3$  mm, implica una diferencia porcentual que en ninguno de los casos indicados en la Tabla 3 llega a ser mayor al 2.0%.

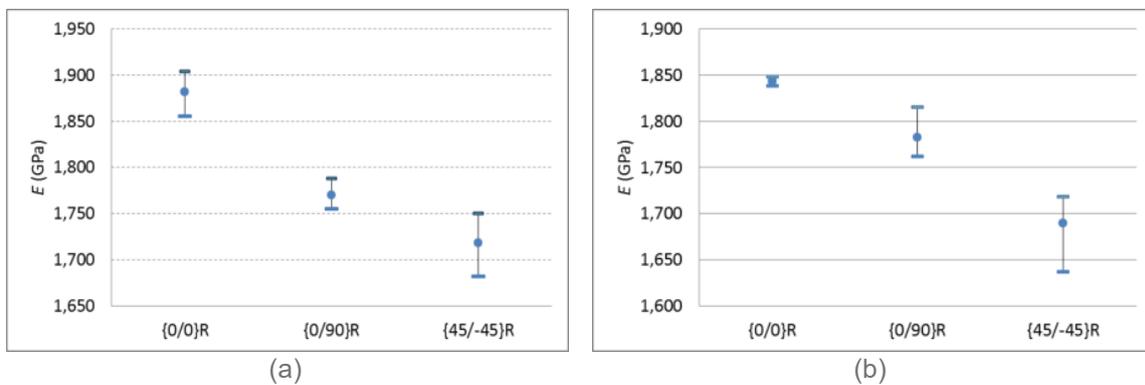


Figura 3: Variación del módulo de elasticidad del PETG. (a) con  $t = 0.3$  mm. (b) con  $t = 0.2$  mm.

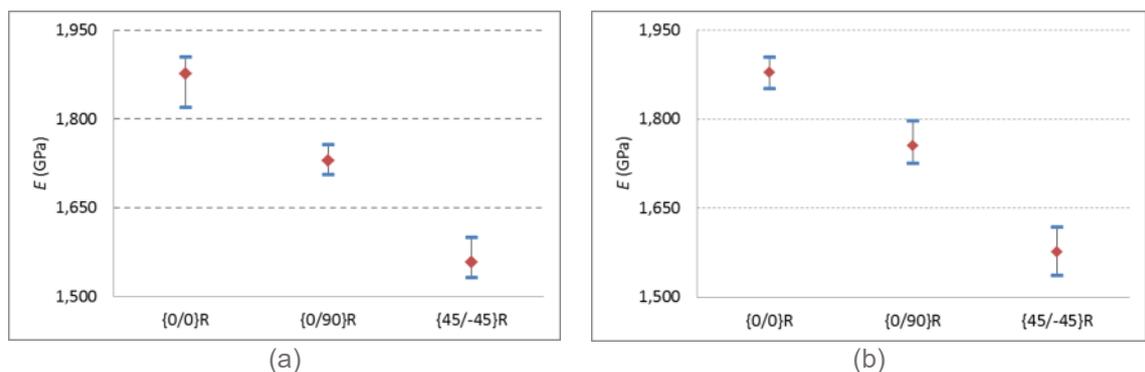


Figura 4: Variación del módulo de elasticidad del HIPS. (a) con  $t = 0.3$  mm. (b) con  $t = 0.2$  mm.

Tabla 4. Comparación con datos de la literatura técnica internacional:  $E$  [GPa].

Método	Caso	HIPS	PETG
Dinámico	Impreso, Presente $\{0/0\}_R$	1,819 – 1,905	1,839 - 1,904
Estático	Impreso, ISO 178, $\{0/0\}_R$ , [12]	-----	1,810 – 2,060
Estático	Impreso, ISO 178, $\{0/0\}_R$ , [13]	1,985 – 2,105	----
Estático	En molde, ISO 178, [14]	1,900 – 2,300	----



En la Tabla 4, se muestra una comparación de los valores del módulo de elasticidad a flexión determinados en este trabajo con respecto a datos experimentales extractados en la literatura científico-técnica, tanto de especímenes impresos (ensayados bajo enfoques de sollicitación estática) como de especímenes inyectados en moldes. En particular el registro del presente estudio incluido en la tabla,  $\{0/0\}_R$ , contempla el rango mínimo a máximo de los valores de  $E$ , determinados. Se puede observar que hay una correspondencia razonablemente buena entre uno y otro tipo de ensayos.

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un estudio experimental para la determinación de propiedades elásticas a flexión de PETG y HIPS, los cuales son dos de los tipos de filamento empleados en la impresión 3D MDF y de los cuales hay pocos estudios de caracterización, particularmente en ensayos de tipo dinámico. Se ha determinado el módulo de elasticidad para tres configuraciones típicas del tramado angular de deposición observándose similitud de comportamiento con estudios en otros materiales (e.g. PLA), es decir con la disposición angular a lo largo del eje de la probeta con el mayor valor y disminuyendo con las distribuciones en ángulo, en particular para el caso  $\{45/-45\}_R$ . También se ha evaluado la influencia del espesor de capa en el valor del módulo de elasticidad observándose poca sensibilidad, al menos para el nivel de calidad de los especímenes construidos.

El objetivo de este artículo se ha restringido deliberadamente a piezas impresas planas con relleno interno del 100%, como una primera etapa para tener datos experimentales propios con los cuales afrontar estudios más complejos. Teniendo en cuenta que piezas impresas por MDF, frecuentemente tienen rellenos internos menores al 50%, es llamativa la ausencia de estudios como el efectuado este artículo con relación a la identificación de propiedades elásticas y mecánicas de tales piezas. La metodología planteada en este artículo puede ser aplicada a estos últimos contextos sin inconvenientes, aunque ello es parte de futuros estudios.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional a través de la financiación del proyecto PID 8454 TC.

#### REFERENCIAS

- [1] Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramanian K., Chenc Y., Williams C., Wang C., Shin Y., Zhang S., Zavattieri P. *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*. *Comput Aided Design* 69, 65–89, 2015.



- [2] Dizón J., Espera A., Chen Q., Advíncula R. *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*. Additive Manufacturing 20, 44–67, 2018.
- [3] Piovan M., Diaco F., Nacud C., Di Giorgio L. *Elastic properties of 3D printed pieces determined with dynamic methods: applications to assembled 3D printed structures*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 109, 411–419, 2020.
- [4] Rodriguez J., Thomas J., Renaud J. *Characterization of the mesostructure of fused deposition acrylonitrilebutadiene-styrene materials*. Rapid Prototyping Journal 6(3), 175–186, 2000.
- [5] Galantucci L., Lavecchia F., Percoco G. *Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling*. CIRP Annals 59(1), 247–250, 2010.
- [6] Virgin L. *On the flexural stiffness of 3D printer thermoplastic*. International Jou. Of Mechanical Engineering Education 45(1), 59–75, 2017.
- [7] Chaitanya S., Reddy K., Sri Harsha S. *Vibration properties of 3D printed/rapid prototype parts*. Int. Journal Innov Res Sci, Eng & Tech. 4(6), 4600–4608, 2015.
- [8] Forster A. *Materials testing standards for additive manufacturing of polymer materials: state of the art and standards applicability (NISTIR 8059)*. National Institute of Standards and Technology. US Dept of Commerce, 2015.
- [9] Rao S. *Vibration of continuous systems*. Wiley, Hoboken, 200
- [10] Tymrak B, Kreiger M, Pearce J. *Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions*. Mater Des 58, 242–246, 2014.
- [11] Chacón J, Caminero M, García-Plaza E, Núñez P. *Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection*. Mater Des 124, 143–157, 2017.
- [12] Valvez S., Reis P., Ferreira J. *Effect of annealing treatment on mechanical properties of 3D-Printed composites*. Jou Materials Research and Technology 23, 2101-2115, 2023.
- [13] Stechina D., Mendoza S., Martín H., Maggi C., Piovan M. *Determination of elastic properties of polymeric pieces constructed by 3D printing, subjected to bending*. Revista Materia 25(2), e-12617, 2020.
- [14] <https://polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/PS2.html>. Acceso el 29/05/2023.



## Modelado de la recristalización dinámica continua en una aleación de Zn-Cu-Ti laminada

Analia Roatta <sup>1,2</sup>, Martín Leonard <sup>2,3</sup>, Emanuel Nicoletti <sup>2</sup>, Fernando Schlosser <sup>4</sup> y Javier Signorelli <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Formación Básica, Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (FCEIA-UNR) – Pellegrini 250, Rosario (2000), Santa Fe.

<sup>2</sup> Instituto de Física Rosario – CONICET/UNR – Ocampo 210 bis, Rosario (2000), Santa Fe.

<sup>3</sup> Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (FCEIA-UNR) – Berutti 2109, Rosario (2000), Santa Fe.

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca (B8000CPB), Buenos Aires, Argentina

[roatta@ifir-conicet.gov.ar](mailto:roatta@ifir-conicet.gov.ar); [leonard@ifir-conicet.gov.ar](mailto:leonard@ifir-conicet.gov.ar); [nicoletti@ifir-conicet.gov.ar](mailto:nicoletti@ifir-conicet.gov.ar); [fernando.schlosser@uns.edu.ar](mailto:fernando.schlosser@uns.edu.ar); [signorelli@ifir-conicet.gov.ar](mailto:signorelli@ifir-conicet.gov.ar)

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la predicción del efecto de la recristalización dinámica continua (CDRX) en la respuesta mecánica de una aleación de Zn-Cu-Ti a temperatura ambiente sometida a ensayos de tracción uniaxial. Para ello se empleará un modelo viscoplástico autoconsistente (VPSC) con linealización afín donde el proceso de fragmentación de granos se asocia al fenómeno de CDRX. Los mecanismos de deformación activos y los fenómenos físicos que participan en la acomodación de la deformación y evolución de la textura cristalográfica de la aleación son: deslizamiento basal, piramidal de 2da especie y prismático, junto con la CDRX. A fin de predecir qué modos potenciales de deformación son activados para esta aleación particular y la influencia del fenómeno de CDRX, se incorpora una ley de endurecimiento basada en densidad de dislocaciones y un modelo de fragmentación por CDRX. El modelo es calibrado y validado frente a un conjunto de datos experimentales que incluyen curvas de fluencia, coeficientes de Lankford y evolución de textura, llevados a cabo sobre una chapa comercial de Zn-Cu-Ti a temperatura ambiente sometida a ensayos de tracción uniaxial en el plano de la chapa, paralela y perpendicularmente a la dirección de laminación del material de partida. Además, se llevará a cabo un estudio paramétrico de la influencia de la movilidad de los bordes de subgrano, tamaño de subgrano y su relación con el tamaño de grano padre, y factor de probabilidad sobre la cinética de CDRX, y se discutirá el consiguiente efecto en el comportamiento plástico de esta aleación.

**Palabras Clave:** Modelado micromecánico; Chapas de zinc; Recristalización dinámica continua.



## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos termomecánicos para la manufactura de piezas metálicas involucran, en general, deformaciones plásticas acompañadas de fenómenos microestructurales de recuperación y/o recristalización. En particular la recristalización dinámica (DRX, por sus siglas en inglés) implica la generación de granos nuevos en la microestructura por activación térmica durante la aplicación de la deformación plástica, tanto por mecanismos de nucleación y crecimiento (DDRX) como de fragmentación por formación y rotación de subgranos (CDRX) [1]. El modelado computacional de estos fenómenos resulta de gran interés científico y tecnológico, ya que facilita la comprensión de los aspectos físicos que los gobiernan y a la vez permite optimizar el procesamiento de los materiales y sus propiedades finales.

El zinc (Zn) es un metal de estructura cristalina hexagonal compacta (HCP) y relativamente bajo punto de fusión (419,5 °C), lo que hace que su comportamiento plástico a temperatura ambiente exhiba ciertas particularidades que difieren de las de los metales de estructura cúbica, más comúnmente estudiados. Actualmente existe un gran interés en el desarrollo de aleaciones de base Zn para la fabricación de *stents* y otros implementos médicos reabsorbibles [2]. Complementariamente, las chapas de la aleación Zn-Cu-Ti tienen aplicación en construcción y arquitectura debido a su buen aspecto superficial, resistencia a la corrosión y alta maleabilidad [3]. El afinamiento de grano por adición de aleantes, partículas de segunda fase y/o fragmentación por plasticidad es clave para mejorar la resistencia mecánica y al *creep* de las aleaciones de Zn [2,3]. En trabajos previos, los autores han estudiado la conformabilidad de chapas comerciales de Zn-Cu-Ti tanto experimentalmente como en la posibilidad de su modelado [4–6]. La fragmentación granular por la ocurrencia de CDRX a temperatura ambiente resulta clave para comprender la ductilidad extendida y la estabilidad de la textura encontrada para dichas chapas [4,5]. En general, debido a la estructura cristalina HCP, la marcada textura cristalográfica y la consecuente anisotropía mecánica, los modelos micromecánicos de plasticidad cristalina (CP) resultan óptimos para abordar la simulación de la plasticidad de este material. La incorporación del fenómeno de CDRX en la formulación de los modelos CP es una tarea que ha sido abordada limitadamente en la literatura [1]. Existen antecedentes en el campo de la geología [7], y más recientemente se han propuesto modelos aplicables a la CDRX de aleaciones de Mg [8,9]. El desarrollo de estos modelos es relevante para predecir mejor la evolución de textura y microestructura, y el comportamiento mecánico macroscópico de los materiales HCP y del Zn en particular.

En este trabajo se continúa el abordaje de la simulación de la respuesta mecánica y evolución de textura de chapas de Zn-Cu-Ti mediante el modelo viscoplastico auto-consistente [6] incorporando un submodelo de CDRX basado en la densidad de dislocaciones acumuladas durante la deformación [9,10]. Se presenta resumidamente el enfoque conceptual del modelo, su



posterior implementación y calibración para chapas de Zn-Cu-Ti ensayadas a tracción, y un estudio del efecto de los principales parámetros involucrados. Además, se muestran los resultados en términos de evolución de textura y cinética de la fragmentación por CDRX.

## 2. ENFOQUE DE MODELIZACIÓN Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Modelo VPSC incluyendo CDRX

El modelo empleado en este trabajo está basado en la propuesta de Tam et al. [9] y se implementa en un código de plasticidad cristalina viscoplástico autoconsistente (VPSC [11]) que permite evaluar la respuesta mecánica y el desarrollo de textura cristalográfica del material de interés, en particular para materiales con alta anisotropía. La evolución de las tensiones críticas de activación de los sistemas de deslizamiento responsables del desarrollo de la deformación plástica es descrita por una ley basada en densidad de dislocaciones [10]. Este enfoque permite disponer de variables a nivel de los granos que conforman el policristal para activar o no, los mecanismos de CDRX. Para una descripción más detallada del modelo VPSC puede consultarse la ref. [11] y trabajos previos de aplicación a plasticidad de Zn [5,6]. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de flujo del modelo de CDRX incorporado al esquema VPSC, y a continuación se resumen sus aspectos básicos (en la Tabla 1 se identifican los parámetros y constantes incluidas en la formulación).

El inicio de la CDRX se determina con un criterio de densidad crítica de dislocaciones ( $\rho_{crit}$ ) que desarrolle cada grano padre. Superado este umbral, el grano tiene la posibilidad de generar bordes internos de bajo ángulo que poseen una dada movilidad de borde de grano,  $M$ . La generación de estos nuevos subgranos o fragmentos (se usarán indistintamente ambos términos) es condicionada por una probabilidad de ocurrencia dependiente del tamaño del grano padre y del nivel de deformación acumulado. La cinética de la tasa de crecimiento (radio  $r$ ) de los subgranos recrystalizados se determina mediante la velocidad del borde de grano,  $V$ , que se expresa a través de la movilidad  $M$ , y una fuerza impulsora,  $F$ . Esta fuerza impulsora para el crecimiento del subgrano proviene de la disparidad de las densidades de dislocaciones entre los granos padre y sus subgranos. Los subgranos consumen a los granos padre hasta una fracción que es elegida como parámetro del modelo de acuerdo a la evidencia experimental disponible.

En este trabajo se adopta la posibilidad de un máximo de 9 subgranos recrystalizados por grano padre. La textura inicial se describe con un conjunto de 1000 orientaciones de igual fracción de volumen (representando 1000 granos padre), resultando a lo sumo un total de 10000 orientaciones si todos los granos padre generan el número máximo de fragmentos. Por simplicidad se selecciona una forma esférica para ambos tipos de granos.

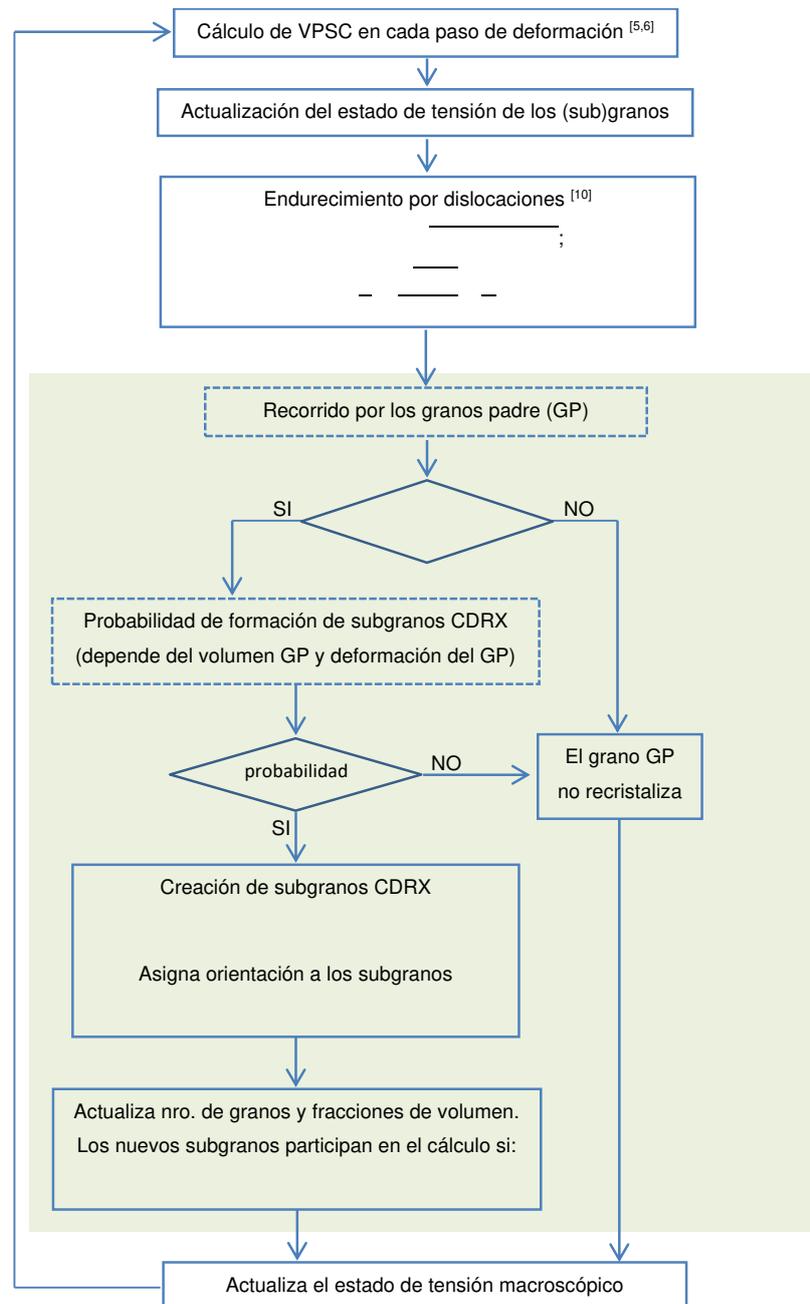


Figura 1: Diagrama de flujo y ecuaciones principales del modelo de CDRX basado en densidad de dislocaciones e incluido en el esquema VPSC.

La implementación de este modelo en el código VPSC se realiza en dos etapas (Fig. 1): en cada paso de deformación impuesto se actualizan el estado de tensiones de cada grano del policristal y se seleccionan los granos que satisfacen los criterios para que ocurra CDRX. En la segunda etapa estos posibles fragmentos actualizan su tamaño y cuando satisfacen un criterio de tamaño mínimo ( $f_{tam}$ ) comienzan a participar en el cálculo policristalino como granos limpios de



dislocaciones ( $\rho = 10^4 \text{ m}^{-2}$ ) con orientaciones cristalográficas asociadas al modelo de CDRX impuesto. Se asume que los nuevos granos tienen una textura similar a los granos padres debido a la creación de bordes de grano de bajo ángulo que evolucionan hacia alto ángulo con el desarrollo de la deformación [4]. La orientación cristalográfica de los nuevos fragmentos se obtiene modificando la orientación del grano padre con un ángulo aleatorio entre  $-15^\circ$  y  $15^\circ$ .

En esta implementación del modelo, se impone que en cada paso de deformación pueda generarse solo un fragmento por grano padre. Si en el transcurso de la deformación se alcanza el máximo de fragmentos y se siguen satisfaciendo las condiciones de CDRX, se elige al azar alguno de los fragmentos ya creados y se los limpia de dislocaciones, con el fin de emular el carácter continuo de este proceso de recrystalización. Una vez modificados el número de granos, sus orientaciones y sus correspondientes fracciones de volumen, se resuelve en forma auto-consistente el nuevo paso de deformación y, al lograr la convergencia, se actualiza el estado de tensiones macroscópicas del material. De este modo, al finalizar el proceso se dispone de la curva de fluencia del material, la actividad de los modos potenciales de deformación, los coeficientes de Lankford y la evolución de la textura cristalográfica.

Tabla 1. Identificación de las constantes y parámetros principales del modelo

Constantes		Valores
$b^s$	Vector de Burgers (sistema $s$ )	$\langle a \rangle$ : 2,66Å $\langle c+a \rangle$ : 5,61Å
$\mu$	Módulo de corte	37,9 GPa
Parámetros		Valor adoptado
	Tensión de corte resuelta crítica (del sist. $s$ )	(ver en texto)
	Camino libre medio de dislocaciones	= = 5 $\mu\text{m}$
$D$	Tamaño de grano	
$1/K$	Factor de inmovilización de dislocaciones	0,001
$L$	Factor de endurecimiento latente	0,5
$r_0$	Radio inicial de subgranos	0,8–2,0 $\mu\text{m}$
$m$	Factor de movilidad borde de subgrano	$3,5-20 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
$f_{prob}$	Factor de probabilidad	0,1–0,3
$f_{tam}$	Factor de tamaño ( $V_{CDRX}/V_{GP}$ )	0–0,05
$f_{CDRX}$	Fracción fragmentable máxima	0,75

## 2.2. Material de estudio

El material utilizado para calibrar y validar el modelo es una chapa comercial de la aleación Zn-Cu-Ti de espesor 0,80 mm. Su comportamiento mecánico en tracción uniaxial (UAT) y la evolución de textura y microestructura correspondientes fueron presentados en trabajos previos

[5,6]. A modo de resumen, en la Fig. 2a se presentan las curvas de fluencia (tensión-deformación reales) para tres direcciones de ensayo en el plano de la chapa: a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  de la dirección de laminación (RD, DD y TD, respectivamente). En ellas puede apreciarse la marcada anisotropía mecánica del material debida a la textura cristalográfica heredada del proceso de laminado. Dicha textura inicial y su evolución con la deformación por tracción se resume en la Fig. 2c empleando las figuras de polo basales (eje  $c$  ó  $\langle 0002 \rangle$ ). La mayoría de los granos presentan su eje  $c$  a  $\sim 20^\circ$  de la dirección normal a la chapa (ND) en el plano ND-RD, estando en una orientación marcadamente más favorable para la deformación plástica en el ensayo UAT-RD respecto al UAT-TD. El caso a  $45^\circ$  se encuentra en una condición intermedia. Este efecto se observa principalmente en la anisotropía de las curvas de carga (Fig. 2a) tanto en los valores de tensión como de deformación máxima obtenidas.

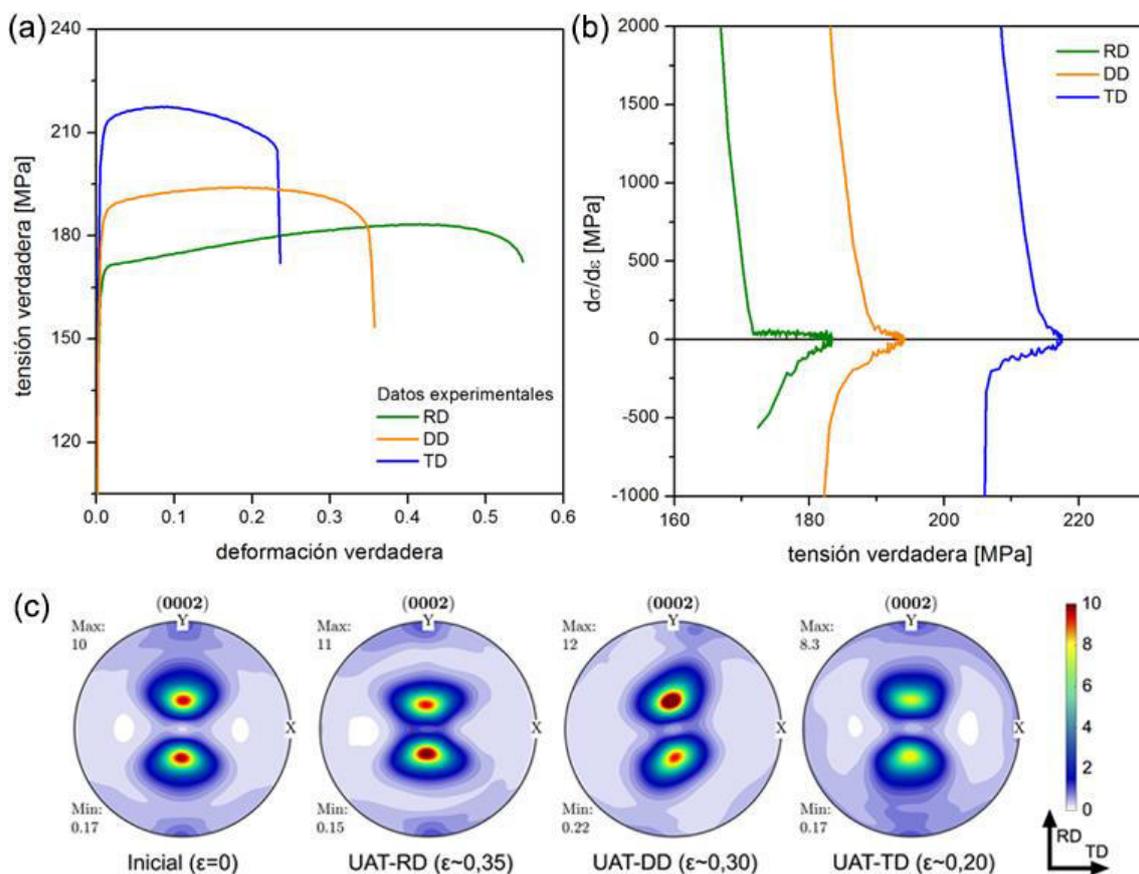


Figura 2: (a) Curvas de fluencia para ensayos de tracción uniaxial (UAT) en tres direcciones; (b) Curvas de endurecimiento por deformación en función de la tensión; (c) texturas experimentales para la condición inicial y luego de los ensayos de tracción.

Con respecto a la microestructura, como se mostró en trabajos previos este material desarrolla CDRX cuando se lo deforma plásticamente a temperatura ambiente, incluso en una sollicitación



sencilla tal como un ensayo UAT en RD [4,6]. En la sollicitación transversal (TD) cabe esperar un afinamiento de grano asistido por maclado, además del proceso de CDRX, aunque su efecto es menor. Como se mencionó, la estabilidad de la textura y su leve aleatorización puede atribuirse al fenómeno de CDRX; como así también la elevada ductilidad en términos de elongación post-uniforme. Otra manifestación de este fenómeno puede observarse en el comportamiento del endurecimiento por deformación. La Fig. 2b muestra la evolución de la tasa de endurecimiento ( $d\sigma/d\epsilon$ ) con la tensión ( $\sigma$ ). En el período de deformación plástica homogénea no hay aumento en el endurecimiento, lo que indica que el deslizamiento es el modo de deformación predominante (sin maclado). Este bajo nivel de endurecimiento, seguido de la adopción de valores negativos durante un rango de deformación prolongado, resulta indicativo de fenómenos de DRX [9].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se comienza calibrando el modelo de endurecimiento por dislocaciones dentro del código VPSC y se logra capturar la anisotropía observada en las tensiones de fluencia del material para ensayos de tracción en distintas direcciones respecto a la de laminación (Fig. 2). Para ello se consideran potencialmente activos los sistemas de deslizamiento basal  $\langle a \rangle$ , prismático  $\langle a \rangle$  y piramidal II  $\langle c+a \rangle$  con tensiones críticas CRSS iguales a 12 MPa, 135 MPa y 80 MPa, respectivamente, que cumplen las relaciones típicas empleadas para materiales hexagonales con relación  $c/a$  mayor que la ideal [5]. Los valores adoptados para el resto de los parámetros del modelo se detallan en la Tabla 1. Las curvas de carga obtenidas para ensayos en RD y TD se muestran en la Fig. 3a donde puede observarse un marcado endurecimiento del material con la evolución de la deformación cuando no se considera el efecto de la CDRX. Además, en la Fig. 3b se muestran las figuras de polo basales desarrolladas a deformaciones de 0,2 para ambos ensayos. La comparación con las texturas experimentales indica la presencia de componentes cualitativamente correctas para el caso RD aunque con intensidades superiores, mientras que en el caso TD se produce un desdoblamiento de los polos basales que no se observa en las mediciones. Estos efectos fueron observados previamente empleando la ley de endurecimiento de Voce y diferentes linealizaciones, afín y tangente, respectivamente, para la aplicación del código VPSC [5,6]. Respecto a las predicciones de coeficientes de Lankford, la tendencia creciente a medida que la dirección del ensayo se aleja de RD logra reproducirse, aunque los valores obtenidos: 0,13 y 0,48 para UAT-RD y TD, respectivamente, subestiman los experimentales, 0,29 y 0,53, medidos a una deformación de 20% [5].

Con el objetivo de mejorar estos resultados se implementa el submodelo CDRX y se evalúa el efecto de sus diferentes parámetros: movilidad de borde de grano, radio inicial asignado al subgrano, probabilidad de creación de subgranos y umbral de tamaño del subgrano para participar del cálculo autoconsistente.

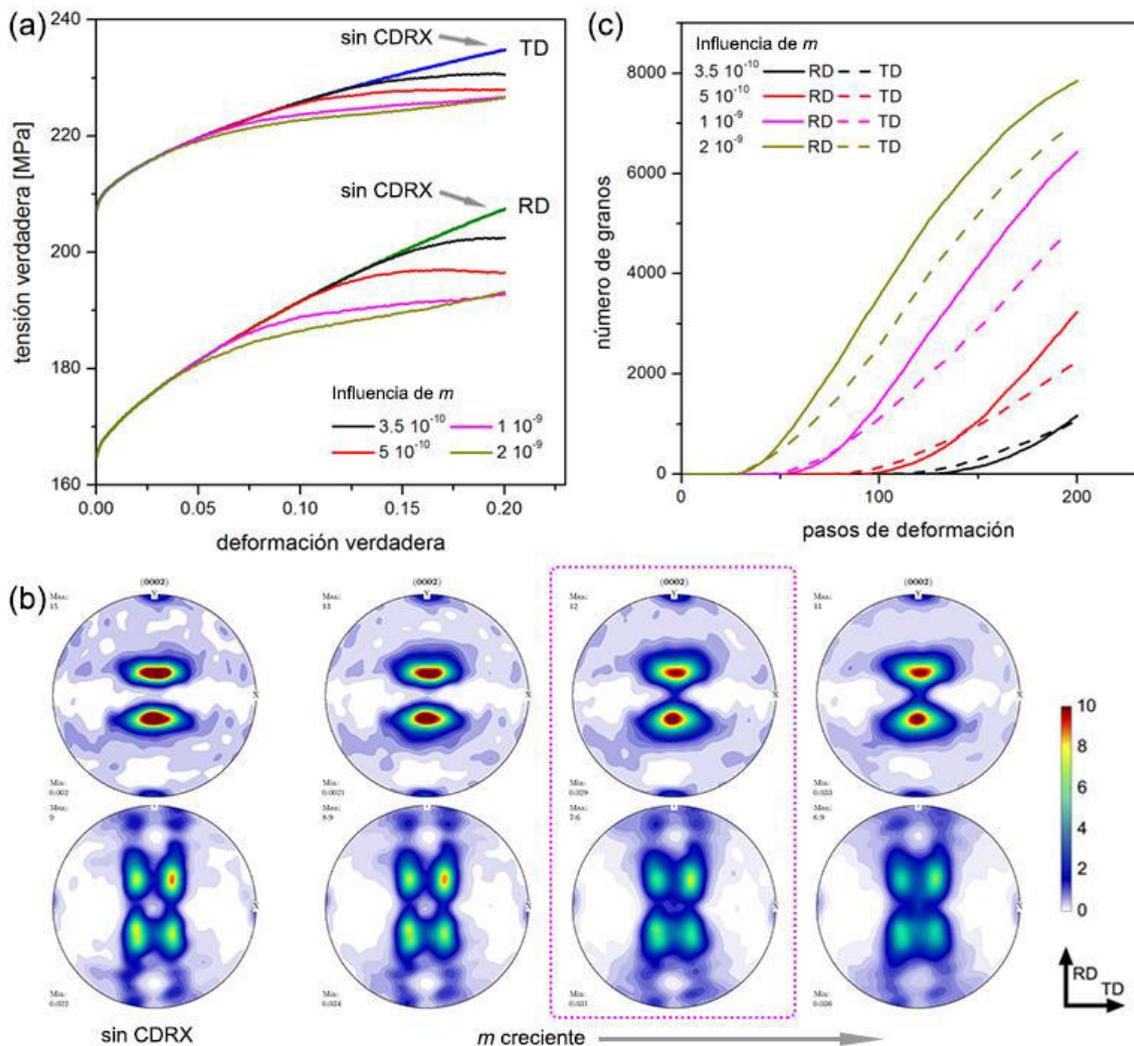


Figura 3: (a) Curvas de fluencia simuladas sin CDRX y con CDRX para distintos valores del factor de movilidad; (b) texturas predichas (fila superior: UAT-RD, fila inferior: UAT-TD); (c) evolución del número de subgranos generados con la deformación.

### 3.1. Influencia de la movilidad de borde de (sub)grano

La movilidad de borde de grano depende de características del material como son el coeficiente de difusión a través de los bordes de grano, su grosor, la energía de activación para difusión y la temperatura [9]. La cinética de crecimiento de los subgranos está dada por una velocidad  $V=MF$ , donde  $F$  es la fuerza impulsora que proviene de la disparidad entre densidades de dislocaciones del grano padre y el recrystalizado. El factor que acompaña esta expresión ( $m$ , ver diagrama en Fig. 1) se eligió entre  $3,5 \times 10^{-10}$  y  $2 \times 10^{-9}$  m<sup>3</sup>/s. Las figuras 3a y 3c muestran las curvas tensión-deformación para los ensayos en RD y TD en comparación con la simulada sin considerar CDRX,

y la evolución del número de nuevos granos con los pasos de deformación (200 pasos corresponde a una deformación de 20%). Puede observarse un ablandamiento más temprano del material a medida que aumenta el factor de movilidad y un posterior endurecimiento cuando la evolución del número de granos tiende a un comportamiento en saturación. Este efecto se observa claramente para la curva correspondiente al mayor  $m$  a partir de una deformación de 0,15, siendo más marcado para el ensayo RD.

Con respecto a la evolución de la textura, el cambio principal se da en la disminución de las intensidades al aumentar el número de subgranos recristalizados describiendo mejor los datos experimentales, aunque aún persiste la separación de polos basales para el ensayo en TD. Se indica en magenta el caso de referencia que se tomará de aquí en más para evaluar la influencia del resto de los parámetros estudiados.

### 3.2. Influencia del radio inicial

En el proceso de generación de nuevos granos es necesario adoptar un tamaño inicial del subgrano recristalizado que luego evolucionará según la cinética de crecimiento seleccionada. Se tomaron valores de  $r_0$  entre 0,8 y 2  $\mu\text{m}$  que corresponden a 0,4 y 0,064% en relación al volumen inicial del grano padre y un factor de movilidad constante  $m = 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ .

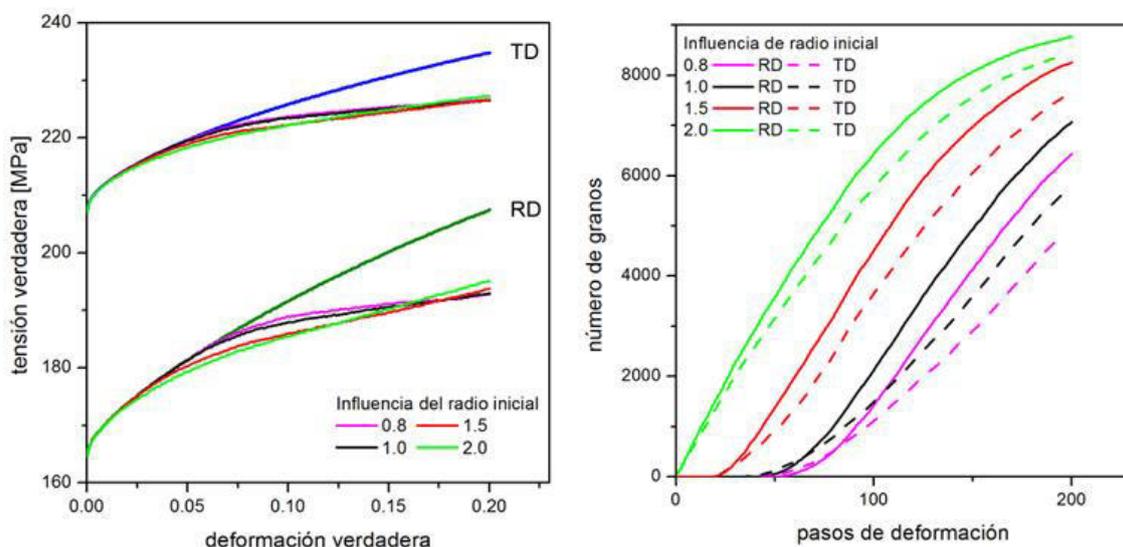


Figura 4: Curvas de fluencia simuladas para distintos valores radio inicial de los subgranos (izq.) y evolución del número de subgranos recristalizados con la deformación (der.).

Valores de  $r_0$  crecientes adelantan el comienzo de la recristalización pero también provocan una saturación temprana del proceso. El primer efecto se manifiesta en las curvas de carga, en un ablandamiento del material (en comparación con la respuesta del modelo sin considerar CDRX)

que comienza a menores deformaciones, mientras que la saturación se traduce en un crecimiento marcado de la pendiente  $d\sigma/d\varepsilon$ . Este cambio no es representativo del comportamiento del material e indicaría que cesó el proceso de CDRX. Respecto a la evolución de la textura se comporta en forma similar al caso anterior.

### 3.3. Influencia de la probabilidad de creación de subgranos

La probabilidad de creación de nuevos granos se asume proporcional al tamaño del grano padre y de su deformación en ese paso de modo de activar el proceso si supera un valor elegido al azar. Se analiza la influencia del factor de proporcionalidad entre 0,1 y 0,3. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5 donde puede observarse que el inicio del ablandamiento no se modifica en el rango estudiado y que la aparición de saturación en las curvas de evolución de número de granos DRX vuelve a manifestarse en un endurecimiento indeseado del material.

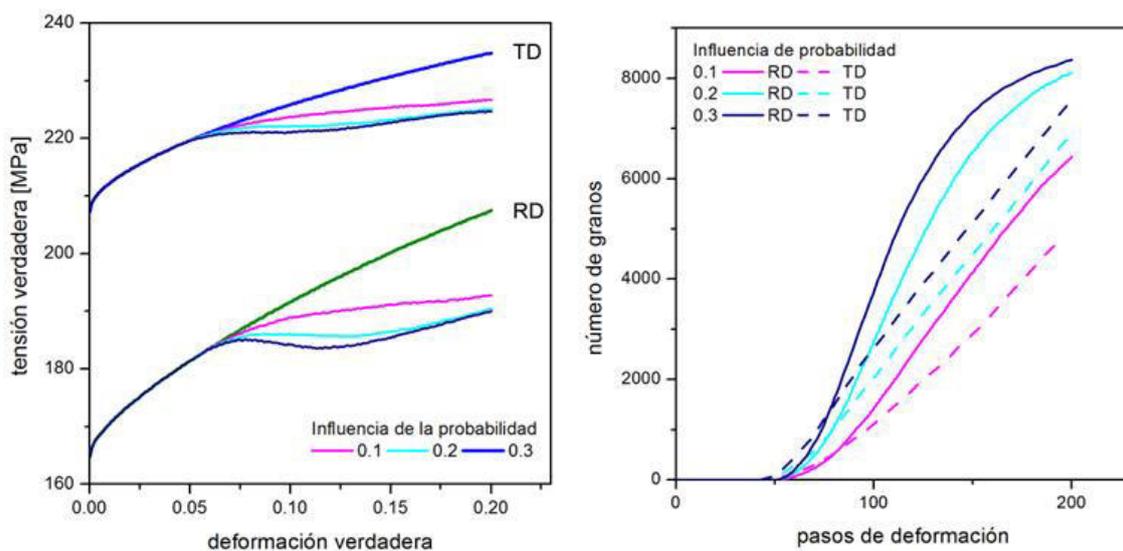


Figura 5: Curvas de fluencia simuladas (izq.) y evolución del número de subgranos recristalizados con la deformación (der.) para distintos valores del factor de probabilidad ( $f_{prob}$ ).

### 3.4. Influencia del umbral de tamaño del subgrano

El umbral de tamaño de grano es la fracción de volumen del subgrano respecto a su grano padre a partir de la cual el nuevo grano participa en el cálculo autoconsistente. La Fig. 6 muestra las respuestas tensión-deformación y evolución de nro. de granos para umbrales decrecientes a partir del 5%. Los umbrales menos restrictivos llevan a un comienzo más temprano de la CDRX como también la saturación, tal como se vio en la sección 3.2. Aunque no son mostradas, la evolución de textura sigue un comportamiento similar a los casos previos.

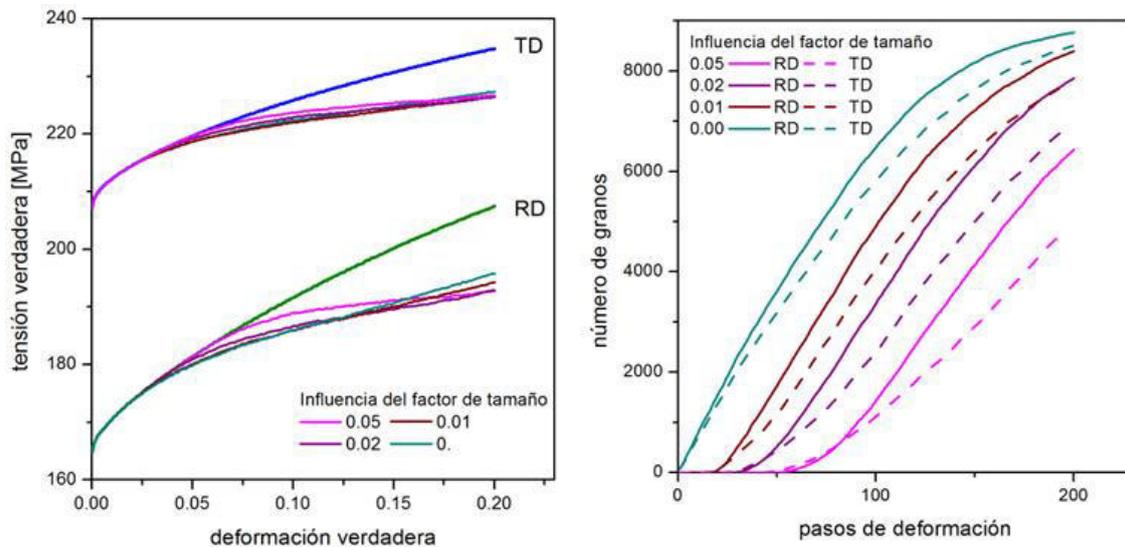


Figura 6: Curvas de fluencia simuladas (izq.) y evolución del número de subgranos recristalizados con la deformación (der.) para distintos valores del factor de tamaño ( $f_{tam}$ ).

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó un modelo de CDRX basado en la densidad de dislocaciones incluido en el esquema VPSC a fin de simular el efecto de dicho fenómeno de recristalización en el comportamiento mecánico de una chapa de Zn-Cu-Ti. La ley de endurecimiento por densidad de dislocaciones implementada logra capturar la anisotropía de la respuesta en tracción uniaxial en distintas direcciones respecto a la de laminación de la chapa y brinda información a nivel de cada grano padre, necesaria para determinar el inicio del proceso de CDRX. Se analizó la influencia de varios parámetros del submodelo de CDRX y se logró modificar el comportamiento de las curvas tensión-deformación encontrando una marcada disminución de la tasa de endurecimiento del material, compatible con la evidencia experimental. Respecto a la evolución de la textura, en todos los casos analizados se desarrollaron las mismas componentes principales con una disminución de las intensidades al tener en cuenta la CDRX, aproximándose a las intensidades medidas.

La obtención de datos experimentales referentes a la evolución microestructural durante la CDRX, complementarios a los disponibles hasta ahora (por ejemplo, mapeo EBSD *ex situ* mediante ensayos secuenciales con seguimiento de la microestructura en regiones representativas) brindarían información más detallada sobre fracción de volumen de material recristalizado, dependencia con la orientación del grano padre, reorientación de nuevos fragmentos (ángulo y eje de misorientación), posibilidad de fragmentación por maclado, etc.



Estas tareas, que permitirán la calibración/validación del modelo presentado, se están abordando en trabajos en curso.

## REFERENCIAS

- [1] Huang, K. y Logé, R. *A review on dynamic recrystallization phenomena in metallic materials*. Materials and Design, 111: 548–574. 2016.
- [2] Mostaed, E., Sikora-Jasinska, M., Drelich, J. y Vedani M. *Zinc-based alloys for degradable vascular stent applications*. Acta Biomaterialia, 71: 1–23. 2018.
- [3] Porter, F. *Zinc Handbook*. 1st ed. CRC Press, Nueva York. 1991.
- [4] Leonard, M., Moussa, C., Roatta, A., Seret, A. y Signorelli, J.W. *Continuous dynamic recrystallization in a Zn–Cu–Ti sheet subjected to bilinear tensile strain*. Materials Science and Engineering A, 789. 2020.
- [5] Roatta, A., Leonard, M., Nicoletti, E. y Signorelli, J.W. *Modeling texture evolution during monotonic loading of Zn-Cu-Ti alloy sheet using the VPSC polycrystal model*. Journal of Alloys and Compounds, 860: 158425. 2020.
- [6] Leonard, M., Nicoletti, E., Roatta, A. y Signorelli, J.W. *Recristalización dinámica continua en una chapa de Zn-Cu-Ti: caracterización experimental y modelado*. VII CAIM / II CAIFE (ISSN 2683-8818), 15-17 sept. 2021, UTN Fac. Reg. San Nicolás.
- [7] Signorelli, J. y Tommasi, A. *Modeling the effect of subgrain rotation recrystallization on the evolution of olivine crystal preferred orientations in simple shear*. Earth and Planetary Science Letters, 430: 356–366. 2015.
- [8] Zhou, G., Z. Li, D. Li, Y. Peng, H. Wang and P. Wu. *Misorientation development in continuous dynamic recrystallization of AZ31B alloy sheet and polycrystal plasticity simulation*. Materials Science and Engineering A, 730: 438–456. 2018.
- [9] Tam, K.J., M.W. Vaughan, L. Shen, M. Knezevic, I. Karaman and G. Proust. *Modelling the temperature and texture effects on the deformation mechanisms of magnesium alloy AZ31*. International Journal of Mechanical Sciences, 182: 105727. 2020.
- [10] Kitayama, K., C.N. Tomé, E.F. Rauch, J.J. Gracio and F. Barlat. *A crystallographic dislocation model for describing hardening of polycrystals during strain path changes*. International Journal of Plasticity, 46: 54–692. 2013.
- [11] Lebensohn R. y Tomé C. *A self-consistent anisotropic approach for the simulation of plastic deformation and texture development of polycrystals*. Acta Metallurgica & Materialia, 41(9). 1994.



## SOLDADURA DE SOLAPE POR FRICCIÓN AGITACIÓN (FSLW) EN UNIONES DISÍMILES AL-CU Y AL-ACERO INOXIDABLE

Leonardo N. Tufaro<sup>1,2</sup> y Hernán G. Svoboda<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Soldadura, Subgerencia Operativa de Mecánica y Logística, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), San Martín, Buenos Aires, Argentina -  
ltufaro@inti.gob.ar

<sup>2</sup> GTSyCM3, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina - hsvobod@fi.uba.ar

### RESUMEN

La Soldadura de Solape por Fricción Agitación (FSLW) es un proceso de unión en estado sólido relativamente reciente, que tiene un gran desarrollo en los últimos 30 años, en especial para uniones de aleaciones de aluminio, que presenta una serie de ventajas para la soldadura de materiales disímiles. Por este motivo, en las aplicaciones industriales donde se requiere de la unión de materiales disímiles como aluminio, acero o cobre este proceso presenta gran interés. Además, la soldadura de chapa fina (espesor hasta 1 mm) presenta mayores desafíos debido a la menor rigidez de las mismas y a la mayor reducción relativa del espesor en la zona de la unión. En el presente trabajo se estudió la soldadura de solape por Fricción Agitación (FSLW: Friction Stir Lap Welding) en chapa fina ( $e=1$  mm), de materiales disímiles: AA5052-H32 – Cu y AA5182-O – AISI 304L, con la chapa de aluminio ubicada del lado superior de la junta. El objetivo del trabajo es analizar el efecto del procedimiento de soldadura sobre las características macroestructurales y las propiedades mecánicas de estas uniones a fin de desarrollar procedimientos de soldadura robustos para las mismas. Se realizaron uniones soldadas por FSLW en los materiales mencionados, con diferentes parámetros de proceso. Posteriormente se llevó a cabo la caracterización macroestructural, se determinaron perfiles de microdureza y se realizaron ensayos de corte. Tanto la velocidad de soldadura como la indentación, presentaron influencia sobre la resistencia de la unión. Se alcanzaron elevados valores de eficiencia de junta, obteniéndose distintos modos de fractura en el ensayo de corte: material base, zona agitada o interfaciales. Se analizó en flujo plástico en la interfaz de las uniones y su relación con el modo de fractura de las mismas en el ensayo de corte. Se obtuvieron procedimientos que optimizan las propiedades de las uniones obtenidas.

**Palabras clave:** Friction Stir Lap Welding (FSLW); Aluminio; Cobre; AISI 304L.



## 1. INTRODUCCIÓN

La Soldadura por Fricción Agitación (FSW) es un proceso de soldadura en estado sólido relativamente reciente, que tiene un gran desarrollo en los últimos 30 años, en especial para uniones de aleaciones de aluminio, que presenta además ventajas comparativas para la unión de materiales disimilares como aluminio-acero o aluminio-cobre, en especial para aquellos de difícil soldabilidad por otros procesos [1, 2]. En particular, la variante de Soldadura de Solape por Fricción Agitación (FSLW) es ampliamente utilizado en diversas industrias, debido a la simplicidad de su configuración, orientado especialmente a la unión de chapas finas. En este sentido, la soldadura de chapa fina (espesor hasta 1 mm) mediante estos procesos presenta mayores desafíos debido a la menor rigidez de las mismas y a la mayor reducción relativa del espesor en la zona de la unión [3].

En uniones disimilares Al-Cu o Al-Acero se suele formar en la interfaz una capa de compuestos intermetálico (IMC). Se ha mostrado que la presencia de una delgada capa de IMC es beneficioso para la unión. Sin embargo, la integridad de la interfaz se ve afectada al aumentar el espesor de dicha capa [4, 5]. La soldadura FSW es un proceso de bajo aporte térmico, por lo que se logra controlar el crecimiento de la capa de IMC [1, 2, 5].

Los parámetros de proceso presentan una fuerte influencia en la evolución microestructural y en la interacción entre ambos materiales en uniones disimilares por FSLW en chapa fina. El nivel de interacción (indentación) del pin en la chapa inferior es un aspecto relevante. La misma produce el flujo plástico de material de la chapa inferior en la chapa superior formando un “hook” el cual puede afectar las propiedades mecánicas de la unión. Por un lado, reduce la sección resistente de la chapa superior [2]. Por otro, genera un anclaje mecánico que puede ser positivo para la resistencia de la unión [6]. La velocidad de soldadura también puede afectar el tamaño del hook, así como otros aspectos microestructurales que terminan afectando las propiedades mecánicas de la unión [7].

Para ciertos materiales son escasos los trabajos sistemáticos realizados sobre el efecto de las variables de proceso sobre las propiedades mecánicas de uniones soldadas por FSLW de materiales disimilares en chapa fina.

El objetivo del trabajo es analizar el efecto del procedimiento de soldadura sobre las características macroestructurales y las propiedades mecánicas de uniones de solape por FSLW en chapa fina de materiales disimilares AA5052-H32 – Cu y AA5182-H32 – AISI 304L, a fin de desarrollar procedimientos de soldadura robustos para las mismas.



## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se analizaron uniones a solape disímiles en chapas de diferentes materiales y espesores ( $t$ ) mediante el proceso FSLW. Las juntas analizadas fueron AA5052-H32 ( $t = 1$  mm) con Cu ( $t = 0,8$  mm), así como AA5182-O ( $t = 1,2$  mm) con AISI 304L ( $t = 0,7$  mm). Sobre cada uno de los materiales base se determinó la microdureza (500 gf) y se realizaron ensayos de tracción.

El ancho de cada chapa de la junta fue de 75 mm, mientras que el largo fue de 125 mm. Las chapas se posicionaron de manera tal de generar una longitud de solapamiento de 30 mm. La chapa de aleación de aluminio se ubicó del lado superior de la junta y del lado de avance (AS), mientras que las chapas de cobre y acero inoxidable se ubicó del lado inferior del lado de retroceso (AR), respectivamente. En la Figura 1 se puede observar un esquema de la configuración de junta utilizada.

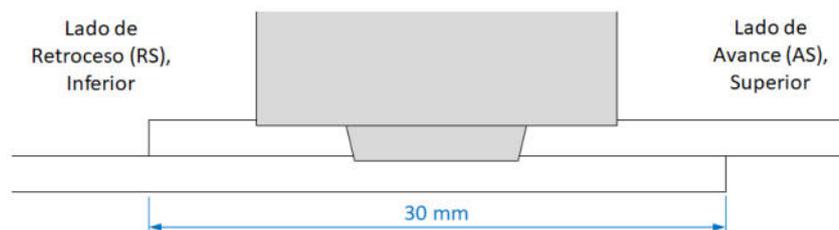


Figura 1: Esquema de configuración de junta para soldadura FSLW

Se utilizaron dos herramientas para soldadura FSLW, una para cada par de materiales a unir. Las herramientas utilizadas fueron fabricadas en acero para herramientas del tipo H13. Se utilizó un hombro cóncavo de 10 mm de diámetro y un pin cónico liso con un diámetro mayor de 4,2 mm y un diámetro menor de 3,5 mm. La longitud del pin fue igual al espesor de la chapa de aluminio, de manera tal de que al generar una indentación ( $h$ ) de la herramienta del orden de 0,1 mm el pin se inserte 0,1 mm en la chapa inferior. Las uniones se realizaron con una velocidad de rotación de 680 rpm y un ángulo de inclinación de la herramienta de  $1,5^\circ$ . Se utilizaron diferentes velocidades de avance: 98, 146 y 206 mm/min, designando con este valor a las diferentes condiciones de soldadura. Para el caso de las uniones AA5052-H32 – Cu se realizó una unión adicional para la mayor velocidad con una indentación menor, designando a esta condición 206b. En la Figura 2 se puede observar el montaje experimental empleado para la soldadura FSLW y una de las uniones soldadas.



Figura 2: Montaje experimental para soldadura FSLW

Las uniones soldadas obtenidas se inspeccionaron visualmente y se extrajeron cortes transversales para observación macrográfica y medición de perfiles de microdureza Vickers empleando una carga de 500 gf, sobre la línea media del espesor de la chapa del lado superior, (aleación de aluminio). Se realizaron ensayos de corte de 3 probetas extraídas de las uniones soldadas, obteniéndose la carga máxima por unidad de longitud (ancho) ( $P_{m\acute{a}x}/w_0$ ). Se analizaron los modos de fractura obtenidos en cada caso.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Materiales Base

En la Tabla 1 se muestra la identificación, el espesor y las propiedades mecánicas de los materiales base (BM): microdureza Vickers (HV0,5), resistencia a la tracción ( $\sigma_{UTS}$ ) y deformación a fractura ( $e_f$ ).

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales base

Material Base	t (mm)	HV (HV0,5)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$e_f$ (%)	$P_{m\acute{a}x}/w_0$ (N/mm)
AA5052-H32	1	79	260	11	260
AA5182-O	1,2	76	296	24	355
Cu	0,8	53	229	31	183
AISI 304L	0,7	173	741	54	519



También se muestra la  $P_{m\acute{a}x}/w_0$  correspondiente a cada material, característica que es de utilidad para el análisis de la resistencia de las uniones de solape obtenidas. La eficiencia de junta de las uniones se determina utilizando la menor de las  $P_{m\acute{a}x}/w_0$  de los materiales de la unión. Para el caso de las uniones de AA5052-H32 – Cu, las  $P_{m\acute{a}x}/w_0$  de las uniones se comparan con la del cobre (183 N/mm), mientras que para las uniones de AA5182-O – AISI 304L se utiliza la de la aleación de aluminio (355 N/mm).

### 3.2. Uniones de AA5052-H32 – Cu

En la Figura 3 se muestra una de las probetas soldadas por FSLW de AA5052-H32 – Cu, representativa de todas las uniones realizadas. Las uniones presentaron un buen aspecto superficial, con un flash adecuado y sin observarse defectos superficiales. En el agujero de la salida de la herramienta al final del proceso, se distingue la chapa de cobre, lo cual indica que hubo interacción entre el pin de la herramienta y la chapa inferior.



Figura 3: Aspecto superficial de una unión AA5052-H32 – Cu

En la Figura 4 se presentan las macrográficas correspondientes a los cortes transversales de las distintas condiciones analizadas para las uniones AA5052-H32 – Cu. En ningún caso se observan defectos macroscópicos en la zona agitada (Weld Nugget: WN), lo cual se asocia a un flujo plástico adecuado durante el proceso FSLW. Para todas las condiciones se puede ver un buen mezclado en la interfaz de la unión, lo cual puede asociarse a una considerable interacción entre el pin de la herramienta y la chapa de cobre en el lado inferior y al flujo plástico generado en ambos materiales. Es importante analizar el flujo de cobre ascendente hacia la chapa de aluminio generado, denominado hook, particularmente del lado de avance ya que puede afectar la resistencia en los ensayos de corte al reducir la sección del lado del aluminio y aumentar el efecto de concentración de tensiones en el borde de la interfaz soldada [8]. En las probetas soldadas, dicho hook puede considerarse bajo, salvo para a condición 206. Se observa cierta

tendencia al aumento del tamaño del hook al aumentar la velocidad de avance y la indentación de la herramienta (condición 206b).

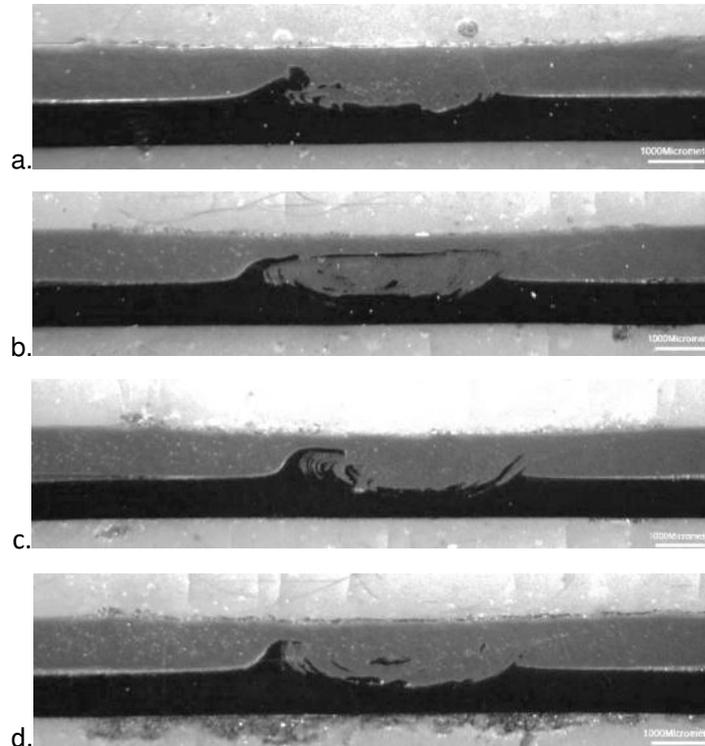


Figura 4: Macrografías de las uniones AA5052-H32 – Cu: a. 98, b. 146, c. 206, d. 206b

En la Figura 5 se muestra el perfil de microdureza obtenido sobre la chapa de aluminio en una de las uniones soldadas (AA5052-H32 – Cu/206b), indicándose con línea de trazos la dureza del AA5052-H32 (material base). Los resultados mostrados son representativos de lo obtenido para las diferentes condiciones analizadas. Se puede observar una disminución de dureza en la WN y la zona afectada por el calor (HAZ), la cual se asocia a fenómenos de recuperación y recristalización durante el proceso FSLW [8, 9]. Los puntos en la WN de dureza superior a la del material base se corresponden con mediciones sobre el flujo ascendente de cobre en el aluminio, el cual presenta un fuerte endurecimiento por deformación.

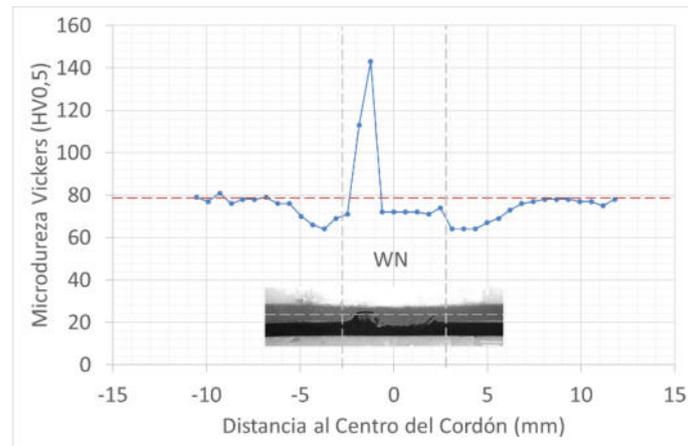


Figura 5: Perfiles de microdureza Vickers de la unión AA5052-H32 - Cu/206b

En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de corte para las uniones AA5052-H32 – Cu. Para cada condición se presenta el resultado obtenido para cada una de las tres probetas ensayadas y se indica numéricamente la  $P_{m\acute{a}x}/w_0$  promedio y la eficiencia de junta promedio. Además, se muestran los tipos de fractura obtenidos y se indican con colores el tipo de fractura correspondiente a cada ensayo.

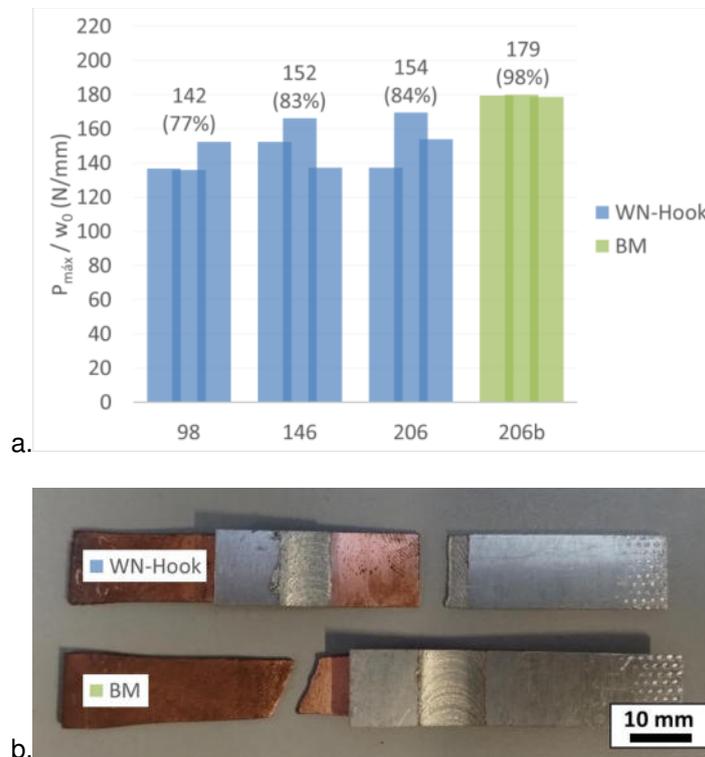


Figura 6: Ensayos de corte de las uniones AA5052-H32 – Cu: a.  $P_{m\acute{a}x}/w_0$ , b. Tipos de fractura

En general, las uniones soldadas con una indentación nominal de 0,1 mm (98, 146 y 206) presentaron una fractura ubicada en la WN, del lado de avance en la posición del hook (WN-Hook) con una dispersión mayor en los valores de  $P_{m\acute{a}x}/W_0$  obtenidos, en comparación con la 206b. Se observa cierta tendencia al aumento de la resistencia con la velocidad de avance, obteniéndose eficiencias de junta entre 77 y 84%. Estos resultados estarían asociados a que al aumentar la velocidad de avance la indentación se ve disminuida, debido a la mayor resistencia a la deformación plástica, por mayor velocidad de deformación y menor temperatura generada. A su vez, la dureza de la zona del hook, podría incrementarse levemente con la velocidad de soldadura. La condición 206b, la de menor indentación, presentó un desempeño superior, produciéndose la falla en el material base (BM) con una eficiencia de junta del 98 % y presentando una muy baja dispersión, propia de la rotura en el material base. Este efecto estaría asociado a que la menor indentación produce un menor tamaño de hook, lo que aumenta la carga de rotura en la zona agitada asociada al hook. Por último, cabe destacar que todas las uniones verifican la eficiencia requerida por la norma AWS D17.3 del 60% para uniones de solape por FSLW [10, 11].

### 3.3. Uniones de AA5182-O – AISI 304L

En la Figura 7 se observa una de las probetas soldadas por FSLW de AA5182-O – AISI 304L, representativa de todas las uniones realizadas. Las uniones presentaron un buen aspecto superficial, con un flash adecuado y sin observarse defectos superficiales.



Figura 7: Aspecto superficial de una unión AA5182-O – AISI 304L

En la Figura 8 se presentan las macrografías correspondientes a los cortes transversales de las distintas condiciones analizadas para las uniones AA5182-O – AISI 304 L. En todos los casos no se observan defectos macroscópicos en la WN, lo cual se asocia a un flujo plástico adecuado durante la soldadura. Para todas las condiciones se observa algún grado de deformación de la



chapa de acero inoxidable en la interfaz, lo cual indica que hubo interacción entre el pin de la herramienta y la chapa del lado inferior. En general se observa un bajo mezclado, debido a la mayor dureza y endurecimiento que presenta el acero inoxidable, lo que genera una baja deformación plástica. Para el caso de la unión 146, se observa un flujo plástico en la interfaz algo superior. Por otra parte, el hook resultó considerablemente bajo para todas las condiciones.

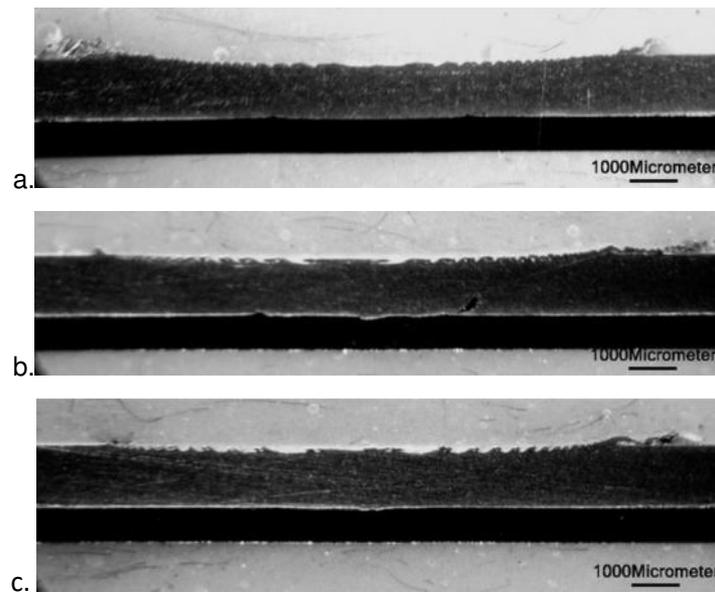


Figura 8: Macrográficas de las uniones AA5182-O – AISI 304L: a. 98, b. 146, c. 206

En la Figura 9 se muestra el perfil de microdureza obtenido sobre la chapa de aluminio en una de las uniones soldadas (AA5182-O – AISI 304L/146). Indicándose con línea de trazos la dureza del AA5182-O. Los resultados mostrados son representativos de lo obtenido para las diferentes condiciones analizadas.

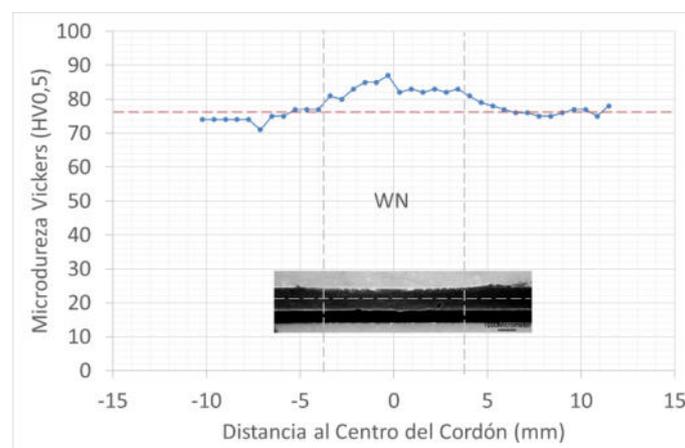


Figura 9: Perfiles de microdureza Vickers de la unión AA5182-O – AISI304L/146

El aumento de dureza en la WN se debe al endurecimiento por refinamiento del tamaño de grano grano que experimenta el material durante el proceso de soldadura, considerando que el material base corresponde a la condición recocida (O) [8, 9].

En la Figura 10 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de corte para las uniones AA5182-O – AISI 304L, de manera análoga a la Figura 6. Estas uniones presentaron tres tipos de fractura: interfacial, en el WN-Hook y en el material base (BM).

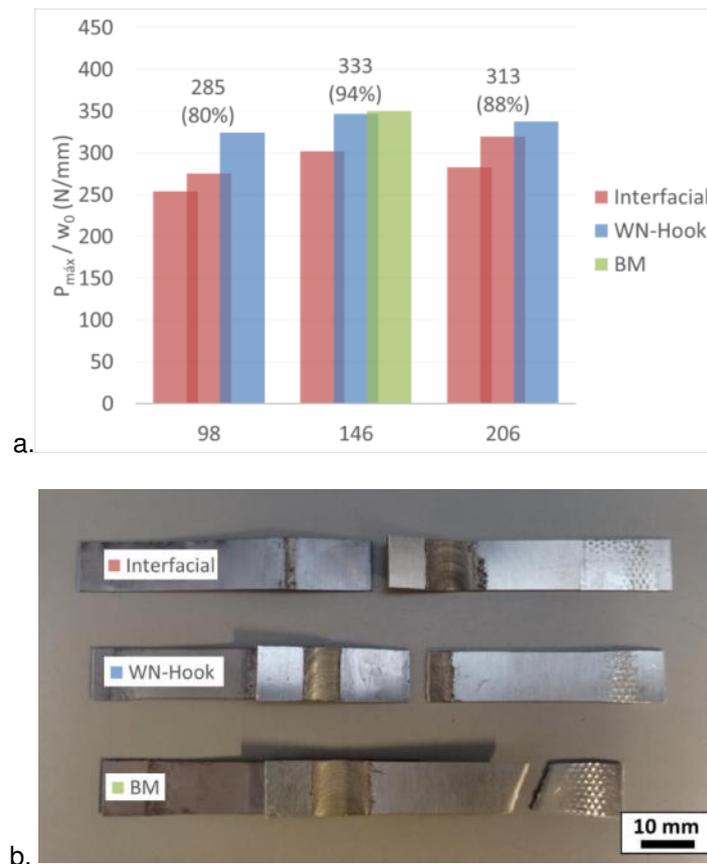


Figura 10: Ensayos de corte de las uniones AA5182-O – AISI 304L: a.  $P_{m\acute{a}x}/w_0$ , b. Tipos de fractura

Para las tres condiciones se obtuvieron más de un modo de falla, sin presentar una gran dispersión en los valores de resistencia obtenidos. Este resultado puede asociarse al bajo flujo plástico y a la sensibilidad de la resistencia de la interfaz a leves variaciones del mismo durante el proceso de soldadura, así como a que los valores de carga de rotura de transición entre los diferentes mecanismos son cercanos. Las probetas que fallaron de forma interfacial presentaron la menor resistencia, seguidas de las que fracturaron en la WN y por último en el BM. Podría indicarse que la carga de transición entre el modo de rotura interfacial al modo WN-Hook es del orden de los 320 N/mm. Para la condición 146, la que presentó un mayor flujo plástico en la



interfaz, se obtuvo la mayor resistencia, alcanzando una eficiencia promedio de 94%. Además, fue la única condición que presentó una probeta que falló en el BM, con una eficiencia del 98%. A pesar de la falta de robustez observada en la forma de falla de las probetas, las eficiencias de junta obtenidas fueron superiores al 70%, las cuales se consideran satisfactorias ya que superan la eficiencia requerida por la norma ASW D17.3 del 60% [10, 11].

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió el efecto de la velocidad de soldadura e indentación en uniones FSLW disimilares de aleaciones de aluminio (AA5052 y AA5182) con cobre y con acero inoxidable austenítico del tipo AISI 304L, sobre las propiedades mecánicas.

Todas las uniones obtenidas tuvieron buen aspecto superficial y sin observarse defectos macroscópicos. Las uniones de AA5052-H32 – Cu presentaron un mayor mezclado entre ambos materiales en la interfaz y un mayor hook en comparación con las uniones de AA5182-O – AISI 304L.

Las uniones AA5052-H42 – Cu con una indentación nominal de 0,1 mm presentaron una fractura en la zona agitada del lado de avance en la posición del hook, con eficiencias de junta entre 77 y 84%. Para la condición de menor indentación (206b), la fractura se ubicó en el material base, obteniéndose una eficiencia de junta del 98%, lo cual puede asociarse a un hook menor. Esta observación pone de manifiesto que la interacción entre la herramienta y el pin debe ser acotada para maximizar la resistencia de la unión.

Las uniones AA5182-O – AISI 304L presentaron más de un modo de falla para la misma condición, lo cual pueden asociarse al bajo flujo plástico en la interfaz y a la similitud entre los valores de carga de rotura mediante los distintos mecanismos. Las probetas que fallaron de forma interfacial presentaron la menor resistencia, seguidas de las que fracturaron en la WN y por último en el BM. Se obtuvieron eficiencias de junta promedio entre 80 y 94%, siendo la mayor para la condición 146, la cual presentó el mayor flujo plástico en la interfaz.

Todas las uniones obtenidas superan la eficiencia de junta requerida por la norma AWS D17.3 del 60% para uniones de solape por FSLW.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Téc. Fabián Stilo por su colaboración en la preparación de las probetas metalográficas y la determinación de perfiles de microdureza.



## REFERENCIAS

- [1] Kar, A., Vicharapu, B., Morisada, Y., Fujii, H.: *Elucidation of interfacial microstructure and properties in friction stir lap welding of aluminium alloy and mild steel*. Mater. Charact. 168, 110572–281, 2020.
- [2] Sorger, G., Wang, H., Vilaça, P., Santos, T.G.: *FSW of aluminum AA5754 to steel DX54 with 299 innovative overlap joint*. Weld World 61(2), 257–268, 2017.
- [3] Verma, M., Ahmed, S., Saha, P., *Challenges, process requisites/inputs, mechanics and weld performance of dissimilar micro-friction stir welding (dissimilar  $\mu$ FSW): A comprehensive review*, Journal of Manufacturing Processes 68, 249–276, 2021.
- [4] Kumar, N., Yuan, W., Mishra, R.S.: *Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials*. 288 Butterworth-Heinemann, Oxford, 2015.
- [5] Panaskar, N., Terkar, R., *A Review on Recent Advances in Friction Stir Lap Welding of Aluminium and Copper*, Materials Today: Proceedings 4, 8387–8393, 2017.
- [6] Movahedi, M., Kokabi, A. H., Reihani, S. S., Najafi, H. *Mechanical and microstructural characterization of Al-5083/St-12 lap joints made by friction stir welding*. Procedia Engineering 10, 3297-3303, 2011.
- [7] Tufaro, L.N., Svoboda, H.G. *Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Lap Welds of AA5052 and AISI 1010*. 2nd International Conference on Advanced Joining Processes (AJP 2021). Proceedings in Engineering Mechanics (2731-023X). Portugal, Cham, 2021.
- [8] Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., & Withers, P. J. *Friction stir welding of aluminium alloys*, International Materials Reviews 54(2), 49-93, 2009.
- [9] Mishra, R.S, Mahoney M.W. *Friction Stir Welding and Processing*. ASM International, Miami, 2007.
- [10] AWS D17.3/D17.3M. *Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications*. American Welding Society. 2010.
- [11] Tufaro L., Svoboda H. *Calificación de procedimientos de soldadura por fricción agitación de aleaciones de aluminio*. Congreso Argentino y Latinoamericano de Ingeniería 2021. Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería - 2021 (978-987-88-7180-6), Buenos Aires, 2021.



## ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS EN LA PRIMERA FALANGE DEL CABALLO, CON MONITOREO DE EMISIÓN ACÚSTICA

Pablo Gerardo Varela <sup>1</sup>, Rita Cecilia Fioretti <sup>2</sup>, Rosana Moine <sup>2</sup>,  
Rodrigo Enzo de Prada <sup>1</sup>, Mario Salvi <sup>2</sup>, Leandro Duilio Giorgetti <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Ensayos de Materiales – Fac. de Ingeniería – Universidad Nac. de Río Cuarto  
pvarela@ing.unrc.edu.ar; rodrigodeprada@ing.unrc.edu.ar; lgiorgetti@ing.unrc.edu.ar

<sup>2</sup> Facultad de Agronomía y Veterinaria – Universidad Nac. de Río Cuarto  
cfioretti@ayv.unrc.edu.ar; rmoine@ayv.unrc.edu.ar; msalvi@ayv.unrc.edu.ar

Ruta Nac. 36 - km. 601, Río Cuarto, Córdoba, Argentina

### RESUMEN

El hueso es un órgano que puede tener adaptaciones mecánicas y cuyo conocimiento es muy importante desde el punto de vista clínico. La primera falange del dedo de la mano del caballo es un hueso sometido a esfuerzos biomecánicos y se expone a sufrir fracturas. Este órgano contrarresta las cargas mediante adaptaciones en su geometría y está diseñado para resistir fuerzas de manera repetitiva de distinta intensidad, sin sufrir cambios en su estructura y funcionamiento. Analizando las variaciones de módulos biomecánicos en huesos expuestos a cargas se pueden mejorar materiales para osteosíntesis. En este sentido, hay poca información sobre las características biomecánicas de la primera falange del dedo de la mano del caballo ante esfuerzos de flexión en tres puntos. En respuesta a ello, se utilizó un modelo experimental para cuantificar las propiedades mecánicas del hueso. Los objetivos de este trabajo fueron determinar las características mecánicas estáticas de la primera falange del dedo de la mano del caballo y aportar conocimientos biomecánicos aplicables a la clínica animal. Para complementar lo expuesto se realizó el monitoreo del ensayo mediante la técnica de Emisión Acústica. Materiales y métodos: se estudiaron las falanges proximales del dedo de la mano de 15 caballos mestizos criollos. A las falanges derechas se les practicó una osteotomía transversal en la parte media de la diáfisis y se midió en la superficie de sección: espesor cortical, área cortical y área medular. A las falanges izquierdas se las sometió a prueba de flexión en tres puntos, realizándose simultáneamente el monitoreo mediante Emisión Acústica. Dicho monitoreo presenta enormes ventajas, ya que permite conocer el inicio de fracturas en huesos sometidos a sollicitaciones mecánicas.

**Palabras Clave:** Flexión, Emisión Acústica, Primera Falange, Caballo.



## 1. INTRODUCCIÓN

Las alteraciones del aparato locomotor producen un grupo de enfermedades frecuentes dentro de la clínica equina. Actualmente la frecuencia de presentación se ha visto aumentada con el uso del caballo como animal de trabajo y deporte, estos usos exigen sobre esfuerzo del aparato locomotor. Los huesos de la mano del caballo están sometidos a sollicitaciones biomecánicas y por lo tanto se exponen a presentar fracturas. El hueso es un órgano capaz de experimentar adaptaciones mecánicas y su conocimiento es esencial desde el punto de vista clínico. Además, se puede optimizar el material a utilizar en procesos de osteosíntesis a través de variaciones en los módulos biomecánicos obtenidos de huesos expuestos a cargas. El desarrollo del sistema esquelético es un importante requerimiento para un potencial de caballo de competición y trabajo [1,2,3].

Las enfermedades relacionadas con el sistema músculo-esquelético representan la causa más común de incapacidad física y afectan a cientos de equinos. El estudio morfológico del tejido óseo refleja la importancia de aportar conocimientos para este problema.

El miembro torácico soporta gran parte del peso del animal en el apoyo [4]. A su vez, la falange proximal de la mano soporta elevada carga entre los huesos del miembro torácico, posee las características de un hueso largo y por fundamentos anatómicos y biomecánicos está expuesta a injurias. El hueso contrarresta las cargas mediante adaptaciones en su geometría y está diseñado para resistir fuerzas de manera repetitiva de distinta intensidad, sin sufrir cambios en su estructura y funcionamiento. Sin embargo, cada tejido tiene una capacidad de resistencia determinada que depende de su composición, ubicación anatómica y función [5,6,7]. Las fracturas de la falange proximal se producen con frecuencia y se clasifican en dos grandes grupos: conminutas y no conminutas [8]. La causa podría ser una combinación de compresión longitudinal junto con la rotación lateral a medial asincrónica de la falange proximal, o por torsión en relación con el metacarpo o metatarso [9].

Las fracturas de la falange proximal ocurren en diferentes partes del hueso dependiendo del tipo de estrés aplicado. Los tipos de fracturas más comunes son las fracturas “chip” (astilla) en la superficie dorsal proximal y en espiral o longitudinales del cuerpo [10].

Varios autores han realizado estudio de las propiedades morfológicas del tejido óseo del metacarpiano III de equinos, durante los primeros 5 años de vida y observaron que, a un incremento de área total, lo acompaña un incremento mayor de área cortical que de área medular [11,12,13]. Otros autores también encontraron que el área cortical aumenta claramente entre 1 y 5 años de edad al igual que el área total [14]. El área total aumenta principalmente a expensas del crecimiento del área cortical, el aumento de la corteza se puede atribuir a la adaptación de las cargas de tensión y compresión. Además, en estudios morfométricos realizados sobre huesos



de perro, se observaron que las variables sexo y edad influyen en el área cortical [15,16,17]. También se estudiaron las falanges proximales y se observaron que, a mayor peso de las mismas, mayor es el tamaño de su área cortical [18].

Una herramienta de gran utilidad en la actualidad es la técnica de Emisión Acústica (EA), la cual es no destructiva, comúnmente usada para detectar y localizar fallas en estructuras y componentes cargados mecánicamente. Esta técnica se basa en la detección de ondas elásticas producidas por la aparición o crecimiento de un defecto en el material y la conversión de éstas a señales eléctricas, las cuales se digitalizan y almacenan para su posterior análisis a través de parámetros característicos [19]. Se ha estudiado con dicha técnica, por ejemplo, al cartílago articular de equinos in vitro y propuesto un nuevo enfoque alternativo para evaluar su potencial en el diagnóstico de osteoartritis del nudo; con el fin de evaluar cómo cambian las señales de Emisión Acústica con el aumento de la gravedad de la enfermedad [20].

Se presenta actualmente poca información sobre las características biomecánicas de la primera falange del dedo de la mano del caballo ante ensayos de flexión en tres puntos y los eventos de Emisión Acústica que aparecen cuando dicho hueso es sometido a carga. Desde la clínica veterinaria se generan interrogantes sobre su comportamiento biomecánico. En respuesta a ello, se utilizó un modelo experimental para cuantificar las características mecánicas del hueso.

### 1.1. Objetivos

- Aportar conocimientos biomecánicos de la primera falange de caballos mestizos criollos aplicables a la clínica animal.
- Determinar las características mecánicas dinámicas y su relación con la aparición de eventos de Emisión Acústica en la primera falange del dedo de la mano del caballo.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las muestras óseas estudiadas fueron las falanges proximales del dedo de la mano de 15 caballos mestizos criollos. Se dividió a los animales en dos grupos etarios: G1: (18 meses - 2 años), G2: (2 - 5 años); la edad se determinó por cronometría dentaria. Las muestras se obtuvieron del frigorífico General Pico (Las Higueras, provincia de Córdoba). Una vez extraídas, las falanges proximales se conservaron congeladas a -20 °C hasta su procesamiento. Luego se liberaron los huesos de los tejidos blandos que los rodeaban, por disección convencional. A la falange proximal derecha se le practicó una osteotomía transversal en la parte media de la diáfisis del hueso y se midió con micrómetro en la superficie de sección el espesor cortical, obteniéndose: área cortical y área medular.

Con la finalidad de lograr los objetivos planteados, la falange proximal izquierda fue situada en una máquina universal de ensayos marca Amsler, modelo 6PZD 1406, sometiéndola a un esfuerzo de flexión en tres puntos, simulando así una condición a la que puede estar expuesto in vivo.

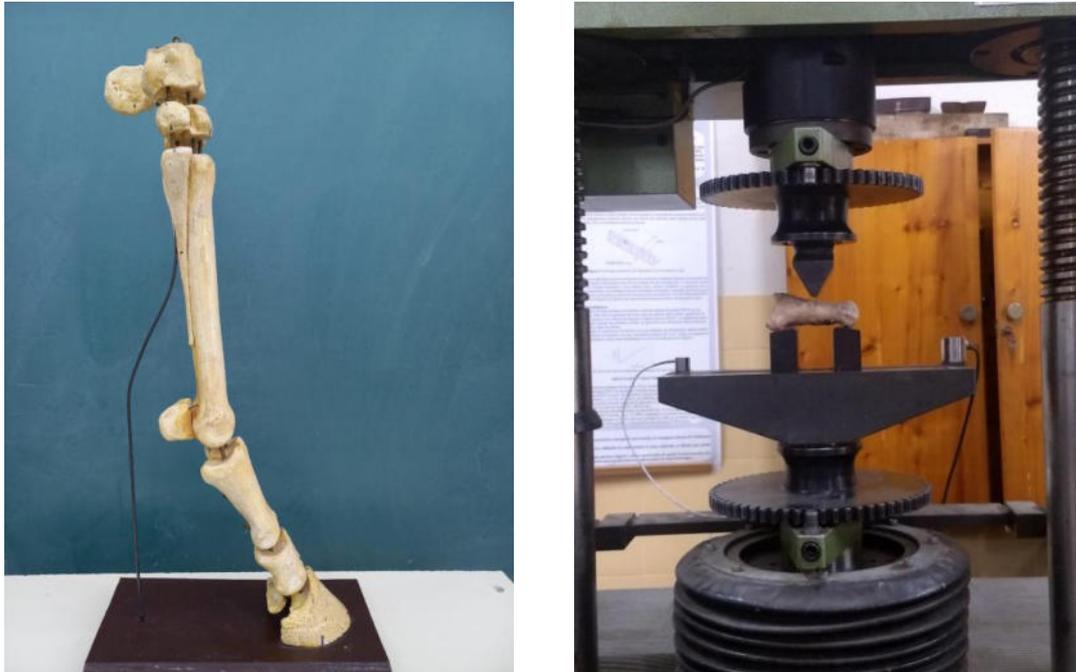


Figura 1: Izquierda: Imagen in situ de la primera falange del caballo.  
Derecha: Montaje en la máquina de ensayos, con sensores de Emisión Acústica.

En la Figura 1 se muestra una imagen in situ de dicho hueso y la disposición experimental de flexión en la máquina universal de ensayos. Se observa que, en el soporte inferior, se han colocado dos sensores de Emisión Acústica, uno de los cuales está conectado a un pre-amplificador. Se procedió a la realización de los ensayos de flexión en tres puntos y al mismo tiempo, la recolección de datos con el equipo de Emisión Acústica.

Se realizó análisis estadístico descriptivo, de correlación, regresión y varianza ( $p \leq 0,05$ ), utilizando el paquete estadístico InfoStat (2009), bajo licencia de la FCA de la UNC, Argentina.

## 2.1. Obtención de señales de Emisión Acústica

Para este estudio se utilizaron dos sensores comerciales de EA, los modelos R15I y WDI de Physical Acoustics Corporation. Los sensores fueron anclados a la máquina de ensayos utilizando cera sintética para asegurar una fijación adecuada y fueron conectados a un sistema de adquisición de datos para Emisión Acústica marca Physical Acoustics Corporation, modelo "PCI-2 Based AE System". Se logró registrar el número de eventos, sus amplitudes y el número



de ondas de cada evento. Las ondas elásticas generadas cuando la muestra reacciona a los efectos de disminuir su energía interna, viajan como señales acústicas en todas las direcciones y pueden detectarse por los sensores instalados, los cuales convierten las ondas acústicas en tensión eléctrica de baja amplitud.

## 2.2. Procesamiento de señales de Emisión Acústica

Las señales de Emisión Acústica obtenidas se procesaron con el software "AEWIN", que almacena los datos en forma digital, en función del tiempo. El sistema provee información sobre amplitud de hit y número de ondas por evento. Cada evento se define cuando se cumplen las condiciones de superar el umbral de tensión establecido, y un tiempo muerto fijo (por ejemplo, el tiempo transcurrido sin superar el umbral de tensión, con el cual se evita la medición de reflexiones y ondas de arribo tardío, mientras que el cruce de umbral próximo define el comienzo de un nuevo evento). De esta manera cada vez que la señal de Emisión Acústica excede el umbral de tensión, se registra un evento, y el siguiente evento será registrado si dentro de la duración del hit establecida y del tiempo de rearmado del sistema de adquisición no hay otro cruce de umbral.

## 3. RESULTADOS

Las medidas de tendencia central de cada variable tomadas en las primeras falanges se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Medidas resumen de la falange proximal. (n=15).

Variable	Media	EE	Min	Máx
Edad (años)	3,2	0,33	2,0	5,0
Peso h (g)	158	5,93	138	193
Longitud hueso derecho (cm)	9,52	0,15	9,00	10,50
DiámT D/P (cm)	2,77	0,04	2,62	3,00
DiámT L/M (cm)	3,78	0,07	3,59	4,20
Cuad/dorsal (cm)	0,68	0,03	0,54	0,77
Cuad/palmar (cm)	0,64	0,03	0,55	0,79
Cuad/lateral (cm)	0,66	0,03	0,57	0,82
Cuad/medial (cm)	0,82	0,03	0,72	0,98
Diám CM D/P (cm)	1,39	0,04	1,29	1,60
Diám CM L/M (cm)	2,29	0,06	2,00	2,69
Área total (cm <sup>2</sup> )	8,42	0,24	7,54	9,92
Área medular (cm <sup>2</sup> )	2,66	0,15	2,20	3,61
Área cortical (cm <sup>2</sup> )	5,76	0,14	5,22	6,53
F Máx (kN)	25,47	3,76	16,15	43,88

Referencias: h=hueso; EE=error estándar; Diám T D/P=diámetro total dorso-palmar; Diám T L/M=diámetro total latero-medial; Cuad=cuadrante; Diám CM D/P=diámetro cavidad medular dorso palmar; Diám CM L/M= diámetro cavidad medular latero medial; F Máx=fuerza máxima.



Los esfuerzos a los que fueron sometidas las falanges se registraron por la máquina universal de ensayos y se monitorearon los eventos de Emisión Acústica producidos por la carga. En la Figura 2 se pueden observar las curvas de ensayo esfuerzo/deformación, que arroja la máquina universal de ensayos, por la flexión en tres puntos de la falange proximal del dedo de la mano del caballo y la curva de conteo de Emisión Acústica de un canal, en función del tiempo (actividad de Emisión Acústica producida por la carga). El conteo se realizó sumando la cantidad de veces que las ondas superan el umbral establecido. Se tomó un solo canal, puesto que ambos indicaron la misma información de conteo. Dicha figura presenta los resultados de la muestra N° 13: falange proximal izquierda de animal macho de 2 años y del grupo G1. La fuerza máxima soportada por el hueso fue de 17,8 kN y los conteos de Emisión Acústica detectados fueron 183.

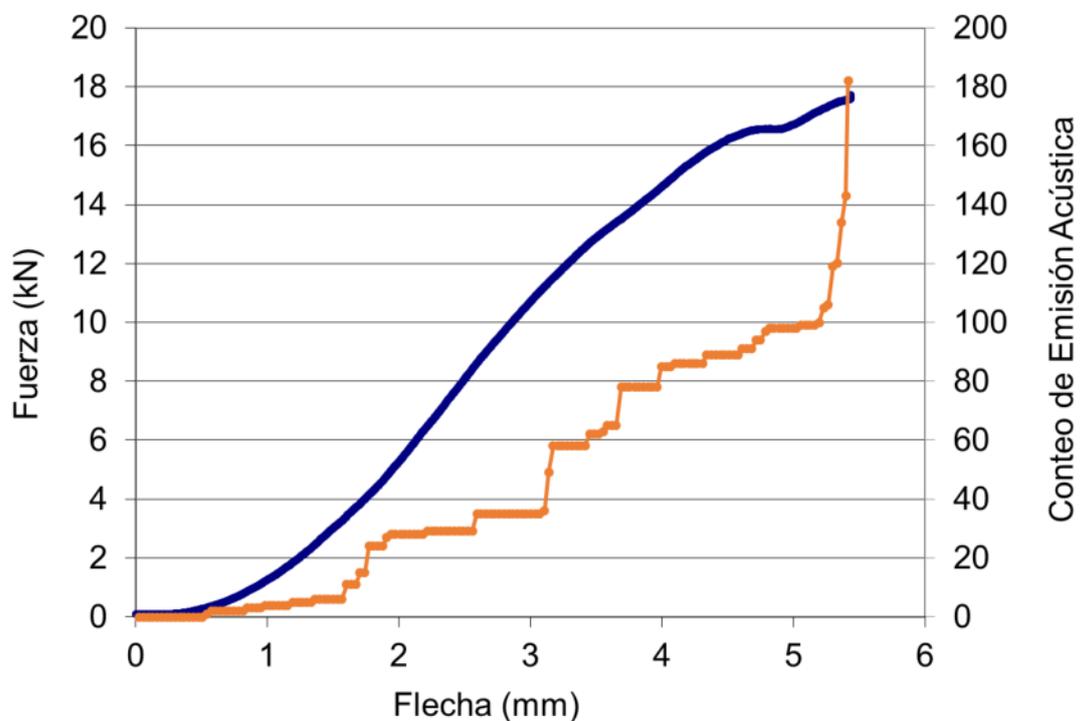


Figura 2: Curva esfuerzo/deformación resultante de la flexión en tres puntos y resultados obtenidos de Emisión Acústica.

El análisis de correlación para las variables área total vs fuerza máxima (Correlación  $r= 0,90$ ) muestra que hay asociación entre dichas variables a nivel poblacional, trabajando con un nivel de significación de Probabilidad  $P < 0,05$ . El análisis de regresión lineal de las variables fuerza máxima vs. área total del hueso, los coeficientes de regresión con sus estadísticos asociados y el análisis de la varianza se muestran en las Tablas: 2, 3, y 4, respectivamente. En la Figura 3 se muestra la recta de regresión para la variable fuerza máxima de la falange proximal en función de su área total. Las variables área total y fuerza están correlacionadas positivamente ( $r= 0,90$ ,  $P=<0,0001$ ) podemos observar que el 90 % de la fuerza está explicada por el área total del hueso.



Tabla 2. Análisis de regresión para las variables fuerza máxima vs. área total. Coeficiente de determinación (n=15).

Variable	n	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
F máx (kN)	15	0,80	0,79	28,79	93,24	95,36

Referencias: n=número de muestras; R<sup>2</sup>: Regresión; R<sup>2</sup> Aj: Regresión ajustada; ECMP: Error cuadrático medio; AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información bayesiano

Tabla 3. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para la variable área total (n=15).

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	t	P-valor
Área total (cm <sup>2</sup> )	14,15	1,93	9,98	18,33	7,32	<0,0001

Referencias: Est.: Estadístico; EE: error estándar; LI(95%): Límite inferior; LS(95%): Límite superior; t: prueba t de Student; P-valor: Probabilidad

Tabla 4. Análisis de la varianza para la variable área total (n=15).

	SC	gl	CM	F	P-valor
Modelo	1215,96	1	1215,96	53,63	<0,0001
Área total	1215,96	1	1215,96	53,63	<0,0001
Error	294,77	13	22,67		
Total	1510,73	14			

Referencias: SC: Factor de desviación de la media; gl: grados de libertad; CM: Cuadrado medio; F: Prueba F de Fisher; P-valor: Probabilidad

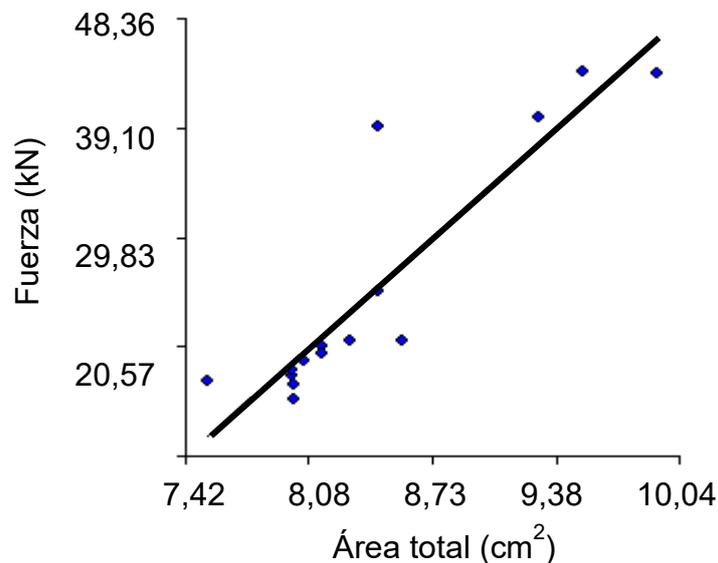


Figura 3: Regresión lineal simple para las variables F máx (kN) vs. área total (cm<sup>2</sup>) (n=15).

En el Gráfico de Barras de la Figura 4 se muestra la fuerza máxima de la diáfisis de la falange proximal para las dos categorías de la variable edad, donde se observa mayor fuerza máxima en los animales de dos a cinco años (G2) que en los animales de dieciocho meses a dos años (G1). Respecto al estado del hueso durante la evolución del experimento se logró determinar que la fractura comienza donde las laminillas óseas están sometidas a mayor tracción. La línea de propagación, en la mayoría de los ensayos, produjo una fractura transversal diafisaria con dos fragmentos (Figura 5). En algunas muestras, apareció un tercer fragmento en cuña.

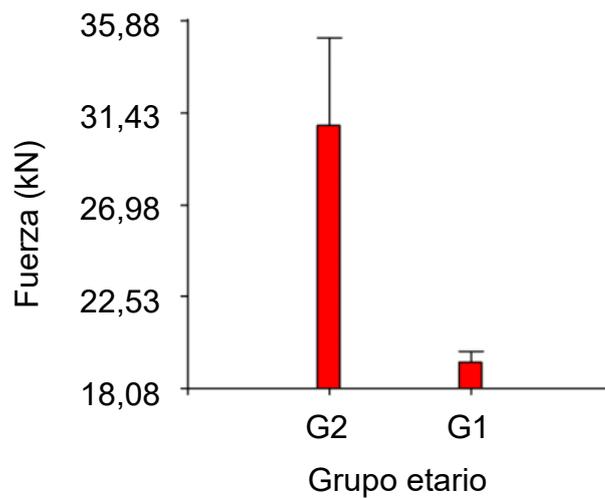


Figura 4: Gráfico de Barras para fuerza máxima (kN) vs. edad (n= 15).



Figura 5: Estado final de las falanges proximales N° 13 y N° 15 sometidas a flexión en tres puntos con sus sitios de rotura.



#### 4. DISCUSIÓN

Para cumplir su función, los miembros están constituidos por sólidos radios óseos, debidamente articulados y con disposiciones angulares compensadas, por lo cual el miembro torácico soporta gran parte del peso y tiene como principal función la transmisión de fuerzas en ambos sentidos [4]. Las propiedades morfométricas de la falange proximal de la mano del caballo están íntimamente relacionadas con las propiedades biomecánicas y estructurales del hueso. El hueso contrarresta las cargas mediante adaptaciones en su geometría que involucra una actividad continua y coordinada de construcción y destrucción [6]. Tanto los tejidos blandos como el tejido óseo están diseñados para resistir fuerzas de manera repetitiva de distinta intensidad, sin sufrir cambios en su estructura y funcionamiento. Sin embargo, cada tejido tiene una capacidad de resistencia determinada que depende de su composición, ubicación anatómica y función [5]. La morfología del hueso tiene mucha importancia en la resistencia a la fractura de los huesos [7]. En este trabajo los resultados indican que la fuerza máxima depende linealmente del área total del hueso ( $R^2= 0,80$ ,  $P=<0001$ ), por lo cual a medida que aumenta el área total aumenta la fuerza de la falange proximal. Se observó que el diámetro latero-medial del hueso y de la cavidad medular es mayor que el diámetro dorso-palmar tanto del hueso como de la cavidad medular. El espesor de la cortical del cuadrante medial en el tercio medio de la diáfisis, es mayor que el espesor de los otros tres cuadrantes. El área total es mayor que el área cortical y ésta última a su vez es mayor que la cavidad medular. Ellos son similares a los publicados en 2019, en un estudio en la primera falange de equinos [15]. El aumento del espesor puede ser atribuido a una adaptación de las cargas que aumentan con la velocidad del ejercicio y para contrarrestar las tensiones y fuerzas de compresión [7]. Los cuadrantes dorsal y lateral son similares siendo menor el cuadrante palmar, probablemente se deba a los tejidos blandos que lo rodean. El tamaño del área cortical depende del peso, longitud del hueso y edad de los animales ( $P<0001$ ), el área total depende del peso de la falange proximal. En los primeros 5 años de vida hay un crecimiento mayor del área cortical que el crecimiento simultáneo producido en el de área medular. A un incremento de área total, lo acompaña un incremento mayor de área cortical que de área medular, durante los primeros 5 años de vida [11,12,13]. El área total aumentó principalmente a expensas del crecimiento del área cortical, el aumento de la corteza se puede atribuir a la adaptación de las cargas de tensión y compresión.

La fuerza máxima promedio de resistencia de las falanges fue de 25,47 kN, con rangos entre 16,15 kN y 43,88 kN. Al examinar los resultados de Emisión Acústica y las curvas obtenidas por la máquina universal de ensayos aparecen eventos de Emisión Acústica que pueden ser detectados y acompañan gradualmente al aumento de la fuerza que va soportando el hueso. Dichos eventos fueron generados por un estado tensional interno, el cual a su vez se originó por la carga externa aplicada en una configuración de flexión. El conteo de Emisión Acústica crece,



conforme crece la aplicación de la carga. Otros autores determinaron también que la actividad de Emisión Acústica puede mostrar el punto de inicio de la microfisuración así como su desarrollo; además los parámetros de Emisión Acústica como la frecuencia y el tiempo de subida exhiben fuertes cambios con el aumento de la carga, lo que muestra que los mecanismos de fractura no son estables [20].

Analizando con detalle las curvas mostradas en la Figura 2, puede apreciarse que los eventos de Emisión Acústica comienzan a aparecer a pequeñas deformaciones, coincidiendo con un pequeño cambio en el valor del esfuerzo aplicado en ese momento. Los demás eventos de Emisión Acústica, también aparecen en puntos donde varía el esfuerzo en forma momentánea, indicando la aparición o propagación de fisuras en el hueso. En el momento de la rotura máxima, es donde se produce la mayor concentración de eventos de Emisión Acústica, con un aumento notable de los mismos.

## 5. CONCLUSIONES

Los miembros torácicos del caballo son partes esenciales en la locomoción, y para ello se estructuran como columnas de soporte. Son importantes tanto en el equilibrio como en la actividad locomotora. Se ensayaron, a flexión en tres puntos, muestras de falanges proximales del dedo de la mano del caballo y simultáneamente se registró la actividad de Emisión Acústica que dichos huesos presentaban. Se encontró un importante número de eventos previo al colapso óseo. Se comprueba la importancia de la utilización de Emisión Acústica, ya que dicha técnica permite determinar la existencia de eventos tempranos que podrían detectarse, antes incluso, que el hueso llegue a una fractura. En trabajos futuros, se podrían instalar sensores de Emisión Acústica para determinar las señales emitidas y monitorear esfuerzos en otros huesos o materiales anatómicos. Se encontró una fuerte asociación entre la fuerza que soportaba cada falange proximal respecto a la intensidad de las señales de Emisión Acústica (EA) analizadas en el rango de 1,5 a 6 kHz.

## REFERENCIAS

- [1] Glade M., Belling T. *Growth plate cartilage metabolism, morphology and biomechanical composition in over and underfed horses*. Growth. 48: 473, 1984.
- [2] Bigot G., Boudizi A., Rumelhart C., Martin-Rosset W. *Evolution during growth of the mechanical properties of the cortical bone in equine cannon-bones*. Med. Eng. Phys. 18(1).79-87, 1996.



- [3] Nielsen R., Potter G., Greene L., Morris E., Murraygerzik M., Smith W., Martin M. *Response of Young Horse in Training to Varying Concentration of Dietary Calcium and Phosphorus*. Vol. 18. 397-404, 1998.
- [4] Agüera E., Sandoval J. *Anatomía Aplicada del Caballo*. Harcourt Brace, España, 1999.
- [5] Southwood L., McIwaith C. *Arthroscopic removal of abaxial fracture fragments involving a portion of the base of the proximal sesamoid bone in horses*. J. Am. Vet. Med. Assoc. 217(2).236- 240, 2000.
- [6] Currey J. D. *The mechanical properties of materials and the structure of bone*. In: *The Mechanical Adaptation of Bone*. University Press. Princeton, USA.3-37, 1984.
- [7] Yeni Y., Brow C., Wang Z., Norman T. *The influence of bone morphology on fracture toughness of the human femur and tibia*. Bone. 21(5)453-459, 1997.
- [8] Stashak T. S. Adams. *Lameness in horses*. Quinta edición. Bs. As., Argentina: Intermédica. 135, 312, 613, 695, 2004.
- [9] Adams D. *Lameness in horse*. Edit. Lea and Febiger.18-21,596-599, 612-614, 1987.
- [10] Thrall D. E. *Manual de diagnóstico radiológico veterinario*. Cuarta edición. Bs. As., Argentina: Intermédica, 1986.
- [11] Moine R., Rivera C., Vivas A., Ferraris G., Galán A., Natali J. *Morfometría y determinación de calcio y fósforo en la parte media de la diáfisis del metacarpiano III en yeguas mestiza con criollo*. Arch. Med. Vet. Chile. ISSN 0301 – 732X. XXXIII, N° 1.63 – 68, 2001.
- [12] Moine R., Galán M., Vivas A., Fioretti C., Varela M., Bonino F., Quinteros A., Natali J. *Propiedades Morfológicas en la Parte Media de la Diáfisis del Hueso Metacarpiano III de Equino Mestizo Criollo*. Int. J. Morphol. Chile. ISSN 0717 – 9502. 33 (3).955-961, 2015.
- [13] Galán A., Rivera C., Moine R., Ferraris G., Gigena S., Natali J. *Propiedades morfométricas del metacarpiano III de potrillos mestizos*. Revista chilena de Anatomía. Chile. ISSN 0716 – 9868. 20(3).285-290, 2002.
- [14] Nunamaker D., Butterwerck D., Provost M. *Some geometric of third metacarpal bone: a comparision between the thoroughbred and standard bredrace horses*. Journal of Veterinary Research, 22(2).129-134, 1989.
- [15] Natali J., Wheeler J. T., Kohl R., Varela P. *Comparación de las Características Mecánicas Estáticas del Fémur Aislado de Perro, con y sin la Colocación de una Placa de Ortopedia Fabricada en polipropileno*. Int. J. Morphol. Chile. ISSN 0717 – 9502. 26(4). 791-797, 2008.
- [16] Fioretti C., Galán A., Moine R., Varela M., Varela P., Mouguelar H., Gigena S., Bonino F., Quinteros R., Natali J. *Características Mecánicas Dinámicas de la Tibia Aislada de Perro*



- Sometida a Prueba de Impacto*. Int. J. Morphol. Chile. ISSN 0717 – 9502. 31 (2). 562-569, 2013.
- [17] Fioretti R., Moine R., Varela M., Varela P., Galán A., Gigena S., Mouguelar H., Gonzalez Sanchez S., Natali, J. *Densidad mineral ósea y resistencia ante la prueba de compresión en la mitad de la diáfisis del hueso fémur de perro*. Ab Intus. ISSN 1234-5678. Vol. 1, (1).43-52, 2018.
- [18] Natali J., Fioretti R., Moine R., Gigena S., Mouguelar H., Varela M., Varela P., Gonzalez Sanchez S., Quinteros R., Galán A. *Morfología y comportamiento biomecánico de la falange proximal de la mano del caballo mestizo criollo*. Ab Intus. 56-62. ISSN 2618-2734. Vol. 3, (2).43-52, 2019.
- [19] Hellier C.J. *Handbook of nondestructive evaluation. Chapter 10 Acoustic Emission Testing*. McGraw-Hill, USA:10.1-10.39, 2003.
- [20] Strantza M., Polyzos D., Louis O., Boulpaep F., Van Hemelrijck D., Aggelis D.G. *Damage characterization on human femur bone by means of ultrasonics and acoustic emission*. J. Phys.: Conf.Ser. 628 012016 doi:10.1088/1742-6596/628/1/0, 2015.



## ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO AL CREEP DE ACEROS CON ALTO CONTENIDO DE Ni

Gabriel Gonzalez <sup>1</sup>, Gerardo Pender <sup>1</sup>, René Molina <sup>1</sup>, Lilian Moro <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Estudio de Materiales, UTN Facultad Regional Bahía Blanca  
11 de Abril 461, Bahía Blanca, Argentina. [ggonzal@frbb.utn.edu.ar](mailto:ggonzal@frbb.utn.edu.ar).  
[gpender@frbb.utn.edu.ar](mailto:gpender@frbb.utn.edu.ar). [rjmolina@criba.utn.edu.ar](mailto:rjmolina@criba.utn.edu.ar). [lmoro@frbb.utn.edu.ar](mailto:lmoro@frbb.utn.edu.ar).

### RESUMEN

Las aleaciones de base níquel son utilizadas en ambientes extremos para evitar que las corrosiones, oxidaciones o carburaciones originadas por altas temperaturas y presiones, puedan dar lugar a grietas que colapsen los equipos en funcionamiento. Se utilizan en aplicaciones que contemplan recipientes sometidos a presión, tubos, codos, válvulas y otros equipos, en refinerías y plantas petroquímicas; su uso se debe a que en su composición química presentan un alto contenido de Ni, Cr y Mo que le otorgan una alta resistencia a la corrosión, a las vibraciones y a la termofluencia (creep), aún, cuando las temperaturas de servicio son superiores a los 1000°C.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio comparativo del comportamiento al creep de tres - aleaciones con alto contenido de níquel: Incoloy 800 (30 Ni – 20 Cr), Inconel 601 (60 Ni – 25 Cr) y aceros de la serie HP (25 Cr – 35 Ni) las cuales poseen alta resistencia termomecánica asociada a la microestructura interna de la matriz. Para esto se realizaron ensayos de creep a una temperatura de 705°C y a tensiones que varían de 80 a 110MPa, del resultado de los ensayos, se comparó la velocidad de deformación. De acuerdo al resultado de estos ensayos podemos calcular el exponente de endurecimiento “n”, parámetro que indica la resistencia mecánica de los materiales. Se complementa este estudio con un análisis de la microdureza y la observación de la evolución microestructural en las tres aleaciones, tanto en estado de suministro como luego de los ensayos, para comprender las transformaciones de sus estructuras que permite evaluar las ventajas de cada una a las distintas condiciones de trabajo.

El análisis de los datos obtenidos de los ensayos de creep por tracción, sumados a la observación de los cambios microestructurales, permite realizar una mejor selección del material según las condiciones de servicio.

**Palabras Clave:** Aleaciones base Ni, Creep, Ensayos termofluencia., Propiedades mecánicas



## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando los componentes de una planta industrial se encuentran sometidos a condiciones severas de temperatura y esfuerzos mecánicos, sufren una deformación plástica que continúa a lo largo del tiempo. Este proceso, denominado termofluencia o fluencia lenta (creep), se evidencia a partir de transformaciones en la microestructura del material y la pérdida de la resistencia mecánica [1,2].

Las condiciones de temperatura, tensiones y tiempo bajo las cuales suceden los fallos por termofluencia dependen del tipo de metal o aleación, su microestructura, y de cualquier agente externo. En consecuencia, la termofluencia aparece cuando se supera ligeramente la temperatura de recristalización del metal o aleación, estado en el que los átomos se desplazan para reorganizar la estructura [3,4].

El estudio de este fenómeno adquiere aún mayor importancia, cuando los materiales afectados son aceros destinados a industrias petroquímicas, plantas generadoras de energía y refinerías de petróleo, ya que sus componentes son utilizados durante largos períodos de tiempo y expuestos a condiciones severas de servicio. La importancia que tiene la comprensión del comportamiento de los materiales para el diseño industrial se debe principalmente al alto costo que representa para las industrias la rotura de sus equipos, problema que puede ser solucionado cuando se realiza una correcta selección del material [5,6].

En este trabajo se compara el comportamiento al creep de aleaciones base níquel que poseen alta resistencia termo mecánica asociada a la microestructura interna de la matriz. Los aceros estudiados son Incoloy 800 (30 Ni – 20 Cr), Inconel 601 (60 Ni – 25 Cr) y el acero HP (25 Cr – 35 Ni) aleado con Nb y se realizan en los mismos ensayos de creep por tracción a tensiones entre 80 y 131 MPA y a temperaturas de 705 °C. A partir de los mismos se calcula la velocidad de deformación de la etapa secundaria, la cual se vincula con la temperatura y la tensión aplicadas, a partir de la ecuación empírica o ley de potencias que se expresa como:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n e^{-Q/RT} \quad (1)$$

dónde:

$\dot{\epsilon}$  es la velocidad de deformación equivalente, A una constante función de la estructura, n el exponente de tensión, Q la energía de activación del creep, R la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta. El coeficiente de tensión es un parámetro que está relacionado con la resistencia al creep de cada material originada por la acumulación de dislocaciones en imperfecciones o en bordes de grano. [7,8]



Las aleaciones de Níquel presentan una microestructura constituida por una matriz formada por una solución sólida fcc (fase  $\gamma$ ) y un disperso de precipitados intermetálicos (fase  $\gamma'$ ) que son los responsables de su gran resistencia, sin embargo, cuando los materiales son sometidos a condiciones de creep, se evidencia una transformación de las fases que provoca el debilitamiento de los mismos. En este trabajo se realiza también un estudio de la evolución estructural de los materiales para obtener una mayor comprensión del fenómeno [9,10].

## 2. METODOLOGIA Y TECNICAS UTILIZADAS

Se estudiaron los materiales de la serie Hp modificado y las aleaciones base Ni. En la Tabla 1 puede observarse la composición química de los materiales en cuestión, verificada con un espectrómetro de emisión por plasma, marca Spectromax modelo X, se presentan los elementos componentes y los valores medidos de las concentraciones (% en peso) del material.

La serie HP posee resistencia a la corrosión y al creep cuando se exponen a temperaturas de servicio próximas o superiores a 1000°C. Con el agregado de microaleantes, por ejemplo, Nb o Ti, se promueven la formación de carburos estables que favorecen una mejor resistencia al creep a alta temperatura. Estas aleaciones son utilizadas, generalmente, en la condición as-cast, pero luego de operar en servicio a temperaturas entre 850 y 1050°C, evidencian transformaciones de fase; de esta forma los carburos primarios de cromo, se transforman en  $M_{23}C_6$  y precipitan en forma intragranular e intergranular [11].

Tabla 1. Composición química de la aleaciones.

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo	Fe	Al	Ti
HP – mod.	0.60	1.8	2.0	25	35	1.34	0.5	Bal.	--	--
INCOLOY	0,006	--	--	20,1	30,9	--	--	46,2	0,53	1,04
INCONEL	0,03	0,12	0,20	21,94	58,5	--	--	17,39		0,30

Los factores físicos que dan lugar a la utilidad de las aleaciones base Ni a temperaturas elevadas, no se basan en la temperatura de fusión del níquel (Ni) en sí misma, porque esta no es particularmente alta y de hecho es más baja (a 1455°C), que la del hierro o el titanio. Un primer factor contribuyente es la estructura cristalina cúbica centrada en la cara (FCC), para la cual los procesos activados que controlan la deformación por fluencia son bajos; además, la estructura FCC es estable desde condiciones ambientales hasta el punto de fusión, de manera que se



dificultan las transformaciones de fase. Un segundo factor es la solubilidad sustancial de los elementos de aleación en la matriz de Ni, indicada como  $\gamma$ . Además, la oxidación y corrosión / sulfuración es suprimida por el Cr y Co, respectivamente. Las adiciones de Al, Ti y Ta mejoran la tensión de fluencia y a la rotura en tracción, y Mo, Re y W, junto con los reforzadores de límite de grano, mejoran el rendimiento a la termofluencia dependiente del tiempo al cual esta sometido. En tercer lugar, mediante el uso de criterios adecuados en el procesamiento de la solidificación, se ha hecho posible suprimir los límites de grano, que son una fuente de debilidad a temperaturas elevadas y, por lo tanto, desarrollar estas aleaciones en forma monocristalina, con un efecto ventajoso. Esta situación es única entre los materiales estructurales. Finalmente, y lo más importante, el Ni es capaz de tolerar la precipitación de la fase  $\text{Ni}_3$  (Al,Ti,Ta), denominada  $\gamma'$ , que exhibe la estructura cristalina. Al hacerlo, surge la llamada anomalía del límite elástico: el límite de fluencia aumenta con la temperatura, un efecto que puede aprovecharse para aplicaciones de alta temperatura. Los responsables de este efecto son defectos planares tales como fallas de apilamiento [12]. Este tema ha sido revisado por Birks et al., Pope y Ez, Pollock y Field y otros [13,14,15, 16].

El INCOLOY 800 H/HT (Especificación UNS N08810/11 - ASTM B408) es una aleación base Ni, con un porcentaje de Ni relativamente bajo, es un material resistente al calor y a la corrosión. El INCONEL 601 (Especificación UNS N06601-ASTM B166-06) es una aleación base Ni, con el agregado de Cr y Al, que se utiliza en aplicaciones que requieren resistencia al calor y a la corrosión.

El equipo para realizar los ensayos de creep fue diseñado y construido íntegramente en la FRBB, por personal de nuestro grupo de estudio. Consta de un sistema de tres máquinas, de igual diseño, que someten al material bajo ensayo a tensión y temperatura constantes, manteniendo la independencia de funcionamiento de cada una de ellas con la particularidad de estar controlado por un único sistema de adquisición y software específico [17].

Los ensayos se realizaron respetando las condiciones de la norma (ASTM E139, 2018), para obtener los resultados buscando se realizaron 9 (nueve) ensayos, 3 (tres) por cada tensión de trabajo, manteniendo la misma temperatura en todos las experiencias (705°C), las probetas se obtuvieron de materiales en estado de recepción, a partir de los datos registrados en los estudios de creep, realizados a una misma tensión, se calculó el valor n de tensión graficando el logaritmo de la velocidad de deformación, en función de la tensión  $\sigma$ , a una misma temperatura de ensayo. Todos los ensayos tuvieron una duración de 1000 hs [18].

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS



Se realizaron ensayos de creep sobre las tres aleaciones, a tensiones de 80, 110 y 131 MPa y a temperaturas de 705 °C. En la Tabla 2 se observan las velocidades al creep de los materiales ensayados, en ellas se evidencia que, a tensiones bajas, de 80 MPa el HP es el que presenta mayor resistencia, debido a que manifiesta una baja velocidad de deformación. A tensiones de trabajo medias (110 MPa) y altas, los Inconel y HP se comportan en forma similar y con velocidades de deformación parecidas.

Tabla 2. Velocidades de deformación de las aleaciones ensayadas.

Tensión \ Material	80 MPa	110 MPa	131 MPa
Incoloy	$4,4 \times 10^{-4}$ (1/s)	$1,8 \times 10^{-4}$ (1/s)	$9,01 \times 10^{-4}$ (1/s)
Inconel	$4,1 \times 10^{-6}$ (1/s)	$2,2 \times 10^{-5}$ (1/s)	$1,8 \times 10^{-5}$ (1/s)
HP	$4,0 \times 10^{-7}$ (1/s)	$1,0 \times 10^{-5}$ (1/s)	$1,0 \times 10^{-5}$ (1/s)

De los valores resultantes y relacionando la velocidad de deformación y la tensión aplicada se obtiene el coeficiente de endurecimiento (Tabla N°3).

Tabla N°3: Valores del coeficiente de endurecimiento

Material	Coeficiente de endurecimiento (n)
Inconel	2
Incoloy	4,7
Hp	4,9

Luego de los ensayos de creep se tomaron las durezas Vickers al material (Tabla 4), las cuales evidencian que la aleación Hp, a bajas tensiones, es el material que posee mayor dureza, esta se asocia a la fina precipitación en borde de grano dendrítico que provoca un aumento de su resistencia al creep. La menos resistente es la aleación Inconel donde se observan mayores cantidades de cavidades de creep.

Tabla N°4: Durezas de los materiales luego del ensayo.

<b>Dureza</b> <b>Material</b>	Dureza [HV] a 80 (MPa)	Velocidad de deformación (1/s)
Incoloy	201	$4,4 \times 10^{-4}$
Inconel	252	$4,1 \times 10^{-6}$
HP	297	$4,0 \times 10^{-7}$

Posteriormente se estudiaron los cambios estructurales producidos en los materiales luego de estar sometidos a creep. En la figura 2 se muestra la microestructura de los materiales, en estado de recepción, donde se puede observar que el Inconel presenta una matriz de granos deformados de solución sólida gamma, con precipitados complejos (Fig. 2.a), el Incoloy una matriz de granos equiaxiales de solución sólida gamma, con presencia de maclas en el seno de los mismos y un disperso de precipitados complejos (Fig. 2.b) y el HP una estructura dendrítica de granos de solución sólida gamma, con precipitados interdendríticos (Fig. 2.c). En todos los casos se ha utilizado para el ataque químico el reactivo Glicerregia (10 ml de HNO<sub>3</sub>, 35 ml de HCl y 30 ml de glicerina).

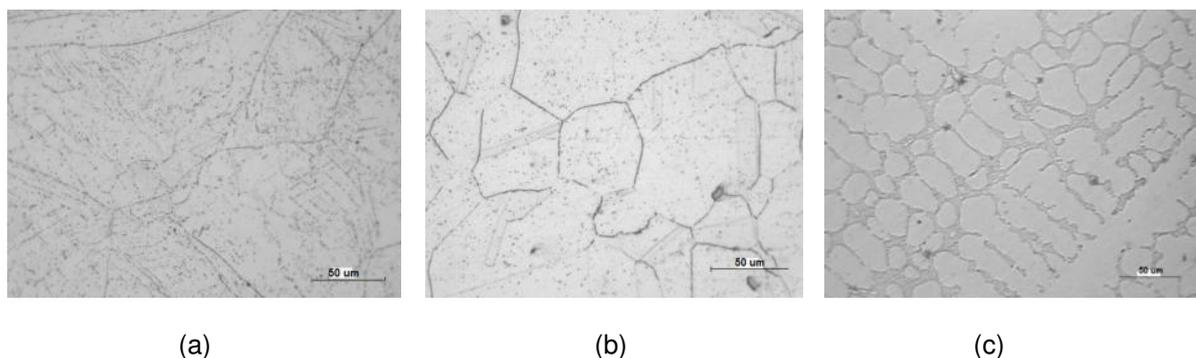


Figura 2: Microestructura de los materiales en estado de recepción (500X)

En la figura 3 se observan los cambios estructurales del material, luego de los ensayos de creep, los cuales inciden en el comportamiento mecánico. Se observa la formación de cavidades de creep en el borde de los granos en la muestra del Inconel (Fig 3.a). El Incoloy presenta una masiva precipitación de partículas complejas tanto en el seno de la matriz como en el borde de

grano, con coalescencia de los mismos (Fig. 3.b). La aleación HP presenta menor densidad de precipitados, con coalescencia de los situados en borde de grano (Fig 3.c).

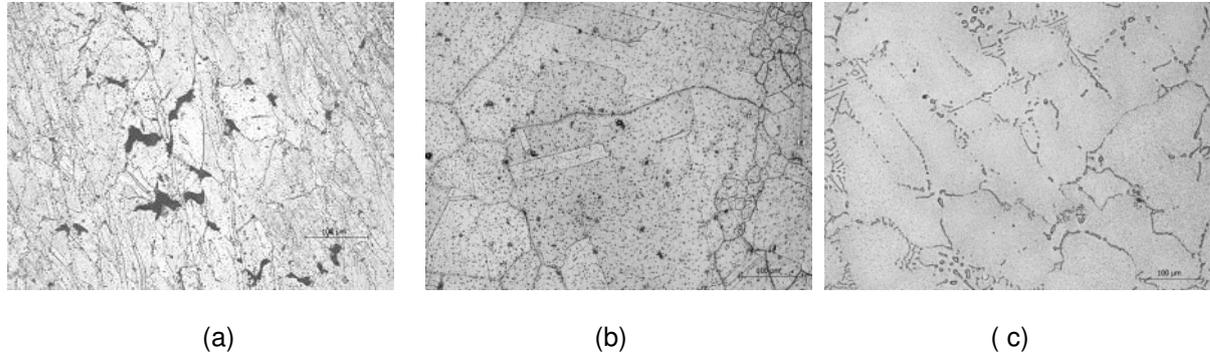


Figura 3: Microestructura de los materiales luego de ser ensayados a creep (200x).

#### 4. CONCLUSIONES

De lo informado previamente se infiere que la aleación HP, a la a la temperatura de 705° C, es la que mejor responde a las solicitaciones de tensión y temperatura.

El HP, si bien tiene menor contenido de Cr y Ni, presenta una fase  $\gamma'$  que le otorga una superior resistencia al creep y un mayor coeficiente de endurecimiento.

La aleación Inconel es la que menor coeficiente de endurecimiento presenta y, por lo tanto, es la que posee mínima resistencia a la deformación en función del tiempo.

El estudio micrográfico revela que el Inconel es el material con mayor número de cavidades, mientras que el Incoloy presenta masiva precipitación de partículas complejas, tanto en el borde como en el interior de los granos y finalmente el HP ostenta una precipitación uniforme en toda la estructura cristalina.

#### REFERENCIAS

- [1] Viswanathan R, *Damage Mechanisms and life Assessment of High Temperature Components*, Internacional Metals, Park Ohio, USA. 1989.
- [2] Nabarro, F.R.N., de Villiers, H.L. *The Physics of Creep*. Taylor and Francis, London. 1995.
- [3] Kassner M.E., Perez-Prado T., *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*, 2nd Ed, Elsevier, 2004.
- [4] Abe, F., Kern, T.U and Viswanathan, R. *Creep resistant steels*, Woodhead Publishing and Maney Publishing, p 478. 2008.



- [5] Onizawa T., Wakai T., Ando M., Aoto K., *Effect of V and Nb on Precipitation Behavior and Mechanical Properties of High Cr Steel*, Nucl. Eng. Des. 238. 408 – 416. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.09.013>
- [6] Xiang S., Fan Z., Chen Tao, Lian X., Guo Y., *Microstructure evolution and creep behavior of nitrogen-bearing austenitic Fe-Cr-Ni heat-resistant alloys with various carbon contents*, Materials Science Journal of Materials Research and Technology. 2023.
- [7] Abe F., *Research and development of heat-resistant materials for advanced USC power plants with steam temperatures of 700°C and above*, Engineering, Vol.1, Issue 2, pp.211-224. 2015.
- [8] Chen Fuyang, Jin-yan Chen, Bing Shao, Yang Zhou, J. Gong, Xiao-feng Guo, Yong Jiang les, *Effect of microstructural evolution in thermal exposure on mechanical properties of HP40Nb alloy*, Materials Science. 2021.
- [9] Oinuma S., Takaku R., Nakatan Y.i, Takeyama M., *Effect of Microstructure and Deformation on Hardness Distribution of Wrought Precipitation Strengthened Ni-Based Alloy after Creep Damage*, Materials Science, Journal of the Society of Materials Science Japan, 2021.
- [10] Conforto, E., Molenat, G., Caillard, D., *Comparison of Ni-based alloys with extreme values of antiphase boundary energies: dislocation mechanisms and mechanical properties*. Philos. Mag. 85, 117–137. 2005.
- [11] Broomfield RW, Ford D A, Bhangu J K, ThomasMC, Frasier D J, Burkholder P S, Harris K, Erickson G L, Wahl J B . *J. Eng. Gas Turbines Power* 120: 595–608.1998.
- [12] Field, R.D., Pollock, T.M., Murphy, W.H. *The development of g/g' interfacial dislocation networks during creep in Ni-base superalloys*. Superalloys Minerals, Metals & Materials Soc, pp. 557–566. 1992.
- [13] Birks, N., Meier, G.H., Pettit, F.S., *Introduction to the High Temperature Oxidation of Metals*. Cambridge University Press. 2006.
- [14] Pope, D.P., Ezz, S.S., *Mechanical properties of Ni<sub>3</sub>Al and nickel-base alloys with high volume fraction of g<sub>0</sub>*. Int. Metals Rev. 29, 136–167. 1984.
- [15] Pollock, T.M., Field, R.D., *Dislocations and high temperature plastic deformation of superalloy single crystals*. In: Nabarro, F.R.N., Duesbery, M.S. (Eds.), *Dislocations in Solids*, vol. 11, Elsevier, Amsterdam, pp. 593–595. 2002.
- [16] Nembach, E., Neite, G., *Precipitation hardening of superalloys by ordered-γ' particles*. Prog. Mater. Sci. 29, 177–319 (UK). 1985.
- [17] Molina R., González G., Pender G., Moro, L., *Checking of the uniformity of results of simultaneous creep testing equipment*. Revista Materia, 26 N.02, ISSN 1517-7076 artículo e-12022, 2018.
- [18] Alessio D., Gonzalez G., Fernandez Pirrone V., Iurman L., Moro L.; *Variation of Creep Properties in HP Steel by Influence of Temperature*. Procedia Materials Science, 1, 104-109. 2012).. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.014>.



[19] ASTM E139 -11. (2018). *Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials*. <https://www.astm.org/Standards/E139.htm>.



## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO AL CREEP DE UN ACERO TERMO-RESISTENTE GR HP

**Daniela Alessio<sup>1</sup>, Sandra Robles<sup>1</sup>, Lilian Moro<sup>2</sup> y René Molina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253, (8000) Bahía Blanca. [dalessio@uns.edu.ar](mailto:dalessio@uns.edu.ar); [srobles@uns.edu.ar](mailto:srobles@uns.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento de Mecánica – Facultad Regional Bahía Blanca – UTN  
11 de Abril 465, (8000) Bahía Blanca. [lilianmoro14@gmail.com](mailto:lilianmoro14@gmail.com); [rjmolina@criba.edu.ar](mailto:rjmolina@criba.edu.ar)

### RESUMEN

En este trabajo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de ensayos de creep en tracción de un acero termo-resistente ASTM 297 Gr HP de aplicación en equipos que trabajan en condiciones críticas de alta temperatura y tensión.

A partir de ensayos de creep en tracción realizados con este material se observa que la velocidad de deformación en el estadio secundario a tensiones en el entorno de los 80 MPa y 900°C no es la esperable, ya que es semejante a los valores de velocidad a tensiones inferiores en la misma condición de temperatura. Aun así, se observa una menor resistencia evidenciada por un estadio secundario breve y rotura rápida de las probetas.

Con el objetivo de profundizar en el estudio de este comportamiento se realizaron ensayos de creep en tracción a 900 °C y tensiones de 75, 80 y 85 MPa, con un equipo que permite ensayar hasta tres probetas en forma independiente a tensión y temperatura constantes, controlado por un sistema de adquisición de datos. Además, se determinó la dureza Vickers de cada probeta ensayada. Con los resultados obtenidos se determinaron las velocidades de deformación en el estado estacionario y, mediante el análisis metalográfico se analizó la vinculación entre la microestructura y la resistencia.

Los resultados obtenidos son de interés para evitar el riesgo de fallas prematuras de equipos que se encuentran en esa condición de operación.

**Palabras Clave:** *Acero termo-resistente; Serie HP; Creep*



## 1. INTRODUCCIÓN

En general, los componentes de equipos de plantas termoeléctricas o petroquímicas se exponen a temperaturas elevadas, entorno agresivo y estados de sollicitación que dan origen a diferentes mecanismos de daño que pueden causar la degradación, la deformación o agrietamiento de los componentes. El mecanismo de falla predominante, cuando en servicio los componentes están sometidos a combinación de altas temperaturas y tensiones moderadas, es la termofluencia, fluencia lenta o creep [1,2]. Consecuentemente, para lograr un funcionamiento fiable de la planta, se requiere un diseño eficiente de los componentes, que contemple su vida útil y, para ello, es necesario conocer las propiedades mecánicas y los mecanismos de degradación microestructural, de las aleaciones empleadas en la construcción de los mismos [3]. En relación con esta temática, en la bibliografía actual se dispone de significativas investigaciones vinculadas al estudio de la microestructura de estos aceros y la forma de mejorar las propiedades de resistencia al creep mediante el agregado de aleantes [4-6]

Los autores de este trabajo, con el propósito de analizar el comportamiento al creep, de los aceros utilizados frecuentemente en los equipos de la industria local, han hecho diversos estudios, en particular con aceros de la serie HP [7,8]. Para ello, se realizaron ensayos isotérmicos de creep por torsión y por tracción, a carga constante a lo largo del tiempo. En los ensayos realizados con acero HP modificado con Nb y Ti, en el entorno de los 80 MPa y 900°C, se observó una singularidad en los valores de la velocidad de creep en el estadio secundario. A 80 MPa los valores obtenidos eran del mismo orden que a tensiones inferiores, tendencia contraria a la esperada.

Estudios de otros investigadores en superaleaciones base níquel, en los cuales se manifiesta un comportamiento similar, lo explican a partir del fenómeno denominado "rafting". El mismo se observa cuando el material permanece a altas temperaturas. Consiste en un desplazamiento de las fases  $\gamma$  y  $\gamma'$ , que origina una disminución del espaciado intercrystalino generando tensión interna en el material. Esta transformación microestructural provoca una acumulación de dislocaciones sobre las fases, endureciendo al material, hasta que estas deslizan prosperando la deformación plástica [9,10]

Con el objetivo de profundizar el estudio de este comportamiento y dar respuesta al fenómeno observado, se llevaron a cabo ensayos de creep en tracción a 900 °C y a tensiones entre 70 y 90 MPa. Posteriormente, se analizó la evolución de la microestructura a partir del estudio metalográfico y se efectuó la medición de durezas en la sección transversal de las probetas ensayadas.



## 2. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS UTILIZADAS

De un tubo de 110 mm de diámetro externo y 11 mm de espesor, de acero termo-resistente de base Cr y Ni con adición de Nb y Ti, de la serie HP, se extrajeron las probetas para los ensayos de creep y las muestras para la determinación de la composición química y para la observación de la microestructura inicial. En la Tabla 1, se presentan los elementos componentes y los valores de las concentraciones (% en peso).

Tabla 1. Composición química nominal de la aleación HP – modificado con Nb y Ti

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo	Ti	Fe
HP – mod.	0.41	2.06	1.04	25	33	1.13	0.95	0.3	Bal.

Los ensayos de creep se realizaron de acuerdo con la norma ASTM E139 [11], a 900 °C y bajo tensiones en el rango de 70-90 MPa.

La máquina de ensayo de creep en tracción [12] está formada por tres equipos idénticos e independientes entre sí. Cada uno posee un horno eléctrico, donde el control de la temperatura se efectúa por medio de una termocupla de cromel-alumel cuyo extremo se ubica sobre la superficie de la zona central calibrada de la probeta. La deformación de la zona calibrada de la probeta se mide por medio de dos transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) Marca Solartron, que producen una salida de corriente continua con una amplitud proporcional al desplazamiento del núcleo móvil. La señal de salida de los LVDT posee diferencia de potencial variable de 10V y la señal de los sensores es adquirida por un sistema analógico-digital. El equipo posee certificados de calibración de las variables con una confiabilidad en las mediciones de 0,5% de error, emitidos por laboratorios acreditados ante el OAA en Diciembre de 2022.

En la Figura 1 se presentan las curvas de creep correspondientes a las tensiones de interés para este estudio. Se puede observar que a la tensión aplicada de 80 MPa la velocidad de deformación es inferior a la manifestada a 75 MPa y a 85 MPa. Asimismo, a la tensión de 80 MPa, el estado estacionario de deformación es breve y rompe súbitamente, mientras que a las otras dos tensiones el estadio es más extenso.

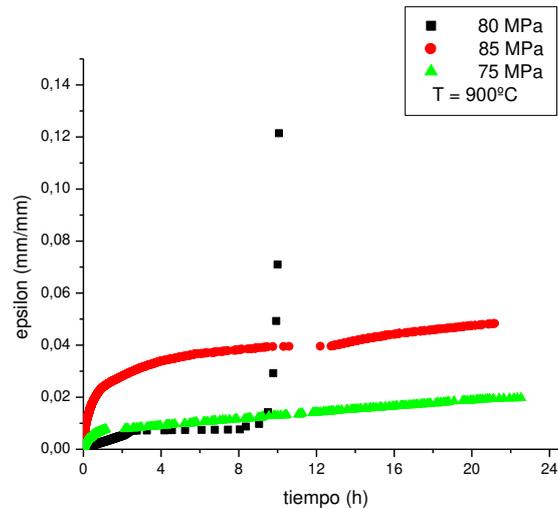


Figura 1: Curvas de creep a T = 900°C y tensiones de 75, 80 y 85 MPa

En la Tabla 2, se indican para las tensiones de 75, 80 y 85 MPa y temperatura de 900°C, los valores de la velocidad de deformación en el estado estacionario y la dureza Vickers, medida con un microdurómetro marca Future- TECH modelo FM – 300. Se aprecia a 80 MPa un menor valor de la velocidad de deformación y un mayor valor de la dureza, indicando que bajo estas sollicitaciones de tensión y temperatura, el material presenta menor tenacidad.

Tabla 2. Valores de velocidad de deformación del material y dureza

Temperatura (°C)	Tensión (MPa)	Velocidad de deformación ( $\epsilon/h$ )	Dureza [HV]
900	75	6,20101E-4	204,4
	80	9,24246E-5	273,7
	85	6,65214E-4	201,5

Para la observación de la microestructura del material se empleó un microscopio invertido para aplicaciones de metalografía y control de materiales industriales, marca Leica DM ILM, equipado con una máquina fotográfica digital de la misma marca; la microscopía de barrido se realizó con un microscopio SEM- LEO- EVO 40XVP, el cual tiene adosado un sistema de microanálisis del tipo EDX. Las probetas fueron desbastadas con papeles abrasivos de diferentes granulometrías y atacadas químicamente con Kalling (0.5 g de  $CuCl_2$ , 100 ml de HCl, 100 ml de etanol).

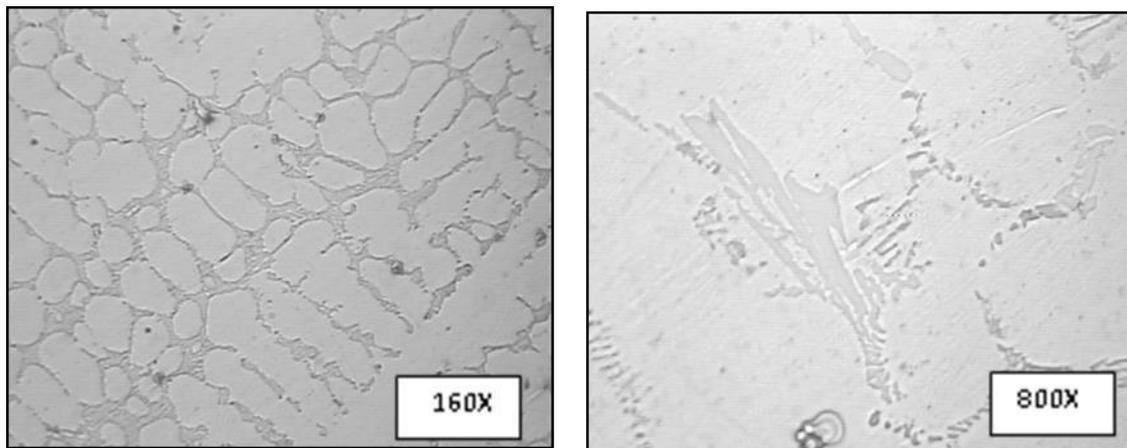


Figura 2: Microestructura característica del acero HP-modificado; estructura dendrítica compuesta por austenita (zonas claras) y carburos primarios eutécticos en bordes MC y  $M_{23}C_6$

En la Figura 2, se muestra la microestructura correspondiente al acero HP modificado con Nb y Ti, en su condición as-cast. Tal como puede apreciarse, la microestructura es de tipo dendrítica compuesta por una matriz austenítica y con carburos primarios ubicados entre las dendritas, junto a una leve dispersión intragranular [4].

Este acero presenta una microestructura en la que se observa la presencia de tres fases principales [10]:

- La fase gamma ( $\gamma$ ). Esta muestra la estructura FCC y forma una fase de matriz continua en la que residen otras fases. Contiene concentraciones significativas de elementos tales como Co, Cr, Mo, Ru y Re, donde estos están presentes.
- La fase gamma prima ( $\gamma'$ ). Esta generalmente se forma como un precipitado y, a menudo, es coherente con la matriz ( $\gamma$ ); es rica en elementos como Al, Ti y Ta. En las superaleaciones de níquel-hierro y las que poseen alto Nb, se privilegia una fase ordenada relacionada, ( $\gamma''$ ), en lugar de ( $\gamma'$ ).
- Carburos. El carbono, a menudo presente en concentraciones de hasta 0,2 % en peso, se combina con elementos reactivos como Ti, Ta y Hf para formar carburos MC. Durante el procesamiento o el servicio, estos pueden descomponerse en otras especies como  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$ , que prefieren residir en los límites de grano y y que son ricas en Cr, Mo.

La adición de niobio y titanio como modificadores microestructurales ha demostrado su eficacia a la hora de proporcionar una microestructura más estable a la aleación HP [13]. Se ha informado que pequeñas concentraciones de elementos, como el titanio, cambian la morfología del carburo MC de laminar a placas [4,14], dando lugar al carburo complejo de niobio y titanio ( $NbTiC$ ), que es más estable a altas temperaturas. Este aumento de la estabilidad del carburo

MC inhibe su transformación a fase G. La adición de titanio también promueve una precipitación intradendrítica uniforme y más fina.

La Figura 3 muestra la microestructura a las distintas tensiones ensayadas a 900°C.

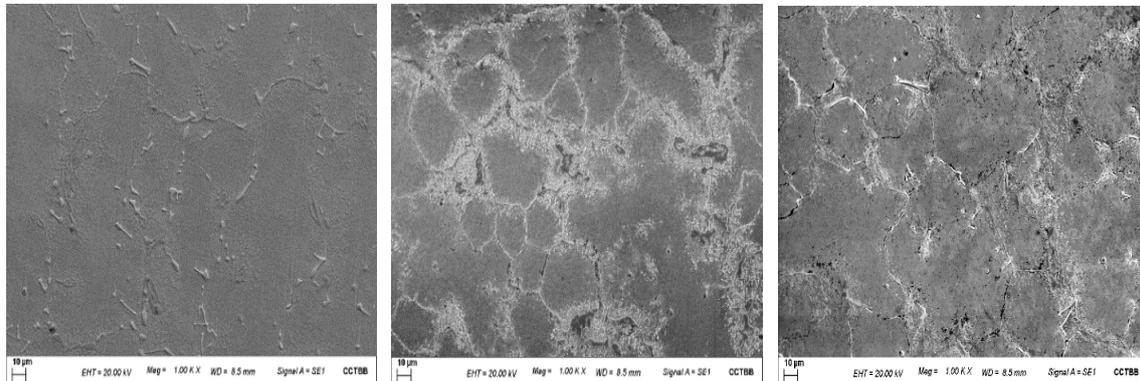


Figura 3: Variación de la microestructura a 900 °C y tensiones de 75, 80 y 85 MPa (1000x)

A 75 MPa, se observa que la red de carburos primarios de Nb, Ti y Cr en los bordes de grano se mantiene estable con escaso engrosamiento y se comienza a observar en la matriz un fino precipitado de carburos secundarios  $M_{23}C_6$  (Figura 4).

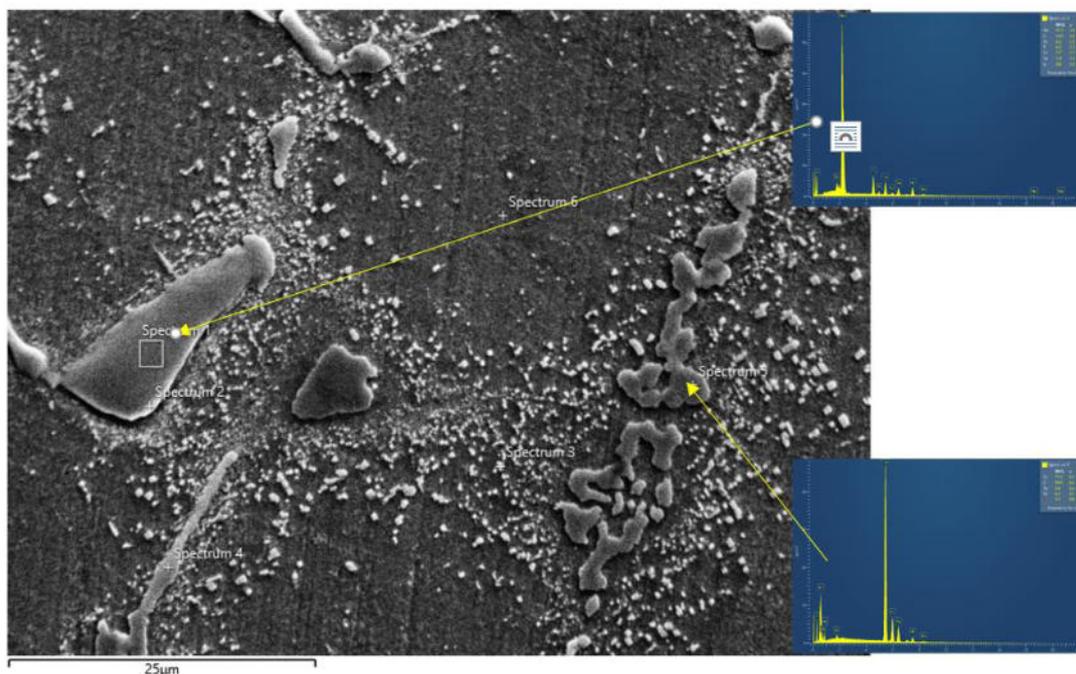


Figura 4: Microestructura a 900 °C y a la tensión de 75 MPa (4200x)

A 80 MPa, en los bordes de grano se ubica una densa red de carburos complejos de NiNbTi (A), de NiNbCr (B) y carburos de Cr (C), que inhiben el avance de dislocaciones. Los precipitados secundarios de Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> en la aleación son finos y están uniformemente distribuidos intragranularmente (Figura 5).

A 85 MPa se observan fisuras en el borde del grano y poros a lo largo de los carburos de Nb, Ti (Figura 6).

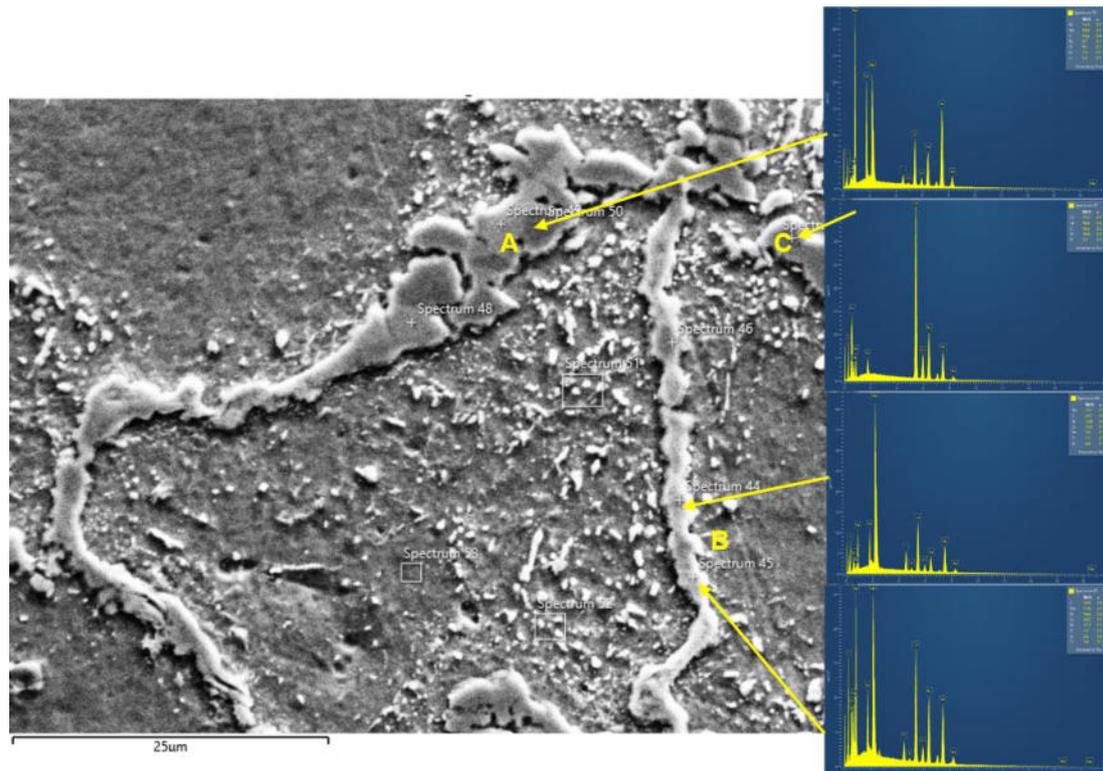


Figura 5: Microestructura a 900°C y a la tensión de 80 MPa (4200x)

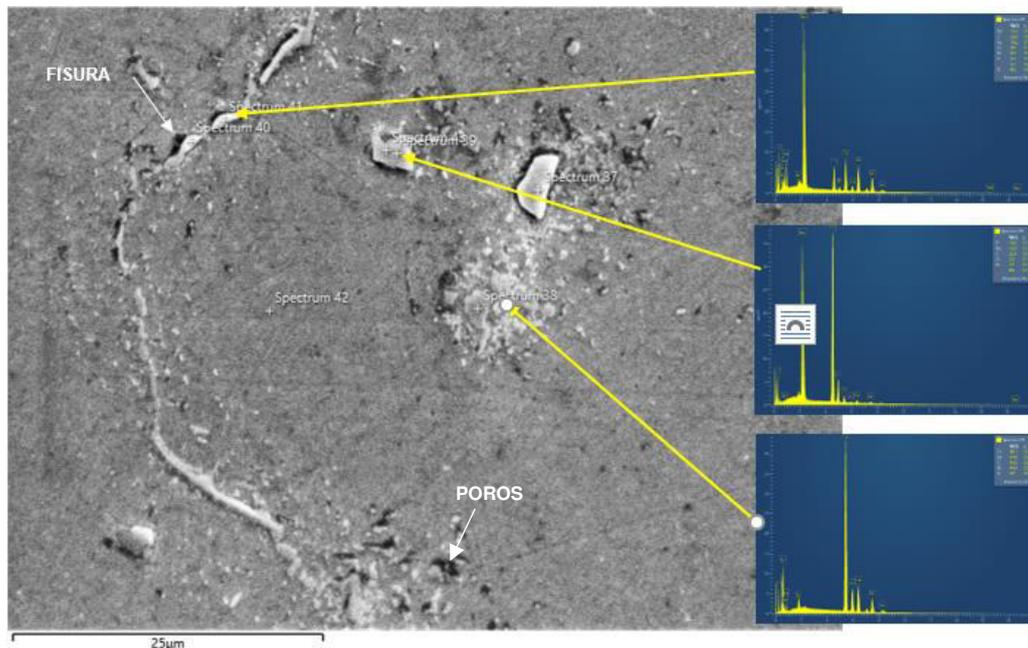


Figura 6: Microestructura a 900°C y a la tensión de 85 MPa (4200x)

### 3. CONCLUSIONES

Bajo la condición de ensayo de creep en tracción de este material a 900°C y diferentes tensiones aplicadas, se puede observar diferencias pronunciadas en la microestructura a causa de la difusión y formación de los carburos. En particular a 80 MPa la presencia de placas de carburos complejos y la importante concentración de ellos en los bordes de grano, que impiden el avance de las dislocaciones durante la deformación, explica la disminución de la velocidad del estadio secundario de creep y el endurecimiento del material manifestado en el incremento de la dureza y consecuente pérdida de la tenacidad.

### REFERENCIAS

- [1] Ray A.K., Amarendra K.S., Yogendra N.T., Swaminathan J., Das G., Chaudhuri S., Singh R., *Analysis of failed reformer tubes*, Eng. Fail. Anal. 10, 351-362, 2003.
- [2] Jakobi D., Gommans R., *Typical failures in pyrolysis coils for ethylene cracking*, Mater. Corros. 54, 881-886, 2003.
- [3] Voicua R., Lacazea J., Andrieua E., Poquillona D., Furtado J., *Creep and tensile behaviour of austenitic Fe–Cr–Ni stainless steels*. Materials Science and Engineering A, vol. 510-511, 185-189. ISSN 0921-5093. 2009.
- [4] de Almeida, L.H., Ribeiro, A.F., Le May, I., *Microstructural characterization of modified 25Cr–35Ni centrifugally cast steel furnace tubes*. Mater. Charact. 49, 219–229, 2003.



- [5] Barbabela, G.D., de Almeida, L.H., da Silveira, T.L., Le May, I. *Role of Nb in modifying the microstructure of heat-resistant cast HP steel*. Mater. Charact. 26, 193–197, 1991.
- [6] Andrade, A.R., Bolfarini, C., Ferreira, L.A.M., Souza Filho, C.D., Bonazzi, L.H.C., *Titanium micro addition in a centrifugally cast HPNb alloy: High temperature mechanical properties*. Mater. Sci. Eng. A 636, 48–52. 2015.
- [7] Alessio D., Gonzalez G., Pirrone V. F., Iurman L., Moro L. Variation of creep properties in HP steel by influence of temperature. Procedia Materials Science, 1, 104–109, 2012.
- [8] Alessio D., Robles S., Moro L., Gonzalez G., Molina R., *Ensayos de creep: torsión y tracción*, CONAMET/SAM- Congreso Internacional de metalurgia y materiales. ISBN 978-956-227-393-0, 17-20 noviembre, Concepción, Chile, 2015.
- [9] Reed R.C., Rae C.M. *Physical Metallurgy of the Nickel-Based Superalloys*. Elsevier, UK, 2014
- [10] Reed R.C., Rae C.M. *Primary creep in single crystal superalloys: Origins, mechanisms and effects*, Acta Materialia, 55 (3), 1067-1081, 2007.
- [11] ASTM3-01-E139, Standard test method for conducting creep, creep-rupture, and stress-rupture test of metallic materials. 2003.
- [12] Molina R., Pender G., González G., Moro L. *Comprobación de la uniformidad de resultados de un equipo de ensayos simultáneos de termofluencia*. Revista Materia, 23 (2), 2018.
- [13] Nunes F.C., de Almeida L.H., Dille J., Delplancke J.L., Le May I., *Microstructural changes caused by yttrium addition to NbTi-modified centrifugally cast HP-type stainless steel*. Mater. Charact., 58,132-142, 2007.
- [14] Hou Wen-Tai, Honeycombe R.W.K., *Structure of centrifugally cast autenitic stainless steels: Part 2—Effects of Nb, Ti, and Zr*. Mater. Sci. Technol., 1, 390-397, 1985.



## LADRILLOS ECOLÓGICOS PARA LA SUSTENTABILIDAD EN EL NORDESTE ARGENTINO

**Gabriel Corvalán<sup>1</sup>, Pablo Martina<sup>1</sup>, Raquel Aeberhard<sup>1</sup> y Franco Milich<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> G.I.D.E.R.-Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables – Depto. de Termodinámica – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste  
Av. Las Heras 727, Resistencia, Chaco, Argentina - gabrielcorvaa@yahoo.com.ar;

pablo@ing.unne.edu.ar; raquelaeberhard@gmail.com; francomilich@hotmail.com

### RESUMEN

En el nordeste argentino se observa el problema que ocasiona el inadecuado desecho de residuos biomásicos. Representando estos una gran cantidad de desperdicios que en la mayoría de los casos se tiran, queman, incineran, entierran o se dejan acumulados a la intemperie sin ser ocupados, perjudicando al medio ambiente.

Es por ello, que se resuelve fabricar a partir de estos materiales, elementos reciclados que se puedan utilizar en la industria de la construcción, provocando así la disminución de los desechos como forma de mitigar el impacto ambiental que éstos provocan.

El trabajo se centra en el estudio de la industria ladrillera y en la fabricación y ensayo de ladrillos a los cuales se les adiciona diferentes porcentajes de aserrín para luego someterlos a ensayos a fin de lograr su caracterización, dichos ensayos son los de resistencia al fuego, realizados con equipos fabricados por el grupo de investigación GIDER además del ensayo de absorción de agua. Se prevé en etapas posteriores a la publicación de este informe, la realización de los ensayos de resistencia mecánica y de conductividad térmica.

Con estos ensayos, se logrará caracterizar con precisión las propiedades de este nuevo material, para su posterior utilización en la construcción, promoviendo así una fabricación sustentable y viable económicamente.

En el presente estudio se exponen los resultados de los ensayos con 10%, 20% y 30% en volumen de aserrín.

Los resultados alcanzados en esta primera etapa, son altamente promisorios para lograr una cuantificación en cuanto a la incidencia del aserrín sobre los ladrillos.

Este trabajo fue presentado y aprobado para su ejecución por el Consejo Interuniversitario Nacional mediante la convocatoria de becas de investigación de pregrado EVC-CIN.

**Palabras Clave:** *Biomasa; Ecología; Ladrillos; Construcción Sustentable.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Es conocida la importancia que tiene la industria forestal la región del NEA, esto se traduce en mayor cantidad de aserraderos y desechos de la industria forestal.

Fuentes oficiales estiman cerca de 1.600.000 toneladas de biomasa seca residual al año en la región NEA. Por lo que se busca con el trabajo darle un uso racional al inmenso desperdicio de biomasa residual de la región, al utilizarlo como material de construcción e introducirlo en ladrillos los cuales serán estudiados en este trabajo. Ya que en la mayoría de los casos estos desechos se queman, produciendo así gases contaminantes.

Es por ello, que el trabajo se centra en el estudio de ladrillos y como afecta a las propiedades del mismo la variación del porcentaje de material biomásico que contiene, que, en este caso, se trata de aserrín en diferentes dosajes.

El ladrillo que se produce en la ciudad de Resistencia, y el que se toma como base para la realización de este estudio, es un elemento sumamente artesanal, lo que genera que existan gran variedad en cuanto a los elementos que lo componen y las cantidades del mismo según quien sea el productor. Es por ello, que el trabajo se realiza considerando el estudio de ladrillos de arcilla a los que se le adiciona aserrín como único agregado, siendo el aserrín, además, un elemento denominado “de liga” ya que se los utiliza como ligante de la mezcla. [1]

De esta manera, se definen los horizontes que a lo largo del trabajo se buscan alcanzar. Por un lado, estudiar las posibilidades de aprovechamiento de la biomasa residual del nordeste argentino como insumo utilizable en la construcción utilizando tecnología sencilla. Por el otro, ensayar y medir las propiedades térmicas de ladrillos fabricados con biomasa residual del nordeste argentino, así como la absorción de agua.

## 2. ESTUDIOS PRELIMINARES

Se realizaron visitas a ladrilleras locales de la ciudad de Resistencia, a fin de poder realizar entrevistas a los productores, referidas al proceso de fabricación del ladrillo artesanal, así como también, adquirir la arcilla para la producción de las probetas. Con dicha arcilla, se realizó un estudio en el Laboratorio de Mecánica de Suelos, del Instituto de Estabilidad de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, obteniendo como resultado que la arcilla para ladrillos que se utiliza en Resistencia, obtenida de ladrilleras del barrio “Boquita de Cortez” (Figura 1) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) es una arcilla de baja plasticidad (CL) [2] y según la Clasificación HRB es un suelo A-6 (15), indicando un suelo arcilloso plástico, en donde más del 75% pasa del tamiz N°200 [3]. Es decir, se trata de un material muy fino y seco, ya que se obtuvo un porcentaje de humedad natural  $w_e=2,7\%$ .

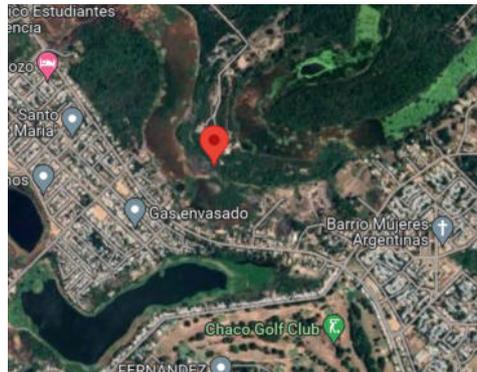


Figura 1: Ladrillería del barrio “Boquita de Cortez” de donde se ha obtenido la arcilla para la realización del trabajo.

## 2.1. Adopción de dosajes

Una vez identificado el material, se procedió a realizar las muestras, para lo cual se utilizó como residuo biomásico el aserrín obtenido de aserraderos (Figura 2). Las proporciones con las que se trabajó fueron:

Probeta Tipo I: 10% aserrín + 90% arcilla.

Probeta Tipo II: 20% aserrín + 80% arcilla.

Probeta Tipo III: 30% aserrín + 70% arcilla.

Se trabajó con estos porcentajes en volumen, y no se tuvo en cuenta la adición de arena, si bien hay ciertas bibliografías [4] que indican incluir arena debido a que contribuye a preservar la forma del ladrillo y que en este no se generen contracciones volumétricas por secado de la arcilla, se optó por no utilizar arena y evaluar también la incidencia o no de la misma, al registrar estas variaciones.



Figura 2: Diferenciación del aserrín y la arcilla antes de iniciar el proceso de mezclado.

## 3. ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos realizados para este Proyecto de Investigación son los siguientes:

### 3.1. Ensayo de Absorción de Agua [5] (Realizado en el Laboratorio de Materiales y Estructuras de la F.I. UNNE) :

La capacidad de absorción de agua de un ladrillo se define como el cociente entre el peso de agua que absorbe y su propio peso cuando está seco. Se expresa en porcentaje. Ecuación (1).

Para realizar este ensayo, se sumergen las probetas durante un periodo de 24 h. Después de este tiempo, se elimina el agua superficial mediante un paño y se procede a pesar el ladrillo. Con posterioridad, se procede a secado en estufa a 105 °C durante 24 h; a fin de poder determinar el peso seco. De esta manera, se mide el aumento de peso del ladrillo debido a la absorción de agua (Figura 3). La absorción de agua es importante porque puede afectar la resistencia del ladrillo a la compresión, así como su durabilidad. Si un ladrillo absorbe demasiada agua, puede debilitarse y romperse más fácilmente.

$$A_m = [(m_s - m) / m] * 100 \quad (1)$$

$A_m$  = porcentaje de absorción

$m_s$  = masa saturada del ladrillo

$m$  = masa del ladrillo en condición seca



Figura 3: Diferencias de peso en la probeta debidas a su estado saturado; y su estado seco.

### 3.2. Ensayo de Resistencia al Fuego (Realizado en el laboratorio de Termodinámica de la F.I. UNNE) :

Se realizó el ensayo de resistencia al fuego definido según la norma IRAM 11575; si bien en el laboratorio no se dispone del dispositivo especificado en dicha norma, se llevaron adelante experimentaciones por parte del grupo de investigación GIDER de la Facultad de Ingeniería de la UNNE a fin de lograr realizar una adaptación de una mufla eléctrica para la realización de este ensayo. De esta adaptación, se han obtenido buenos resultados, por lo cual, se considera apta esta adaptación para realizar el ensayo.

La mufla eléctrica adaptada para hacer el ensayo de resistencia al fuego es un equipo de laboratorio de 4,8 litros de capacidad, base rectangular de 19 cm x 29 cm, con una pared de

techo ligeramente abovedado de 10 cm de altura máxima. Dicho equipo puede alcanzar una temperatura máxima de 980 °C.

Para la realización del ensayo, se colocan 2 termocupas; una que registra la temperatura del horno, el cual debe permanecer a una temperatura constante; y otra dentro de la probeta; siendo esta variación, la que resulta de especial interés.

Se calienta el interior de la mufla hasta que se estabilice su temperatura en 750 °C. Se coloca en el interior la probeta (previamente secada a 60 °C durante 24 h), con la termocupla, midiendo la temperatura de la muestra.

Se realizan las lecturas de temperatura, de ambas termocupas, las mismas se toman a intervalos de aproximadamente 10 mediciones por minuto durante los primeros 5 minutos del ensayo, pudiendo disminuir esta periodicidad en la toma de mediciones al avanzar durante el tiempo total del ensayo, estimado en 30 minutos.

En la Figura 4 se observa el equipo y las diferencias del proceso de colocación en cuanto al ensayo definido en IRAM 11575 [6].

Una vez obtenidos los resultados, los mismos se procesan y se obtiene la curva de variación de la temperatura a lo largo del tiempo. Se deben de analizar tres criterios para definir si una muestra resulta no combustible.

1er criterio: no deben presentar un salto térmico tal que las temperaturas del interior no se elevaron 11,5 °C por arriba de la temperatura del aire en ningún momento. [6]

2do criterio: no debe de existir presencia de llama durante el ensayo. [6]

3er criterio: la muestra luego del ensayo no debe haber disminuido un 50% de su masa. [7]



Figura 4: Imagen ilustrativa del proceso de colocación de la muestra en la mufla eléctrica.

#### 4. PROCESAMIENTO DE PROBETAS

Se definieron cantidades y dimensiones de las probetas.

Para “3.1. Ensayo de Absorción de Agua” se realizaron probetas de 864 cm<sup>3</sup> (Figura 5).

3 probetas de 6 cm x 12 cm x 12 cm del TIPO I



- 3 probetas de 6 cm x 12 cm x 12 cm del TIPO II
- 3 probetas de 6 cm x 12 cm x 12 cm del TIPO III



Figura 5: Probetas realizadas para el ensayo de absorción de agua.

Para “3.2.Ensayo de Resistencia al Fuego” se realizaron probetas (\*) de 101,25 cm<sup>3</sup> (Figura 6).

- 2 probetas de 5 cm x 4 cm x 4 cm del TIPO I
- 2 probetas de 5 cm x 4 cm x 4 cm del TIPO II
- 2 probetas de 5 cm x 4 cm x 4 cm del TIPO III

(\*) Se realiza en las probetas un orificio pasante de 8mm de diámetro para disponer en el mismo la termocupla; además de un pequeño chaflán curvo a fin de permitir el ingreso de la muestra a la mufla.

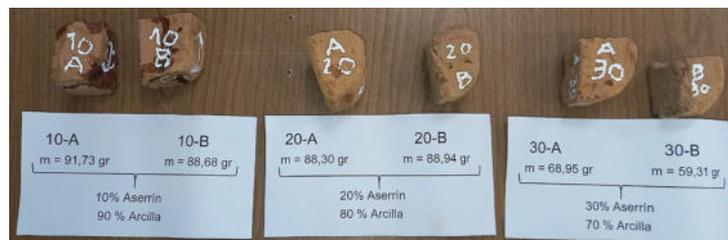


Figura 6: Probetas realizadas para el ensayo de resistencia al fuego.

En todos los casos, a fin de conseguir una mezcla homogénea entre ambos componentes, se estableció triturar los terrones de arcilla de manera manual, tal que estos se consideraban aptos para el mezclado cuando pasaban por el tamiz N°8 de 2,38 mm de abertura de malla (Figura 7).



Figura 7: Tamiz N°8 utilizado para la preparación de la arcilla.



Se encontró la relación de que por cada 1000 cm<sup>3</sup> de mezcla de arcilla y aserrín; se utilizó entre 500 ml y 550 ml de agua para realizar la preparación; ya que este punto resultaba óptimo para realizar el moldeo del material y dejarlo reposar en moldes (Figura 8).



Figura 8: Proceso de mezclado húmedo del aserrín y la arcilla.

En todos los casos, se realizó un “secado al aire” de las probetas, el cual se respetó que sea de mínimo 2 semanas, a fin de que se produzca un primer endurecimiento. Luego se procedió a secado en estufa a 105 °C durante 8 h (Figura 9). Este secado en estufa se realizó debido a que, si se realizaba la cocción directa, sin haber secado las probetas con anterioridad en estufa, se producía una pérdida abrupta de humedad. Dicha pérdida brusca de agua resultaba en que, en ocasiones, se haya producido un resquebrajamiento en las probetas.



Figura 9: Secado de las probetas en estufa a 105 °C.

Con posterioridad al secado, se realizó la cocción. Para la misma, se utilizó un horno tipo “mufla eléctrica” al cual se le prefijo una temperatura de 750 °C. Dicha cocción, se llevó adelante durante 8 h debido a las capacidades del instrumental, y a que fue realizado en condiciones de laboratorio (Figura 10).



Figura 10: Proceso de cocción en mufla eléctrica a 750 °C.

## 5. RESULTADOS

Del “3.1. Ensayo de Absorción de Agua” se obtuvieron los resultados que se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados del ensayo de absorción de agua.

Probeta	Peso (kg)		Am (Porcentaje de absorción)	Am (Promedio por tipo)	
	ms (peso saturado)	m (peso seco)			
TIPO I (10% aserrín + 90% arcilla)	10-1	0,870	0,744	16,935	17,332
	10-3	0,831	0,704	18,040	
	10-4	0,825	0,705	17,021	
TIPO II (20% aserrín + 80% arcilla)	20-2	0,837	0,700	19,571	19,621
	20-3	0,836	0,699	19,599	
	20-4	0,857	0,716	19,693	
TIPO III (30% aserrín + 70% arcilla)	30-1	0,700	0,567	23,457	22,235
	30-2	0,691	0,569	21,441	
	30-3	0,715	0,587	21,806	

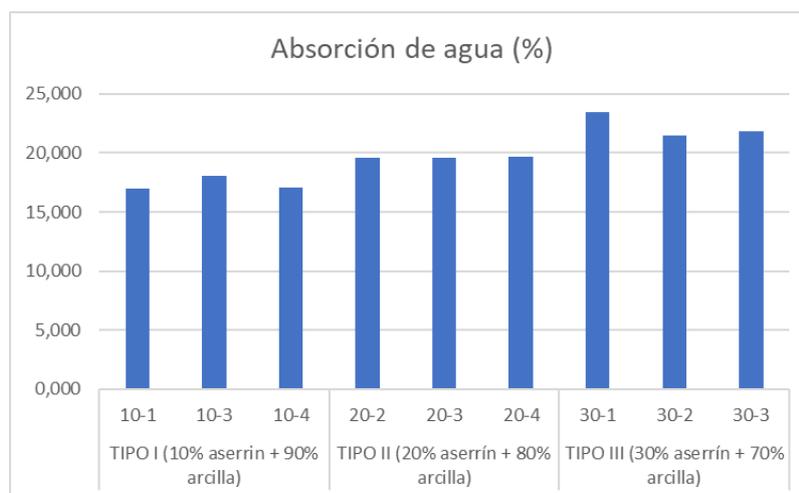


Figura 11: Representación de los resultados del ensayo de absorción de agua en ladrillos.



Se observa que a medida que aumenta el contenido de aserrín del ladrillo; el ladrillo se vuelve más permeable (Figura 11).

En cuanto al “3.2. Ensayo de Resistencia al Fuego” se obtuvieron los resultados que se detallan en la Tabla 2 con los cuales se realizaron una serie de gráficos de variaciones de temperatura para evaluar el comportamiento de las muestras (Figuras 12, 13, 14 y 15)

Tabla 2. Resultados del ensayo de resistencia al fuego.

Muestra	Salto Térmico sobre los 750°C	Presencia de llama	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	%reducción de masa	Resultado
10-A	+5°C	No	91,73	88,64	3,37	No Combustible
10-B	+7°C	No	88,68	87,45	1,39	No Combustible
20-A	+6°C	No	88,30	87,94	0,41	No Combustible
20-B	+8°C	No	88,94	88,60	0,38	No Combustible
30-A	+9°C	No	68,95	68,48	0,68	No Combustible
30-B	+9°C	No	59,31	57,57	2,93	No Combustible

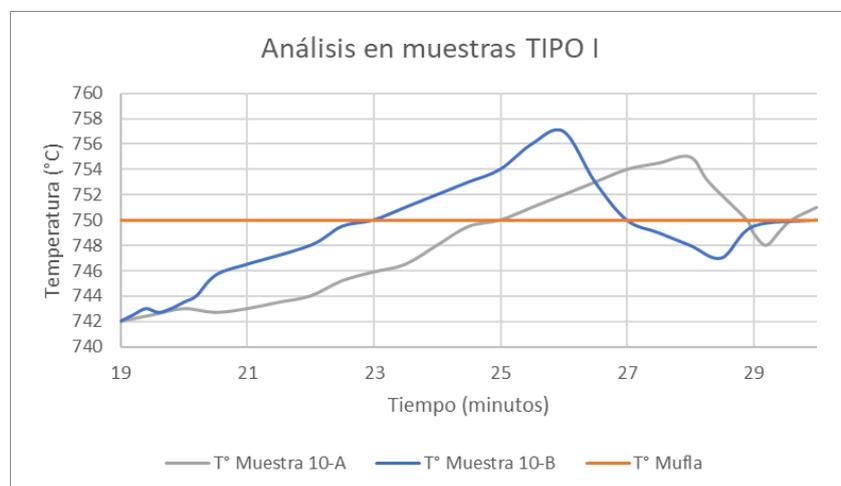


Figura 12: Gráfico de las variaciones de temperatura para muestras del tipo I.

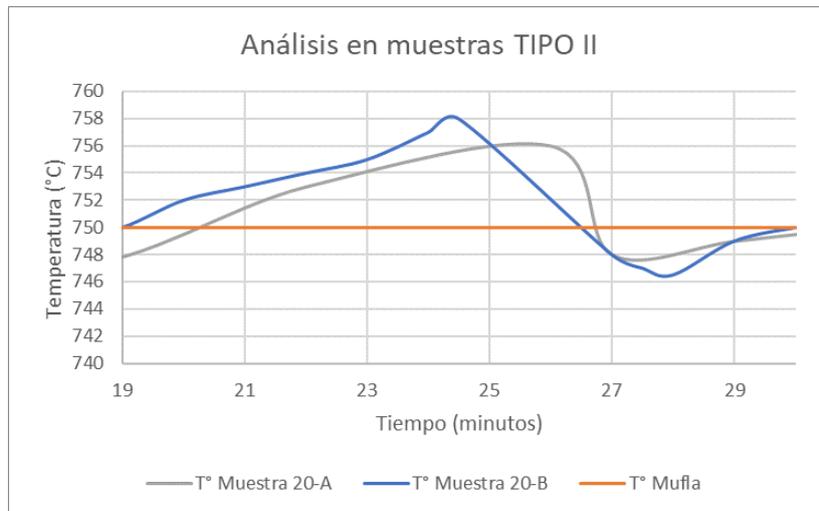


Figura 13: Gráfico de las variaciones de temperatura para muestras del tipo II.

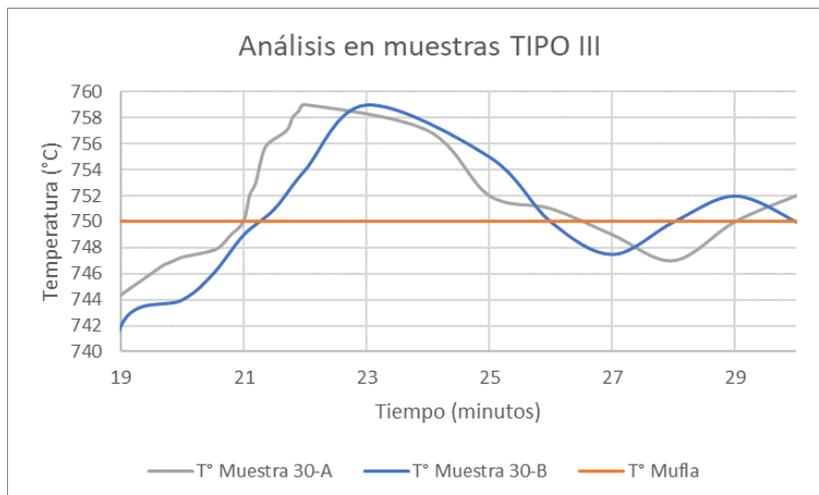


Figura 14: Gráfico de las variaciones de temperatura para muestras del tipo III.

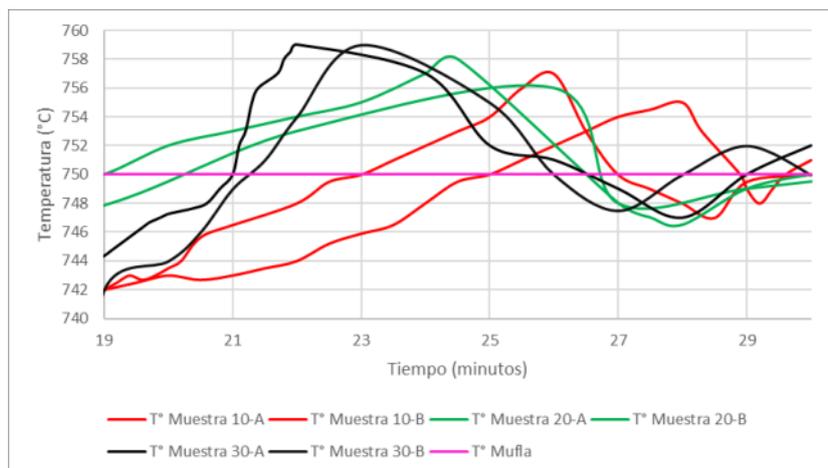


Figura 15: Gráfico de las variaciones de temperatura para la totalidad de las muestras.



Se observa que las curvas obtenidas en los ensayos como la llegada de las muestras a los valores pico, son consistentes entre sí, lo que es un indicativo de que al utilizar la adaptación de la mufla para la realización del ensayo, se obtienen valores de referencia. La variación en cuanto a los tiempos en que las distintas muestras llegan a los valores picos de temperatura, se presume que se debe al mayor o menor contenido de poros presentes en el material (Figura 16). De igual forma, al tratarse de una adaptación, podrían surgir mejoras en la adaptabilidad del método, o bien, en caso de poseer el equipo homologado obtener resultados más confiables, aunque a los fines del estudio de si el material es o no combustible, la adaptación de la mufla eléctrica resulta satisfactoria.



Figura 16: Apreciación de los poros internos en una muestra de resistencia al fuego con 10% de aserrín.

Es de destacar, que se observaron durante cada una de las etapas del armado de las probetas, desde el “secado al aire” hasta la cocción, pasando por el secado en estufa, contracciones en el tamaño de las muestras. Las mismas, se estima que pueden llegar a ser del orden del 15% al 20% (Figura 17).



Figura 17: Contracción volumétrica notoria en muestras para el ensayo de absorción de agua.

## 6. CONCLUSIONES

En cuanto a la absorción de agua de las muestras se puede concluir que se han obtenido resultados consistentes con los esperados, debido a que a mayor porcentaje de aserrín en la conformación de la muestra; resultan en ladrillos con mayor número de poros, ya que el aserrín



para las temperaturas de cocción utilizadas, se volatiliza, provocando la aparición de dichos poros. Esto resulta entonces en un material poroso y por ende, un material “aliviado”.

En cuanto a la resistencia al fuego se obtuvieron como resultados que el material se trata de un material no combustible, debido a que todas las muestras cumplen con los tres criterios impuestos por las normativas (criterio de saltos térmicos menores a 11,5 °C y ausencia de llama IRAM 11575 [6] y que la pérdida de masa sea menor al 50% ISO 1182 [7]).

Al tratarse de una investigación en curso, al momento de la presente publicación, se están llevando a cabo en el Laboratorio de Estabilidad de la Facultad de Ingeniería de la UNNE los ensayos de resistencia mecánica, a fin de poder cuantificar la variación en la resistencia para los diferentes dosajes de aserrín; a su vez, se están procesando las probetas para realizar el ensayo de conductividad térmica en el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE.

Teniendo en cuenta que en este trabajo no se añadió arena en la conformación de las muestras, se propone para próximas etapas del proyecto, la realización de probetas con diferentes porcentajes y granulometrías de arena del Río Paraná, para así, cuantificar su incidencia considerando principalmente, las contracciones volumétricas que se han presentado.

## REFERENCIAS

- [1] Bianucci M. *El ladrillo: Orígenes y desarrollo*. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Chaco, Argentina, 2009.
- [2] ASTM D2487 - 11. Práctica estándar para la clasificación de suelos para propósitos de ingeniería. American Society for Testing and Materials. 2011.
- [3] VN-E4-84-ASTM D3282. Clasificación de los suelos para subrasantes. Dirección Nacional de Vialidad. 1984.
- [4] San Bartolomé Ramos A.F. *Construcciones de albañilería: comportamiento sísmico y diseño estructural*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 1994.
- [5] IRAM 12588. Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros. Método de ensayo de la capacidad de absorción de agua por inmersión en agua fría y en agua caliente. Instituto de Racionalización Argentino de Materiales. 2006.
- [6] IRAM 11575. Materiales de Construcción. Método de ensayo de resistencia al fuego. Instituto de Racionalización Argentino de Materiales. 1971.
- [7] UNE-EN-ISO 1182. Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad. Asociación Española de Normalización y Certificación. 2021.



## CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304 ANTE EL DESGASTE EROSIVO EN CONDICIONES DE MUY BAJO ÁNGULO Y DE BAJA Y MUY BAJA VELOCIDAD

José Lucioni <sup>1</sup>, Carlos Tais <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Materiales, Departamento Mecánica, Facultad Regional Villa María, Universidad Tecnológica Nacional, Av. Universidad 450, Villa María, Córdoba, Argentina.  
jlucioni@frvm.utn.edu.ar; carlos.e.tais@gmail.com

### RESUMEN

Se efectuó la caracterización del comportamiento tribológico del acero austenítico AISI 304 bajo los efectos del desgaste erosivo en condiciones de muy bajo ángulo (MBA) y de baja y muy baja velocidad (BV/MBV). Ambos fenómenos (MBA y MBV) plantean un campo de interés que ha sido poco estudiado en el ámbito de la investigación básica y aplicada; normalmente la bibliografía considera ángulos superiores a los 15°; son escasas las referencias a ángulos inferiores. Adicionalmente, las muy bajas velocidades están asociadas a eventos de desgaste erosivo de larga duración; también aquí es exigua la bibliografía. Para la curva de erosión, se reporta la aparición de un intervalo de inflexión entre ángulos 8° y 12°; lo cual se cumple para diferentes tamaños de partículas, angularidades y velocidades. La determinación de la velocidad de partícula a partir de su energía permite incorporar los parámetros geométricos y físicos de la masa erosiva.

**Palabras Clave:** *Desgaste Erosivo; Acero Inoxidable; Bajo Ángulo; Baja Velocidad.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El desgaste, la fatiga y la corrosión son las causas más comunes en la falla de máquinas; de ellos, el desgaste es el relativamente menos investigado, pero con efectos finales similares o superiores en lo que hace al deterioro de un material.

El desgaste es el daño producido a una superficie sólida que generalmente incluye una progresiva pérdida de material debido al movimiento relativo entre la superficie y una sustancia de contacto. Los esfuerzos sistemáticos en su investigación se iniciaron en los países industrializados en la década de 1960. Aunque ha sido ampliamente estudiado, aún existen problemas sin ser investigados detalladamente o, en otros casos, está pendiente la aplicación de los desarrollos científicos al ámbito industrial. Esta situación revela la complejidad del fenómeno [1].

Los principales tipos de desgaste incluyen abrasión, fricción (adhesiva o cohesiva) y erosión. Una definición general de desgaste erosivo puede enunciarse como el daño provocado en una superficie por impactos repetitivos de partículas, que pueden ser de diferente naturaleza, tamaño y forma. La norma ASTM G40-99 [2] lo define como la pérdida progresiva de material de una superficie sólida debido a la interacción mecánica con un fluido, un fluido multicomponente o impacto de líquido o partículas sólidas. Las partículas duras se mueven arrastradas en el seno de un gas o líquido que incide en un sólido a una velocidad tal que produce la remoción de material de la superficie impactada [1].

La variación de la dirección de movimiento del fluido conlleva la variación de los ángulos de impacto, parámetro importante en el estudio de la erosión. También lo son el tipo y dureza relativa (respecto de la superficie impactada) de las partículas.

Los aceros inoxidables AISI 304, 316 y 420 tienen varias aplicaciones industriales, tales como álabes de turbinas, válvulas, herramientas, tuberías, tanques de almacenamiento, equipos de procesamiento de alimentos, etc.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se ensayaron probetas de acero inoxidable AISI 304 en condiciones as factory (AF). (Tabla 1)

Tabla 1. AISI 304. Composición química y dureza.

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Dureza
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[HRB]
0,06	1,99	0,04	0,012	0,58	18,29	8,77	84

Las dimensiones de las probetas variaron entre mínimo establecido por la norma y el máximo permitido por la capacidad de las mordazas y cavidad interna del tribómetro. Largo ( $l_p$ ): ( $30 < l_p < 230$ ) mm. Ancho ( $a_p$ ): ( $10 < a_p < 45$ ) mm. Espesor ( $e_p$ ): ( $2 < e_p < 15$ ) mm.

Las masas de la probeta y de la carga erosiva se determinaron en una balanza digital METTLER modelo H10 ( $d=0,1$  mg).

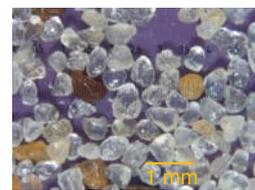
Si bien la norma de referencia [3] recomienda especificaciones técnicas para el tribómetro, también permite la construcción de aparatos diferentes siempre que se indiquen de manera detallada sus características y las condiciones de ensayo empleadas. Por ejemplo, Wood y Wheeler diseñaron un tribómetro de alta velocidad para desgaste erosivo para que emulara las condiciones que se dan en válvulas de la industria petrolera offshore [4]. Para este trabajo, las pruebas de desgaste erosivo se realizaron en un tribómetro de construcción propia [5] basado en los requerimientos establecidos por la Norma ASTM G76-13 [3]; se incorporaron mejoras que permiten la modificación de las condiciones de ensayo a fin de obtener muy bajos ángulos y muy bajas velocidades. Distancia orificio-probeta: ( $10,0 \pm 0,5$ ) mm. Diámetro de orificio de tobera: 3 mm. En la Tabla 5, los intervalos marcados con (\*) indican los rangos estudiados.



a.  $\phi 177 \mu\text{m}$ .  $61^\circ < \mathcal{A} < 83^\circ$



b.  $\phi 250 \mu\text{m}$ .  $94^\circ < \mathcal{A} < 106^\circ$



c.  $\phi 595 \mu\text{m}$ .  $102^\circ < \mathcal{A} < 127^\circ$

Figura 1: Arena Paraná.

Como carga erosiva se utilizó arena Paraná (Figura 1); tamiz US #30, #60 y #80. La angularidad  $\mathcal{A}$  de la partícula se calculó con la Ecuación(1) (Tabla 2) [6]; lo cual corrobora la clasificación surgida de aplicar la referencia geológica GSCC (Grain Size Card Comparator) y la clasificación establecida en ISO 14688-1:2017 [7].

$$\mathcal{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i f_{\alpha i} h_i}{\sum_{i=1}^n f_{\alpha i} h_i} \quad (1)$$

donde  $\alpha_i$  es el ángulo de cada vértice externo de la partícula,  $f_{\alpha i}$  un factor de ponderación y  $h_i$  la distancia entre el centroide de la partícula y el vértice externo sobre el cual se mide el ángulo. Nótese que valores elevados de angularidad indica mayor redondez; poca irregularidad de la superficie.



Tabla 2. Escala de Angularidad

$\mathcal{A} [^\circ]$					
<30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180
Muy Angular	Angular	Subangular	Subredondeado	Redondeado	Muy Redondeado

La caracterización de forma se efectuó a través de los valores de esfericidad  $\psi$ , alargamiento  $\mathcal{L}$ , planitud  $\mathcal{P}$  y relación de aspecto o ecuaticidad  $\mathcal{E}_c$  obtenidos con las Ecuaciones (2) [8], (3), (4) y (5), [9] respectivamente. Se adoptaron las formas propuestas originalmente por Zingg [10] y Sneed y Folk [11], que -tomando como referencia un elipsoide- modelizan las partículas empleando relaciones simples entre los ejes mayor ( $l$ ), intermedio ( $i$ ) y menor ( $s$ ). Se considera [8] que la Ecuación (3) es la mejor estimación de la esfericidad; cuando  $s=l=i$ ,  $\psi=1$  (esfera). (Tabla 3)

$$\psi = \left( \frac{s^2}{li} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$\mathcal{L} = \frac{i}{l} \quad (3)$$

$$\mathcal{P} = \frac{s}{i} \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_c = \frac{s}{l} \quad (5)$$

Tabla 3. Caracterización de Partícula

Número Malla	Abertura	Grain Size Card Comparator	ISO 14688-1	Forma
[US Sieve]	[ $\mu\text{m}$ ]	Tamaño	Angularidad	Tamaño
#30	595	Coarse (Lower) Medium (Upper)	Redondeado Subredondeado	mSa Discoidal Ecuante moderado
#60	250	Medium (Lower) Fine (Upper)	Subredondeado	mSa Acicular. Elipsoidal Ecuante moderado
#80	177	Fine (Lower)	Subredondeado Subangular	fSa Acicular. Elipsoidal Ecuante moderado

El caudal de alimentación de masa erosiva fue proporcional a la inversa de la velocidad de impacto ( $1/v$ ) variando de 0,4 a 2,0 g/s. El gas portador fue aire a temperatura ambiente; regulado para mantener constante la velocidad de las partículas. La velocidad de partícula se ha determinado por correlación de su energía cinética [6].



Solo para inspección general y verificación de la homogeneidad de la huella, la topografía de la superficie desgastada se observó con un microscopio óptico OLYMPUS empleando los objetivos 50X y 100X.

Los perfilogramas se obtuvieron con un dispositivo de construcción propia. Rango de Desplazamiento X-Y (0,00-50,00 +/- 0,01) mm. Rango de Desplazamiento Z (0,00-10,00 +/- 0,01) mm. Tamaño de malla plano X-Y:  $l_x=l_y=(0,20 \pm 0,01)$  mm.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer antecedente de un comportamiento diferenciado en los rangos inferiores surge durante el proceso de calibración [5] del equipo de desgaste (tribómetro), cuando se verificaba en la zona de bajas velocidades y bajos ángulos, detectando que –en esas condiciones– se presentan efectos que normalmente no son tratados en la bibliografía sobre desgaste erosivo.

Se exploró, entonces (Tabla 4), la región de las bajas ( $v < 30$  m/s) y muy bajas ( $v < 15$  m/s) velocidades y muy bajos ( $0^\circ < \alpha < 15^\circ$ ) ángulos, notando que aparecen fenómenos singulares que traen aparejadas toda una dimensión diferente a lo habitualmente estudiado ( $\alpha > 15^\circ$ ;  $v > 30$  m/s).

“El desgaste erosivo es la consecuencia de una secuencia cíclica continua: “impacto-grieta-fatiga- pérdida de material”. [12]

“El contenido de carbono juega un rol importante en el fenómeno de desgaste [13] pero también el resto de los componentes del acero incrementan o reducen el efecto del carbono [14]. El concepto de carbono equivalente (CE) permite cuantificar el efecto combinado de todos esos componentes.” [12]. Tylczak [15] lo asoció al desgaste abrasivo; más recientemente [12], se estudió la correlación entre el CE y el Parámetro Crítico de Metal (Pcm) con el desgaste erosivo, verificando similar relación de ambos con el volumen perdido.

Trabajos fundacionales como los de Finnie [16], Bitter [17,18], Neilson y Gilchrist [19] o, varias décadas después, el de Zum Gahr [20] no estudian de manera completa y combinada la erosión a bajos ángulos y bajas velocidades. Posteriormente, Meng y Ludema [21] efectúan un minucioso análisis de 5466 de artículos sobre desgaste; detectan que la velocidad, densidad y el ángulo de impacto son los parámetros que más se emplean en los modelos de desgaste erosivo; no mencionan rangos evaluados.

Por lo tanto, es notoria la escasez de publicaciones donde se reporten los fenómenos erosivos relacionados con los intervalos ubicados en los extremos inferiores de las escalas de velocidad y ángulo de impacto. La Tabla 4 clasifica dichos intervalos.

Se encuentran disponibles resultados para ángulos de impacto mayores a  $15^\circ$ ; en cambio, el extremo de muy bajo ángulo ( $0 < \alpha < 15^\circ$ ) está muy poco estudiado. Para la velocidad de partículas sucede algo similar; son poco frecuentes los reportes de resultados en el intervalo de bajas velocidades ( $15 < v < 20$ ) m/s y, casi inexistentes, a muy bajas velocidades ( $v < 15$  m/s). En este

trabajo se evaluaron esos intervalos. La combinación de velocidad y ángulo permitió explorar con mayor detalle el fenómeno, combinando valores en los extremos más bajos de dichos parámetros y elaborar el mapa de desgaste asociado.

Tabla 4. Velocidad. Ángulo. (\*) Intervalos estudiados en este trabajo.

Denominación de Rango	Velocidad de partícula [m/s]	Ángulo de Impacto [°]
Muy bajo	0 – 15 (*)	0 – 15 (*)
Bajo	15 – 30 (*)	15 – 30
Medio	30 – 80	30 – 60
Alto	80 – 100	60 – 80
Muy Alto	100 – 200	80 – 90

En cuanto al tamaño y forma de las partículas, si bien han sido consideradas en numerosos estudios, tampoco se han encontrado reportes relacionados con los efectos producidos por ellas en condiciones de baja y muy baja velocidad y muy bajo ángulo.

La proyección superficial de la región erosionada adopta una forma elíptica (Figura 2 c.) para todos los ángulos de impacto. Alrededor del 95% del desgaste se produce en la semielipse más cercana al orificio de la tobera [6]. En la Figura 2 a. y b. se muestran los resultados de erosión a  $v=25$  m/s para ángulos de impacto  $\alpha=4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$  y  $16^\circ$ .

Para bajas velocidades los tiempos de ensayo son mucho mayores debido a la necesidad de reducir el caudal de masa erosiva en un valor proporcional a la velocidad de impacto ( $1/v$ ). Caudales alejados de ese valor producen resultados erráticos.

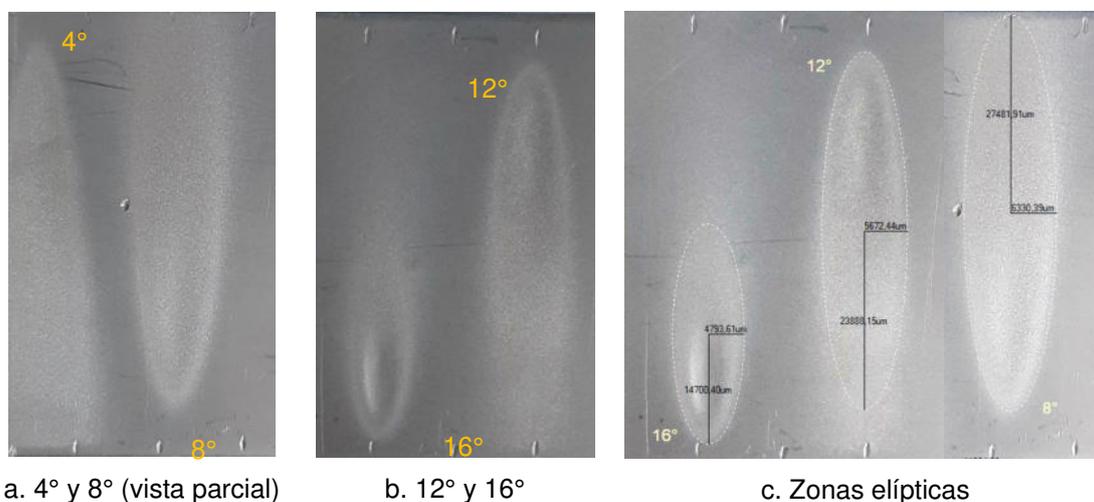


Figura 2: AISI 304. Probetas erosionadas.  $v=25$  m/s



Es conveniente el uso de cantidades relativas (normalizadas) ya que “los valores absolutos de las tasas de erosión de los materiales generalmente no están disponibles debido a la amplia gama de posibles condiciones de exposición” [3]. Los valores de erosión se han calculado como tasas de pérdida de masa (Ecuación (6)) o de volumen (Ecuación (7)); la unidad es  $\text{kg}^{-1}$ .

$$Erosión_{m\acute{a}sica} = \frac{\text{Masa Perdida}}{\text{Masa Impactada}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}^2} \right] \quad (6)$$

$$Erosi\acute{o}n_{volumen} = \frac{\text{Volumen Perdido}}{\text{Masa Impactada}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg m}^3} \right] \quad (7)$$

La tasa de erosión másica se incrementa con el aumento del tamaño de partícula y de las velocidades (energía) de impacto. (Figuras 3 a, b y c).

Se presenta una zona de inflexión entre 8 y 12°; esto es importante porque –en este rango angular y a estas velocidades– no existen antecedentes y la bibliografía supone una región lineal. En [22] se estudiaron velocidades tan bajas como 9, 18 y 28 m/s pero no se evaluaron ángulos menores a 15°. Anteriormente, Finnie [23] presentó valores de erosión para ángulos de impacto alrededor de 10° pero las velocidades mencionadas en el artículo son elevadas (76 a 152 m/s).

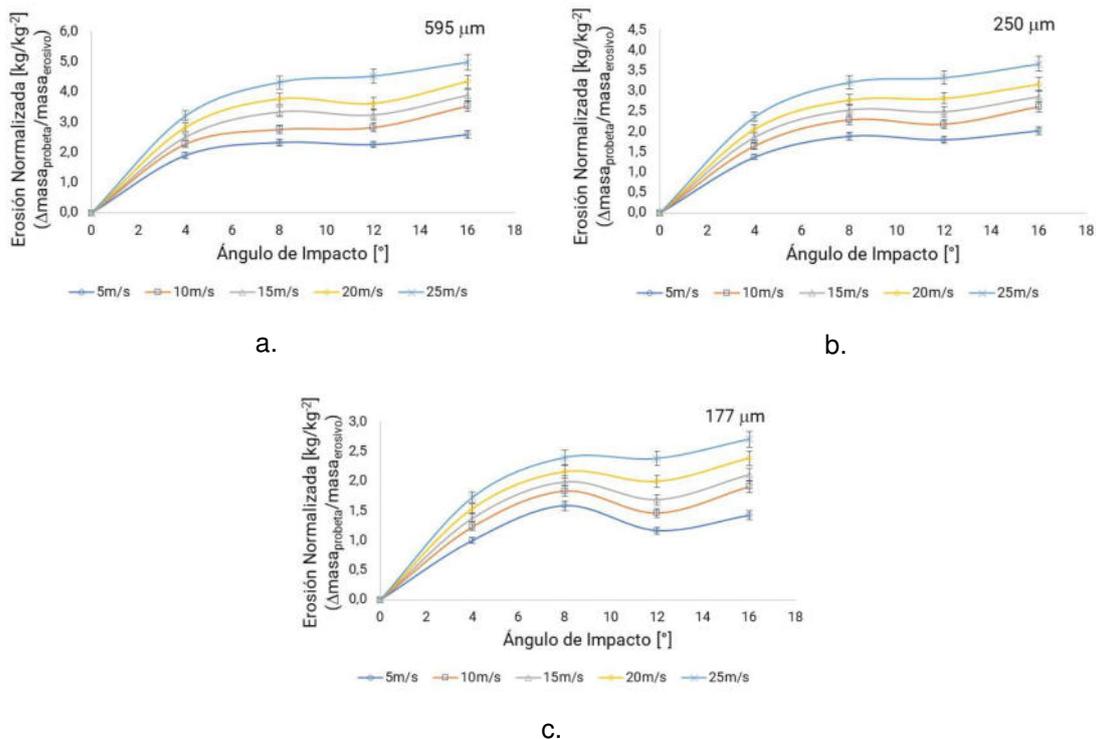


Figura 3. Erosión Másica: Tamaños de partícula  $\phi=177, 250, 595 \mu\text{m}$ .

La importancia de la angularidad de las partículas ya fue mencionada por Bisht [24]; en su modelo propone una geometría piramidal e incorpora el efecto dimensional y la forma. Los valores de erosión obtenidos (Figuras 3 c. y 4 b.) confirman ese resultado y validan la intensificación de la pérdida de linealidad para las partículas  $\phi 177 \mu\text{m}$ .

El fenómeno -que ya se presenta para partículas grandes ( $\phi 595 \mu\text{m}$ )- es evidente para partículas de  $\phi 177 \mu\text{m}$  (Figura 4 b.) Aun así, debe notarse que un cambio de diámetro de  $\phi 595$  a  $\phi 250 \mu\text{m}$  es una reducción de 8 veces en el volumen perdido, pero un cambio de  $\phi 250 \mu\text{m}$  a  $\phi 177 \mu\text{m}$  implica solo un decremento de 2,8 veces; por lo tanto, la angularidad y la forma de partícula (Tabla 4; Figura 4) tienen mayor incidencia en la aparición de la zona no lineal entre  $8$  y  $12^\circ$ . Arabnejad y col [22] emplean el concepto de energía cinética para aplicar su modelo de la ecuación de desgaste en un acero inoxidable AISI 316, a la vez que consideran los efectos de la angularidad aun cuando las velocidades disminuyen.

A bajas velocidades, el tiempo de ensayo para producir la misma erosión es mucho mayor. También aumenta la dificultad para la obtención de valores. Ambos aspectos dan relevancia a considerar la energía de la partícula como parámetro importante más que la sola velocidad de esta. Tempranamente, Finnie [16] observaba que al llegar la partícula a la muestra, su velocidad es solo una fracción de la velocidad del aire (el fluido que la transporta) y que la incertidumbre en los valores de erosión está asociada a la influencia del tamaño en la velocidad de las partículas; hay que agregar a esa conclusión que la forma y angularidad también afectan la velocidad. Por lo tanto, la velocidad obtenida a partir de la energía cinética incorpora todos estos efectos y otorga una mejor estimación de la velocidad real de la misma [6].

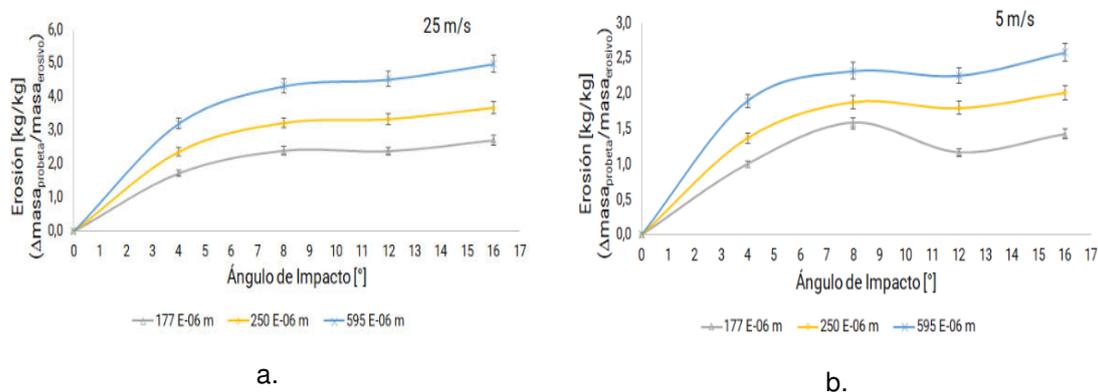


Figura 4: Erosión Másica. Velocidades de Impacto  $v=5$  y  $25 \text{ m/s}$ .

Si bien el volumen perdido puede obtenerse con un modelo elipsoidal [12], solo se ajusta correctamente para ángulos de impacto de  $90^\circ$  o cercanos a este valor. El volumen perdido se calculó sobre los datos obtenidos de la perfilometría. La Figura 5 muestra los valores

normalizados de profundidad de huella de desgaste para un ángulo de Impacto  $\alpha=12^\circ$ , tamaño de partícula  $\phi=595 \mu\text{m}$  y velocidad  $v=20 \text{ m/s}$ .

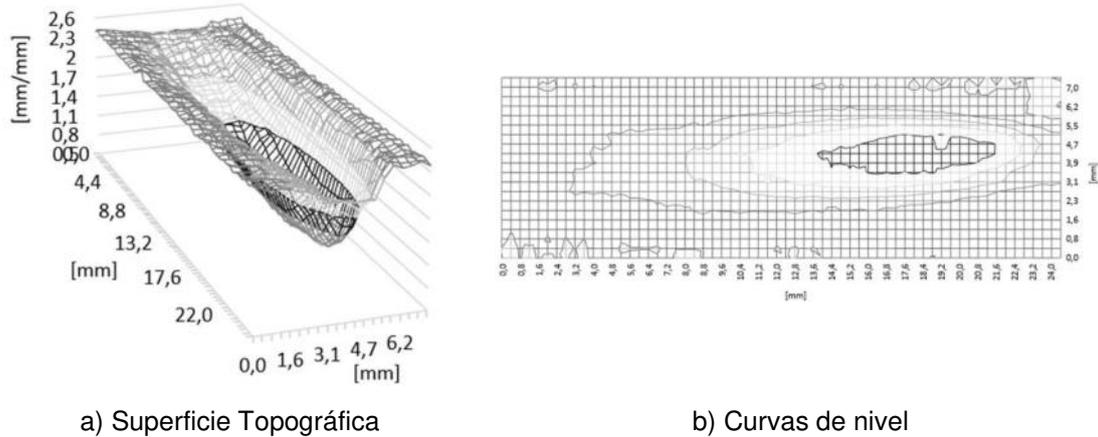


Figura 5: Perfilometría. Ángulo de Impacto  $\alpha=12^\circ$ . Tamaño de partícula  $\phi=595 \mu\text{m}$ . Velocidad  $v=20 \text{ m/s}$ .

La tasa de erosión volumétrica confirma lo determinado por pérdida de masa (Figura 6 a. y b.) La dispersión en algunas curvas de volumen (Figura 6 b.) podría deberse a la precisión del perfilómetro; por otro lado, la misma norma ASTM G76 admite que la medición del área erosionada en la muestra está sujeta a un error considerable [3] y recomienda mantener una adecuada relación entre el ancho y la profundidad del perfil del cráter producido. Estas condiciones se mantuvieron bajo control en todas las muestras de este trabajo. La media volumétrica presenta la misma tendencia general que la media másica (Figura 7).

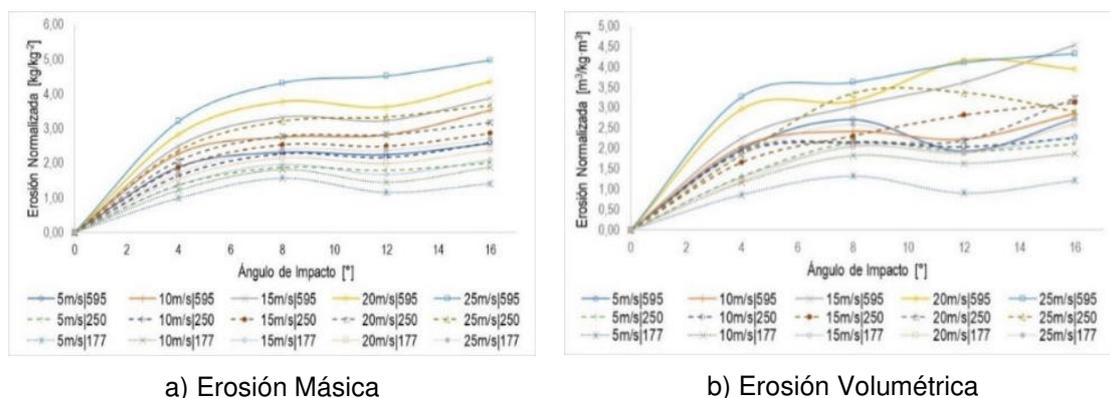
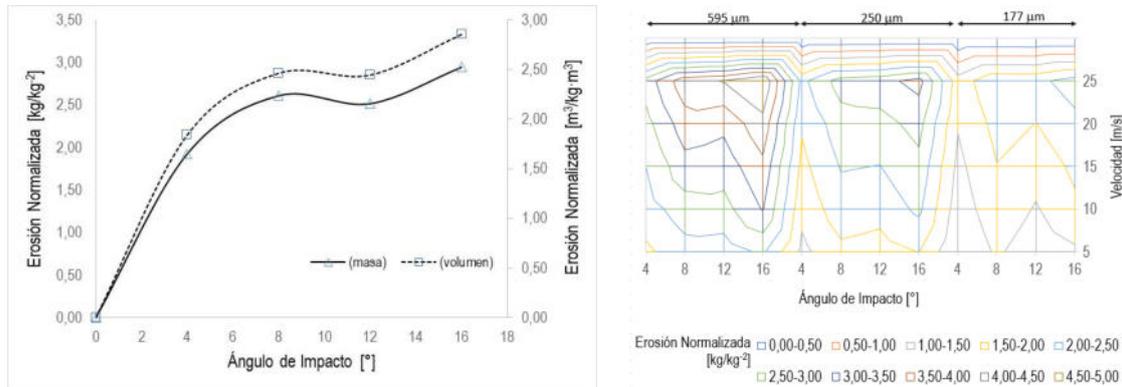


Figura 6: Erosión Normalizada

Ambas tasas de erosión normalizada –determinadas a partir de la pérdida de masa y de volumen– muestran el mismo comportamiento para ángulos de impacto en el intervalo  $8^\circ < \alpha < 12^\circ$ . Los valores medios de la tasa de erosión (Figura 7.a) presentan una zona de inflexión; se

manifiesta para todas las velocidades medidas y se incrementa para menores valores de angularidad  $\mathcal{A}$ . Excepto en la región indicada, el resto de los valores se comportan linealmente.



a) Valor medio de erosión normalizada.

b) Mapa de erosión.

Figura 7: Erosión.

La presentación de las tasas de erosión en formato de mapa (Figura 7.b) facilita la predicción del comportamiento del material combinando múltiples parámetros en una misma herramienta (el mapa).

#### 4. CONCLUSIONES

La fricción, el desgaste y la lubricación son las áreas que estudia la tribología. Los resultados obtenidos aportan principalmente a un conocimiento del desgaste erosivo, pero sirven como datos experimentales para el estudio de primeros principios que la Física considera al tratar el fenómeno de fricción.

Se detectó una zona de inflexión (8° a 12°) en la región considerada habitualmente como lineal. Puede interpretarse como un incremento local de la resistencia al desgaste.

Siendo la partícula el medio erosionante, el cálculo de su velocidad a partir de un modelo basado en la energía cinética permite incluir los parámetros geométricos y las propiedades físicas que influyen en el movimiento de esta. También resulta relevante la adecuada especificación geométrica a partir de relaciones cuantitativas entre las dimensiones de la partícula; así la angularidad, ecuanticidad, planitud, alargamiento y esfericidad son los parámetros que la distinguen e individualizan en cuanto a su efecto sobre las tasas de erosión.

En general, lo deseable es disponer de una caracterización simple para ser empleada en el ámbito industrial en condiciones de ángulos de impacto mínimos y a velocidades tan bajas que suelen interpretarse (erróneamente) como valores cuyos efectos no son significativos. Se ha



detectado que en estas circunstancias hay efectos acumulativos a tener en cuenta en la resistencia al desgaste para los aceros inoxidable AISI 304.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Juan Manuel Victorio Vallaro por el desarrollo y construcción del dispositivo para la obtención de los perfilogramas.

Al Sr. Juan Ángel Barella por la colaboración en la implementación de mejoras en el tribómetro de desgaste erosivo.

Este artículo se enmarca en el proyecto PID MAUTNVM0005146 cuyo financiamiento y apoyo surge de la UTN-SCyT y la FRVM-SCyT. (Código SCyT: MAUTNVM0005146 / Disposición SCyT: 49/2019).

## REFERENCIAS

- [1] Patnaik, A.; Satapathy, A.; Chand, N.; Barkoula, N.M.; Biswas, S. *Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymercomposites: A review*. *Wear*, 268, 249-263, 2010.
- [2] ASTM G40-99 *Standard Terminology Relating to Wear and Erosion*. ASTM, 1999.
- [3] ASTM G76-13 *Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets*. ASTM, 2013.
- [4] Wood, R.J.K.; Wheeler, D.W.. *Design and performance of a high velocity air- sand jet impingement erosion facility*. *Wear*, Volume 220, Issue 2, 95-112, 1998.
- [5] Nores, R.A.; Victorio Vallaro, J.M. *Reingeniería del dispositivo para determinar la resistencia al desgaste en seco de materiales por erosión*. 8ª Jornadas de Ciencia y Tecnología - CyTAL 2018, ISBN 978-987-4433-19-0, 12-14 Sep 2018, Villa María (Córdoba).
- [6] Lucioni, J. *On correlation between particle velocity in erosive wear and its shape, size and energy*. [Comunicación interna. En preparación para publicación]. Laboratorio de Materiales, Departamento Mecánica, Facultad Regional Villa María, Universidad Tecnológica Nacional, 2022.
- [7] ISO 14688-1:2017 *Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description*. ISO, 2017.
- [8] Araujo, G.S.; Bicalho, K.V.; Tristão, F.A. *Use of digital image analysis combined with fractal theory to determine particle morphology and surface texture of quartz sands*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9, 1131-1139, 2017.
- [9] Szabó, T., Domokos, G. *A new classification system for pebble and crystal shapes based on static equilibrium points*. *Central European Geology*, Vol. 53/1, 1-19, 2010.



- [10] Zingg, T. *Beitrag zur Schotteranalyse*. – Schweizerische Mineralogische und Petrologische Mitteilungen, 15, 39–140, 1935.
- [11] Sneed, E., R.L. *Folk Pebbles in the lower Colorado River, Texas, a study in particle morphogenesis*. – Journal of Geology, 66, 114–150, 1958.
- [12] Barella, J.A., Victorio Vallaro, J.M., Lozano Rus, M., Lucioni, E.J., Fernández, H.G. *Tribological Characterization of Erosive Wear Resistance as a Criteria of Material Selection for Fabrication of Construction Equipment and Machinery*. In: Botto Tobar, M., Cruz, H., Díaz Cadena, A. (eds) Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. CIT 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering, 763, 137–150, 2021.
- [13] Larsen Badse, J. *The abrasion resistance of some hardened and tempered carbon steels*. Trans of The Metal Soc of AIME, Vol 236, 1461-1466, 1966.
- [14] Garcia, A. et al. *Influencia del carbon y el cromo en el comportamiento tribológico de aleaciones férreas*. Rev. Metal. Madrid. Vol. Extr., 493-497, 2005.
- [15] Tylczak, J. H. *Correlating Alloy Composition to Wear in Low-Alloy Steels*. Wear of Materials, 77-78, 1985.
- [16] Finnie, I. *Erosion of surfaces by solid particles*. Wear, vol. 3, no 2, p87-103, 1960.
- [17] Bitter, J. G. A. *A study of erosion phenomena Part I*. Wear, vol. 6, no 1, 5-21, 1963.
- [18] Bitter, J. G. A. *A study of erosion phenomena Part II*. Wear, vol. 6, no 3, 169-190, 1963.
- [19] Neilson, J. H.; Gilchrist, A. *Erosion by a stream of solid particles*. Wear, vol. 11, no 2, 111-122, 1968.
- [20] Zum Gahr, K.H. *Wear by hard particles*. Tribology International, Vol.31, No. 10, 587-596, 1998.
- [21] Meng, H. C.; Ludema, K. C. *Wear models and predictive equations: their form and content*. Wear, vol. 181, 443-457, 1995.
- [22] Arabnejad, H.; Mansouri, A.; Shirazi, S.A.; McLaury, B.S. *Development of mechanistic erosion equation for solid particles*, Wear, Volumes 332–333, 1044-1050, 2015.
- [23] Finnie, I. *Some reflections on the past and future of erosion*. Wear, vol. 186, 1-10, 1995.
- [24] Bisht, R. *A modified approach for better prediction of erosion wear of materials: Redefining the paradigms*. Materials & Design, vol. 47, 395-407, 2013.



## EFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE AA6061-T6 SOLDADO POR FSW

Leonardo N. Tufaro<sup>1,2</sup>, Maximiliano A. Escoda Avila<sup>3</sup>, Marcos Bergant<sup>3</sup> y Hernán G. Svoboda<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Soldadura, Subgerencia Operativa de Mecánica y Logística, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), San Martín, Buenos Aires, Argentina - [ltufaro@inti.gov.ar](mailto:ltufaro@inti.gov.ar)

<sup>2</sup> GTSyCM3, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Universidad Nacional de Cuyo (UNCUYO), San Carlos de Bariloche, Argentina - [maximilianoescoda@cnea.gov.ar](mailto:maximilianoescoda@cnea.gov.ar), [marcos.bergant@cab.cnea.gov.ar](mailto:marcos.bergant@cab.cnea.gov.ar)

<sup>4</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina - [hsvobod@fi.uba.ar](mailto:hsvobod@fi.uba.ar)

### RESUMEN

La soldadura por fricción agitación (FSW) es un proceso de unión en estado sólido de aplicación creciente en los últimos 30 años en la fabricación de componentes de aleaciones de aluminio y otros materiales. Una de las ventajas de este proceso es la microestructura de grano fino en la zona agitada generada por la recristalización dinámica durante la soldadura, la cual en general mejora la tenacidad de la zona agitada. Las aleaciones de aluminio termotratables experimentan un ablandamiento significativo debido a fenómenos de solución, re-precipitación y sobre-envejecimiento asociados al ciclo térmico de la soldadura. En este sentido, se puede recurrir a tratamientos térmicos post soldadura (PWHT: Post Weld Heat Treatment) de solubilizado y envejecimiento para recuperar la resistencia de la unión. Sin embargo, durante la etapa de solubilizado se produce en general un crecimiento anormal del tamaño de grano en la zona agitada, que no afecta a la resistencia, pero que puede reducir la tenacidad. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del tratamiento térmico post soldadura en las propiedades a fractura de una unión soldada por FSW de AA6061-T6. Se realizó la soldadura por FSW sobre chapas a tope de AA6061-T6 de 3 mm de espesor. Posteriormente, se realizó un PWHT de solubilizado y envejecido. Se llevó a cabo la caracterización macro y microestructural, perfiles de microdureza, ensayos de tracción, ensayos de arrancamiento tipo Kahn y ensayos de mecánica de fractura para ambas condiciones de soldadura (AW y PWHT) y para el metal base. Se observó un aumento en la dureza de la zona agitada y en la resistencia de la unión debido al PWHT, así como la disminución en la ductilidad en los ensayos de tracción y de la tenacidad medida mediante ensayos Kahn. Dicha caída de tenacidad no se detectó en los ensayos de mecánica de fractura. De esta manera, se discuten las ventajas y desventajas en la realización del PWHT, así como la aplicabilidad de los distintos ensayos empleados.

**Palabras clave:** Soldadura por Fricción Agitación; Aleación de Aluminio; Ensayo de Arrancamiento Tipo Kahn; Mecánica de Fractura.



## 1. INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción agitación (FSW) es un proceso de unión en estado sólido de aplicación creciente en los últimos 30 años en la fabricación de componentes de aleaciones de aluminio y otros materiales. Una de las ventajas de este proceso es la microestructura de grano fino en la zona agitada generada por la recristalización dinámica durante la soldadura, la cual en general mejora la tenacidad de la zona agitada [1].

Los ensayos de arrancamiento tipo Kahn fueron desarrollados para aleaciones de aluminio para determinar comportamiento a fractura a partir de una probeta entallada, ensayada en modo de apertura. A partir de registros de carga-desplazamiento se pueden determinar valores de resistencia al arrancamiento (Tear Strength – TS), asociada a la carga máxima y Energía de propagación unitaria (UPE), asociada al área bajo la curva luego de la carga máxima [2]. Se ha reportado que los valores de UPE pueden asociarse con la tenacidad a fractura del material [3].

Los ensayos de mecánica de fractura permiten estimar la tenacidad a fractura mediante parámetros elastoplásticos, empleando probetas pre-fisuradas [5]. Los mismos se han aplicado para caracterizar uniones soldadas, en particular por FSW [4].

Las aleaciones de aluminio termotratables experimentan un ablandamiento significativo debido a fenómenos de solución, re-precipitación y sobre-envejecimiento asociados al ciclo térmico de la soldadura FSW [4]. En este sentido, se puede recurrir a tratamientos térmicos post soldadura (PWHT: Post Weld Heat Treatment) de solubilizado y envejecimiento para recuperar la resistencia de la unión. Sin embargo, durante la etapa de solubilizado se produce en general un aumento anormal del tamaño de grano en la zona agitada, que no afecta a la resistencia, pero que puede reducir la tenacidad en comparación a la condición como soldada (AW: As Welded).

Sin embargo, es escasa la información disponible respecto al efecto del PWHT sobre la tenacidad de las uniones soldadas por FSW.

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del tratamiento térmico post soldadura en las propiedades mecánicas, especialmente en el comportamiento a fractura de uniones soldadas por FSW de AA6061-T6.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizaron uniones a tope de chapas de AA6061-T6 de 150x75x3 mm utilizando soldadura por FSW con una velocidad de rotación de 680 rpm, una velocidad de avance 206 mm/min y un ángulo de inclinación de la herramienta de 1,5°. La herramienta construida en acero para herramientas del tipo H13, presentó un hombro cóncavo de 12 mm de diámetro y un pin cónico liso con un diámetro mayor de 4,2 mm, un diámetro menor de 2,8 mm y una longitud de 2,9 mm.



En la Figura 1 se puede observar el montaje experimental para la soldadura FSW y dos chapas preparadas para la unión. Posteriormente, se realizó un PWHT de solubilizado y envejecido (SE) a una de las uniones. El tratamiento térmico de solubilizado se efectuó a una temperatura de 530 °C durante un tiempo de 45 minutos y enfriando en agua, seguido por un envejecido a 177 °C durante un tiempo de 4 horas, con enfriamiento al aire.



Figura 1: Equipo de soldadura FSW

Se caracterizan uniones soldadas en dos condiciones: como soldada (AW) y tratada térmicamente post soldadura (PWHT). Además, el material base (MB) también fue caracterizado mediante los mismos ensayos a fin de contar con valores de referencia.

Las uniones soldadas se inspeccionaron visualmente y se extrajo una muestra para observación macrográfica y medición de perfiles de microdureza Vickers empleando una carga de 500 gf, sobre un corte transversal a la unión siguiendo la línea media del espesor. Se realizaron ensayos de tracción de acuerdo con a la norma ASTM E8, obteniéndose la resistencia a la tracción y la deformación a fractura [6]. Se realizaron ensayos de arrancamiento tipo Kahn utilizando la norma ASTM B871, determinándose la resistencia al arrancamiento (TS: Tear Strength) y la energía de propagación unitaria (UPE: Unit Propagation Energy) [2]. Por último, se realizaron ensayos de mecánica de la fractura de acuerdo con la norma ASTM E1820 utilizando probetas de flexión en tre puntos (SEB) de 150x35x3 mm con una longitud entre apoyos de 140 mm, obteniéndose las Curvas de resistencia al crecimiento de fisura JR y valores de  $J_0$  [5]. Para las uniones soldadas, en todos los casos, se evalúan las propiedades en la dirección transversal a la unión soldada, estando la entalla/fisura centrada en el cordón de soldadura. En la Figura 2 se muestran imágenes del montaje experimental los ensayos de Kahn y fractura.

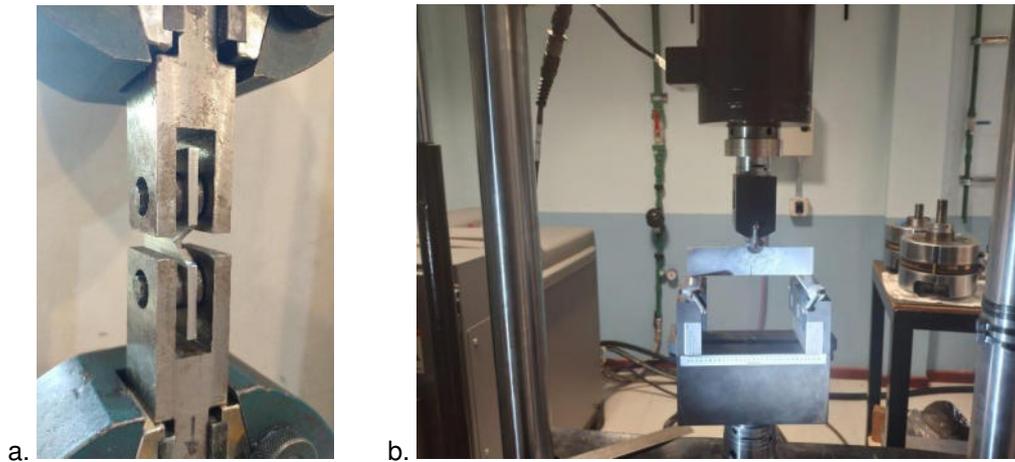


Figura 2: a. Ensayos de Kahn, b. Ensayo de mecánica de fractura

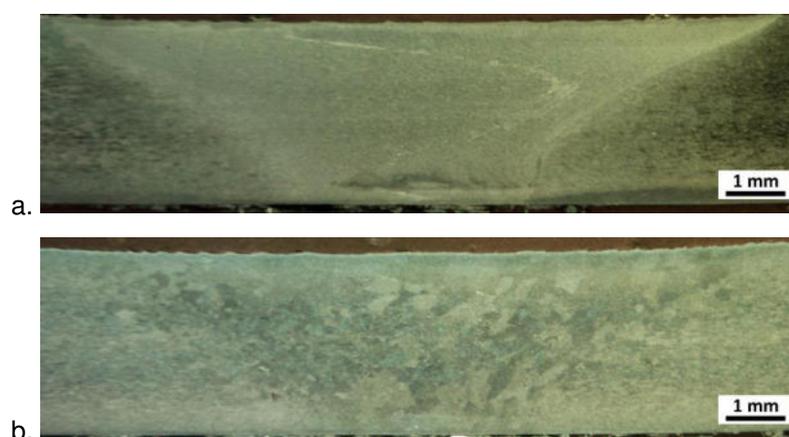
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se observa el aspecto superficial de las uniones soldadas por FSW. Puede verse que las mismas presentan una buena calidad superficial, con escaso flash, sin detectarse la presencia de defectos superficiales.



Figura 3: Aspecto superficial de unión soldada por FSW

En la Figura 4 se muestran macrográficas de cortes transversales de las probetas soldadas, tanto en condición AW como PWHT.



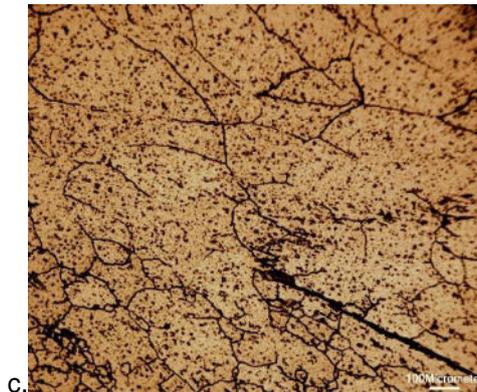


Figura 4: Macrografías: a. AW, b. PWHT, c. Detalle de crecimiento de grano en WN de condición PWHT

Se observa que se obtuvo una penetración total, sin detectarse defectos en la raíz, ni otros defectos macroscópicos como defecto túnel, etc. En el centro de la zona agitada de la condición AW se observa la línea de óxidos remanente, la cual resulta de la dispersión de los óxidos existentes en las superficies originales a unir. Para la condición PWHT se ve la existencia de crecimiento anormal de grano (AGG) en la WN debido al tratamiento térmico post soldadura, detectándose valores mayores a 500 micrones.

En la Figura 5 se presentan los perfiles de microdureza Vickers medidos en AW y PWHT, mostrando también la referencia de la dureza medida en el material base (BM).

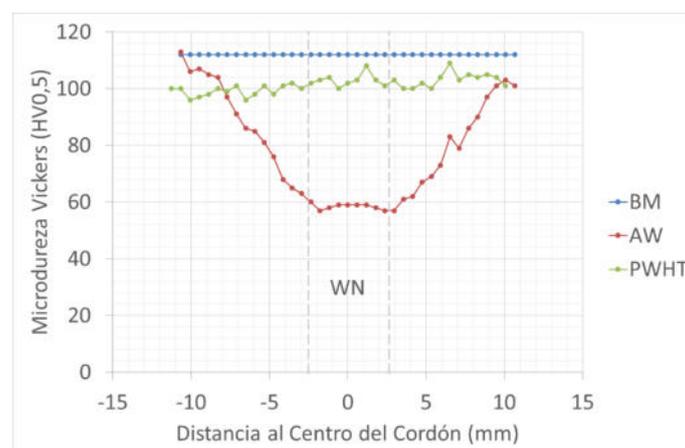


Figura 5: Perfiles de microdureza Vickers para ambas condiciones AW y PWHT y BM

Puede verse que para la condición AW se tiene una disminución en la WN (Weld Nugget) o zona agitada y en las zonas adyacentes debido a fenómenos de solución, re-precipitación y sobre-envejecimiento, generados durante el ciclo térmico de la soldadura, siendo mínima en la WN y recuperando su valor a lo largo de la HAZ, hasta alcanzar el valor del BM a unos 10 mm

de la línea central del cordón. La dureza promedio en la WN fue de 58 HV0,5, el cual se corresponde con un 52% de la dureza del material base (112 +/- 2 HV0,5). Para el caso de la condición PWHT se ve que se recupera la dureza obteniéndose un perfil uniforme, algo menor que el BM. El valor promedio en la WN fue de 102 HV0,5, siendo un 91% de la dureza del BM.

En la Figura 6a se muestran las curvas de tracción obtenidas para el BM y las uniones soldadas en ambas condiciones (AW y PWHT), mientras que en la Figura 6b se presentan los resultados obtenidos (Resistencia a la tracción y Deformación a rotura).

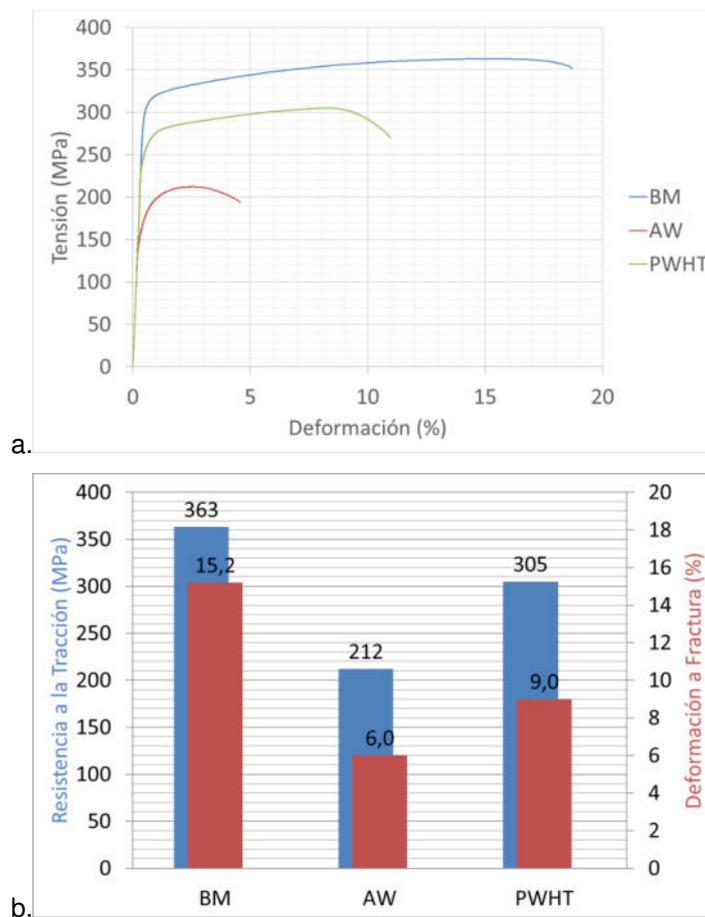


Figura 6: Ensayos de tracción: a. Curvas tensión-deformación, b. Propiedades en tracción para las distintas condiciones

Para la condición AW la resistencia a la tracción fue de 212 MPa, mientras que para la PWHT fue de 305 MPa. Considerando que el BM tiene una resistencia a la tracción de 363 MPa, se obtuvieron eficiencias de junta de 58 y 84 %, respectivamente; siendo valores del orden a la relación entre la dureza de ambas condiciones y la del BM. Esto pone de manifiesto que las uniones soldadas no presentan defectos severos que pudieran afectar la resistencia a la tracción.

Los valores de deformación a fractura también resultaron menores para ambas condiciones de las uniones soldadas en relación al BM, consistentemente con lo observado habitualmente para uniones soldadas. La deformación a fractura resultó mayor para la condición PWHT, lo que en principio no es esperado debido al crecimiento de grano. Esto se debe a que la deformación se localiza menos en relación a la condición AW, por lo que se deforma toda la unión durante el ensayo, mientras que en la condición AW la deformación se localiza en la zona de menor dureza, es decir, el centro de la WN. En ambas condiciones de soldadura la fractura se localizó en la WN, sin observarse defectos asociados a la misma.

En la Figura 7a se presentan las curvas Carga-Desplazamiento y en la Figura 7b, los resultados obtenidos de los ensayos de arrancamiento tipo Kahn (TS y UPE), tanto para el BM como para las uniones soldadas en condición AW y PWHT.

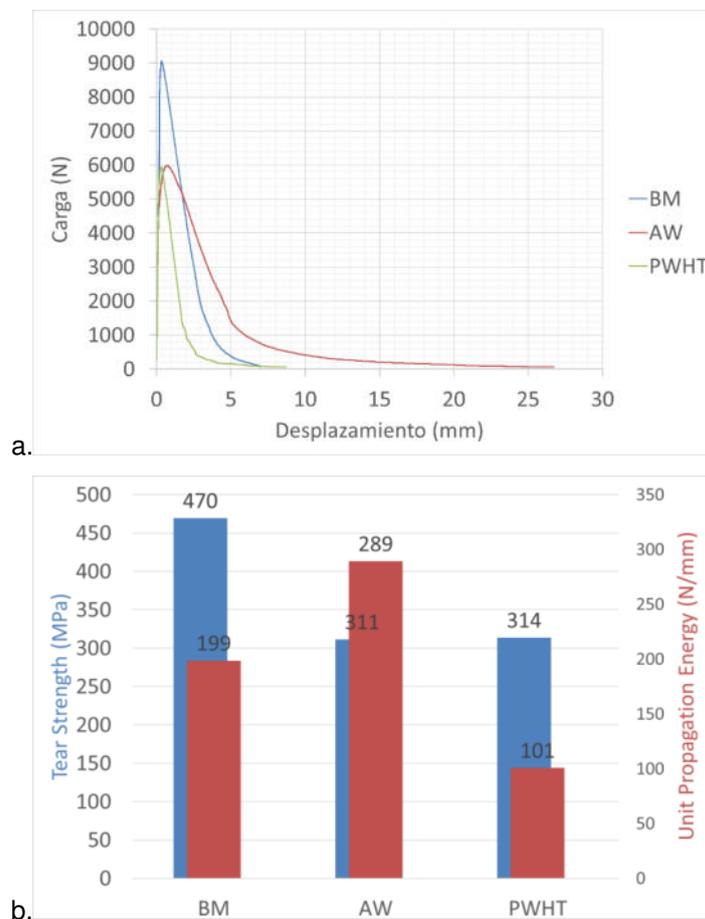


Figura 7: Ensayos de Kahn: a. Curvas P-D, b. TS y UPE para las distintas condiciones



En la Figura 8 se muestran las probetas ensayadas, para las distintas condiciones analizadas (BM, AW y PWHT).

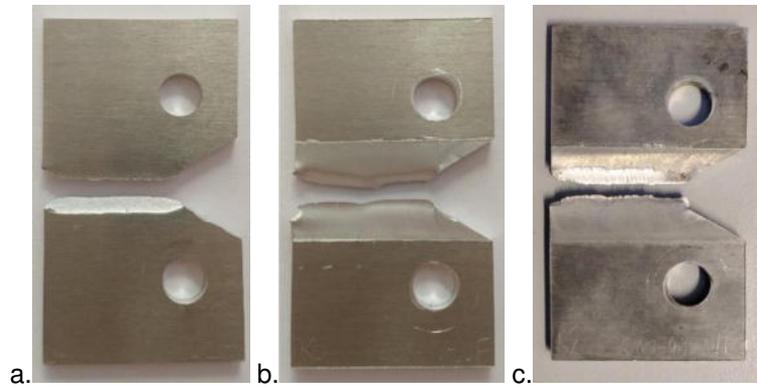
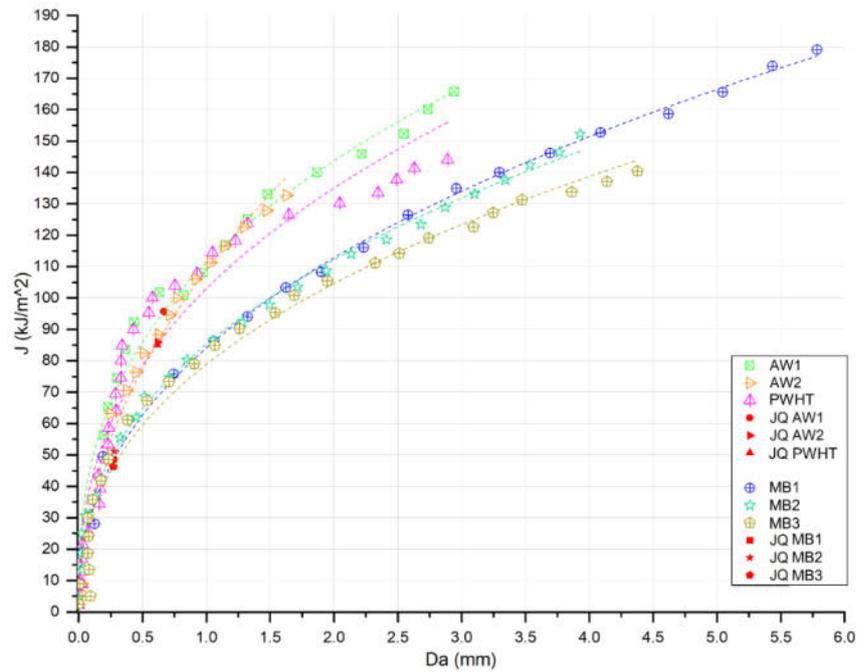


Figura 8: Probetas ensayadas: a. BM, b. AW y c. PWHT

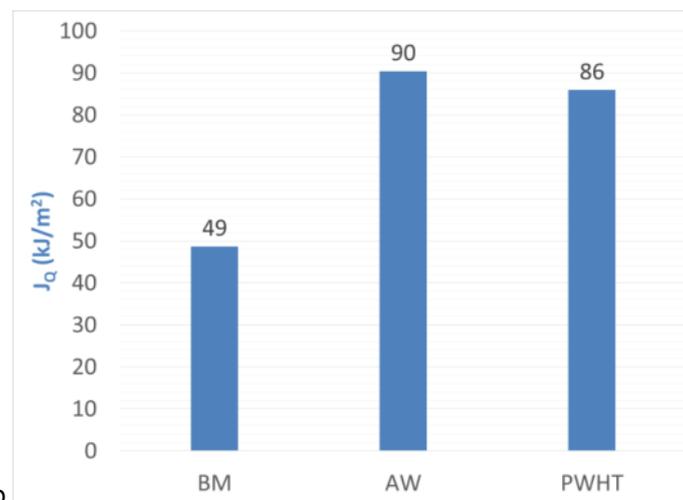
La resistencia al arrancamiento (TS), la cual está asociada a la carga máxima durante el ensayo, para las uniones soldadas fue considerablemente menor a la correspondiente al BM, siendo similar para ambas condiciones.

La energía unitaria de propagación (UPE), la cual está asociada al área bajo la curva a partir de la carga máxima, en el caso de la condición AW es mayor a la del BM. Esto podría asociarse al refinamiento de grano que ocurre durante el proceso de soldadura FSW, lo que genera un aumento en la tenacidad, siendo consistente con lo observado para otras aleaciones de aluminio soldadas por FSW [7]. En cambio, para la condición PWHT se observa una disminución de esta propiedad por debajo de la correspondiente al BM, lo que puede asociarse al crecimiento anormal de grano debido al tratamiento térmico. En ningún caso se observaron defectos de soldadura asociados a la superficie de fractura.

En la Figura 9 se muestran las curvas de resistencia JR obtenidas a partir de los ensayos de fractura para ambas condiciones de soldadura (AW y PWHT) y para el BM.



a.



b.

Figura 9: a. Curvas de resistencia al crecimiento de fisura JR y b.  $J_Q$  para las distintas condiciones

Las curvas de resistencia JR representan la resistencia del material a la propagación inestable de fisuras, medida en términos de un parámetro elastoplástico como la integral J en función de la extensión de fisura  $\Delta a$ . En particular, el valor crítico al que se inicia la propagación de fisura se lo conoce como  $J_Q$ ; mientras que la propagación subsecuente de la fisura está definida por el resto de la curva por encima del valor  $J_Q$ . De esta manera, la tenacidad a la fractura, definida como la resistencia a la propagación de una fisura, depende del valor de  $J_Q$  y de la pendiente de



la curva. Es importante destacar que en estos ensayos de fractura, se utiliza una fisura crecida por fatiga y que representa de forma real una fisura desarrollada en un componente.

Como se observa, las curvas de resistencia JR correspondientes a las uniones soldadas tienen valores de  $J_Q$  y pendientes mayores que las correspondientes al BM. Los valores de  $J_Q$  son entre 85 y 95 kJ/m<sup>2</sup> para las uniones soldadas y entre 45 y 50 kJ/m<sup>2</sup> para BM, mostrándose los valores promedio para cada condición en la Figura 9.b. Los resultados obtenidos en el BM son consistentes a los registrados en la bibliografía con probetas de otros espesores [8]. No se observan diferencias significativas entre ambas condiciones (AW y PWHT). Estos resultados indican de forma preliminar que las uniones soldadas presentan una tenacidad a la fractura levemente mayor que la del BM, por lo que el proceso de unión y tratamiento térmico no afectan negativamente a esta propiedad. La dispersión observada tanto en las curvas JR es la esperada para el comportamiento dúctil de cada condición.

Estos resultados son consistentes con lo obtenido en los ensayos Khan (UPE) para la condición AW respecto del BM. Sin embargo, los resultados obtenidos para la condición PWHT no presenta la disminución observada en aquellos ensayos. En este sentido, es interesante analizar las razones de dicha diferencia. Se requiere realizar mayor cantidad de trabajo para comprender esta diferencia observada y profundizar en las diferencias que existen entre ambos tipos de ensayos para la determinación de la tenacidad.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizó el efecto del tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) en el comportamiento mecánico de uniones soldadas por FSW a tope de una aleación de aluminio AA6061-T6.

Como consecuencia de la aplicación de un Solubilizado y Envejecido (SE) luego de la soldadura se en la WN un crecimiento anormal de grano (AGG), como consecuencia del tratamiento de solubilizado. Sin embargo, se observa la recuperación de la dureza en la WN y la ZAC, obteniéndose un perfil de microdureza uniforme a lo largo de todo el cordón de soldadura, que se refleja en una resistencia a la tracción del orden del 90% de la del material base (BM). Asimismo, se mide una mayor deformación a rotura que en la condición AW, producto de la uniformidad de las propiedades a lo largo de la junta.

En relación al comportamiento a fractura, en los ensayos de arrancamiento tipo Kahn, se detectó que la condición AW presentó una mayor UPE que el BM, mientras que la condición SE mostró menor UPE que la condición AW y que el BM. Dicha observación sería consistente con una pérdida de tenacidad asociada al AGG generado. Las curvas de resistencia y los valores de  $J_Q$  indican que la condición AW presenta mayor tenacidad que el BM, lo que es consistente con los



resultados obtenidos anteriormente. Sin embargo, para el caso de la WN de la condición PWHT, no se observa una pérdida significativa de tenacidad, respecto de la condición AW, alcanzándose valores similares. Esta discrepancia entre ambos resultados es un aspecto que será estudiado en mayor profundidad en los próximos trabajos.

## AGRADECIMIENTOS

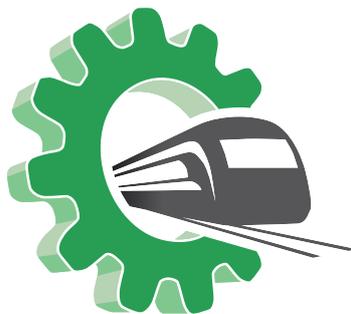
Los autores de este trabajo desean agradecer al Téc. Fabian Stilo (INTECIN) por su colaboración en la preparación y caracterización de muestras.

## REFERENCIAS

- [1] Sun, Z., Yang, X., Li, X., Cui L. *The local strength and toughness for stationary shoulder friction stir weld on AA6061-T6 alloy*. Materials Characterization 111, 114-121, 2016.
- [2] ASTM B871 – 01. *Standard Test Method for Tear Testing of Aluminum Alloy Products*. American Society for Testing and Materials. 2001.
- [3] Kaufman, J.G. *Fracture Resistance of Aluminum Alloys: Notch Toughness, Tear Resistance, and Fracture Toughness*. ASM International, Ohio, 2001.
- [4] Mishra, R., Mahoney, M. *Friction Stir Welding and Processing*, ASM, Ohio, 2007.
- [5] ASTM E1820 – 23a. *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. American Society for Testing and Materials. 2023.
- [6] ASTM E8M – 04. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. American Society for Testing and Materials. 2004.
- [7] Tufaro, L., Bergant, M., Svoboda, H. G. *Caracterización mecánica de una unión soldada por fricción agitación de aleación de aluminio 6061-T6*, SAM-CONAMET 2022, 2 al 6 de Mayo de 2022, Mar del Plata, Argentina.
- [8] MacMaster, F. J., Chan, K. S., Bergsma, S. C., Kassner, M. E. *Aluminum alloy 6069 part II: fracture toughness of 6061-T6 and 6069-T6*, Materials Science and Engineering: A 289, 1–2, 54-59, 2000.

Área Temática

# Simulaciones Numéricas y Mecánica Computacional Aplicada





## DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN PARA CAÑO DN 3” SCH 80

Marcos Amado <sup>1</sup>, Javier Idzi <sup>1</sup>, Fernando Gutiérrez <sup>1</sup>, José Gialonardo <sup>1</sup> y Eduardo Becker Groth <sup>2</sup>

<sup>1</sup> UIDET Ingeniería Aplicada en Mecánica y Electromecánica (IAME), Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 116, La Plata,  
Argentina, marcos.amado@ing.unlp.edu.ar

<sup>2</sup> Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
BRASIL

### RESUMEN

Las cañerías de proceso de pared gruesa son ampliamente utilizadas en la conducción de fluidos para diferentes propósitos en la industria. Debido a su amplio uso se requieren técnicas de inspección de ensayos no destructivos (END) que permitan detectar de manera temprana defectos, especialmente cuando las cañerías están enterradas o embutidas. Por este motivo actualmente diferentes investigadores están desarrollando técnicas basadas en ondas guiadas, para detectar defectos. Para el empleo de esta técnica se requiere conocer el espectro de curvas de dispersión, que depende de la característica geométrica de la sección y de las propiedades del material. En este trabajo se determinaron las curvas de dispersión de un caño DN 3” SCHEDULE 80 utilizado en la conducción de vapor.

**Palabras clave:** Ondas guiadas; Curvas de dispersión; Método Axisimétrico; Elementos Finitos.



## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de métodos de ensayos no destructivos (END) que revelen la integridad estructural son de importancia relevante. Dentro de los ensayos no destructivos se encuentran los ensayos por ultrasonido, basados en la medición de la propagación de ondas acústicas en el medio que constituye la pieza a analizar. En estructuras donde una de sus dimensiones es mucho más grande que las otras dos es común la propagación de las ondas guiadas. La comparación entre la forma convencional de realizar inspecciones con la utilización de ondas guiadas se muestra en la Figura 1. Las ondas guiadas permiten localizar daños en estructuras que están montadas en lugar de difícil acceso (sumergidas, enterradas o aisladas) debido a que solo se requiere una pequeña área de acceso cuando se aplica una vibración que se extenderá como una onda guiada [1].

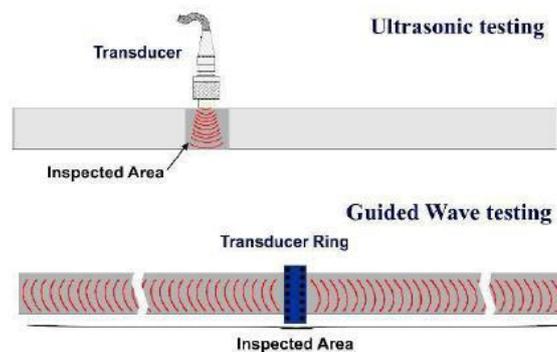


Figura 1. Diferencia entre inspección por ultrasonido y ondas guiadas

Las ondas superficiales de Rayleigh (tipo de onda acústica superficial que viaja a lo largo de la superficie de los sólidos) pueden propagarse sobre la superficie de una placa, por ejemplo, o sobre cualquier estructura donde la frecuencia es tal que la longitud de onda es muy pequeña en comparación con el grosor de la estructura. Estructuras tubulares, rieles, recipientes sometidos a presión, y tanques son algunos ejemplos de geometrías estructurales en las que se presenta el característico fenómeno de propagación de ondas en la dirección de la mayor dimensión. Para su estudio resulta fundamental la utilización de las curvas de dispersión que dependen de las dimensiones de la estructura. El estudio de este tipo de ondas fue iniciado por Lamb [5] a comienzos del siglo XX, el mismo propuso una solución analítica para representar la propagación espacial-temporal de este tipo de ondas para el caso de una placa.

Estudiar la propagación de ondas sobre una determinada geometría específica utilizando las curvas de dispersión permite entender que frecuencias y modos pueden aparecer, [1]. En este trabajo se calculan las curvas de dispersión para una sección gruesa de 3 in de



diámetro nominal y un espesor de pared que se corresponde con un SCH 80. Las metodologías de cálculo para determinar las curvas de dispersión consisten en la aplicación del modelo axisimétrico y el modelo de condiciones periódicas.

## 2. DESARROLLO

En esta sección se determinan las curvas de dispersión y los modos de una caño de diámetro nominal 3 in (pulgadas) SCH 80 utilizado en la construcción de equipos sometidos a presión y cañerías (vapor, gas, etc). Si bien existe una amplia gama de caños que cumplen el DN y NPS, solo se estudia en este trabajo el caño DN 3", para determinar las curvas de dispersión en caños de mayor o menor diámetro nominal se debe hacer el estudio correspondiente a cada geometría particular.

### 2.1 Modelo axisimétrico

El modelo axisimétrico [3] para el cálculo de curvas de dispersión consiste en modelar una guía de ondas a través de un aro de gran radio (Figura 2), en la cual la sección transversal bajo estudio es la sección transversal del aro ( $R > 10L$ , siendo  $R$  el radio adoptado y  $L$  una dimensión característica de la sección transversal estudiada).

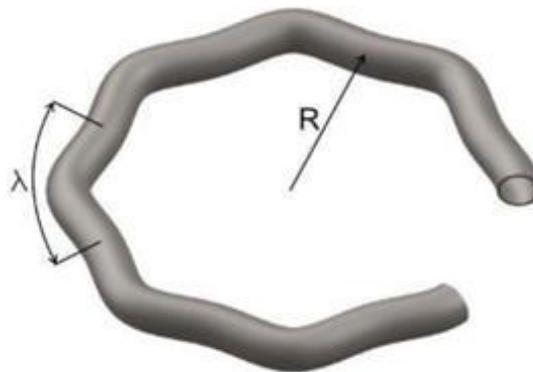


Figura 2. Esquema del método axisimétrico

Los softwares comerciales de elementos finitos, que ofrecen un análisis modal a través del modelo axisimétrico, usualmente permiten la entrada de las condiciones de contorno descritas a través de un comando. Este comando, preestablece una cantidad de longitudes de onda  $\lambda$  para las cuales el modelo está sujeto a vibrar. La cantidad de longitudes de onda son fijadas a través de un parámetro conocido como  $C_{order}$ . Por consiguiente, resulta de importancia determinar este parámetro, que representa el número por el cual debemos dividir a la longitud de la circunferencia del modelo axisimétrico analizado, para poder determinar la longitud de onda  $\lambda$  definida como:

$$\lambda = (2 \cdot \pi \cdot R) / C_{order} \quad (1)$$



$$\lambda = (2 \cdot \pi)/k \quad (2)$$

De las ecuaciones 1 y 2 es posible establecer una relación entre el parámetro  $C_{order}$  y el número de onda  $k$  de la siguiente manera:

$$C_{order} = R \cdot k \quad (3)$$

Para el cálculo de la sección, se utiliza el elemento PLANE83 (Figura 3) que permite automatizar el proceso de formación de las curvas de dispersión [2].

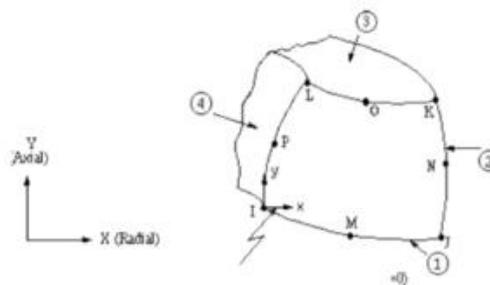


Figura 3. Elemento PLANE 83, usado en el modelo axisimétrico.

## 2.2 Modelo considerando condiciones periódicas

Este método consiste en modelar una porción de la guía de onda en elementos finitos, como se muestra en la Figura 4, donde sobre las caras A y B son aplicadas las condiciones de contorno periódicas. Estas condiciones de contorno hacen posible el acoplamiento, ecuación 3 de los desplazamientos de las caras, de modo que la cara A tenga un desplazamiento igual a la cara B.

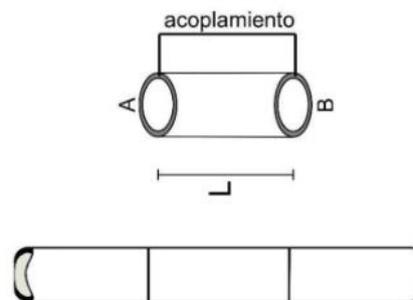


Figura 4. Caras A y B, sobre las cuales se aplican las condiciones de contorno periódicas.

$$\sum_{i=1}^n (u_{Aj}^i C_A + u_{Bj}^i C_B) = 0 \quad (4)$$

Donde  $u_{Aj}^i$  y  $u_{Bj}^i$  son los desplazamientos de los nodos de las caras A y B en la dirección  $j$ , y  $C_A$  y  $C_B$  son los coeficientes escalares que determinan las características de la restricción. Si se aplican las condiciones de contorno sobre los desplazamientos de las secciones laterales del modelo, su análisis modal proporciona las frecuencias de vibración, es decir, las

frecuencias (imágenes) de las curvas de dispersión. El valor de  $k$  es inversamente proporcional a la longitud de onda  $\lambda$ , la cual proviene de la expresión 5,

$$\lambda = L/p \quad (5)$$

donde  $L$  es la longitud del modelo y su valor arbitrario puede elegirse convenientemente de acuerdo a la región de las curvas de dispersión de interés, y  $p$  es la cantidad de veces que el patrón de deslizamiento, perteneciente al modo, se repite dentro del modelo. El objetivo de este método consiste en, con las condiciones periódicas impuestas, hacer que el modelo imite el comportamiento de una guía de ondas durante el pasaje de una propagación. Con este método se obtuvieron, únicamente, puntos característicos de las curvas de dispersión, para poder visualizar los modos asociados a las curvas obtenidas con el método basado en el modelo axisimétrico anteriormente explicado.

### 2.3 Curvas de dispersión aplicadas en ensayos no destructivos (END)

La prevención de fallas es muy importante en la industria del piping, además de ser costosa pueden causar enormes daños ambientales y personales. Alleyne y Cawley [4] desarrollaron un sistema basado en un transductor piezoeléctrico para la detección de corrosión, en caños de 3 a 12 in de diámetro, usando ondas cilíndricas de Lamb, utilizando el modelo axisimétrico y el modo longitudinal  $L(0,2)$  a una frecuencia de aproximadamente 70 kHz, así como también el modo torsional  $T(0,1)$ , ya que no presenta dispersión para ninguna frecuencia. En las curvas de dispersión mostradas en la Figura 5, puede observarse que este modo no presenta un comportamiento dispersivo a ese rango de frecuencia.

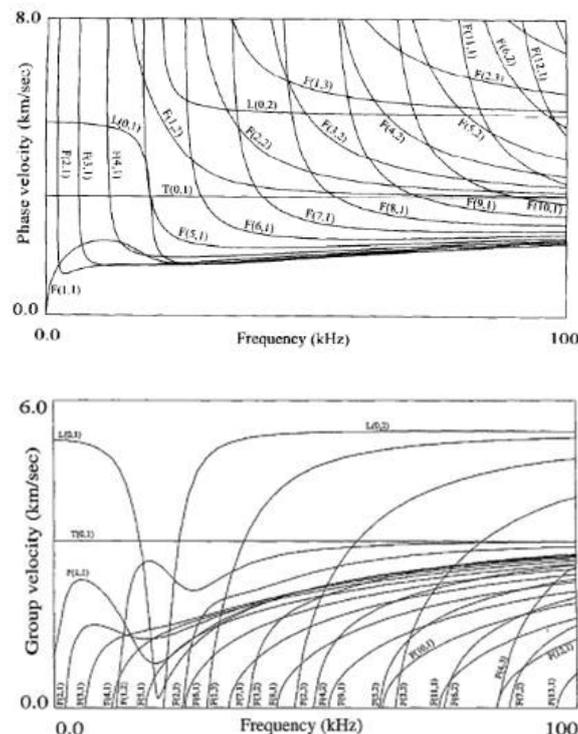


Figura 5. Curvas de dispersión de un caño de 3 in por Alleyne y Cawley.



Este método de inspección, proporciona un sistema adecuado para la inspección de grandes distancias de cañería. El inconveniente ocurre que al excitar el modo  $L(0,2)$ , también se excitan modos no deseados (flexión y altamente dispersivos). En su trabajo, Alleyne y Cawley llegaron a la conclusión de que, para una óptima inspección por ondas guiadas no solo es necesaria la adecuada lectura de las señales recibidas, sino también la supresión de los modos no deseados producto del ensayo.

Se calcularon las curvas de dispersión de un caño de 3 in de diámetro externo y espesor de pared de 7,62 mm de espesor (Figura 7). En la implementación del método basado en el modelo axisimétrico se ha dejado fijo el valor del radio, determinado por los parámetros de cálculo. Para el caso estudiado,  $R = 500$  m y los valores de  $k$  se variaron entre un valor mínimo de 0,01 rad/m y un valor máximo de 350 rad/m, siendo el intervalo de variación de  $k$  de 0,01 rad/m. Luego se grafican las curvas de dispersión en conjunto y los resultados de los modos de condiciones periódicas. Se realizó un análisis de sensibilidad de mallado con dos tamaños de elementos distintos (Figuras 6 y 9), se calcularon las curvas para ambos mallados, y se obtuvieron los resultados por condiciones periódicas para el modelo de menor tamaño de elemento.

Las curvas obtenidas se muestran en la Figura 7, Figura 8, Figura 10 y Figura 11, donde se representa la frecuencia en función del número de onda y la velocidad de fase en función de la frecuencia.

#### 2.4 Malla 1

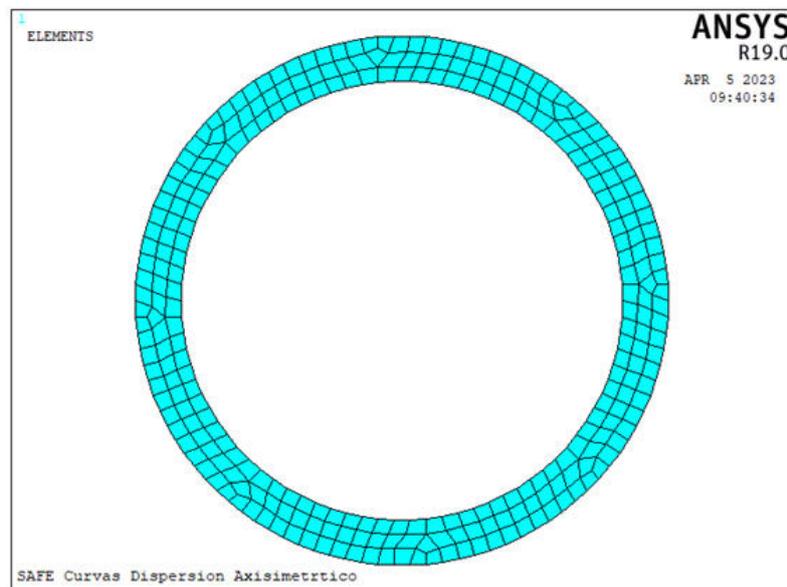


Figura 6. Caño de 3 pulgadas de diámetro nominal SCH 80, malla 1.

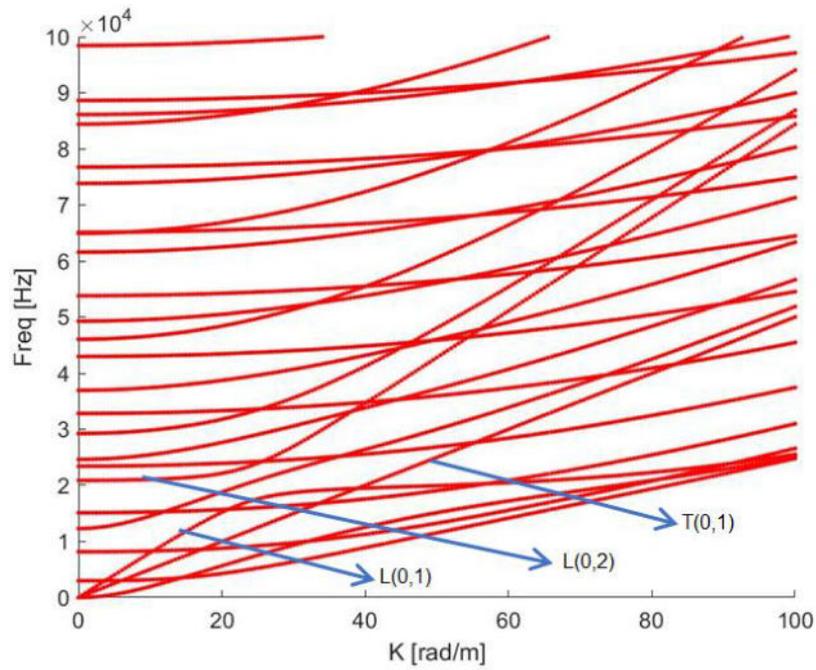


Figura 7. Curvas de dispersión graficadas en frecuencia vs número de onda

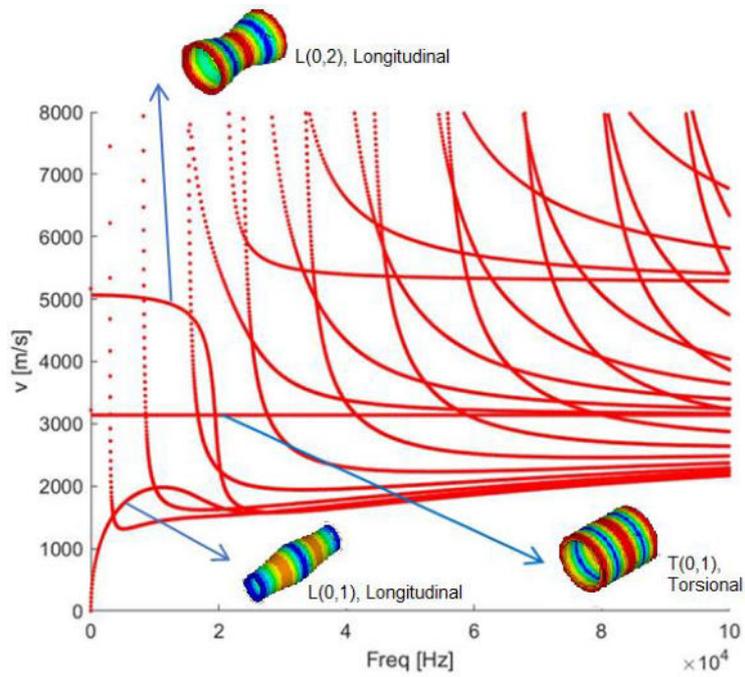


Figura 8. Curvas de dispersión graficadas en velocidad de fase vs frecuencia



## 2.5 Malla 2

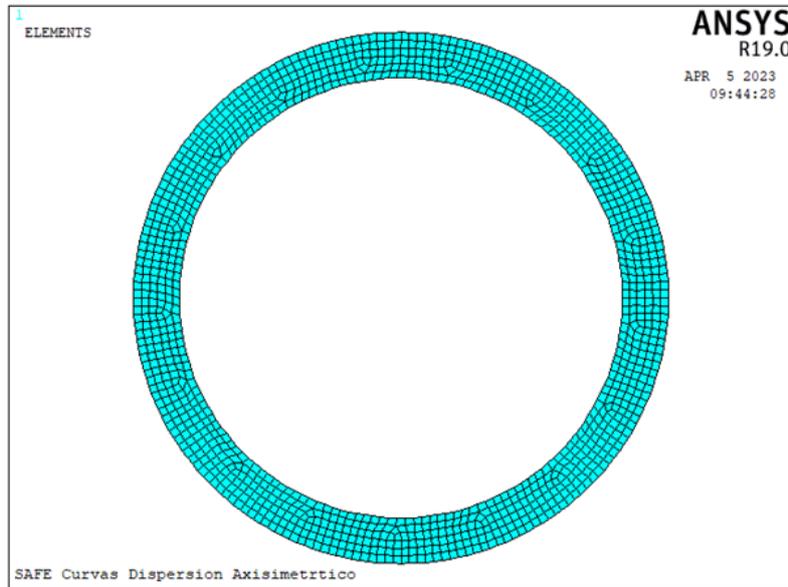


Figura 9. Caño de 3 pulgadas de diámetro nominal SCH 80, malla 2.

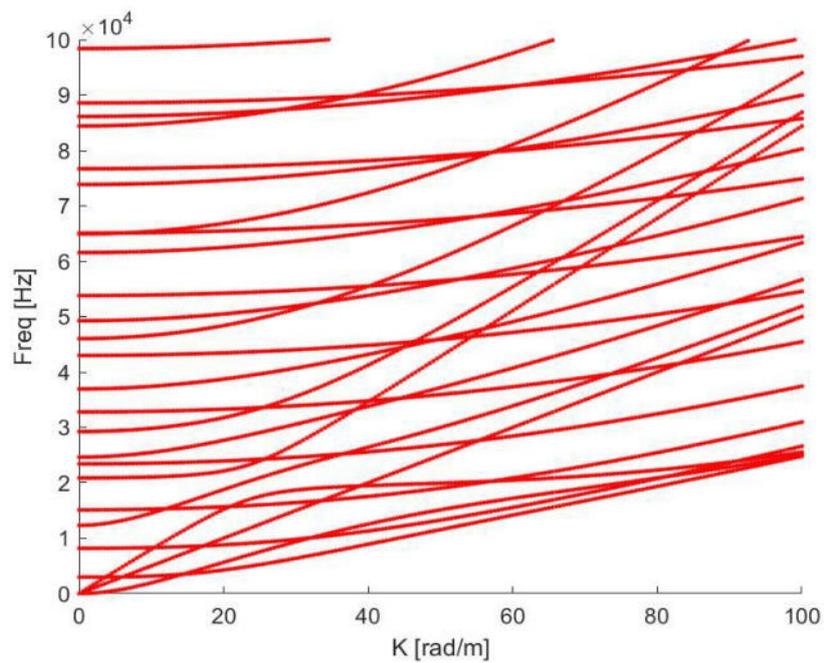


Figura 10. Curvas de dispersión graficadas en frecuencia vs número de onda

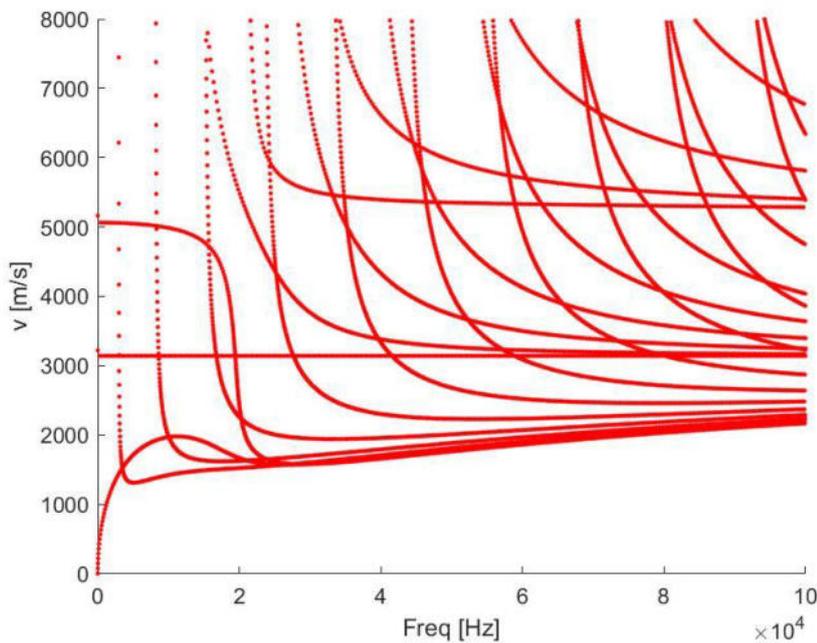


Figura 11. Curvas de dispersión graficadas en velocidad de fase vs frecuencia

Se observa que para valores de frecuencia inferiores a los 200 kHz existe un único modo torsional, conocido como T(0,1) y dos modos longitudinales, L(0,1) y L(0,2). Los modos restantes que aparecen en la gráfica se deben a modos de flexión que tienden a alguno de los modos longitudinales o torsional. Una vez confeccionadas las curvas de dispersión a partir del modelo axisimétrico, se analiza la sección estudiada con el modelo tridimensional por condiciones periódicas. En la Figura 12 se presenta, de manera tridimensional, la estructura estudiada.

## 2.6 Resultados por condiciones periódicas



Figura 12. Caño para condiciones periódicas.

En los gráficos anteriores (Figuras 7, 8, 10 y 11) se pueden observar las curvas de dispersión obtenidas para la estructura estudiada. A continuación se realiza un estudio para todo el rango ( $k$ ,  $f$ ), es decir,  $k$  entre 0 y 200 rad/m y  $f$  entre 0 y 100 kHz. El modelo por condiciones periódicas permite obtener las imágenes de puntos de prueba de las (Figuras 13, 14 y 15), en las mismas se muestran los modos longitudinales  $L(0,1)$ ,  $L(0,2)$  y el torsional  $T(0,1)$ .

#### Modo longitudinal $L(0,1)$

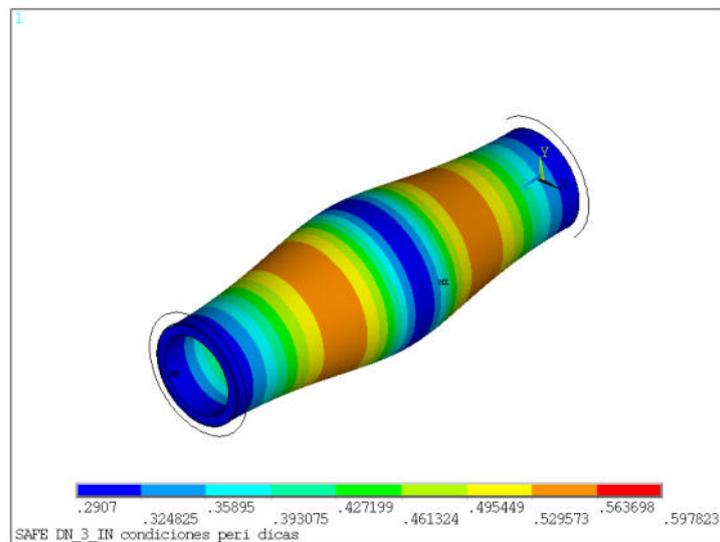


Figura 13. Punto de control de condiciones periódicas ( $k=20$ ;  $f=15,181$  kHz), modo  $L(0,1)$ .

#### Modo longitudinal $L(0,2)$

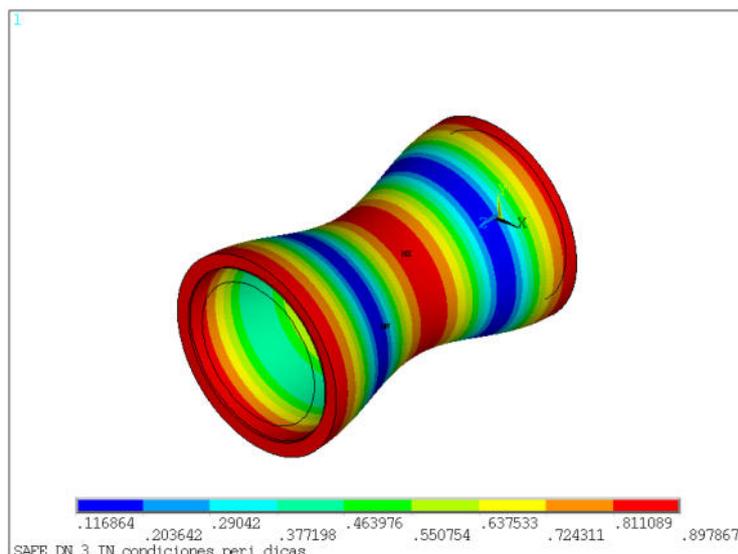


Figura 14. Punto de control de condiciones periódicas ( $k=40$ ;  $f=19,484$  kHz), modo  $L(0,2)$ .

### Modo torsional T(0,1)

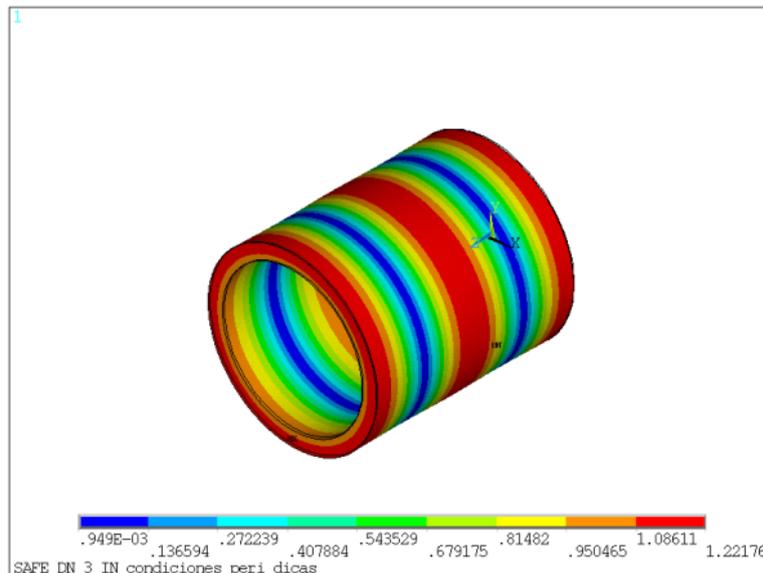


Figura 15. Punto de control de condiciones periódicas ( $k=60$ ;  $f=29,988$  kHz), modo T(0,1).

Se puede observar que, ante la necesidad de utilizar ondas guiadas para realizar inspecciones en estructuras cilíndricas, el modo torsional indicado en la (Figura 8) no es dispersivo debido a que su velocidad es constante para todo el rango de frecuencias estudiado. Esto significa que, definiendo la frecuencia de trabajo al momento de la inspección se puede generar una onda puramente torsional que se propaga a lo largo de la estructura con la velocidad correspondiente calculada en las curvas de dispersión. Las señales recibidas generadas en los defectos presentes en la estructura se procesarán de acuerdo al tiempo de arribo, permitiendo estimar la distancia aproximada a la cual se encuentra el defecto.

Se puede observar que, las curvas de dispersión obtenidas, se verifican con las curvas encontradas por Alleyne y Cawley (Figura 5), quienes también utilizaron una sección circular hueca de 3 pulgadas de diámetro, identificando los modelos longitudinales, de flexión y torsión que se corresponden a lo analizado en el presente trabajo.

## CONCLUSIONES

Mediante el análisis de los modos presentes en las curvas obtenidas, se logró verificar de manera tridimensional el tipo de excitación en cada uno de estos modos durante su propagación. La utilización de ondas guiadas como método de inspección es importante debido a su gran utilidad para la predicción de la vida remanente de las estructuras estudiadas, agilizando los tiempos de inspección gracias a su capacidad de ensayar grandes distancias (de acuerdo a las condiciones donde la estructura se encuentre) y brindar datos de posibles defectos y una aproximación de su localización. El modo torsional es el más útil para realizar una inspección por ondas guiadas, debido a que no es dispersivo para ningún rango de frecuencias visto. Por lo tanto, es primordial el desarrollo de técnicas de inspección en las que este modo pueda ser excitado para su implementación. Las curvas obtenidas son similares a los resultados de Alleyne y Cawley [4]. Como trabajo futuro se están



determinando las curvas de dispersión y los modos para caños de mayores dimensiones y espesores, se pretende estudiar el comportamiento de las curvas a medida que aumenta el diámetro externo y el espesor del caño, así como también se está estudiando la sensibilidad de las curvas de dispersión al material, para secciones de igual tamaño pero compuestas de materiales distintos, por ejemplo cobre, aluminio, aceros inoxidables ferríticos y martensíticos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Javier L. Idzi, Marcos E. Amado. Estudio Numérico de Sensores Piezoeléctricos Aplicados a la Generación de Ondas Guiadas en Barra de Sección Rectangular. *Mecánica Computacional Vol XXXVIII*, págs. 1007-1016, 2021.
- [2] Groth E.B. y Clarke T.G. Método alternativo para la confección de las curvas de dispersión de una guía de onda cualquiera. *Mecánica Computacional*, 36(4):37–48, 2018.
- [3].Eduardo Becker Groth, *Curvas De Dispersão: No Contexto Da Determinação De Defeitos Em Estruturas Laminares Utilizando Ondas Guiadas*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016
- [4]. Alleyne, D. and Cawley, P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 89, p. 1159–1168, 1991.
- [5]. Javier L. Idzi, Boris N. Rojo Tanzi. Estudio de la propagación de ondas sobre un riel ferroviario. *Mecánica Computacional Vol XXXV*, págs.1869-1886,2017.



## SIMULADOR DE PROPULSION DE UNA UNIDAD DE SUPERFICIE DE LA ARMADA ARGENTINA

Juan Francisco Valea <sup>1</sup>, Pablo Raúl Vernière <sup>2</sup>; Juan Jose Oga <sup>3</sup>, Rubén Roth <sup>4</sup>, Guillermo Escudero <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Unidad Académica ESOA, Facultad de la ARMADA, Universidad de la defensa Nacional Argentina- [p4.bblanca@hotmail.com](mailto:p4.bblanca@hotmail.com)

<sup>2</sup> Unidad Académica ESOA, Facultad de la ARMADA, Universidad de la defensa Nacional Argentina- [verniere1963@gmail.com](mailto:verniere1963@gmail.com)

<sup>3</sup> Unidad Académica ESOA, Facultad de la ARMADA, Universidad de la defensa Nacional Argentina - [juanjoseoga@gmail.com](mailto:juanjoseoga@gmail.com)

<sup>4</sup> Servicio de análisis operativo, armas y guerra electrónica (SIAG), Puerto Belgrano – [rubenroth@gmail.com](mailto:rubenroth@gmail.com)

<sup>5</sup> Servicio de análisis operativo, armas y guerra electrónica (SIAG), Puerto Belgrano – [gescudero2712@gmail.com](mailto:gescudero2712@gmail.com)

### RESUMEN

En el artículo a exponer se presentan los principales aspectos del desarrollo y puesta en marcha de un simulador de sala de control de máquinas térmicas perteneciente a una unidad de superficie actualmente disponible en la Armada Argentina. El algoritmo tiene la capacidad de reproducir situaciones complejas en relación a actividades propias de los buques de guerra.

Ese grado de complejidad que presenta la diversidad de escenarios posibles debe ser representado en el simulador para que sea una herramienta didáctica de utilidad.

El proyecto se separó en cuatro fases bien delimitadas.

- Definición y redacción de los requerimientos del simulador.
- Modelización numérica de las diferentes situaciones de propulsión.
- Puesta a punto del hardware.
- Prueba de servicio y evaluación operativa de la simulación,

Las razones por las que se realizó el siguiente trabajo fueron:

- La necesidad de aumentar las horas prácticas de instrucción y adiestramiento, para brindarle al alumno una serie de competencias y habilidades que le ayudarán a enfrentarse a situaciones normales y anormales dentro del ámbito de trabajo.
- Aumento de la velocidad de respuesta ante situaciones problemáticas excepcionales.
- Mejora de las capacidades de adiestramiento con respecto al uso de diferentes equipos a bordo de unidades de superficie de la Armada Argentina.

**Palabras clave:** *Simulador, Propulsión, Modelización, Didáctico*



## 1. INTRODUCCIÓN

La simulación de las diferentes situaciones que se pueden presentar en los sistemas de propulsión de a bordo es una herramienta didáctica poderosa, de bajos niveles de riesgo y costos de operación cuyo objetivo fundamental es el adiestramiento del personal.

El simulador a continuación presentado, es el fruto del desarrollo de un grupo interdisciplinario que abarca áreas del conocimiento que van desde la mecánica, arquitectura naval y ciencias de la computación.

## 2. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es el de presentar introductoriamente los diferentes algoritmos utilizados para la descripción de parámetros de funcionamiento bajo distintas condiciones operativas de carga, velocidades y condiciones de navegación que pueden ocurrir en las marchas operativas de una Corbeta Clase "ESPORA" tipo Meko 140 actualmente en uso la Armada Argentina.

## 3. DESARROLLO

### 3.1. Formulación del adiestrador

Este sistema se define como una herramienta didáctica para la formación y capacitación de los alumnos de las carreras de posgrado en Máquinas y Electricidad Naval según surja de la propia estructura curricular.

Consta de dos partes principales:

- Módulo del Instructor (Propulsión)
- Módulo de Propulsión (Máquinas)

### 3.2. Prestaciones requeridas

En el módulo de Propulsión se representa la interacción entre la planta motriz (motor Diesel) y una carga acoplada (hélice sumergida), considerando las variaciones impuestas por la resistencia del medio y las respuestas de la planta motriz en función de las condiciones de operación, normales y de emergencia.

Para las MEKO 140, esto comprende simular la puesta en marcha de los motores principales de propulsión, el funcionamiento de una o dos líneas de ejes, la resistencia que las palas de la hélice ejercen en el conjunto motriz, la representación de los comandos, sensores y alarmas que intervienen y la posibilidad de interactuar en tiempo real con ayuda de una interface de usuario realista que permita recrear las condiciones que podrían surgir en un escenario real.



El módulo de Propulsión permite:

1) Simular el procedimiento de puesta en marcha y operación de la planta propulsora realizando las tareas:

- Puesta a punto de todos los mecanismos que aseguren que la puesta en marcha de la planta propulsora se haga en las condiciones adecuadas (acciones previas).
- Arranque de la planta motriz de la unidad (uno o dos ejes).
- Operaciones con uno y dos ejes de propulsión, en diferentes condiciones de navegación.
- Maniobras de variación de RPM.
- Operación normal y excepcional en caso de fallas o emergencias.

Finalmente, la consola del instructor cuenta con una interface de usuario que permite iniciar, operar y detener el adiestrador, establecer condiciones para un ejercicio en particular y visualizar en su pantalla todas las acciones que lleva a cabo el alumno durante el mismo.

### 3.3 Descripción de entorno real

El sistema de propulsión de una corbeta tipo MEKO 140 cuenta con dos motores Diesel de 16 cilindros en V. Cada motor impulsa una hélice a través de una línea de eje.[4]

Y por cada línea de eje está conformado por:

- Palanca de comando para control de las revoluciones por minuto (RPM)
- Regulador de velocidad para el comando de la inyección de combustible
- Tobera de inyección en cada cilindro
- Sensores y alarmas varias: temperatura de gases de escape, presión y temperatura de líquido refrigerante y de aceite, sobrealimentador, etc.

Para dar arranque a un motor propulsor, deben cumplirse las denominadas condiciones previas que consisten en varios pasos para poner en servicio operativo todos los circuitos: de alimentación de combustible, de lubricación y de refrigeración a fin de asegurar el correcto funcionamiento de la planta propulsora, siguiendo un protocolo preestablecido.

Cuando se acciona el comando de las RPM, el regulador de velocidad compara las RPM de Motor con las que entrega la máquina y trata de igualar los valores. Si la máquina no lo puede alcanzar (y queda por debajo del valor solicitado), entra en un estado de sobrecarga.

### 3.4 Descripción modular del adiestrador

El módulo Propulsión se divide en dos sub módulos que pueden ejecutarse en serie o por separado, en función de las necesidades de adiestramiento. Dichos sub módulos son Condiciones Previas y Propulsión.



### 3.5 Características de los submódulos

#### 3.5.1 Módulo Condiciones previas:

Este módulo implementa las consignas que constituyen las operaciones previas al arranque de los motores principales de una unidad MEKO 140. El método de implementación elegido consiste en mostrar los distintos planos esquemáticos que ilustran los diversos circuitos de lubricación, refrigeración, etc. con elementos tales como generadores, compresores, tanques, llaves y válvulas (entre otros) que deben colocarse en determinado estado antes de proceder con la puesta en marcha. Los elementos se denominan, en general, actuadores y es función del alumno ubicar el esquema correcto en pantalla e ir colocando cada actuador en el estado que corresponda según la consigna y protocolo, que puede consultar en un documento disponible en el segundo monitor de su estación de trabajo.

#### 3.5.2 Módulo Propulsión

La planta motriz desarrolla una potencia (expresada en kilowatts (kW)) en función de la cantidad de combustible inyectado en cada cilindro y sus RPM. Esta inyección se sintetiza en una expresión conocida como posición de cremallera; la potencia resultante se transmite como giro a un árbol en cuyo extremo se encuentra la hélice propulsora lo que resulta en el movimiento de la unidad a una velocidad que se expresa en nudos (millas / hora).

Con el propósito de modelar esta situación, se clasificaron las condiciones de operación de la planta motriz en cinco (5) casos posibles, donde el primero es el más favorable (condición de franquía), el cuarto el más desfavorable y el quinto corresponde al caso de propulsar con una sola línea de ejes.

En este contexto fueron obtenidas expresiones, para cada condición, que representan las curvas de demanda de potencia (figura 1), la velocidad desarrollada por la unidad y la posición de cremallera [mm], en todos los casos en función de las revoluciones [RPM] de las líneas de ejes figura 2 y figura 3.

Las curvas mostradas en la figura 1 responden a una ley cúbica del tipo

$$N_e(kW) = K_i * \left(\frac{RPM}{100}\right)^3 \quad (1)$$

Donde:

$N_e$ : potencia entregada [kW]

$K_i$  es una constante que depende de la condición.

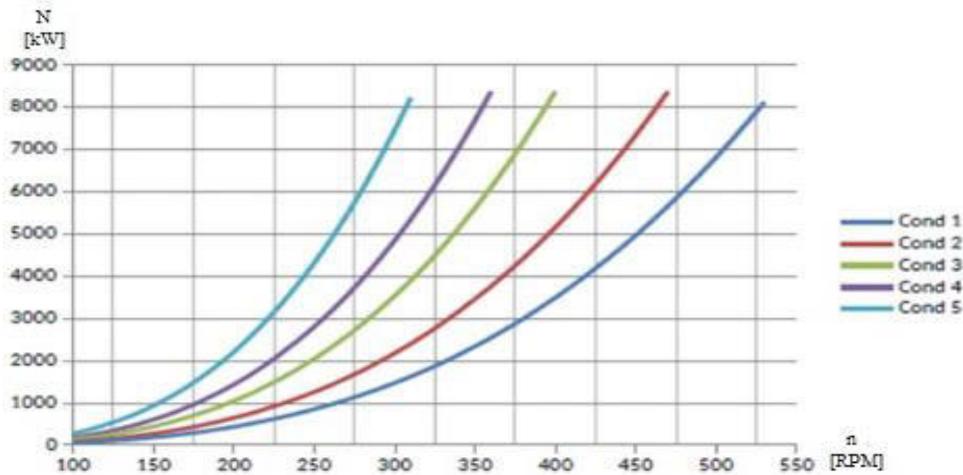


Figura 1 : Curvas de demanda de potencia (kW) para cada condición

Habrà, en consecuencia, cinco (5) constantes, de manera que a medida que aumenta la resistencia a la marcha, la planta debe desarrollar la misma potencia pero a menor régimen de RPM.

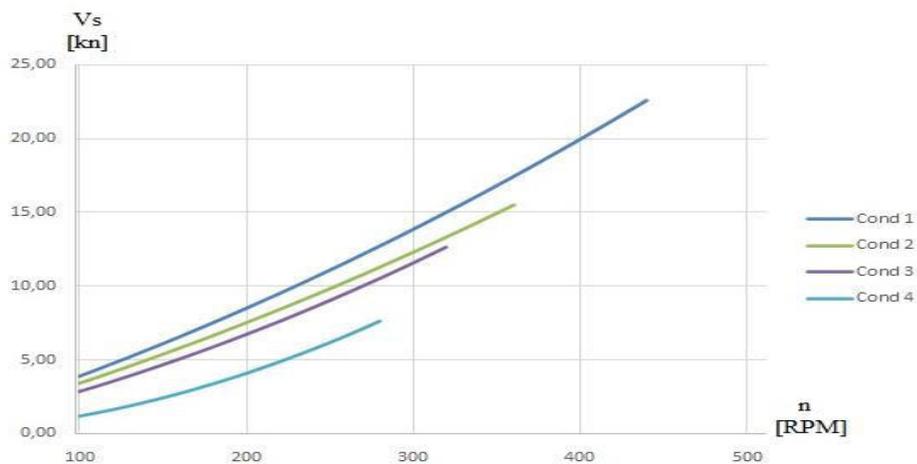


Figura 2 : Curvas de velocidad (nudos) para cada condición

La figura 2 muestra las curvas de velocidad en función de las RPM, según la condición, en la más favorable se aprecia que la unidad llegará al máximo de velocidad (unos 25 nudos) [3] cuando la planta motriz entrega la máxima potencia a las máximas RPM. A medida que empeoran las condiciones, se observa que se obtiene menor velocidad final y que el valor máximo de revoluciones es consecuente con ello.

En este caso, la aproximación se hará mediante una expresión cuadrática del tipo

$$V_s = \left(\frac{RPM}{100}\right) * \left(A_i \left(\frac{RPM}{100}\right) + B_i\right) \quad (2)$$

Donde  $A_i$  y  $B_i$  son los coeficientes de un polinomio de segundo grado, específicos para la  $i$ -ésima condición.

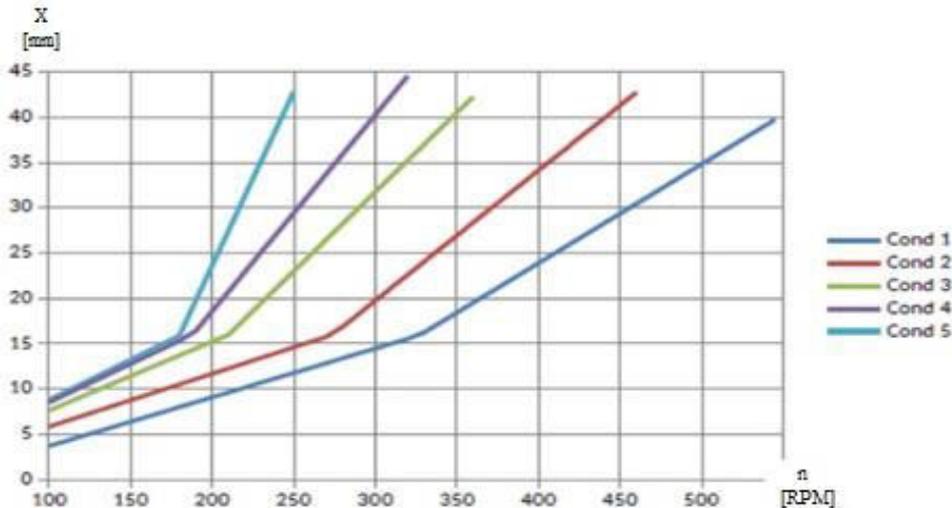


Figura 3 : Posición de cremallera (mm) para cada condición

La figura 3 muestra cual es la posición de cremallera necesaria para determinado valor de RPM, según la condición. En este caso, la solución en expresiones lineales se hará mediante dos rectas:

$$C_r(mm) = M_i * RPM + B_i \quad (3)$$

Donde  $M_i$  y  $B_i$  son constantes propias de la  $i$ -ésima condición.

### Gases de escape y turbo-sobrealimentador

Habrá que tener en cuenta la temperatura de gases de escape y las revoluciones del turbo sobrealimentador, para mantener la integridad mecánica del dispositivo esto se debe a la interacción fluidodinámica entre motor Diesel y turbina de gases de escape, ultra relacionados con influencia mutua.

Para incluir estos dispositivos en la simulación, se formularon sendas ecuaciones en base a expresiones polinomiales, surgidas del ajuste de datos relevados.

En el caso de la temperatura de gases de escape, la fórmula es

$$T(^{\circ}C) = \beta * RPM + C_i \quad (4)$$

Donde:  $\beta = 0,25$  si la cremallera  $\leq 100\%$  (hasta de 37 mm)

$2,0$  si la cremallera  $> 100\%$  (más de 37 mm)

$C_i$  es una constante que depende de la  $i$ -ésima condición

RPM es el régimen del motor principal



Para el régimen de giro del turbo sobrealimentador, tendremos:

$$n = 4,9 * Crem^2 + 16 * (RPM - 330) + 5000 \quad (5)$$

Donde: Crem: es el valor actual de la cremallera para el eje en cuestión

### 3.6. SOLUCION INFORMÁTICA Y ALGORITMOS DE PROPULSIÓN (adaptado de [1])

El modelo toma como hipótesis que las revoluciones del eje varían en el rango [100, 520] RPM y que la cremallera lo hace entre los valores [0.0 , 37.0] milímetros. También se expresa su valor en porcentajes (37 mm = 100%). Observemos que Cremallera = 0 mm implica motor detenido. Aquí, hay que observar dos particularidades: la primera es que a los efectos prácticos no se considera razonable un valor por debajo del 10% o 3,7 mm; la segunda es que bajo ciertas condiciones se admite una “sobrecarga” o sobre inyección de combustible de hasta el 15% (o equivalente al 115%), llevando su valor máximo a 42 mm.[3]

Con estas hipótesis, en la condición n°1, se tienen los siguientes valores de 100 RPM con 3,7 mm de cremallera (10%) y 54,6 kW de potencia y para el extremo se obtiene 520 RPM con 37 mm de cremallera (100%) y 7600 kW de potencia[3]

Observemos que la potencia máxima generada es 7600 kW @ 520 RPM del árbol de salida.

La figura siguiente muestra el diagrama de estados del módulo de propulsión:

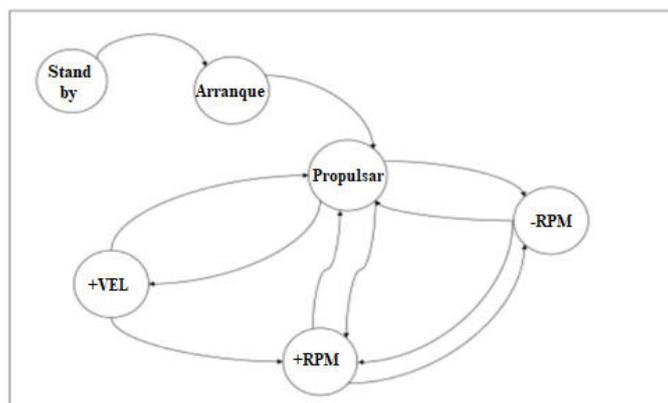


Figura 4 : Diagrama de estados del Módulo de Propulsión

El transitorio de un estado a otro se verifica ante una de las siguientes acciones o condiciones:

- STAND BY: es el estado inicial cuando arranca el módulo, a la espera de una acción del instructor;
- ARRANQUE: cuando recibe la orden de iniciar, el algoritmo simula esta situación con una inyección brusca de combustible (40%) que luego desciende paulatinamente hasta el 10% mientras las RPM llegan al valor 100, y allí pasa al estado siguiente;



- **PROPULSAR:** Es el estado de “equilibrio” de la simulación y representa el estado normal de funcionamiento cuando las RPM solicitadas desde la palanca han sido alcanzadas y la planta motriz está entregando la potencia que corresponda según la condición de navegación.

### 3.7 INTERFASE DEL ALUMNO PARA EL MODULO DE CONDICIONES PREVIAS

Cuando el Instructor inicia un ejercicio, la estación del alumno muestra una pantalla con un esquema similar a la figura 5. Esta imagen permite apreciar un esquema cuyo significado se lee al pie de la misma y, en el sector marcado por la elipse, las distintas solapas con las opciones del módulo.

En particular, interesa la última, la que, si se activa el control que aparecerá en pantalla, mostrará en el segundo monitor el documento que contiene las consignas que el alumno debe ejecutar y el orden en que debe hacerlo.

El alumno deberá identificar por cuál esquema debe iniciar el procedimiento, y a partir de allí seguir la secuencia indicada en el documento. El instructor podrá seguir en su estación la evolución y hacer las observaciones que considere convenientes.

La figura 5 muestra a modo de ejemplo, el esquema de circuito de agua de mar del buque con todos los actuadores ya activados por el alumno. En este caso, se trata de abrir y cerrar válvulas, de allí las letras “A” o “C” destacadas por un círculo en color.

### 3.8. INTERFACE DEL ALUMNO PARA EL MÓDULO DE PROPULSIÓN

Este módulo tiene solamente una pantalla (figura 6), la organización de la misma es una división en tres paneles: uno para cada banda y el central para mostrar el indicador de velocidad y algunos valores informativos para el alumno. También se encuentra allí un control numérico de las RPM que debe usarse en caso de no contar con la palanca.

El control central aplica el valor sobre ambos ejes simultáneamente, aunque existen los controles individuales en caso de que se desee actuar sobre uno solo, por ejemplo, si se está navegando con un solo eje.

El panel de cada banda muestra los indicadores de cremallera, RPM, presión de aceite, temperatura de gases de escape, de agua de camisas y las RPM del turbo.

El indicador de sobrecarga de cremallera actúa tanto como un aviso del estado actual (mediante cambios en el color y el texto).





Figura 6: Pantalla de control de propulsión

El cuadro ubicado en la zona superior derecha (Errores de Secuencia entre Pasos) está destinado a indicar los errores que comete el alumno al avanzar en la secuencia de pasos

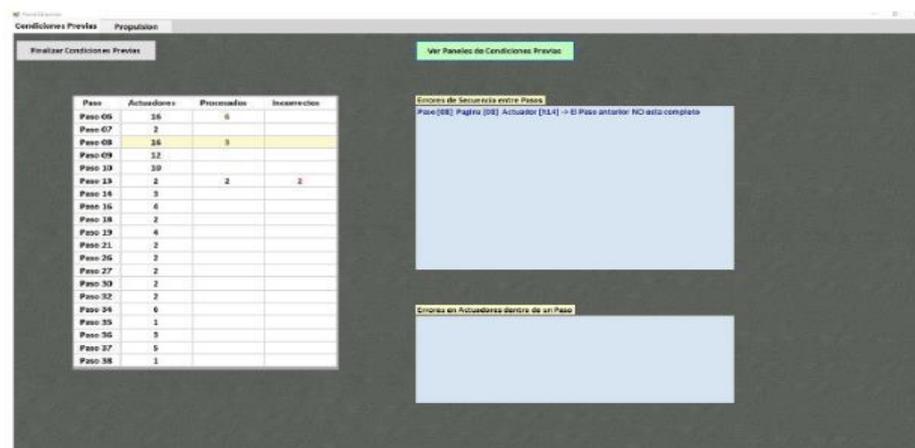


Figura 7 Pantalla del instructor (Condiciones previas)

- Supervisión de Propulsión:

La figura 8 permite apreciar la pantalla que tiene el instructor para supervisar e intervenir en el ejercicio de Propulsión.

La parte izquierda está dedicada a mostrar los valores de los distintos indicadores de la pantalla del módulo de Propulsión en la estación del alumno, además si el instructor ha provocado las incidencias que afectan los valores en el porcentaje mostrado.

La parte derecha está dedicada a las incidencias. Aquí el instructor dispone de una



sencilla interface para alterar valores varios.

También se muestran tres instrumentos indicadores: RPM de cada uno de los ejes y la velocidad de la unidad.

### 3.11. INCIDENCIAS: LA INTERVENCIÓN DEL INSTRUCTOR DURANTE UN EJERCICIO

Como el modelo simula un proceso continuo en el tiempo, los indicadores muestran valores calculados en tiempo real en respuesta a las órdenes de la palanca de control de RPM. Además, por parte del Instructor, existe otra forma de afectar los valores de ciertos indicadores con la finalidad de simular una situación anómala que debería ser notada y corregida por el alumno. Ver la figura 8.

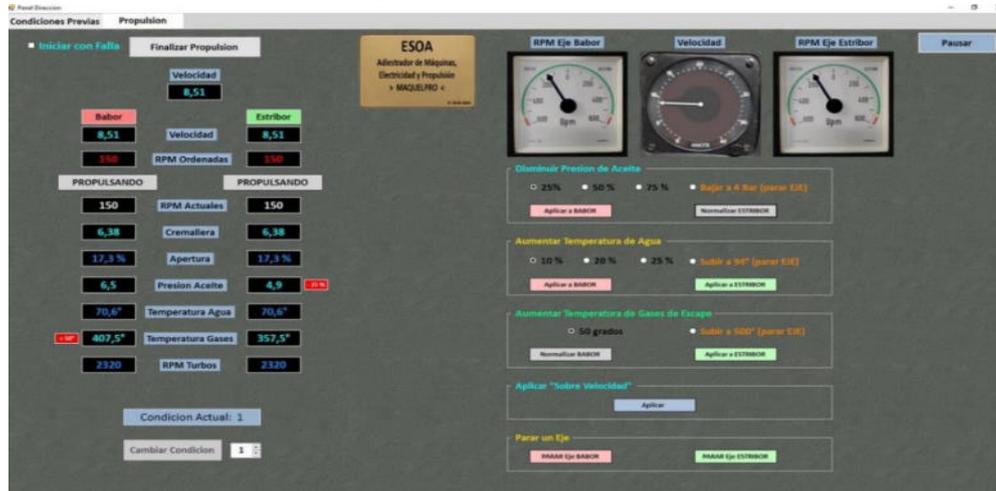


Figura 8 : Pantalla del instructor (Propulsión)

Los indicadores que se pueden afectar son:

- **Presión de Aceite:** Valor actual: 25%, 50% y 75% y una que fuerza la parada del eje.[5]
- **Agua de Camisas:** Sobre temperaturas (más 10%, 20% y 25%), tomando como referencia el valor actual y aumentar a 94°C que provoca la detención del propulsor.[5]
- **Gases de escape:** para cualquier valor actual de este indicador, provocar esta incidencia aumenta la temperatura actual en 50 °C hasta que se detiene el propulsor) [5]
- **Opción de “parar EJE”**
- La “**sobre velocidad**” es una condición en la que el programa aumenta las RPM a una velocidad de 13 RPM/seg, hasta un salto de 130 RPM



- El "cambio de condición" de navegación que genera una variación en los instrumentos mientras los algoritmos generan los valores adecuados para la nueva situación.

#### 4 CONCLUSIONES

Se realizó un trabajo que ha permitido desarrollar una herramienta didáctica de simulación utilizando el lenguaje C# de situaciones que suceden a bordo. En general dicho simulador no solo cumple con las necesidades y requerimientos planteados al inicio del proyecto sino que su desarrollo fue una experiencia muy positiva para el grupo multidisciplinario encargado de la creación.[1][2]

En la actualidad el simulador de máquinas se encuentra en pleno funcionamiento y uso dentro de la Unidad Académica ESOA, Puerto Belgrano tal como lo demuestra la figura 9

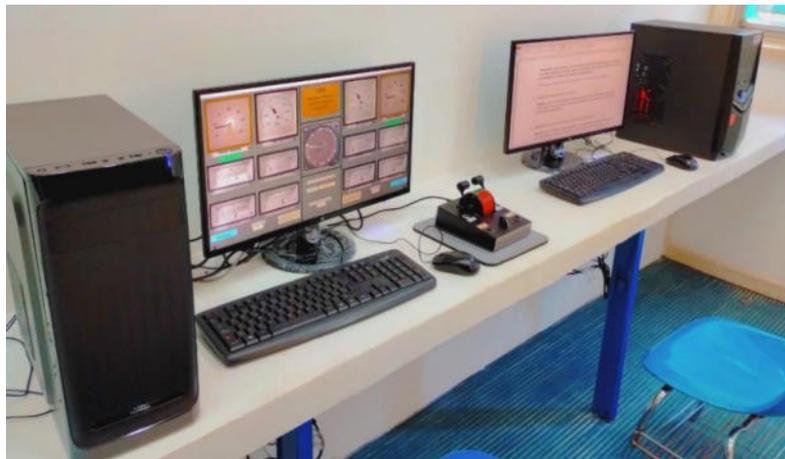


Figura 9 : Simulador en funcionamiento

#### AGRADECIMIENTO ESPECIAL

Los autores de este trabajo desean agradecer al Especialista Sr. CN Jorge Fernando Monticelli por el apoyo en las gestiones necesarias para el total desarrollo de este trabajo desde la Unidad Académica ESOA.

#### REFERENCIAS

- [1] Luthe- Olivera , Schultz . *Métodos Numéricos*, Editorial Limusa,Mexico,1978.
- [2] Mark Michaelis , Eric Lippert. *Essential C# 6.0*, Editorial Addison-Wesley, USA, 2016.
- [3] Blohm + Voss AG. *Diesel Engine Plant PC2-5V*, File 2101-01, Germany, 1984.
- [4] Blohm + Voss AG. *Ship's Information Manual*, File 0724-00, Germany, 1984.
- [5] Blohm + Voss AG. *Electric plant equipment: SIMOS 31*, File 3000-00, Germany, 1984.



## ANÁLISIS TENSIONAL EN ACCESORIOS TE DE SISTEMAS DE CAÑERÍAS

Alejandro J. Giudici<sup>1</sup>, José E. Stuardi<sup>2</sup>, Guillermo D. Chiappero<sup>3</sup> y Francisco Uribarren<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba

Av. Vélez Sarsfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina - [ajjudici@unc.edu.ar](mailto:ajjudici@unc.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba - [jose.stuardi@unc.edu.ar](mailto:jose.stuardi@unc.edu.ar),

<sup>3</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba -

[guillermo.chiappero@unc.edu.ar](mailto:guillermo.chiappero@unc.edu.ar)

<sup>4</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba - [furibarren@mi.unc.edu.ar](mailto:furibarren@mi.unc.edu.ar)

### RESUMEN

Los accesorios te son componentes de los sistemas de cañerías cuya función principal es lograr la derivación del fluido transportado por un tramo recto de cañería. Su análisis tensional resulta relevante, ya que por su complejidad geométrica están sometidos a exigencias superiores a las observadas en los tramos rectos. En efecto, la sección anular debilitada por la presencia del orificio de derivación provoca un incremento de tensiones debido a la presión del fluido. A esto se suma el efecto de ovalización provocado por la presencia de momentos externos. Ambas situaciones dan como resultado un aumento de la flexibilidad de los accesorios y su consecuente aumento de tensiones en comparación con la cañería recta. En general, los códigos y normas actuales aplicables a los sistemas de cañerías, tales como los ASME B31, consideran los efectos mencionados mediante el uso de factores de flexibilidad y de intensificación de las tensiones, lo que permite desarrollar el análisis estructural de un sistema de cañerías como un conjunto de vigas rectas. En el presente trabajo se comparan las tensiones obtenidas mediante la aplicación del código ASME B31.1 con las provenientes de un modelo numérico de elementos finitos, con el objetivo de analizar los márgenes de seguridad presentes dependiendo de las distintas cargas aplicadas. Para esto se plantea como caso de estudio una serie de accesorios te de variados diámetros y espesores que presentan características adecuadas para la comprensión de fenómeno y la comparación de las metodologías de cálculo. Para mejorar la interpretación de los resultados, se define un novedoso indicador denominado Margen de Seguridad Normativo, que proporciona al calculista basado en las normas valiosa información adicional de la seguridad del componente basado en su estado tensional real.

**Palabras Claves:** *accesorios te, tensiones, códigos, métodos numéricos.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Los accesorios te son componentes de los sistemas de cañerías cuya función principal es lograr la derivación del fluido transportado por un tramo recto de cañería. Es habitual que en estos elementos se presenten niveles de tensión superiores a los observados en los tramos rectos, por ello en la bibliografía de esta temática, se recomienda un análisis tensional más detallado. La sección anular debilitada por la presencia del orificio de derivación provoca un incremento de tensiones debido a la presión del fluido. A esto se suma el efecto de ovalización provocado por la presencia de momentos externos. Ambas situaciones dan como resultado un aumento de la flexibilidad de los accesorios y su consecuente aumento de tensiones en comparación con la cañería recta. En general, los códigos y normas actuales aplicables a los sistemas de cañerías, tales como los ASME B31, consideran los efectos mencionados mediante el uso de factores de flexibilidad y de intensificación de las tensiones, lo que permite desarrollar el análisis estructural de un sistema de cañerías como un conjunto de vigas rectas.

Los estudios realizados por Von Kármán [1] sobre codos determinaron que una de las causas principales de los elevados niveles de tensión es el efecto de ovalización provocado por la presencia de momentos externos, introduciendo las nociones de "factor de flexibilidad" y "factor de intensificación de la tensión" para comparar estos aumentos de flexibilidad y tensión respecto a las de una cañería recta equivalente. Basados en los trabajos de Markl [2], los primeros códigos aplicables a los sistemas de cañerías formalizaron los factores de flexibilidad e intensificación de tensiones, que se introdujeron en el análisis convencional de los sistemas de cañerías, los cuales permanecen casi sin cambios hasta la actualidad. En las últimas décadas, se presentaron numerosos trabajos que comparan las tensiones en distintos accesorios de los sistemas de cañería (codos, tes, etc.) calculados con los factores de intensificación normativos con valores experimentales y/o determinados por el método de los elementos finitos (MEF). En general estos trabajos, tratan casos específicos, tanto en la geometría de los accesorios como en las cargas aplicadas, por ello sus resultados se limitan a los casos tratados [3,4].

## 2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo del trabajo es estudiar los estados tensionales en los accesorios te provocados por la presencia de momentos externos y presión interna del fluido que transportan los sistemas de cañerías. Se plantea como caso de estudio una serie de tes de diversos diámetros y espesores de pared con características adecuadas para el análisis y comprensión de los fenómenos provocados por el debilitamiento de la sección anular por la presencia del orificio de derivación y de la ovalización, la comparación de las metodologías de cálculo y la discusión de los resultados obtenidos. Se contrastan los resultados calculados mediante la aplicación de un código vigente con aquellos obtenidos por un modelo numérico de elementos finitos, a fin de profundizar el

estudio de los estados tensionales en estos elementos y determinar los márgenes de seguridad que se obtienen de esa comparación, según las cargas aplicadas.

### 3. CASO DE ESTUDIO

Las tes de la serie que se estudian son rectas (el diámetro de la derivación es igual al tramo recto), forjadas, para soldar a tope y dimensionalmente responden a la norma ASME B16.9 [5], ver Figura 1. Se tomaron tres diámetros nominales típicos para cañería, 150 mm (6"), 300 mm (12") y 600 mm (24"). En la Figura 2 se muestran las dimensiones características de las tes, donde  $t_n$  es el espesor nominal de la te,  $r_x$  es el radio de curvatura,  $r$  es el radio medio de la te y  $T_c$  es el espesor en la zona de empalme.



Figura 1: Te recta para soldar

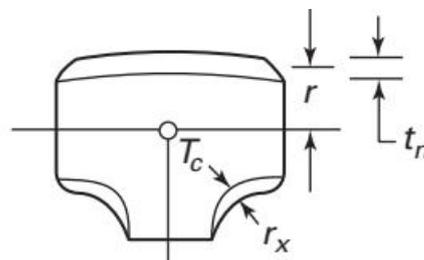


Figura 2: Dimensiones de te para soldar

En la Tabla 1 se detallan las características dimensionales de las tes seleccionadas en la serie, y los parámetros de flexibilidad e intensificación de tensión establecidos por el código ASME B31.1 [6]. La flexibilidad característica  $h$ , que es un parámetro que indica la capacidad de flexionarse que tiene una te y el factor de intensificación de tensiones  $i$ , se definen como:

$$h = \frac{3,1 t_n}{r} \quad ; \quad i = \frac{0,9}{h^{2/3}} \quad (1)$$

Tabla 1: Tes rectas de la serie

Diámetro nominal ( $D_n$ ) (mm/")	150 / 6	300 / 12	600 / 24
Diámetro externo ( $D_o$ ) (mm)	168,3	323,8	610
Espesor nominal ( $t_n$ ) (mm)	7,11	9,53	17,48
Denominación espesor	STD - Sch.40	STD	Sch.40
Radio medio ( $r$ ) (mm)	80,6	157,1	296,3
Flexibilidad característica $h$	0,273	0,188	0,183
Factor de intensificación de tensiones $i$	2,136	2,742	2,793

El material constitutivo de las tes de la serie es acero API 5L X52, típico de los sistemas de cañerías, cuya tensión de fluencia es  $S_y = 360$  MPa y tensión de rotura  $S_u = 455$  MPa. Además, se adopta como módulo de Young  $E = 206.000$  MPa y módulo de Poisson  $\nu = 0,3$ .

Las cargas aplicadas, tanto la presión interna  $P$  como los momentos  $M$ , son relacionadas con la tensión de fluencia considerando las tensiones que ellas provocan en la te y evitando aplicar



cargas excesivas. Para determinar el rango de presiones a aplicar en la te se utiliza la fórmula de Barlow, que define la tensión circunferencial  $S_c$  provocada sólo por la presión interna  $P$ :

$$S_c = \frac{P D_o}{2 t_n} \quad \Rightarrow \quad P = \frac{2 S_c t_n}{D_o} \quad (2)$$

El rango de tensiones circunferenciales propuesto y consecuentemente el rango de presiones adoptado es:

$$0 \leq S_c \leq 0,5 S_y \quad \Rightarrow \quad 0 \leq P \leq \frac{360 t_n}{D_o} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Para determinar el rango de momentos a aplicar en la te se utiliza la fórmula de tensión simple (asumiendo en primera instancia la presencia de solo un momento flector) para determinar la tensión longitudinal  $S_l$ :

$$S_l = \frac{M}{Z} \quad \Rightarrow \quad M = S_l Z \quad (4)$$

donde  $Z$  es el módulo resistente de la sección anular de la te:  $Z = \pi r^2 t_n$

El rango tensiones longitudinales propuesto y consecuentemente el rango de momentos adoptados son:

$$0 \leq S_l \leq 0,3 S_y \quad \Rightarrow \quad 0 \leq M \leq 108 Z \text{ [Nmm]} \quad (5)$$

Es importante destacar que en este trabajo se adoptan los espesores nominales establecidos por la norma ASME B16.9 [5] para determinar los parámetros geométricos y las tensiones establecidas por el código estudiado (ver Tabla 1), si bien los espesores reales encontrados habitualmente en las tes fabricadas exceden los nominales. Para conocer esta característica de la fabricación de las te forjadas, se realizó una serie de mediciones en estos accesorios. Para poder identificar las distintas áreas del accesorio, se dividieron las mediciones en cuatro sectores como se observa en la Figura 3: cuerpo, derivación, empalmes y caras externas. Se tomaron mediciones en tes de distintos diámetros y espesores nominales para determinar los espesores reales en los distintos sectores establecidos. En los sectores del cuerpo y derivación, el rango de espesores medidos es de 21% a 50% mayor a los espesores nominales, en el sector de las caras externas es de 25% a 47% y en los empalmes es de 38% a 65%.

#### 4. DETERMINACIÓN DE TENSIONES APLICANDO EL CÓDIGO ASME B31.1

En este punto se presenta la metodología utilizada para la determinación de las tensiones existentes en una te de acuerdo con los rangos de presiones internas y momentos adoptados. Las verificaciones previstas por el código ASME B31.1 [6] tratan las tensiones circunferenciales y longitudinales de manera independiente. A partir de la verificación de la norma respecto al espesor mínimo requerido  $t_m$  para una te, se determina la tensión circunferencial:



$$t_m = \frac{PD_o}{2(SE + Py)} + A \quad (6)$$

donde:  $S$  es la tensión admisible del material a la temperatura de diseño,  $E$  es el factor de eficiencia de junta, en este caso es  $E = 1$  teniendo en cuenta que estos accesorios son forjados;  $y$  es un factor que depende el tipo de material y la temperatura de trabajo, en este caso  $y = 0,4$ ;  $A$  es el espesor adicional, se adopta  $A = 0$ .

De acuerdo con lo indicado, la tensión circunferencial puede ser despejada de la ecuación (6) considerando el espesor nominal de las tes  $t_n$ :

$$S_c = \frac{PD_o}{2t_n} - Py \quad (7)$$

Para la tensión longitudinal  $S_l$ , se adopta la siguiente expresión del código:

$$S_l = \frac{PD_o}{4t_n} + \frac{C_i M}{Z} \quad (8)$$

donde:  $C_i = \text{mayor}(1; 0,75i)$ ,  $i$  es el factor de intensificación de tensiones y  $M$  es el momento resultante aplicado.

El momento resultante aplicado  $M$  resulta de considerar todos los posibles momentos presentes en la sección en estudio: el momento flector en el plano de la te  $M_i$ , el momento flector fuera de plano de la te  $M_o$  y el momento torsor  $M_t$  (ver Figura 4):

$$M = \sqrt{(M_i)^2 + (M_o)^2 + (M_t)^2} \quad (9)$$

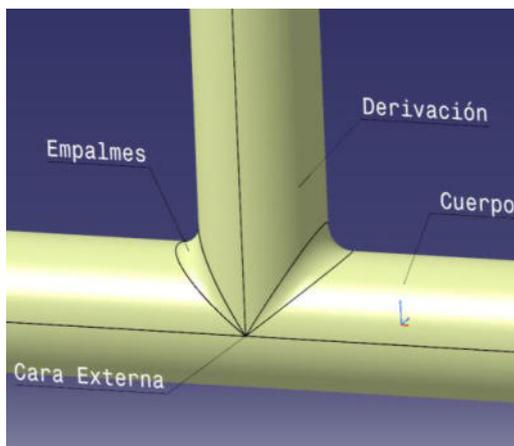


Figura 3: Sectores del accesorio te

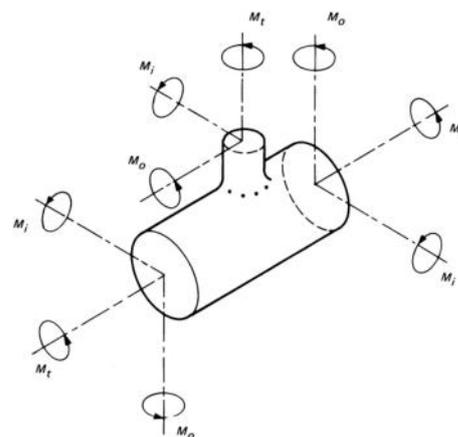


Figura 4: Momentos aplicados de los extremos de una te (ASME B31.1 [6])

Tanto la tensión circunferencial  $S_c$  como la tensión longitudinal  $S_l$  deben resultar menores o iguales a la tensión admisible a máxima temperatura de trabajo  $S_h$ :

$$S_c \leq S_h \quad ; \quad S_l \leq S_h \quad (10)$$



En este trabajo se adopta como máxima temperatura de trabajo la correspondiente a la temperatura de ambiente, entonces  $S_h = S$ . Las tensiones admisibles para los materiales establecidas en este código ASME B31.1 [6], siguen los lineamientos adoptados en el Apéndice 1 de la Parte D del código ASME BPVC.II [7]. Para el tipo de acero adoptado para las tes de la serie estudiada (API 5L X52), la tensión admisible es:

$$S = \frac{S_u}{3,5} \Rightarrow S = 130 \text{ [MPa]} \quad (11)$$

## 5. DETERMINACIÓN DE TENSIONES APLICANDO MÉTODOS NUMÉRICOS

Para el análisis numérico de la serie de tes se utilizó el método de los elementos finitos (MEF) empleando un software comercial. La configuración utilizada es una te recta que está unida en sus extremos a tres tramos de cañería recta (ver la Figura 5). La longitud de cada uno de los tramos rectos es diez veces el diámetro exterior de la cañería ( $L = 10 D_o$ ), de modo que la te no sea afectada por las condiciones de apoyo de los extremos del modelo [8]. Para facilitar la definición de las condiciones de borde se generó el punto de referencia RP-1, situado en el extremo libre de la derivación y los puntos de referencia RP-2 y RP-3 en los extremos de la parte recta (ver Figura 5). Estos puntos están vinculados a cada una de las secciones extremas del modelo mediante una restricción de acoplamiento cinemático, que permite el desplazamiento radial de las secciones finales de la cañería. Respecto a los apoyos y las cargas, el RP-1 se lo define como empotrado, mientras que en los RP-2 y RP-3 se aplican los momentos externos. La presión se incorpora en la cara interior del conjunto. Es importante destacar que la ubicación del RP-1 en el eje de intersección de los planos de simetría del conjunto X-Y e Y-Z y su condición de empotrado permite equilibrar las fuerzas generadas por la presión en las caras internas del modelo. Tanto la te como los tramos rectos se modelan utilizando elementos de cáscara cuadrilátero de cuatro nodos con integración reducida. El tamaño de la malla se densifica en la te para captar más adecuadamente las variaciones en deformaciones y tensiones (ver Figura 6). Se utiliza un material elástico lineal para el modelo en estudio.

### 5.1 Aplicación de los momentos externos

El código ASME B31.1 [6] no hace diferenciación en cuanto al tipo de momento que se aplica en una sección, puede ser momento flector en el plano de la te  $M_i$ , el momento flector fuera de plano de la te  $M_o$  y el momento torsor  $M_t$  (ver Figura 4), todos ellos se aplican a la ecuación 9. En una primera instancia se aplica el rango de momentos como momento flector en el plano  $M_i$  para la determinación de las tensiones por MEF. Además, se analizan las tensiones generadas en el accesorio de acuerdo a cómo se distribuye este momento en los dos extremos libres de la te (RP-2 y RP-3).

En la Tabla 2 se presentan las tensiones máximas de Von Mises  $S_{VM}$  determinadas para un diámetro de  $D_n = 150 \text{ mm}$  (6"), según la distribución de un momento  $M_i = 36 \text{ Z}$  ( $5,22 \times 10^6 \text{ Nmm}$ ), en los

extremos libres y sin presión interna. De la observación de la Tabla 2, surge que el caso más exigente corresponde a aplicar la totalidad del momento externo en unos de los extremos libres.

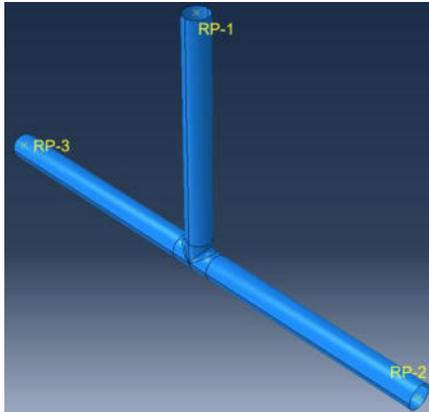


Figura 5: Configuración adoptada para el análisis numérico

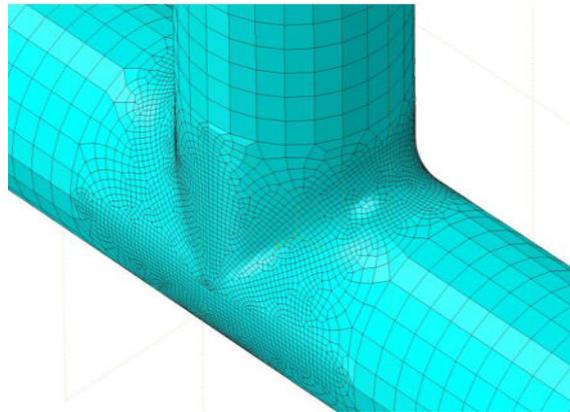


Figura 6: Detalle condición de apoyo. RP-1 empotrado

Tabla 2: Tensiones máximas en el accesorio te según la distribución en ambos extremos libres (RP-2 y RP3) de un momento flector en el plano  $M_i$

Diámetro nominal ( $D_n$ ) (mm/")	150 / 6		
Espesor nominal ( $t_n$ ) (mm)	7,11		
Denominación espesor	STD - Sch.40		
Distribución del momento $M_i$ en RP-2 y RP-3 (%) (%)	100 / 0	75 / 25	50 / 50
Tensión máxima de Von Mises $S_{VM}$ (Mpa)	202	179	157

Para completar el estudio, se aplica el rango de momentos no solo en el plano de la te ( $M_i$ ), sino momentos flectores aplicados fuera del plano ( $M_o$ ), momentos torsores ( $M_t$ ) y una combinación de los tres momentos mencionados anteriormente. La combinación de momentos corresponde al caso cuyos módulos son  $|\overline{M}_j| = \sqrt{3}/3$  por lo tanto el vector final se ubica a  $45^\circ$  de los ejes principales.

## 5.2 Tensiones en el accesorio te

Para las distintas configuraciones de la serie en estudio, se determinan las máximas tensiones de Von Mises que se pueden presentar en el sector de empalme cuando la carga predominante es una presión interna (ver Figura 7), en el sector de la cara externa cuando la carga predominante es un momento (ver Figura 8) y en ambos sectores debido a una combinación de presión interna y momento.

## 6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para comparar los resultados calculados mediante la aplicación del código ASME B31.1 con aquellos obtenidos por el MEF se define un indicador que llamaremos Margen Normativo de Seguridad (MNS) [9]. Este índice compara dos relaciones de tensiones, en el numerador la

relación calculada por la aplicación del código y en el denominador la relación que incluye la tensión obtenida por MEF, de la siguiente manera:

$$MNS = \frac{\text{mayor}(S_c, S_l)/S}{S_{VM}/S_u} \quad (12)$$

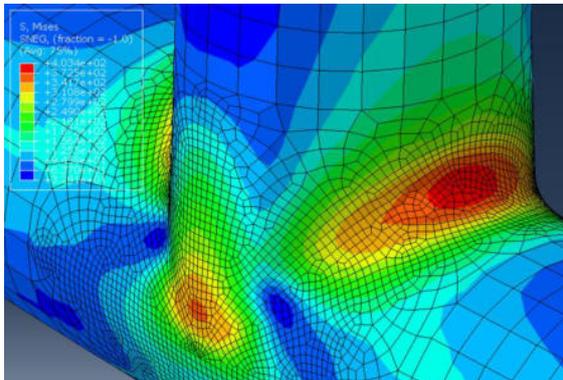


Figura 7: Detalle de la te y sus tensiones de Von Mises para  $P = 180 t_n/D_o$  y  $M_i = 0$

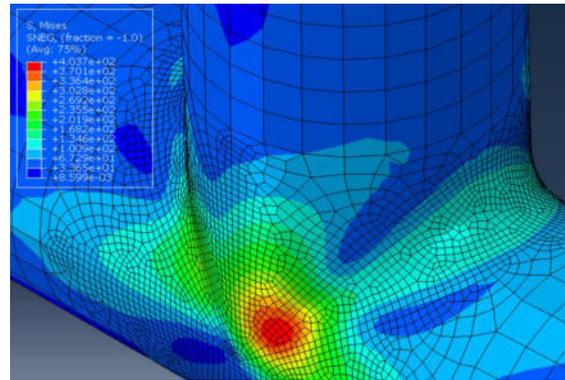


Figura 8: Detalle de la te y sus tensiones de Von Mises para  $M = 72 Z$

La relación correspondiente al código considera la mayor de las tensiones, circunferencial  $S_c$  o longitudinal  $S_l$ , calculadas en un punto de la te frente a la tensión admisible  $S$  establecida por dicho código (ver ecuaciones 10 y 11). La relación en el denominador considera la tensión de Von Mises  $S_{VM}$  obtenida por el MEF respecto a la tensión de rotura  $S_u$  del material. Así definido, el  $MNS$  es un parámetro de control que permite evaluar el nivel de seguridad del código estudiado frente a los resultados numéricos de los casos de estudio. En un punto del accesorio, si el  $MNS$  es mayor a uno se puede asegurar que cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código que se está aplicando, la tensión de Von Mises no supera la tensión de rotura  $S_u$  del material. Por otra parte, el  $MNS$  menor a uno indica que la tensión de Von Mises ha superado la tensión de rotura  $S_u$  del material aun cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código.

En primera instancia se comparan los resultados obtenidos por la aplicación del código y los correspondientes al MEF, para el caso de una te de  $D_n = 150$  mm (6"), espesor nominal  $t_n = 7,11$  mm, con presión interna  $P$  y un momento flector en el plano de la te ( $M_i$ ) variables en el rango de estudio. En la Tabla 3 se comparan las tensiones resultantes de la aplicación creciente de las cargas externas. En la columna 1 se indica la presión interna aplicada creciente en la te dentro del rango establecido en la ecuación 3 y en la columna 2 se presenta el momento flector aplicado creciente dentro del rango establecido en la ecuación 5. En las columnas 3 y 4 se muestran las tensiones circunferenciales y longitudinales determinadas por el código ASME B31.1 [6] y la relación de la mayor de ellas (columna 5) con la tensión admisible del material (columna 6). Para este código la tensión admisible es  $S = 130$  MPa, según la ecuación 11. Además, se incluye las máximas tensiones de Von Mises  $S_{VM}$ , en la te obtenidas por el MEF (columna 7) y su relación con la tensión de rotura del material  $S_u = 455$  MPa (columna 9). En la columna 8 se indica el sector donde se ubican de las máximas tensión de Von Mises y en la columna 10 se presenta el



MNS que surge de la relación entre las columnas 6 y 9. Para los casos donde la presión interna es  $P = 360 t_n / D_o$ , la tensión calculada por el código supera la tensión admisible  $S$  (celdas en amarillo) por lo cual en estos tramos no se realiza la comparación.

Tabla 3: Comparación de tensiones en tes de  $D_n = 150$  mm (6") y  $t_n = 7,11$  mm – Código ASME B31.1 y MEF

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P$ (MPa)	$M_i$ (Nmm)	$S_c$	$S_i$	mayor ( $S_c, S_i$ ) (a)	(a) / $S$ (%) (b)	$S_{VM}$	Ubic. Max.	$S_{VM}/S_u$ (%) (c)	$MNS =$ (b)/(c)
0	0	0	0	0	0%	0	---	0%	---
	36 Z	0	58	58	45%	202	Externo	44%	1,00
	72 Z	0	115	115	88%	404	Externo	89%	1,00
	108 Z	0	173	173	133%	605	Externo	133%	1,00
90 $t_n/D_o$	0	43	23	43	33%	201	Empalme	44%	0,75
	36 Z	43	80	80	62%	347	Externo	76%	0,81
	72 Z	43	138	138	106%	539	Externo	118%	0,90
	108 Z	43	196	196	151%	737	Externo	162%	0,93
180 $t_n/D_o$	0	87	45	87	67%	403	Empalme	88%	0,76
	36 Z	87	103	103	79%	503	Externo	111%	0,72
	72 Z	87	160	160	123%	694	Externo	153%	0,81
	108 Z	87	218	218	168%	886	Externo	195%	0,86
270 $t_n/D_o$	0	130	68	130	100%	604	Empalme	133%	0,75
	36 Z	130	125	130	100%	665	Externo	146%	0,68
	72 Z	130	183	183	141%	850	Externo	187%	0,75
	108 Z	130	241	241	185%	1041	Externo	229%	0,81
360 $t_n/D_o$	0	174	90	174	134%	805	Empalme	177%	0,76
	36 Z	174	148	174	134%	847	Empalme	186%	0,72
	72 Z	174	205	205	158%	1007	Externo	221%	0,71
	108 Z	174	263	263	202%	1197	Externo	263%	0,77

En la tabla anterior están resaltadas en verde aquellas celdas entre las cuales se alcanza la tensión admisible a medida que crecen las cargas aplicadas. A partir de las celdas mencionadas se obtiene el MNS para las distintas combinaciones de cargas (en azul). Se aprecia que el MNS varía entre 1,00 y 0,68. Como se indicó precedentemente, los valores del MNS menores a uno indican que la tensión de Von Mises ha superado la tensión de rotura  $S_u$  del material aun cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código. Es importante recordar que estos resultados se obtuvieron a partir del espesor nominal del accesorio te y como es habitual la existencia de sobreespesores en este tipo de accesorios forjados (según lo relevado en el punto 3), podemos determinar los sobreespesores mínimos necesarios para obtener  $MNS > 1$ , que asegura que cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código, la tensión de Von Mises no supera la tensión de rotura  $S_u$  del material. En la Tabla 4 se presentan los sobreespesores necesarios para obtener el  $MNS = 1$ .



Tabla 4: Determinación de sobreespesores necesarios para obtener  $MNS = 1$  en tes de  $D_n = 150$  mm (6") y  $t_n = 7,11$  mm

$P$ (MPa)	$M_i$ (Nmm)	$S_c$	$S_i$	mayor ( $S_c, S_i$ ) (a)	(a) / S (%) (b)	Sobre espesor (%)	$S_{VM}$	Ubic. Max.	$S_{VM}/S_u$ (%) (c)	$MNS =$ (b)/(c)
90 $t_n/D_o$	72 Z	43	138	138	106%	7%	483	Externo	106%	1,00
180 $t_n/D_o$	36 Z	87	103	103	79%	26%	360	Empalme	79%	1,00
	72 Z	87	160	160	123%	13%	560	Externo	123%	1,00
270 $t_n/D_o$	0	130	68	130	100%	34%	455	Empalme	100%	1,00
	36 Z	130	125	130	100%	45%	455	Empalme	100%	1,00

De la observación de la Tabla 4, se desprende que los sobreespesores necesarios para obtener  $MNS > 1$ , se encuentran dentro de los sobreespesores medidos en cada sector de la te, según se determinó en el punto 3.

El mismo estudio se realiza para los casos de tes de: a)  $D_n = 300$  mm (12"), espesor  $t_n = 9,53$  mm y b)  $D_n = 600$  mm (24"), espesor  $t_n = 17,48$  mm, con presión interna  $P$  y un momento flector en el plano de la te ( $M_i$ ) variables en los rangos de estudio. En la Tabla 5 se presentan los rangos del  $MNS$  y de los sobreespesores necesarios para llegar a  $MNS = 1$ , obtenidos en las tes de diámetros y espesores indicados en la Tabla 1, con cargas aplicadas de presión interna  $P$  y momento flector en el plano de la te ( $M_i$ ), variables en los rangos de estudio. De la observación de la Tabla 5, surge que los rangos de los  $MNS$  que se obtienen para los distintos diámetros de la serie en estudio son similares y consecuentemente los sobreespesores necesarios para llegar a  $MNS = 1$  también lo son. No obstante ello, se aprecia que el mayor sobreespesor en sector externo para la cañería de 600 mm y el mayor sobreespesor en los empalmes para la cañería de 150 mm, excede levemente los sobreespesores mínimos relevados en los correspondientes sectores de las tes. Para completar el estudio, se aplica el rango de momentos no solo en el plano de la te ( $M_i$ ), sino momentos flectores aplicados fuera del plano ( $M_o$ ), momentos torsores ( $M_t$ ) y una combinación de los tres momentos mencionados anteriormente. La combinación de momentos corresponde al caso cuyos módulos son  $|\vec{M}_j| = \sqrt{3}/3$  por lo tanto el vector final se ubica a  $45^\circ$  de los ejes principales.

Tabla 5: Rangos del  $MNS$  y sobreespesores necesarios para llegar a  $MNS = 1$ , con  $P$  y  $M_i$ , variables en los rangos de estudio

Diámetro nominal ( $D_n$ ) (mm/")	150 / 6	300 / 12	600 / 24
Espesor nominal ( $t_n$ ) (mm)	7,11	9,53	17,48
Denominación espesor	Sch.40 – STD	STD	Sch.40
Rangos $MNS$	1,00 - 0,68	1,25 – 0,68	0,89 – 0,64
Rangos de sobreespesores en sector externo (%)	7 – 13	5 – 17	9 – 30
Rangos de sobreespesores en empalmes (%)	26 – 45	29 -30	30 – 35



En la Tabla 6 se presentan los rangos del  $MNS$ , obtenidos para el diámetro  $D_n = 150$  mm (6"), con cargas aplicadas de presión interna  $P$  y un momento según lo indicado precedentemente. Según la Tabla 6, los rangos de los  $MNS$  correspondientes a cargas de presión interna con momento flector fuera del plano ( $M_o$ ) y con momento torsor ( $M_t$ ) son mayores al rango del  $MNS$  para la carga de presión interna y momento flector en el plano ( $M_i$ ), según Tabla 5, por lo cual se desprende que los rangos de sobreespesores serán menores para estos casos. Por otra parte, como el rango del  $MNS$  para la carga de presión interna y combinación de los tres momentos ( $M_i$ ,  $M_o$  y  $M_t$ ) se encuentra dentro del rango del  $MNS$  para la carga de presión interna y momento flector en el plano ( $M_i$ ) se calculan los rangos de sobreespesores necesarios para llegar a  $MNS = 1$  para verificar que estos presentan magnitudes similares a las obtenidas en los casos anteriores.

Tabla 6: Rangos del  $MNS$  y sobreespesores necesarios para llegar a  $MNS = 1$ , con  $P$ ,  $M_o$ ,  $M_t$  y combinaciones de los tres momentos, variables en los rangos de estudio

Diámetro nominal ( $D_n$ ) (mm/")	150 / 6		
Espesor nominal ( $t_n$ ) (mm)	7,11		
Denominación espesor	STD - Sch.40		
Carga aplicada	Presión y momento flector fuera del plano ( $M_o$ )	Presión y momento torsor ( $M_t$ )	Presión y combinación de los tres momentos ( $M_i$ , $M_o$ y $M_t$ )
Rangos $MNS$	1,05 – 0,75	1,03 – 0,74	0,75 – 0,68
Rangos de sobreespesores en sector externo (%)	---	---	18 – 26
Rangos de sobreespesores en empalmes (%)	---	---	21 – 40

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron los estados tensionales en accesorios te provocados por la presencia de momentos externos y presión interna del fluido que transportan los sistemas de cañerías. Se plantearon como casos de estudio una serie de tes de diversos diámetros con características adecuadas para el análisis y comprensión los resultados obtenidos mediante la aplicación del código ASME B31.1 con los obtenidos por un modelo numérico de elementos finitos, con el objetivo de profundizar el estudio de los estados tensionales en estos elementos y visualizar los márgenes de seguridad presentes según las cargas aplicadas.

Se definió como margen normativo de seguridad ( $MNS$ ) al cociente de dos relaciones; en el numerador la relación entre la mayor tensión normal calculada en un punto de la te frente a la tensión admisible establecida por el código ASME y en el denominador la relación que considera la tensión de Von Mises obtenida por el MEF respecto a la tensión de rotura del material. De esta forma el  $MNS$  es un parámetro de control que indica la presencia de tensiones de rotura no detectadas mediante los cálculos normativos. Así un  $MNS$  mayor a uno asegura que cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código que se está aplicando, la tensión de Von Mises



no supera la tensión de rotura del material. En cambio, cuando el  $MNS$  es menor a uno indica que la tensión de Von Mises ha superado la tensión de rotura del material aun cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código.

Considerando que las tes forjadas presentan espesores reales que exceden los nominales establecidos por la normativa vigente, se realizó una serie de mediciones en estos accesorios, para establecer los sobreespesores en los distintos sectores de las tes. Se determinó que de los momentos externos que se pueden aplicar a las tes, los que provocan mayores niveles de tensión son aquellos aplicados en el plano del accesorio. En gran parte de la serie en estudio el  $MNS$  es menor a uno, por lo cual se determinaron los sobreespesores necesarios para obtener el  $MNS = 1$  y se los comparó con los sobreespesores medidos en los distintos sectores de las tes, concluyendo en general que los sobreespesores reales son mayores a los necesarios.

Como conclusión general se indica que la seguridad en estos casos queda ligada a la existencia de sobreespesores, los que son habituales en la fabricación de las tes o a otros fenómenos, tal como la redistribución de tensiones dentro de los accesorios en sectores donde se supera la tensión de fluencia de material.

## 8. REFERENCIAS

- [1] Von Karman, Th. *Über die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federnder Ausgleich Rohre*, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. Vol. 55, Part 2. pp. 1889-1895, 1911
- [2] Markl, A. Piping-Flexibility Analysis, *Transactions of the ASME*. Vol. 77, pp. 127–143, 1955.
- [3] Bhattacharya A. *A Finite Element Based Study on Stress Intensification Factors (SIF) for Reinforced Fabricated Tees*, NAFEMS World Congress 2011, Boston, USA, 2011.
- [4] Jacimovic, N. *Analysis of Piping Stress Intensification Factors based of Numerical Models*, International Journal of Pressure Vessels and Piping. Vol. 163, pp. 8–14, 2018.
- [5] ASME B16.9. *Factory-Made Wrought Buttwelding Fittings*, American Society of Mechanical Engineers, NY, USA, 2018.
- [6] ASME B31.1. *Power Piping*, American Society of Mechanical Engineers, NY, USA, 2020.
- [7] ASME BPVC II. *Boiler and Pressure Vessel Code, Section II*, American Society of Mechanical Engineers, NY, USA, 2021.
- [8] Matzen, B.C. y Yu, L. *Elbow Stress Indices using Finite Element Analysis*, Nuclear Engineering and Design. Vol.181, pp. 257–65. 1998.
- [9] Giudici, A., Wechselberg, N., Stuardi, J. y Chiappero, G. *Análisis Comparativo Tensional en Codos de Sistemas de Cañería aplicando el Margen Normativo de Seguridad*, Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, artículo aceptado para publicación el 13 de abril de 2023.



## DETERMINACION DE TENSIONES RESIDUALES EN COMPONENTES MECANICOS

Leandro Fontanarrosa<sup>1,2</sup>, Alberto Cardona<sup>1</sup> y Federico José Cavalieri<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>CIMEC - Centro de Investigación de Métodos Computacionales (Universidad Nacional del Litoral-CONICET), Predio Conicet "Dr Alberto Cassano", Colectora Ruta 168 s/n, Paraje "El Pozo", 300 0 Santa Fe, Argentina. [acardona@cimec.unl.edu.ar](mailto:acardona@cimec.unl.edu.ar), [fcavalieri@cimec.unl.edu.ar](mailto:fcavalieri@cimec.unl.edu.ar).

<sup>2</sup>GIMA- Grupo de Ingeniería Mecánica Aplicada – UTN Facultad Regional Santa Fe Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina. [lenadrofontanarrosa@utn.frfsf.edu.ar](mailto:lenadrofontanarrosa@utn.frfsf.edu.ar), [fcavalieri@frsf.utn.edu.ar](mailto:fcavalieri@frsf.utn.edu.ar)

### RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología numérica y experimental para la determinación de tensiones residuales en componentes mecánicos. Para ello, la pieza que se desea estudiar se corta en dos partes y el perfil o contorno de la superficie de corte se mide para obtener los desplazamientos producidos por las tensiones residuales. Luego, por medio de una técnica numérica como la del método de los elementos finitos, se realiza un modelo digital de una de las partes cortadas y se aplica un desplazamiento impuesto en la superficie de corte, igual y opuesto al registrado experimentalmente. Teniendo en cuenta el principio de superposición de Bueckner, este cálculo da como resultado en el modelo digital las tensiones residuales normales al plano de corte. La metodología que se presenta en este trabajo permite determinar tensiones residuales en piezas con geometrías complejas con un costo considerablemente menor a otras técnicas como las de difracción de rayos x o de neutrones.

**Palabras clave:** *Tensiones residuales, Elementos finitos, Plasticidad*



## 1. INTRODUCCIÓN

Las tensiones residuales son aquellas tensiones que permanecen en el elemento en forma permanente aun cuando la causa que las generaron ya no esté. En la práctica resultan luego de deformaciones plásticas, de gradientes elevados de temperatura o de cambios cristalográficos en el material. Los ejemplos más comunes de la formación de tensiones residuales son los que se dan por ejemplo en: procesos de soldadura, conformación en frío, tratamientos térmicos y ciertos tratamientos superficiales.

En algunos casos, la generación de tensiones residuales permite ahorrar material en la fabricación de un componente, como es el ejemplo del zunchado, sin embargo, en otros casos pueden contribuir a la formación de una falla temprana si la sollicitación se ve favorecida debido a estas tensiones. Por este motivo, conocer y predecir el comportamiento de los materiales también exige tener en cuenta las tensiones residuales y gestionar como pueden relajarse o intensificarse para obtener una situación beneficiosa. En este sentido, relajar las tensiones es útil en materiales donde se valora la ductilidad y la homogeneidad, mientras que, la formación de estas puede ser, dependiendo de su naturaleza, beneficiosa a la hora de resistir esfuerzos opuestos a las mismas. Las tensiones residuales de tracción en la superficie de una estructura son por lo general indeseables, debido a que reducen su resistencia a la fatiga y predisponen a la fractura. Esto se debe a que la superficie en tracción no puede soportar tensiones adicionales producidas por fuerzas externas tan grandes como las soportados por una superficie en estado relajado. En cambio, las tensiones residuales de compresión sobre una superficie generalmente son deseables. De hecho, para aumentar la vida a la fatiga de los componentes, se pueden aplicar tensiones residuales de compresión a las superficies mediante técnicas como el granallado.

Par la obtención del valor y distribución de las tensiones residuales existen varios métodos que se clasifican según si el ensayo genera en la pieza un efecto tal que sugiere el posterior descarte de la misma o no. Para lo cual, se encuentran dos categorías generales que se describen resumidamente a continuación:

*i) Métodos destructivos.* Son aquellos que producen una modificación tal en el material, que la pieza suele no ser apta para su uso posterior. Por lo general, estos procesos consisten en realizar cortes o perforaciones en la pieza y medir luego cómo se comporta el material. En esta categoría se conocen los siguientes métodos: i) de corte anular, ii) de ranura, iii) de contorno. Detalles de cada método se pueden encontrar en [1].

*ii) Métodos no destructivos.* Son aquellos que no alteran la geometría de la pieza por cortes o perforaciones. Generalmente usan radiaciones o vibraciones que cambian la respuesta del material o componente según parámetros dependientes del estado tensional interno del material.



Suelen tener buena resolución, especialmente cuando las tensiones residuales son de gran magnitud, pues la plasticidad no presentará un inconveniente a la hora de realizar la medición como es en el caso de las técnicas anteriores, pero por otro lado, están limitados por el tamaño o terminación superficial y el costo de realización. En esta categoría se encuentran los siguientes métodos: i) difracción de rayos x, ii) difracción de neutrones y iii) ultrasonido. Detalles de cada método se pueden encontrar en [1].

Este trabajo presenta el procedimiento numérico y experimental para calcular tensiones residuales mediante la técnica de contorno, para conocer la precisión de la metodología desarrollada mediante validaciones numéricas y comparación con ensayos experimentales. El procedimiento del cálculo de las tensiones residuales se realizó con el uso del programa de elementos finitos Samcef [2] utilizando su módulo lineal y no lineal como así también por medio de códigos de desarrollo propio en Octave [3], en tanto que, los resultados experimentales para el cálculo y validación de la propuesta fueron tomados de la reciente publicación de D'Elia et al [4].

## 2. MÉTODO DE CONTORNO

El método de contorno, discutido por primera vez en 2001 y desarrollado por el Laboratorio Nacional de Los Álamos, se considera una técnica joven y el consenso sobre las buenas prácticas está aún en discusión [5]. Es un método de relajación destructivo que, como se ilustra en la Figura 1, consiste en realizar procedimientos experimentales y analíticos. En primer lugar, se corta la pieza a lo largo de una sección plana sobre la que se desea conocer el valor de las tensiones residuales. El corte liberará las tensiones que hasta entonces estaban auto equilibradas, esto producirá una distorsión de la superficie que deberá ser registrada con algún instrumento de medición. Luego, una vez obtenidos los datos de los desplazamientos de la superficie de corte, se pasa al ámbito analítico para llevar a cabo un procesamiento de datos y luego una simulación por medio del método de los elementos finitos. Para ello, primero se construye una superficie virtual y equivalente a la deformada, que será restaurada a su estado plano anterior. Este proceso, basado en el principio de superposición de Bueckner [6], da como resultado las tensiones que debían existir en el cuerpo virtual, para que produzcan las distorsiones medidas, o lo que es igual, devuelve las tensiones residuales que existían en el cuerpo real.

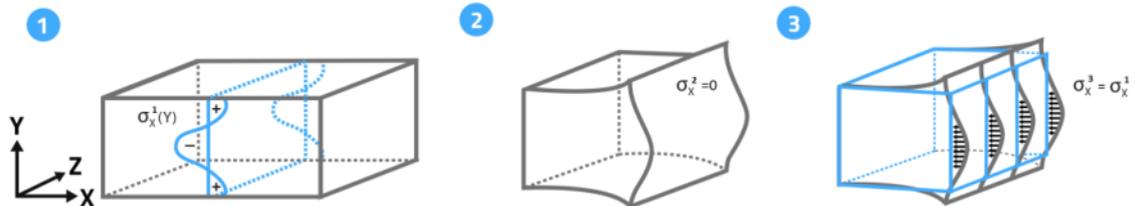


Figura 1: Procedimiento: 1- pieza en estado original con tensiones internas; 2- luego del corte las tensiones se relajan provocando deformaciones; 3- las tensiones que provocan la restauración de la cara plana son equivalentes a las tensiones internas originales

Como se puede inferir de lo mencionado en el párrafo anterior, el método de contorno resulta atractivo por su simplicidad de aplicación y por el requerimiento de equipos de baja complejidad que son relativamente sencillos de encontrar en la industria. Por otro lado se destaca que, con esta metodología se obtiene un mapa bidimensional de la distribución de tensiones normales al plano de corte definido. Los métodos de difracción de neutrones o de seccionado son también capaces de dar estos resultados, pero son lentos o están muy limitados por el tamaño y profundidad de estudio. Finalmente, el hecho que sea prácticamente insensible a los cambios de la microestructura, lo hace particularmente útil cuando se realizan estudios de soldaduras, donde sería imposible el uso de una difracción de rayos x o neutrones.

### 3. DESCRIPCIÓN DETALLA DEL PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO DE CONTORNO

En la práctica, el método de contorno consta de dos pasos fundamentales para realizar de manera experimental y que se describen a continuación:

1- Corte de la pieza. Es habitual el proceso de corte por medio de la técnica de EDM, de sus siglas en inglés Electrical Discharge Machine.

2- Medición de la superficie deformada. Se realiza por medio de una máquina de medición por coordenadas o CMM (por sus siglas en inglés Coordinates Measurement Machine) debido a su amplia disponibilidad y capacidad acorde para la resolución buscada.

Luego, el ámbito analítico requiere procesar los valores de modo que sean útiles y representativos de la deformación en la superficie para un posterior cálculo por elementos finitos. Este análisis de los datos se puede ordenar en una serie de pasos importantes:

1-Alineación. Las mediciones de las dos caras de la pieza cortada deben ser promediadas para disminuir errores antisimétricos.



2-Extrapolación al perímetro. Debido a la gran dificultad que presenta tomar mediciones confiables del borde, los valores de los desplazamientos en el perímetro de la pieza son extrapolados de la superficie promediada con alguna técnica numérica o analítica. Esto implica que estos valores se verán afectados según las elecciones del método de extrapolación, por lo que los resultados en estas zonas se suelen considerar no confiables y no se reportan.

3-Filtrado de ruido. La superficie de corte tendrá consigo ruido producto del proceso de corte y medición, si este ruido aleatorio y de alta frecuencia no es filtrado, afectará de manera considerable en los resultados, puesto que las tensiones dependen de la curvatura del campo de desplazamientos de la cara. En la práctica hay dos estrategias no excluyentes para disminuir el ruido. Una de ellas es el suavizado, que ajusta una superficie aproximada al conjunto de valores dados, para capturar las tendencias y patrones importantes de desplazamientos, y atenúa el ruido, principalmente el debido a la rugosidad superficial del proceso EDM. Actualmente un ajuste por splines bivariantes es el enfoque preferido. Otra alternativa es por medio de la elección de un plano de referencia. El plano sobre el cual se ha decidido realizar el corte inicialmente, no tiene relevancia luego de tomadas las medidas y será necesario elegir arbitrariamente un nuevo plano de referencia para poner a punto los desplazamientos. Normalmente el cero se localiza en la media del conjunto de datos medidos.

5-Inversión. De los pasos descritos se obtendrá una superficie con los datos de desplazamientos listos para aplicarse como condición de borde en un análisis estructural de elementos finitos para obtener tensiones residuales.

#### 4. ENSAYO EXPERIMENTAL

Para la validación y evaluación de la eficiencia de la metodología propuesta, se ha seleccionado los resultados de un ensayo experimental realizados por D'Elia et al, de una viga sometida a flexión que alcanza niveles de plastificación. En la Figura 2 izquierda se puede observar la probeta situada en la máquina de ensayos en tanto que, la Figura 2 derecha muestra las dimensiones de la probeta. El material utilizado en la probeta es un aluminio 7075-T651. Las propiedades mecánicas del material son: módulo de Young  $E = 71000\text{MPa}$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0,33$ , límite elástico  $\sigma_{\text{elás}} = 550\text{MPa}$  y módulo tangente elastoplástico  $E_p = 1200\text{MPa}$ . El lugar de aplicación de las cargas de la máquina de ensayos son los dos rodillos que se muestran en la Figura 2 derecha. Es en estos dos puntos donde la probeta alcanza un desplazamiento máximo de 1.2 mm. De esta forma se genera una deformación plástica y tensiones residuales en el centro de la probeta, donde se localizan los mayores esfuerzos.

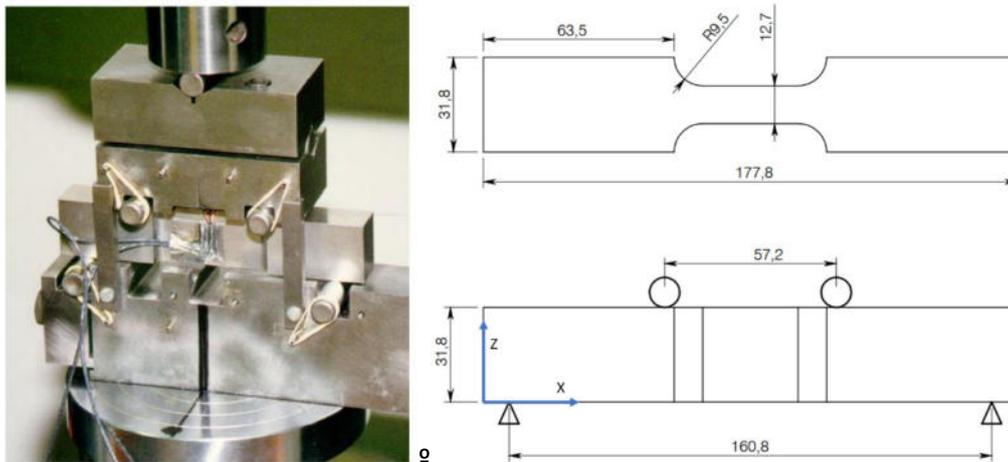


Figura 2: Experimento en una de flexión de cuatro puntos y dimensiones de la probeta ensayada tomadas del trabajo de D'Elía [4].

En la Figura 3-a se muestra la topografía de la superficie de las caras de corte de la probeta miradas en un plano paralelo al formado por los ejes Z-X, ver Figura 2. Como se puede observar, los datos de los desplazamientos generados por las tensiones residuales en ambas caras de las piezas cortadas son similares, lo que demuestra un correcto procedimiento experimental para llevar a cabo el corte de la probeta. La Figura 3-a muestra un patrón consistente con una deformación en flexión. Se tiene dos extremos locales de los desplazamientos situados aproximadamente en  $Z = 7,5$  mm y en  $Z = 25$  mm en tanto que, los valores máximos se sitúan en  $Z = 0$  mm y  $Z = 31,75$  mm, esto es, en la cara superior e inferior, respectivamente.

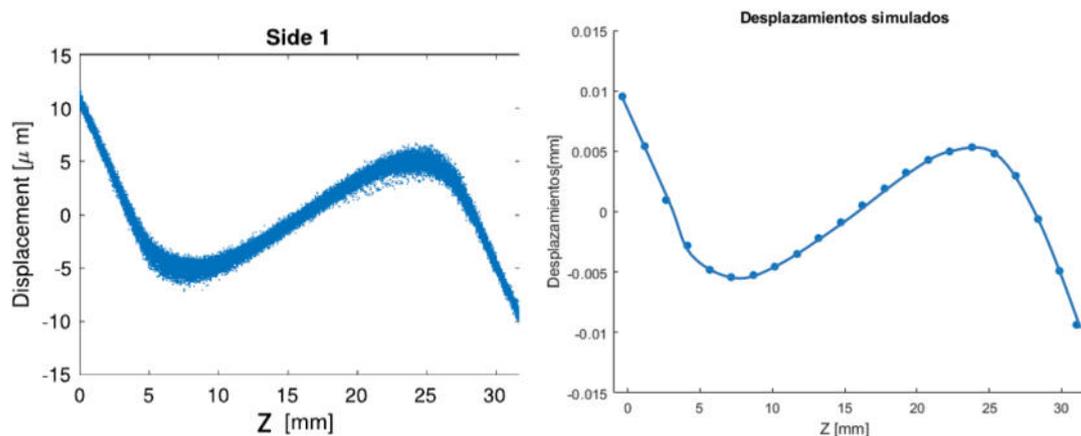


Figura 3: a) Superficie topográfica de las caras cortadas de la probeta [4]. b) Simulación con la metodología propuesta



## 5. DESARROLLO ANALÍTICO UTILIZADO PARA EL MÉTODO DE CONTORNO

El proceso analítico que se presenta en este trabajo consta de dos etapas principales, la primera es una simulación del ensayo real de la probeta donde se la somete a flexión, con el objetivo final de generar un estado de tensiones residuales con deformaciones permanentes en la zona central. En este trabajo, se validaron los desplazamientos reales con los virtuales obtenidos con la metodología propuesta. La segunda etapa, consiste en la aplicación del método de contorno para recrear dicho estado tensional a partir de las mediciones de los desplazamientos de la superficie de corte.

### 5.1 Etapa I. Obtención virtual de las tensiones residuales.

En la Figura 4-b se muestra un diagrama de flujo de las distintas tareas y subtareas que intervienen en el desarrollo de la primera etapa. Esta comienza generando la geometría de la probeta según las dimensiones de la Figura 2 izquierda. En este trabajo, la geometría fue realizada dentro del entorno de dibujo del programa de elementos finitos Samcef [2]. Luego, se introdujeron las condiciones de borde y de carga de modo de reproducir lo más fielmente posible las condiciones del ensayo que han sido descritas en la Sec. 3, éstas son:

- Fijaciones mínimas para impedir desplazamientos de cuerpo rígido. Se fija el desplazamiento de un nodo en la dirección Y en la zona de aplicación de la carga. Por otro lado, debido a la simetría de cargas y geometría, se impide el desplazamiento en la dirección X de los nodos de la cara central, ver Figura 5.
- Restricción del desplazamiento en la dirección Z en cada apoyo, ver Figura 5.
- Cargas aplicadas verticalmente en los rodillos con una magnitud tal que generen un desplazamiento vertical máximo de 1,21 mm hacia abajo.

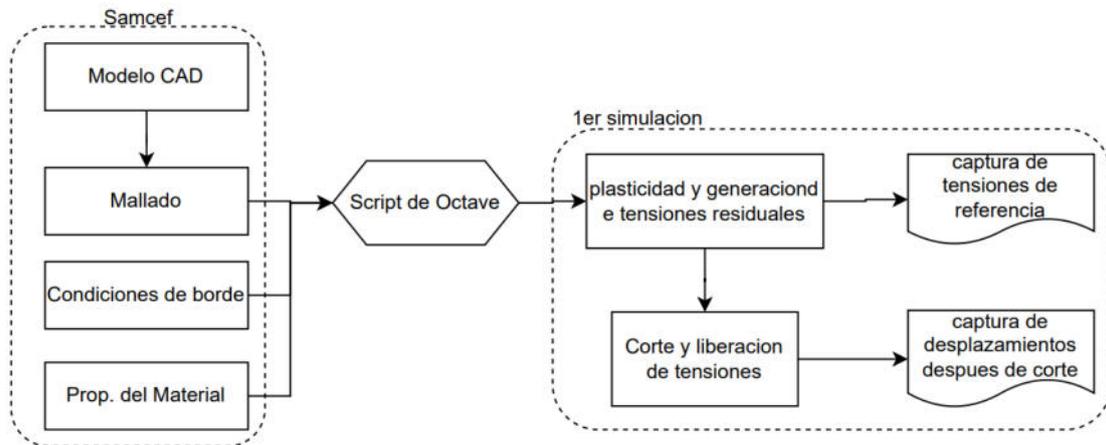


Figura 4: Diagrama de tareas de la primera etapa: simulación del ensayo a flexión para generar tensiones residuales internas en la probeta.

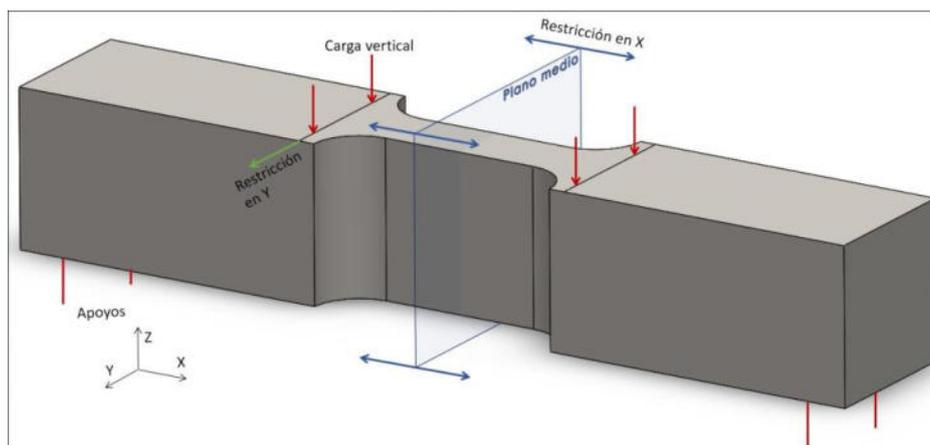


Figura 5: condiciones de borde impuestas para simular el ensayo a flexión, mostrando las cargas, apoyos y restricciones para eliminar movimientos de cuerpo rígido.

La discretización del dominio se realiza con elementos tetraedros lineales con una dimensión de los lados de 3 mm, en promedio. Luego, para captar con precisión los gradientes de tensiones, se aplicó un refinamiento en la zona cercana al plano de medición, esto es, en la mitad de la probeta, con elementos de tamaño de 1,5 mm en sus lados, en promedio. El modelo de la probeta está formado por dos sólidos separados que se encuentran unidos en la cara media por medio de un comando específico de Samcef [2] (Virtual Link) y una modificación al juego de datos de Samcef, (realizada ad hoc en Octave [3]), que permite vincular o desvincular todos los nodos de las caras de corte de ambas mitades de la probeta en forma automática para un determinado tiempo de simulación. Esta vinculación/desvinculación se realiza por medio de una unión rígida nodal basada en la aplicación de multiplicadores de Lagrange, ver [2]. En cuanto a las

propiedades mecánicas del material utilizadas para llevar a cabo las simulaciones, éstas fueron descriptas en la Sec. 4.

La simulación de la Etapa 1 consiste en reproducir el ensayo experimental, para ello aumenta progresivamente la carga aplicada en los rodillos hasta alcanzar un desplazamiento máximo de 1,2 mm y niveles de plastificación. Luego, la carga disminuye progresivamente hasta alcanzar un valor nulo y, por la plastificación, la probeta queda sometida a tensiones residuales. En este punto, se produce la desvinculación de los nodos ubicados en la cara media o cara de corte, simulando el proceso de corte que realiza el EDM y entonces, la pieza se deforma y las tensiones alcanzan una nueva posición de equilibrio. La Figura 6 a-b-c muestran las tensiones máximas en la dirección X, las tensiones residuales en la dirección X y las tensiones luego del corte en su nuevo estado de equilibrio, respectivamente. La Etapa I finaliza con el relevamiento de los desplazamientos nodales de la cara de corte, producto de la liberación de las tensiones.

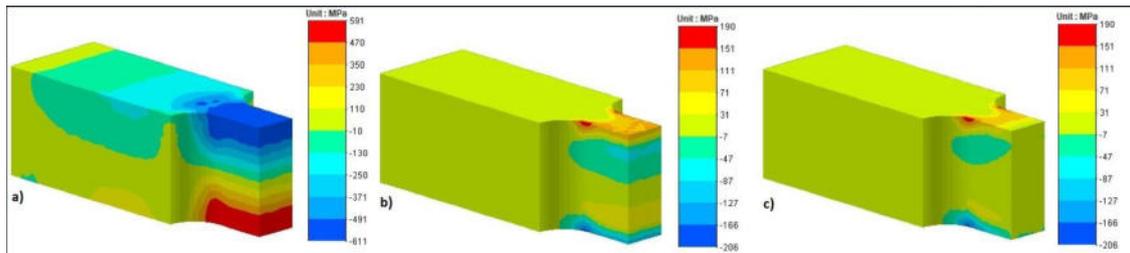


Figura 6: Representación de las tensiones en momentos relevantes del estudio: a) Máxima deflexión; b) tensiones residuales luego de alcanzar la plasticidad; c) tensiones remanentes luego del corte.

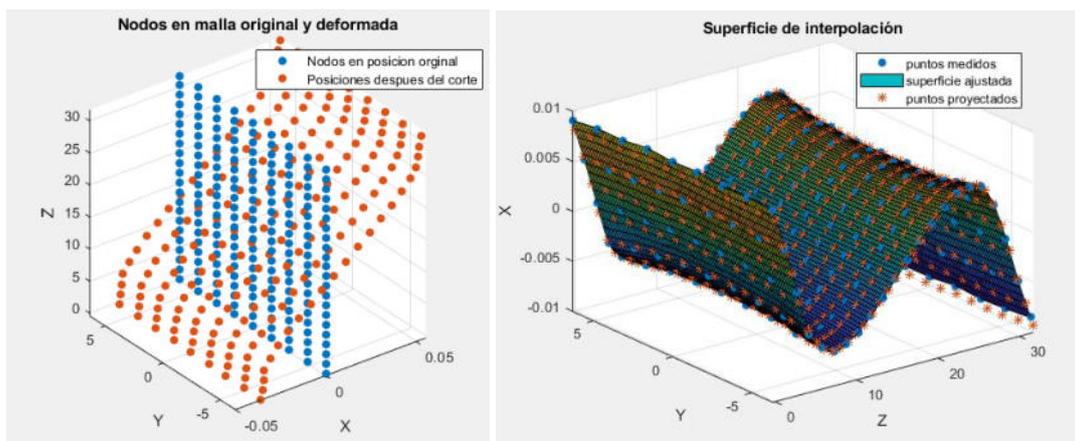


Figura 7. (a). Comparación entre los nodos pertenecientes al plano de corte antes (azul) y después del corte (naranja), mostrando los desplazamientos de los mismos. (b) Superficie de interpolación formada a partir de los desplazamientos medidos luego del corte.

En la Figura 7a se puede observar las coordenadas iniciales de los nodos en el plano de corte, y luego, las posiciones finales producto de las tensiones residuales. Esta topografía sería la misma que se obtendría mediante las mediciones con la CMM en un laboratorio, por lo que representa un justo punto de partida para el desarrollo de la aplicación del método de contorno que aquí se presenta.

Sin embargo, para poder validar el campo de desplazamientos con los registrados en forma experimental, ver Figura 3-a, es necesario realizar un procesamiento de resultados. En primer lugar, es necesario un ajuste con un plano medio de los desplazamientos, para eliminar los movimientos de cuerpo rígido que surgen de la deformación de la probeta en la simulación, seguidamente se recomienda tratar de reducir los posibles ruidos y defectos propios de la medición, pero como en este caso se trata de un corte virtual, este paso no es necesario. La Figura 7b muestra el desplazamiento de los nodos con puntos circulares de color azul y, la superficie interpolante de estos desplazamientos, luego del procedimiento de ajuste. Finalmente, la Figura 3-b muestra la validación numérica y experimental del campo de desplazamientos luego de este tratamiento de datos, que como se puede ver tienen muy buena correlación.

## 5.2 Etapa II. Utilización del método de contorno

Hasta aquí se tiene información de las tensiones residuales internas como así también de los desplazamientos nodales de la superficie deformada del plano de corte. Para validar el cálculo de las tensiones residuales, se debe realizar una segunda simulación, esta vez con una hipótesis lineal elástica siguiendo las tareas de la Etapa II que se detallan en el cuadro de la Figura 8.

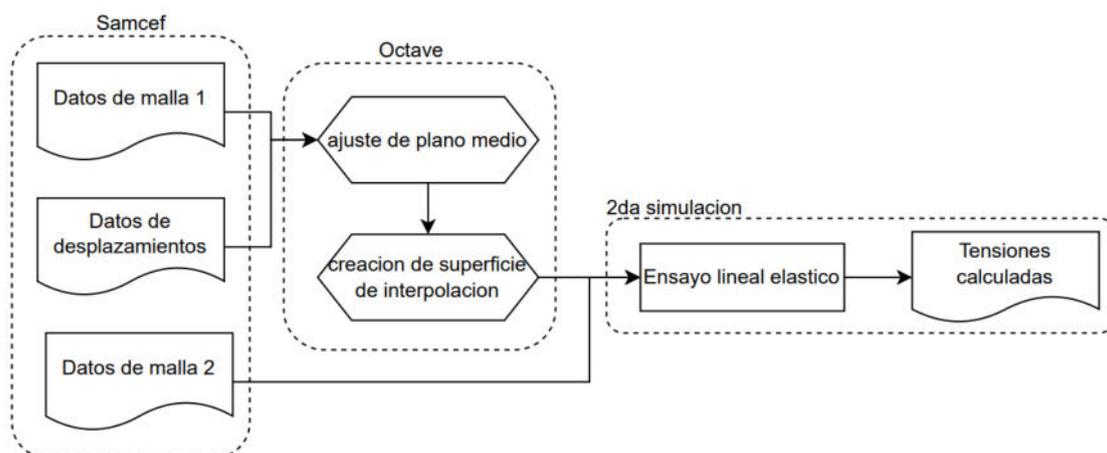


Figura 8: Diagrama de tareas de la segunda etapa. Partiendo de la deformada se aplica el método de contorno.

Para ello, se toma la mitad de la geometría de la probeta manteniendo las mismas propiedades mecánicas del material descritas en la Sec. 4. Luego, se realiza un análisis lineal, imponiendo los desplazamientos obtenidos de la Etapa I en la cara de corte de la media probeta. Estos

desplazamientos producen esfuerzos internos que no son otra cosa que las tensiones residuales. Si la metodología propuesta es correcta, las tensiones obtenidas deberían ser equivalentes a las tensiones residuales de la Figura 6 calculadas en la Etapa I. La discretización del dominio se realiza con elementos finitos con un tamaño diferente al seleccionado en la Etapa 1. En este trabajo se ha utilizado un grado de refinamiento mayor para el modelo de la segunda etapa, con elementos tetraédricos de 1mm de lado medio. Por lo tanto, debido a la diferencia de tamaño de los elementos de las mallas, las posiciones de los nodos de la cara de corte no son coincidentes entre los modelos de las Etapas I y II, por lo cual, los desplazamientos de los nodos obtenidos en la Etapa I, (que tienen que ser aplicados en la nueva malla propuesta en la Etapa II), deben ser obtenidos a partir de la superficie interpolante que se muestra en la Figura 7b. En este sentido, la Figura 7b muestra en puntos rojos los desplazamientos calculados en la Etapa I y que deben aplicarse en el modelo de la Etapa II. La magnitud de estos desplazamientos se obtiene a partir de la proyección de la posición de los nodos de la malla del modelo de la Etapa II en la superficie de interpolación. Finalmente, la Figura 9 muestra la comparación de las tensiones residuales obtenidas en la Etapa I y las calculadas con el método de contorno en la Etapa II vistas en un plano paralelo al formado por los ejes X-Z de la sección media de la probeta. Como se puede observar, el campo de tensiones tiene muy buena correlación, lo que señala la validez y aplicación exitosa del método.

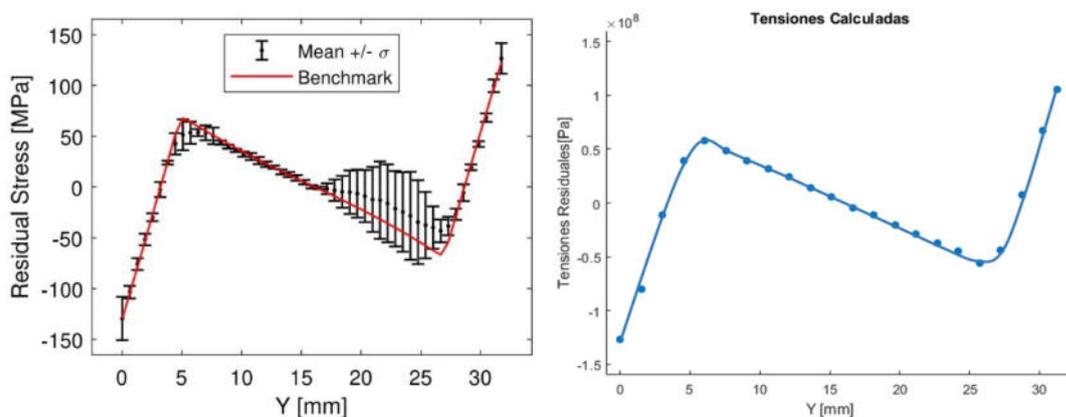


Figura 9: comparación entre las tensiones de referencia obtenidas de la primera simulación (azul) y las obtenidas a partir de la aplicación del método de contorno (naranja).



## CONCLUSIONES

La metodología desarrollada en este trabajo para la determinación de tensiones residuales basada en el método de contorno ha sido validada exitosamente con resultados de bibliografía y con simulaciones numéricas. Se destaca que el método de contorno es capaz de medir un mapa de tensiones residuales en dos dimensiones con costos relativamente bajos comparados con otras técnicas. Esto es, no es necesario la utilización de galgas extensiométricas u otro equipo de elevada complejidad. En cuanto al programa de elementos finitos necesario para llevar a cabo los cálculos analíticos requiere únicamente de la disposición de un módulo lineal y no lineal (cálculo elasto-plástico). En consecuencia, un programa de estas características puede ser obtenido fácilmente de la web con licencia de uso libre. Es por eso que, la metodología desarrollada resulta atractiva para aquellas industrias nacionales PYMES que se encuentren en la necesidad de bajar sus costos de diseño en aquellas piezas donde el conocimiento del valor de las de tensiones residuales resulta un factor clave para un desempeño exitoso del producto que comercializan.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido financiamiento del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) PIP11220200101688CO y de la Universidad Tecnológica Nacional PID-UTN AMECAFE0008102TC.

## REFERENCIAS

- [1] Korsunsky A.M. *A Teaching Essay on Residual Stresses and Eigenstrains*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2017.
- [2] SAMCEF. *Siemens PLM Software*. LMS Samtech, Samcef Field Version 17, 2015.
- [3] John W. Eaton, David Bateman, Søren Hauberg, Rik Wehbring. *GNU Octave version 3.8.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations*. CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN 1441413006, 2014.
- [4] D'Elia C.R., Carlson S.S., Stanfield M.L., Prime M.B, Araújo de Oliveira J., Spradlin T.J. & Lévesque J.B., Hill. M.R. *Interlaboratory Reproducibility of Contour Method Data Analysis and Residual Stress Calculation*. *Experimental Mechanics*, 60:833–845, 2020.
- [5] Prime M.B. *Cross-Sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour after a Cut*. *J. Eng. Mater. Tech* 123:162–168, 2001.
- [6] Bueckner, H.F. *The Propagation of Cracks and the Energy of Elastic Deformation*. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 80, pp. 1225-1230, 1958.



## ESTUDIO DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DE COLADA EN EL ATRAPE DE POLVO COLADOR EN LA COLADA CONTINUA DE PLANCHONES

Javier Sola<sup>1</sup>, Guillermo Diaz<sup>1</sup> y Elena Brandaleze<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento Metalurgia, Facultad Regional San Nicolás, Colón 332, San Nicolás, Argentina.  
jsola@frsn.utn.edu.ar.

### RESUMEN

El proceso de colada continua constituye una de las vías más importantes para la producción de acero en el mundo. El sistema de buza sumergida utilizado en este proceso es un claro ejemplo donde la mecánica de los fluidos es clave, un correcto flujo permite mantener las temperaturas deseadas en los lugares indicados, evita la formación de turbulencia excesiva lo cual promueve los defectos en los productos y también reduce los costos de mantención. En este trabajo se aplicaron las herramientas computacionales de dinámica de los fluidos (CFD) con el fin de evaluar la susceptibilidad al defecto de atrapamiento del fundente del molde en relación con la velocidad de colada y la variación del ancho del molde. La información obtenida permite predecir las condiciones de operación que podrían aumentar el riesgo de atrapamiento del fundente del molde durante el proceso de colada continua de acero HSLA para las condiciones industriales seleccionadas y se considera relevante para el procesamiento de planchones de acero en la industria siderúrgica.

**Palabras Clave:** *Atrape Polvo Colador, Simulación numérica, Fluido dinámica*



## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de colada continua es el más utilizado en la industria siderúrgica, dado que más del 95% de la producción mundial de acero es a través de esta tecnología. Este proceso consiste en introducir el acero líquido (que proviene en una cuchara desde la acería) a un distribuidor y luego mediante una buza sumergida (SEN), dentro de un molde de cobre refrigerado con agua para iniciar la solidificación del producto.

Los polvos coladores, son insumos muy importantes, que se aplican en el molde para procesar los productos colados. Consisten en escorias sintéticas, formadas por una mezcla compleja de óxidos, minerales y materiales carbonosos. Se adicionan por la parte superior del molde de forma manual o automática, cubren el metal líquido formando lo que se denomina “pileta líquida de polvo colador” y además rodean la buza sumergida y cubren las paredes del molde. Estos polvos cumplen con una serie de funciones críticas para el proceso mencionado como ser lubricante, aislante, etc.

Los factores importantes que alteran las condiciones de proceso: velocidad de colada, ancho del molde, temperatura de sobrecalentamiento y el diseño de la buza sumergida. Si se alteran estas variables operativas se pueden generar problemas de perturbaciones en la pileta líquida de polvo colador que pueden producir el fenómeno de atrape del mismo dentro del acero [1 2]. La turbulencia del flujo de acero líquido en la interfaz con la pileta líquida de polvo colador, se relaciona con: la profundidad de la buza, la velocidad de colada y las propiedades físicas del polvo colador (viscosidad y tensión superficial) a las temperaturas de proceso [1].

En este trabajo, se realizan diversas simulaciones con ANSYS FLUENT, contemplando distintas configuraciones de ancho de molde y velocidad de colada. Además, se simulan variaciones de la velocidad de colada en el rango habitual de la práctica operativa en las acerías. Estas condiciones permiten comprender en mayor profundidad los efectos del flujo de acero sobre los fenómenos de turbulencia que se producen en el sistema [3].

Para la turbulencia del acero fundido dentro del molde se usa el modelo  $K-\Omega$  SST durante los primeros 90 segundos para desarrollar un flujo aproximado y luego se pasa al modelo LES (Large Eddy Simulation) para lograr calcular los vórtices de mayor escala.

El valor de la viscosidad del acero se estableció en 0.0271 a 0.0298 Pa.s [5].

La caracterización del polvo colador incluye diferentes aspectos tales como: determinación de las temperaturas críticas de fusión, valores de viscosidad y tensión superficial (en las condiciones de interés) y la tendencia a la cristalización durante el enfriamiento. Las propiedades físicas se determinaron mediante pruebas experimentales y simulaciones termodinámicas (aplicando Fact Sage 8.1) [6, 7].



## 2. EXPERIMENTAL

Para este estudio, se seleccionó un acero HSLA con características específicas, siendo un acero B-Ti con alto contenido de boro (aproximadamente 42 ppm de B y 32 ppm de N). La composición química detallada del acero se muestra en la Tabla I. En cuanto a los parámetros de operación utilizados en el proceso de colada continua, se estableció una temperatura de colada ( $T_c$ ) de 1530°C y se consideraron seis velocidades de colada: 1 m/min, 1,2 m/min, 1,4 m/min, 1,5 m/min y 1,8 m/min. En ambos casos, se consideró una profundidad de inmersión del SEN (nozzle immersion depth) de 100 mm.

Por otro lado, el polvo de molde utilizado en el estudio posee una composición química específica, la cual se detalla en la Tabla II.

Tabla 1. Composición química del acero HSLA

Elementos	% Wt.
C	0.30
Mn	1.46
Si	0.17
Ti	0.035
P	0.015
S	0.0039
B	0.0042
N	0.0032

Tabla 2 Composición química del polvo colador

Componentes	% Wt.
SiO <sub>2</sub>	33.0
CaO	29.0
MgO	1.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.30
Na <sub>2</sub> O+ K <sub>2</sub> O	9.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.57
MnO	0.10
F	9.11
TiO <sub>2</sub>	0.05

Es importante destacar que el uso de un modelo CFD multifásico que considere una superficie libre y una alta resolución de vórtices puede requerir una capacidad computacional significativa, especialmente en el caso de modelos en 3D. Por esta razón, se optó por utilizar un modelo en 2D para este estudio. La Figura 1 ilustra este modelo, mostrando el dominio de simulación y las condiciones de contorno utilizadas.

Para definir el dominio, se emplearon dos geometrías diferentes: una representando un ancho de colada de 900 mm y otra con un ancho de colada de 1600 mm. En ambos casos, se consideró una profundidad de inmersión de la buza de 100 mm.

La presión atmosférica sobre la superficie libre se fijó en  $P=101325$  Pa. La condición de salida considerada es la presión total (presión estática + presión dinámica) en el molde. La condición de contorno de la pared se adoptó como cortante sin deslizamiento. El mallado se realizó con elementos cuadriláteros predominantes y refinando las zonas críticas como las interfaces aire/polvo y acero-polvo, para lograr una mayor precisión de los vórtices en estas áreas. La Figura 2 muestra la malla, con el refinamiento realizado en la zona de interés.

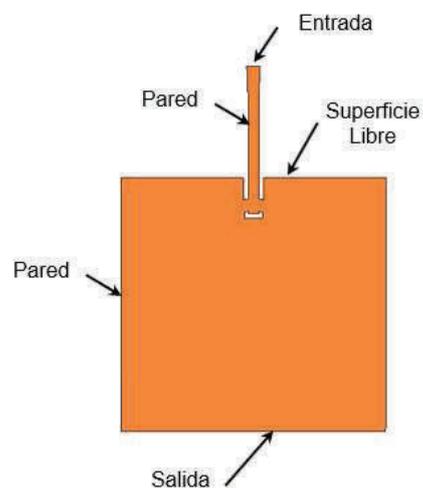


Figura 1: Dominio y condiciones de contorno.



Figura 2: Malla utilizada, mostrando un detalle del refinamiento en la interfase.



En la simulación del sistema de acero, polvo colador y aire, se utilizó el modelo Volume of Fluid (VOF) basado en investigaciones previas informadas en [8].

El Volume of Fluid (VOF) es un método numérico utilizado en la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) para resolver problemas de flujo multifásico, donde se estudia la interacción y el movimiento de dos o más fluidos inmiscibles. Este método se utiliza para rastrear y representar la interfaz entre las fases de manera precisa.

En el método VOF, se asigna un valor de fracción de volumen a cada celda de la malla. La fracción de volumen indica la proporción del volumen de una celda ocupado por un fluido específico en una ubicación determinada. La suma de todas las fracciones siempre debe dar la unidad.

Se utilizó una condición fuerte del tratamiento de interface lo cual se refiere a una técnica utilizada para resolver problemas que involucran la interacción de dos o más fases o fluidos en una simulación. El tratamiento fuerte implica que se aplican ecuaciones de conservación y modelos físicos separados a cada fase o fluido en la simulación, teniendo en cuenta las propiedades y comportamientos específicos de cada una.

Las fases se establecieron en una capa de aire de 300 mm y la capa polvo colador de 3 mm, por encima del acero uniformemente distribuidas y por debajo de la superficie libre, ver figura 3.

Para abordar una solución precisa de la turbulencia, se realizó la simulación en 2 etapas:

**Etapas A:** Consiste en una corrida con el modelo K-omega SST durante los primeros 90 segundos para desarrollar un flujo aproximado. En el modelo K-omega SST, se resuelven dos ecuaciones de transporte de turbulencia: la ecuación de energía cinética turbulenta (K) y la ecuación de disipación específica de la turbulencia (omega). Estas ecuaciones representan la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de la turbulencia, respectivamente. Cabe aclarar que este modelo no resuelve el campo de velocidades debido a la turbulencia, sino que utiliza un promedio de las velocidades en el tiempo.

La característica distintiva del modelo K-omega SST es su capacidad para manejar tanto flujos en capas límite como flujos separados. Utiliza el modelo K-epsilon en la región cercana a la pared (capa límite) y el modelo omega en la región de flujo libre (lejos de la pared) para capturar de manera precisa los efectos de la turbulencia en diferentes regiones del flujo. Esto permite una mejor predicción de fenómenos complejos, como la transición de flujo laminar a turbulento, la separación del flujo y la recirculación.

**Etapas B:** A partir de los resultados de la primera etapa se efectúa una segunda corrida, pero esta vez cambiando al modelo de turbulencia LES (Large Eddy Simulation) para completar la simulación [3]. El modelo LES puede capturar detalles del movimiento transitorio con precisión.



A diferencia de los modelos de turbulencia de tipo RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), (K-epsilon, K-omega SST) que promedian las propiedades turbulentas en el tiempo, el modelo LES resuelve directamente las grandes escalas de turbulencia y modela las pequeñas escalas.

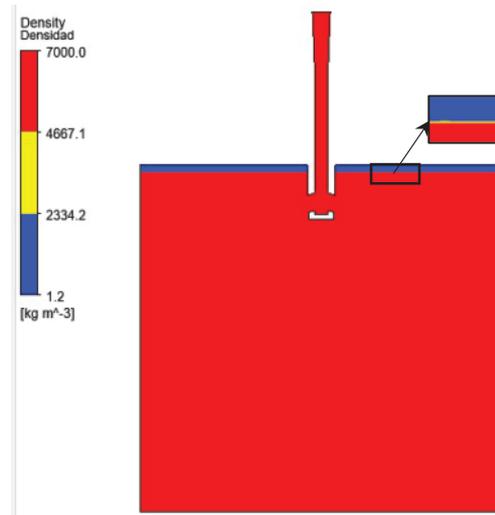


Figura 3 Diagrama de densidades de líquidos

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tensión interfacial ( $\gamma_{ms}$ ) en el sistema polvo colador/acero tiene varias influencias, como la susceptibilidad al atrapamiento del fundente de molde, la forma del menisco y las características de las marcas de oscilación. Una alta tensión interfacial ( $\gamma_{ms}$ ) reduce el riesgo de atrapamiento. En este estudio, se utilizó un valor de  $\gamma_{ms} = 164.2$  mN/m, obtenido mediante medidas del ángulo de contacto en el ensayo experimental HSM a  $1400^{\circ}\text{C}$ .

Los resultados de la simulación revelan tres fuerzas dominantes en el atrapamiento del polvo colador. Dos de ellas son fuerzas estabilizadoras: la fuerza de flotación ( $F_f$ ) y la fuerza de tensión superficial ( $F_\gamma$ ), que depende de las propiedades físicas del acero y el polvo colador. La tercera fuerza es la fuerza de inercia, que actúa como una fuerza desestabilizadora y depende del flujo de las fases en la interfaz (polvo colador-acero), favoreciendo el atrapamiento. Esta fuerza de inercia está determinada por la diferencia de velocidad y espesor entre los lados de la capa de mezcla, causada por el fenómeno de cizallamiento presente en la interfase. También se observa un gradiente de velocidad a ambos lados de la capa de mezcla.

La fuerza de flotación es promovida por la diferencia de densidad entre el acero y el polvo colador. Cuanto mayor es el gradiente de densidad, más estable se vuelve la interfaz, por lo que se considera una fuerza estabilizadora. En la interfaz polvo colador/acero, el polvo fundido forma una película con tensión superficial debido a la atracción molecular de las moléculas internas presentes en el volumen de la fase líquida. Esta fuerza de tensión superficial ( $F_\gamma$ ) actúa como

una fuerza estabilizadora durante cualquier perturbación externa en la interfaz. La figura 4 muestra las fases presentes en el sistema y las diferentes fuerzas.

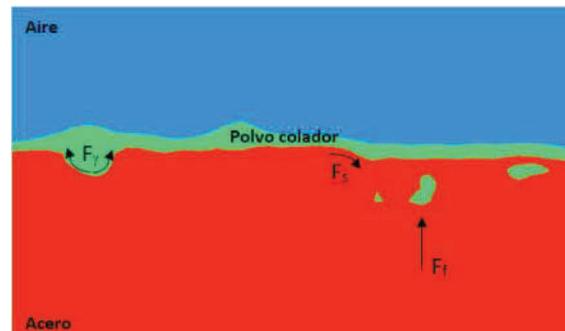


Figura 4: Fases y fuerzas presentes en el sistema polvo colador - acero

En las Figuras 5 (a) y (b), 6 (a) y (b) y 7 (a) y (b), se muestran los resultados de simulación obtenidos para diferentes velocidades de colada (1 m/min, 1,2 m/min y 1,4 m/min) y anchos de molde (900 mm y 1600 mm). Se observa que la interfaz no presenta perturbaciones superficiales relevantes, lo que sugiere que la susceptibilidad al atrapamiento del polvo colador es insignificante y no se ve afectada por el ancho del molde a estas velocidades de colada.

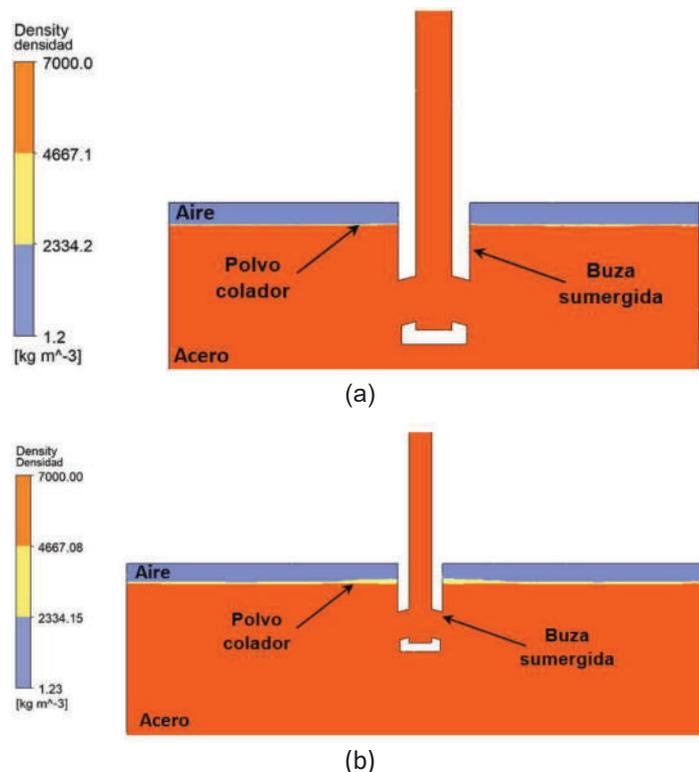


Figura 5: Diagrama de densidad/vector velocidad obtenido para la velocidad de colada 1 m/min. (a) anchos de molde 900 mm y (b) anchos de molde 1600 mm.

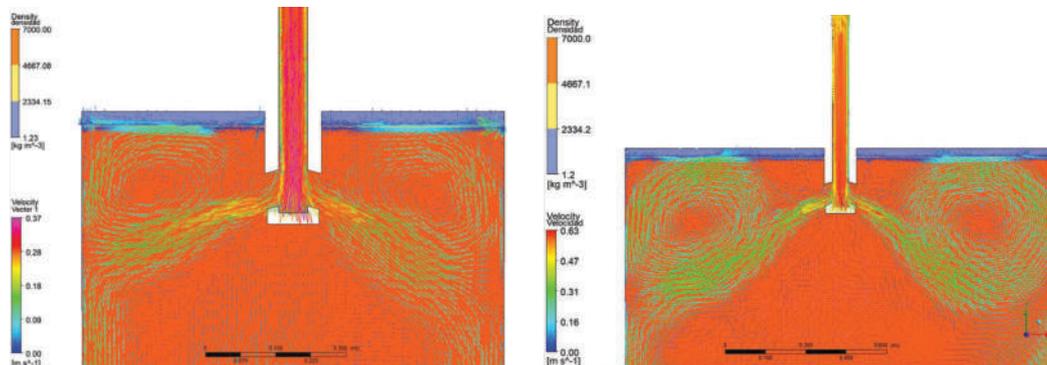


Figura 6: Diagrama de densidad/vector velocidad obtenido para la velocidad de colada 1,2 m/min. (a) anchos de molde 900 mm y (b) anchos de molde 1600 mm.

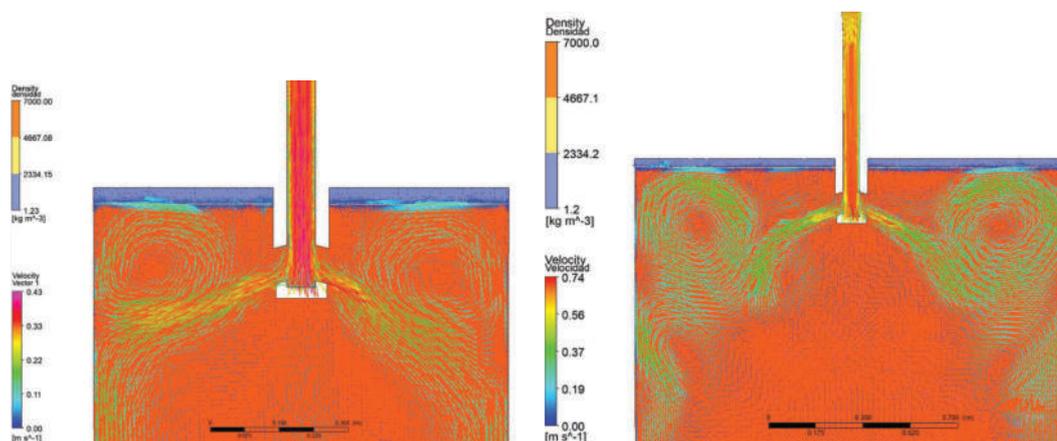


Figura 7: Diagrama de densidad/vector velocidad obtenido para la velocidad de colada 1,4 m/min. (a) anchos de molde 900 mm y (b) anchos de molde 1600 mm.

Las Figuras 8 (a) y (b), y 9 (a) y (b) muestran los diagramas de vectores de velocidad y densidad obtenidos de las simulaciones realizadas a velocidades de colada de 1,5 m/min y 1,8 m/min, para ambos anchos de molde. En estos casos, se observa una perturbación superficial considerable, lo que indica la posibilidad de que ocurra atrapamiento del flujo del molde. Además, en las figuras correspondientes al ancho del molde de 900 mm se aprecia que el impacto del chorro en la pared del molde induce un patrón de flujo diferente al observado para el ancho de 1600 mm, a pesar de tener la misma velocidad de colada. Para el molde de 900 mm se observan dos grandes recirculaciones por encima y por debajo del chorro de fluido, lo que sugiere la formación de un doble rodillo, mientras que para el ancho de 1600 mm se predice un patrón de flujo de un solo rodillo. En ambos casos, la perturbación superficial aumenta y los valores del vector de velocidad presentan variaciones considerables entre ambos casos. La zona crítica donde existe una mayor

posibilidad de atrapamiento del polvo colador se encuentra cerca del SEN. En cada imagen se muestra ampliada la zona de la interface.

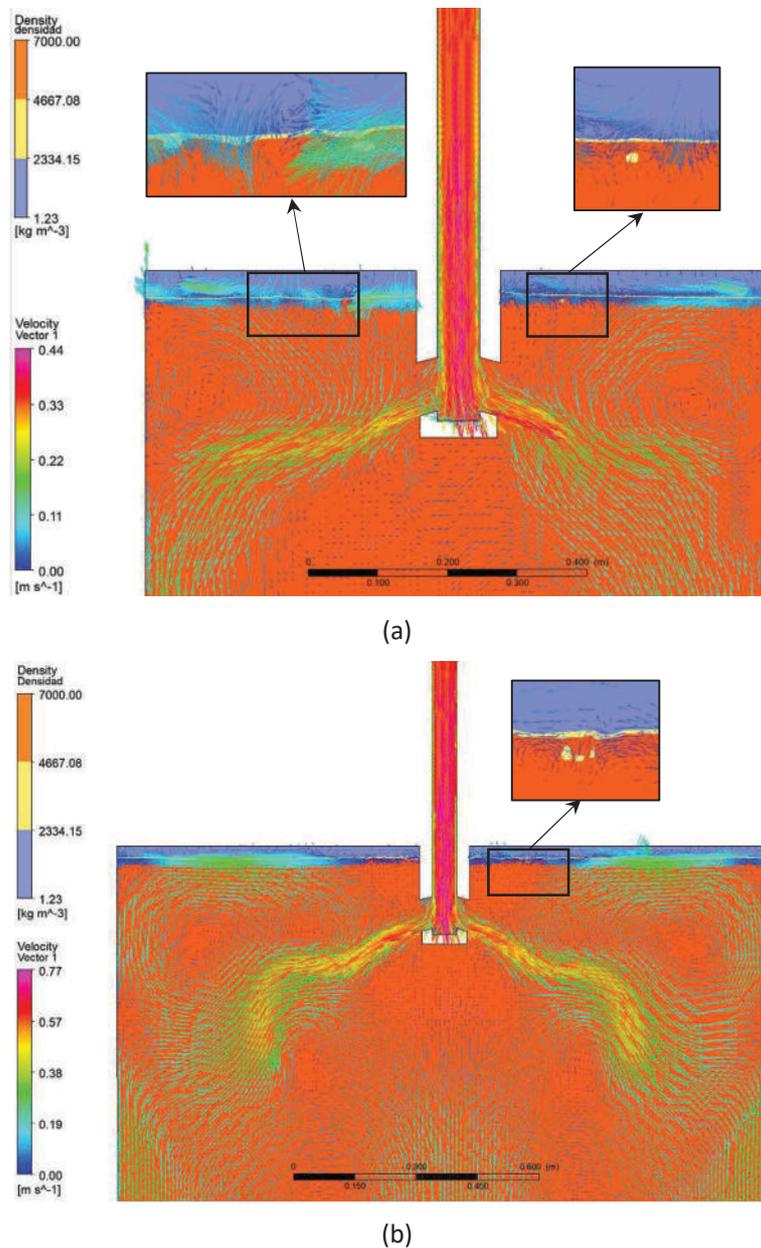


Figura 8: Diagrama de densidad/vector velocidad obtenido para la velocidad de colada 1,5m/min. (a) anchos de molde 900 mm y (b) anchos de molde 1600 mm.

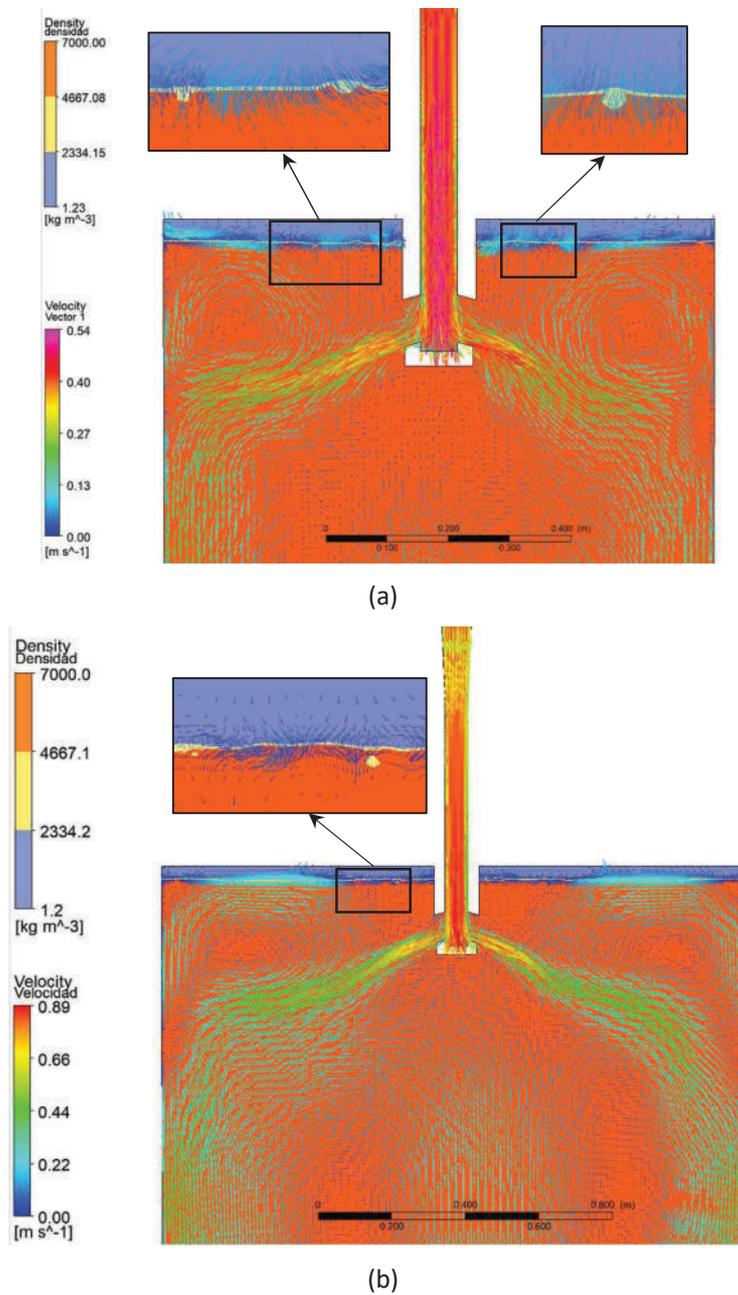


Figura 9: Diagrama de densidad/vector velocidad obtenido para la velocidad de colada 1,8m/min. (a) anchos de molde 900 mm y (b) anchos de molde 1600 mm.



#### 4. CONCLUSIONES

##### CONCLUSIONES

Los resultados de la simulación indican que el acero HSLA puede evitar el atrapamiento del polvo colador para los anchos de molde de 900 mm y 1600 mm, siempre que la velocidad de colada sea inferior a 1,5 m/min y considerando una profundidad de inmersión SEN de 100 mm. Sin embargo, a velocidades de colada superiores a 1,5 m/min para la misma profundidad de inmersión SEN (100 mm), existe la posibilidad de que ocurra el atrapamiento del polvo colador, en el caso del polvo colador utilizado en este estudio. Los resultados también muestran que la velocidad de colada de 1,8 m/min es la más crítica para el sistema de acero analizado y el polvo colador seleccionado. A medida que aumenta la velocidad de colada, aumenta la susceptibilidad al atrapamiento. Es posible que, para condiciones críticas de velocidad de colada, sea necesario seleccionar otro tipo de polvo colador para evitar riesgos de defectos.

La simulación computacional se ha demostrado como una herramienta muy útil para obtener información sobre los fenómenos fluidodinámicos presentes en el proceso de colada continua, los cuales son complejos de estudiar de otra manera. La metodología aplicada en este estudio ha mostrado una alta precisión y una eficiencia confiable para abordar el problema del atrapamiento del polvo colador, y podría utilizarse para predecir defectos en los productos o evaluar el impacto de diferentes tipos de polvo colador y cambios en las variables del proceso.



## REFERENCIAS

- [1] K.C. Mills, C. Å Däcker, Using Mould Fluxes to Minimize Defects and Process Problems, 1<sup>st</sup> ed., vol 1. Springer, 2017. pp. 417-536.
- [2] E. Brandaleze, G. Di Gresia, L. Santini, A. Martin and E. Benavidez, Mould Fluxes in the Steel Continuous Casting Process, 1<sup>st</sup> ed., vol.1. In Tech, 2012. pp.201-233.
- [3] B.G. Thomas, "Modeling of the Coninuous Casting of Steel-Past, Present and Future," Electric Furnace Conference Proc. ISS, vol. 59, pp. 271-350, March 2002
- [4] W.R.Irving, Continuous casting of steel, The Institute of Materials, , 1<sup>st</sup> ed., vol.1. In The University Press, Candbridge, 1983. pp. 93-155.
- [5] M. Ślęzak, M. Warzecha, "Investigation of Liquid Steel Viscosity and Its Impact as the Initial Parameter on Modeling of the Steel Flow through the Tundish," Materials, vol. 13, 5025, pp.1-20, November 2020.
- [6] K.C. Mills, A.B. Fox, R.P. Thackray and Z. Li, "The performance and properties of mould fluxes," VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts," The South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 713-722, Agoust 2004.
- [7] E. Brandaleze, M. Valentini, L. Santini, E. Benavidez, "Study on fluoride evaporation from casting powders," Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 133, pp. 271-277, April 2018
- [8] A. Cwudziński, J. Jowza, P. Przegrąlek, "Interaction of liquid steel with mould flux in continuous casting bloom mould-numerical simulations and industrial experiences," Arch. Metall. Mater., vol. 61, 4, pp. 2013-2020, December 2016.



## ENSAYOS MECÁNICOS EN MATERIALES COMPUESTOS CON CONCENTRACIÓN DE TENSIONES: REVISIÓN DE LA LITERATURA

Victor Huaman<sup>1</sup>, Fernando de Azevedo<sup>2</sup> y Victor Gamarra<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departamento de Mecánica (DME) – Universidad estatal de Sao Paulo (UNESP) – Facultad de Ingeniería de Guaratinguetá (FEG), Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Pedregulho, Guaratinguetá – São Paulo, Brasil

-----  
<sup>1</sup>victor.huaman@unesp.br <sup>2</sup>fernando.azevedo@unesp.br <sup>3</sup>victor.rosado@unesp.br

### RESUMEN

Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre la concentración de tensiones en materiales compuestos de las referencias bibliográficas de la fuente Scopus. La investigación es de naturaleza descriptiva porque revisamos y comparamos los casos estudiados. La principal aportación de este trabajo es obtener relación y discusiones entre los resultados de los autores aplicados en sus métodos experimentales. Existen discontinuidades geométricas en los cuerpos estructurales y las elevadas tensiones locales pueden determinar el fallo de un elemento resistente; por ello, hoy en día es objeto de estudio, el de minimizar las tensiones en los cuerpos sólidos. El objetivo de esta revisión es analizar los resultados vía ensayos mecánicos de tracción uniaxial obteniendo las tensiones máximas respecto a la deformación: local, desplazamiento y porcentual obtenidos de los artículos científicos publicados durante los últimos 6 años.

**Palabras Clave:** *Ensayos mecánicos, materiales compuestos; concentración de tensiones.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La sociedad que avanza tecnológicamente está desafiando continuamente los límites de materiales convencionales; requiriendo mejor rendimiento estructural de los materiales ante la necesidad industrial. Los proyectos de la industria actual exigen a diseñar materiales que no son posibles con los métodos de aleación convencionales. Los materiales compuestos forman un sistema de material compuesto por una mezcla o combinación y son insolubles entre sí. Los materiales compuestos pertenecen a una clase de materiales diseñados específicamente para afrontar este desafío. Los materiales compuestos de matriz de resina reforzados con fibra de vidrio se introdujeron por primera vez a principios de la década de 1940. Desde entonces, el uso de los compuestos está creciendo constantemente en diversas industrias como la aeronáutica, naval, automotriz, artículos deportivos, etc. Algunas de las ventajas de los compuestos incluyen alta resistencia específica, alta rigidez específica, resistencia a la fatiga y al impacto, conductividad térmica, resistencia a la corrosión y buena estabilidad dimensional. Los materiales compuestos son generalmente diseñados para poseer ciertas propiedades específicas deseables en esa aplicación. Se puede obtener una combinación inusual de propiedades no fácilmente obtenibles con aleaciones como mayor tenacidad a la fractura, mayor resistencia a la oxidación y a la corrosión, propiedades direccionales, buena resistencia al calor, al frío y a la humedad, facilidad de fabricación y bajo costo; por supuesto, no todos juntos simultáneamente [8]. Los materiales compuestos modernos, dependiendo de los materiales de matriz utilizados, se clasifican según matriz y según la morfología y configuración del refuerzo (Figura 1).

Según, Callister y Rethwisch (2018), los materiales utilizados en aplicaciones de alta tecnología se denominan materiales avanzados. Por lo general, estos materiales avanzados son materiales tradicionales cuyas propiedades se han mejorado, así como materiales de alto rendimiento que se han desarrollado recientemente. Además, pueden pertenecer a todo tipo de materiales (por ejemplo, metales, cerámica, polímeros) y son generalmente de alto costo. Los materiales avanzados incluyen semiconductores, biomateriales y lo que podríamos llamar "materiales del futuro" (es decir, materiales inteligentes y materiales de nanoingeniería). Estos materiales se utilizan en circuitos integrados, almacenamiento magnético de información, en pantallas de cristal líquido (LCD) o pantalla de cristal y fibras ópticas [3]. Además, Pilkey et al (2020), mencionan que miles de materiales se utilizan en aplicaciones de ingeniería y pueden clasificarse en función de distintos criterios. Por ejemplo, las fuerzas de enlace atómico varían en los distintos materiales, por lo que los materiales se clasifican como metálicos, cerámicos o poliméricos en función de las propiedades de enlace; además, la combinación de distintos materiales forma un material compuesto. Adicionalmente señala que, en el diseño de ingeniería, el análisis de tensiones se utiliza para determinar la distribución de las tensiones e identificar características y lugares críticos con mayor posibilidad de falla. El objetivo del análisis de tensión



es garantizar que el diseño de una estructura pueda soportar cargas específicas con una vida útil determinada, utilizando la cantidad mínima de material o área superficial, con los criterios óptimos. El análisis de tensión se puede realizar a través de técnicas matemáticas clásicas, modelos matemáticos analíticos, simulación computacional, pruebas experimentales o una combinación de métodos [10].

Además, Taheri-Behrooz et al (2017) mencionan que los agujeros son características necesarias de muchos componentes estructurales. La concentración de tensiones provocadas por la discontinuidad geométrica del componente controla la resistencia y la vida a fatiga de la estructura. El factor de concentración de tensiones (SCF) alrededor de un agujero se define como la tensión tangencial máxima, dividida por la tensión aplicada. El concepto de SCF en materiales anisótropos fue desarrollado por primera vez por Lekhnitskii y Savin en la década de 1960. Utilizaron una variable compleja para analizar el campo de tensiones y dieron una solución analítica de forma cerrada para obtener el campo de tensiones en una placa anisótropa infinita que contiene un agujero [15].

Los ensayos mecánicos, son métodos de pruebas de carga a fin de evidenciar el comportamiento estructural del componente como indica la norma ASTM D5766/D5766M – 11, este método de prueba determina la resistencia a la tracción en agujero pasante de laminados compuestos de matriz de polímero multidireccional reforzados con fibras de alto módulo. Las formas del material compuesto se limitan a compuestos reforzados de fibra continua o fibra discontinua (cinta o tela, o ambos) en los que el laminado está equilibrado y simétrico con respecto a la dirección de la prueba [1].

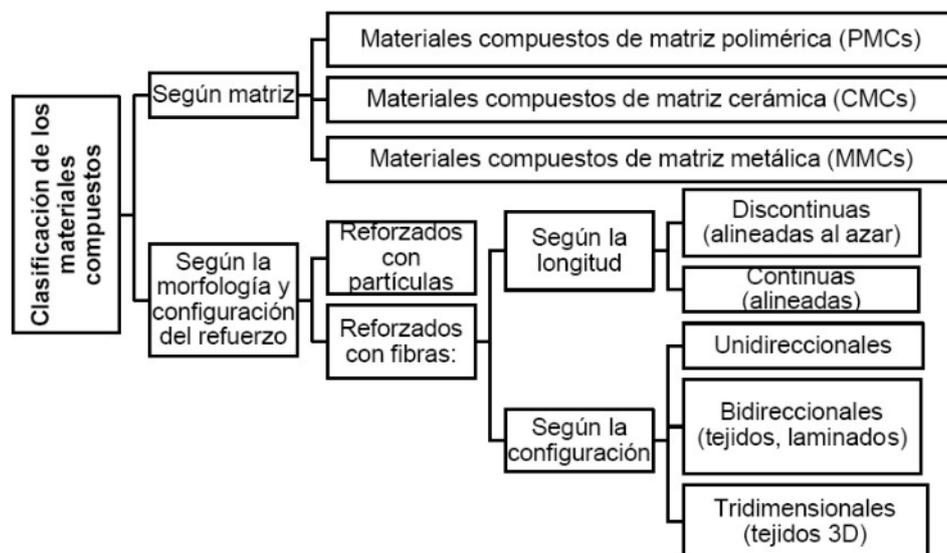


Figura 1: Clasificación de los materiales compuestos, según Springer (2013).



## 2. Metodología de los ensayos de los materiales compuestos

### 2.1. Materiales compuestos aplicados por ensayos mecánicos

De acuerdo con las bases bibliográficas, mostramos en la tabla 1; los materiales compuestos de impacto mundial, su obtención (fabricación), ensayo mecánico aplicado y la aplicación en la industria mundial.

Tabla 1. Descripción de materiales compuestos

Material Compuesto	Obtención	Aplicación
Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP) [5] [9].	Se fabrican mediante la adición de fibras de carbono a los polímeros a través de extrusoras y máquinas de moldeo por inyección. - Ensayo mecánico por fatiga [5] - Ensayo mecánico por fatiga y tracción [9]	Sistemas de fortalecimiento estructural confiables y de alto rendimiento en diversas áreas: - Ingeniería aeroespacial - Ingeniería automotriz - Ingeniería civil  Entre otras aplicaciones.
Sistema de material de matriz de fibra de carbono/epóxi AS4/3501-6 [11].	Este material se fabrica mediante el apilado de varias capas de fibra de carbono impregnadas de resina en diferentes orientaciones y su posterior compactación y curado. - Ensayo mecánico por fatiga [11]	Este material se utiliza para aplicaciones, como:  La industria aeroespacial, (componentes de cohetes y aeronaves).  Biomédica, elementos estructurales con materiales fibra reforzados.
Polímero con Fibra de carbono (FC) [12] [13].	Se fabrica mediante diferentes métodos, como la laminación manual, la inyección de fibras o la inyección de resina. - Ensayo mecánico por tracción [12] [13].	Se usa para aplicaciones que requieren alta resistencia, rigidez y ligereza, como:  La industria aeroespacial, automotriz, naval y deportiva.  También para estructuras de civiles.
Fibra de carbono T300 con resina epoxi 976 [4].	Impregnación de las fibras con la resina mediante un sistema de inyección o infusión, luego se coloca las fibras impregnadas en un molde o una forma según la orientación deseada y para el curado de la resina mediante la aplicación de calor y presión en una prensa.	- Campo aeroespacial. - Campo estructural.



	<p>Finalmente, para el recorte y acabado del producto final según las especificaciones.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensayo mecánico por tracción [4]</li> </ul>	
<p>Compuestos laminados de carbono/epoxi [15].</p>	<p>Usa el método de preimpregnación, que consiste en impregnar las fibras de carbono con la resina epóxica en estado líquido o semisólido, y luego curarla mediante calor y presión. El proceso se puede realizar de forma manual o automatizada, y se pueden emplear diferentes técnicas de curado, como el moldeo por autoclave, el moldeo por vacío o el moldeo por transferencia de resina.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulación numérica computacional [15]</li> </ul>	<p>Estos materiales se usan en la industria aeroespacial por su alta resistencia y rigidez específicas.</p>
<p>Material compuesto de organolámina de poliamida 6 [14].</p>	<p>La poliamida 6 es un polímero termoplástico que se forma por la polimerización de la caprolactama. La fibra de vidrio mejora las propiedades mecánicas y térmicas de la poliamida 6, como la rigidez, la resistencia, la dureza y la estabilidad dimensional. Una organolámina es una lámina delgada de material compuesto que se puede moldear por termoformado o inyección.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensayo mecánico por tracción [14]</li> </ul>	<p>Piezas estructurales para la industria automotriz, componentes para la industria eléctrica y electrónica y productos para la industria médica.</p>
<p>Laminado E-Vidrio (Glass) /epoxi unidireccional (UD) de 4 capas [7].</p>	<p>Las fibras de vidrio se obtienen a partir de minerales molidos (arena, caolín, calcita, colemanita, etc.) fundidos en hornos de fusión entre 1.400°C y 1.500°C para su posterior transformación en fibras. La composición de la masa de vidrio a fundir varía de acuerdo con los minerales que se utilicen, esto determina el tipo de fibra, así: Tipo E (E-glass, electrical glass), Tipo C (C-glass, chemical glass), Tipo ECR (ECR-glass), Tipo S y Tipo AR (AR-glass, Alkali-resistant glass).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensayo mecánico por tracción [7]</li> </ul>	<p>Se utiliza para reforzar estructuras que requieren alta resistencia y rigidez en una dirección. Se usan en el área aeroespacial, automotriz y marino.</p>

<p>Compuestos de matriz cerámica (CMC) basados en refuerzos de fibras de carbono y matrices de carburo de silicio [6].</p>	<p>Llamados compuestos C/SiC o C/C-SiC, se pueden fabricar mediante un proceso de tres pasos basado en el bobinado por filamento húmedo y el procesamiento LSI. (1) modelado de cuerpo verde CFRP por bobinado de filamento húmedo y curado sin presión en el mandril, (2) pirólisis a una preforma C/C porosa, y (3) densificación y acumulación de matriz de SiC por infiltración de fusión reactiva.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensayo mecánico por tracción [6]</li> </ul>	<p>Se usan para aplicaciones que requieren alta resistencia al impacto y a la temperatura.</p>
<p>Compuesto de carbono/epoxi reforzado con MWCNT [2].</p>	<p>MWCNT son las siglas de Multi-Walled Carbon Nanotubes o Nanotubos de Carbono de Pared Múltiple. Son una forma especial de nanotubos de carbono en la que varios nanotubos de una sola pared están anidados uno dentro de otro.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensayo mecánico por tracción [2]</li> </ul>	<p>Ampliamente utilizados en aeroespacial, naval y automóvil industrias debido a sus excelentes propiedades en mayor rigidez, resistencia a la fractura y al impacto.</p>

## 2.2. Normativa y teoría sobre la concentración de tensiones en materiales compuestos.

Según la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM), en las probetas para ensayos mecánicos de resistencia por tracción en el agujero de materiales compuestos. Atribuyen parámetros geométricos estándar como muestra en la figura 2.

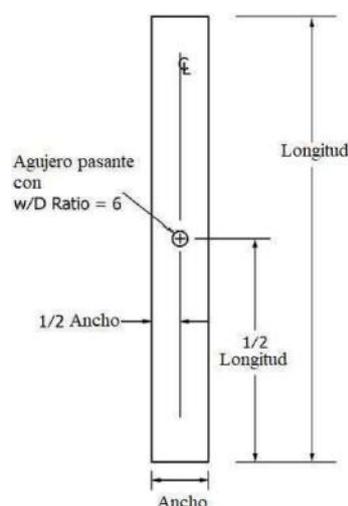


Figura 2: Figura de la probeta para ensayo de tracción del material compuesto, fuente ASTM D5766\_D5766M-11(2018).



Para los parámetros de medidas de los cuerpos de pruebas están denominados en configuración A y configuración B [1], que se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de medidas de las probetas en materiales compuestos

Descripción	Abreviatura	Parámetros normados	
		Configuración (A)	Configuración (B)
Ancho	<i>W</i>	36 ± 1 mm [1.50 ± 0.05 in.]	36 ± 1 mm [1.50 ± 0.05 in.]
Largo	<i>L</i>	200 a 300 mm [8 a 12 in.]	150 a 200 mm [6 a 8 in.]
Espesor	<i>h</i>	El espesor nominal de 2,5 mm [0.10pulg.], con un intervalo admisible de 2 a 4 mm [0.080 a 0.160 in.].	
Diámetro	<i>D</i>	6 ± 0.06 mm [0.250 6 0.003 in.]	

### 2.2.1 Resistencia a la rotura.

Se calcula la resistencia a la rotura por tracción en el agujero de la probeta por resistencia a la tracción; utilizando la Ecuación 1.

$$F_x^{OHTu} = \frac{P^{max}}{A} \quad (1)$$

Donde:

$F_x^{OHTu}$  = Resistencia última a la tracción en agujero pasante en la dirección de ensayo, en MPa [Psi],

$P^{max}$  = Fuerza máxima soportada por la probeta antes de la falla, N [Lbf], y

$A$  = Área bruta de la sección transversal (sin tener en cuenta el agujero) de Método de ensayo D3039/D3039M,  $mm^2$  [ $inch^2$ ].

### 2.2.2 Relación ancho y diámetro.

El cálculo de la relación ancho/diámetro real, como se muestra en la Ecuación 2. Indica la relación nominal calculada a partir de los valores de las medidas geométricas, el cual resultado debe de ser menor o igual a 6.

$$\frac{w}{D} (ratio) = \frac{w}{D} \quad (2)$$

Donde:

$w$  = ancho de la probeta a través del agujero, mm [inch.], y

$D$  = diámetro del agujero, mm [inch.].

### 2.2.3 Relación diámetro y espesor.

El cálculo de la relación diámetro/espesor, como se muestra en la Ecuación 3. Indica la relación nominal calculada a partir de los valores de las medidas geométricas, el cual resultado debe de ser menor a 1.

$$\frac{D}{h} (ratio) = \frac{D}{h} \quad (3)$$

Donde:

$D$  = diámetro del agujero, mm [inch.].

$h$  = espesor de la probeta, mm [inch.].

### 2.2.4 Factor de concentración de tensiones.

En la tensión máxima alrededor del agujero, el factor de concentración de tensiones para este caso es 3. También para el agujero en una placa que es un caso comúnmente a menudo otros factores de concentración de tensiones se validan "estándar" al valor de 3. La distribución de  $\sigma_{\theta}$  en el borde del agujero se muestra en la figura 3.

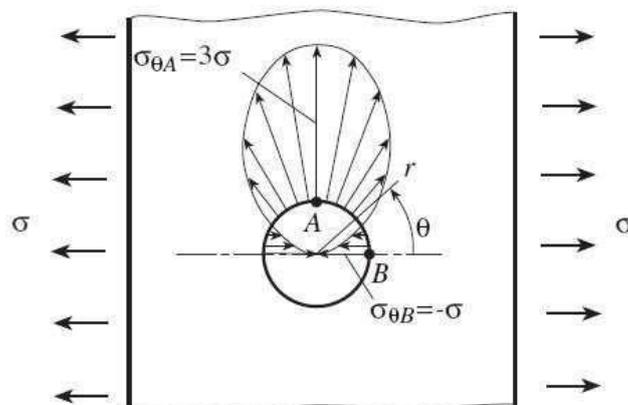


Figura 3: Distribución de tensión circunferencial en el borde de un agujero circular de una placa.

En el punto B, con  $\theta = 0$ , la Ecuación (4) es de:

$$\sigma_{\theta B} = -\sigma \frac{D}{h} \quad (4)$$

Donde:

$\sigma_{\theta B}$  = Tensión angular en el punto B, MPa [Lbf/inch<sup>2</sup>].

$\sigma$  = Tensión nominal, MPa [Lbf/inch<sup>2</sup>].

### 3. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos mecánicos por tracción uniaxial en las probetas del material 3D impreso de fibra de Carbono (de  $W/D = 3$ ;  $D/h = 3,97$ ) [12] y del CF/4% CNT/Epoxi (de  $W/D = 3$ ;  $D/h = 3,97$ ) [2], fueron de 10 kN y de 65 kN aproximadamente según en la curva fuerza y desplazamiento de la estructural global, de acuerdo con la figura 4.

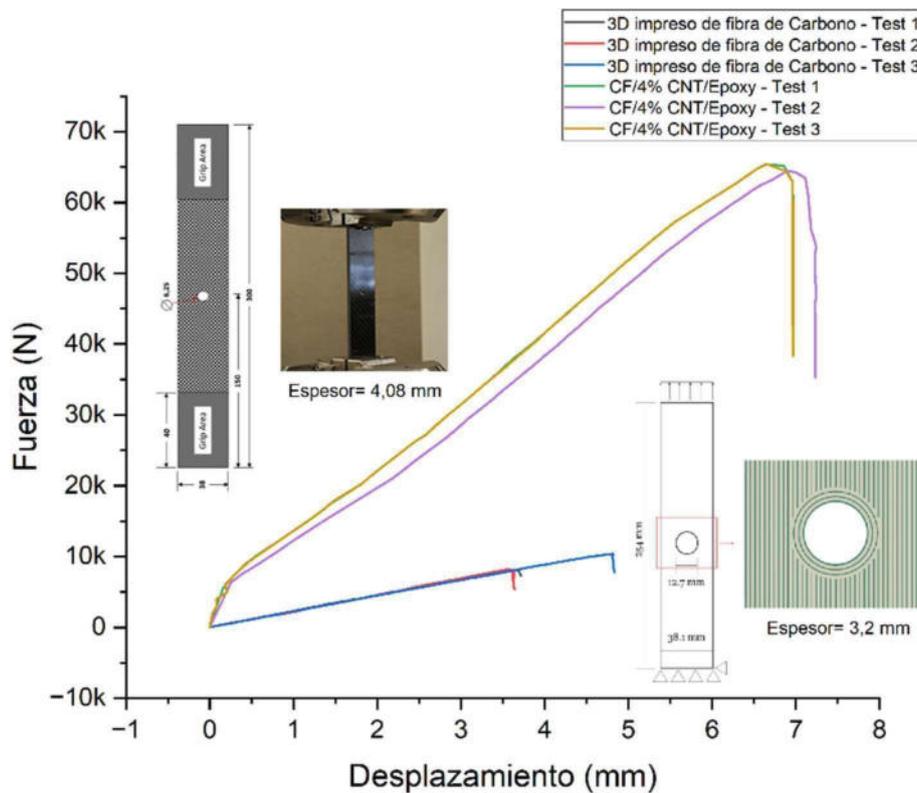


Figura 4: Curva de fuerza vs desplazamiento de dos materiales compuestos.

Los resultados de los ensayos mecánicos por tracción uniaxial en las probetas del material Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP) [9] y del Laminado E-Vidrio (Glass) /epoxi unidireccional (UD) de 4 capa [7], fueron de 300 MPa y de 450 MPa aproximadamente según en la curva tensión y deformación de la estructural global, de acuerdo con la figura 5.

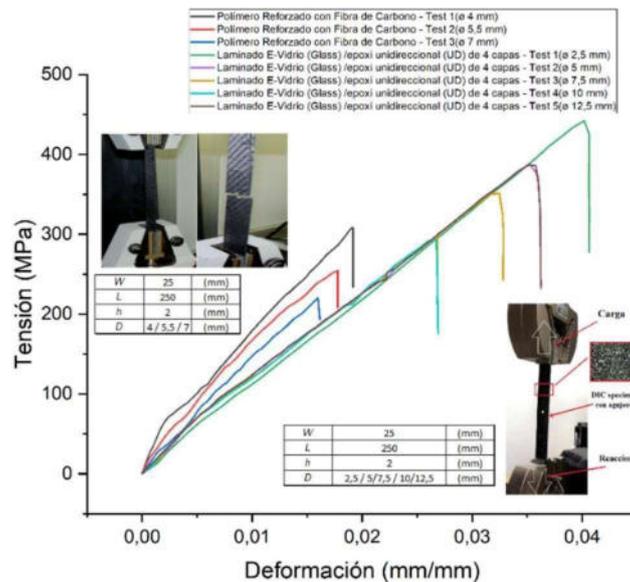


Figura 5: Curva de tensión vs deformación de dos materiales compuestos.

Los resultados de los ensayos mecánicos por tracción uniaxial en las probetas del material Compuesto de matriz cerámica (CMC) [6]; del Carbono T300 con resina epoxi 976 [4] y Material compuesto de organolámina de poliamida 6 [14], fueron de 180 MPa, 100 MPa y de 140 MPa aproximadamente según en la curva tensión y deformación (%) de la estructural global, de acuerdo con la figura 4.

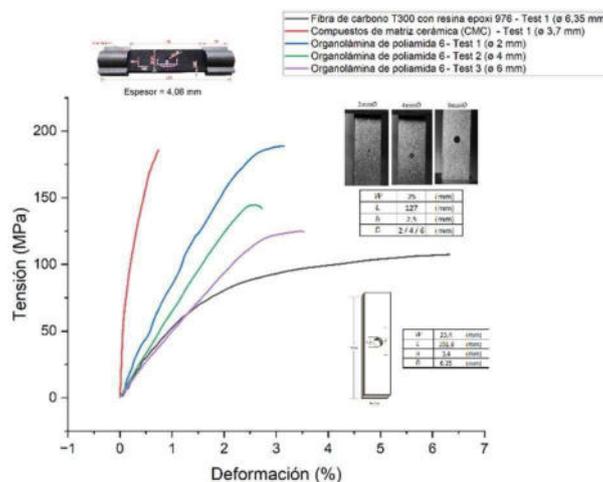


Figura 6: Curva de tensión vs deformación (%) de dos materiales compuestos.



#### 4. CONCLUSIONES

Las probetas de materiales compuestos como CF/4% CNT/Epoxi a comparación al 3D impreso de fibra de Carbono, es de mayor resistencia mecánica y de menor concentración de tensiones. Luego el laminado E-Vidrio (Glass) /epoxi unidireccional (UD) de 4 a comparación al Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP), es de mayor resistencia mecánica y de menor concentración de tensiones. Finalmente, el compuesto de matriz cerámica (CMC) a comparación del Carbono T300 con resina epoxi 976 y el compuesto de organolámina de poliamida 6, es de mayor resistencia mecánica y de menor porcentaje de deformación. La concentración de tensiones aplicadas en los casos de estudio es un caso de discontinuidad geométrica que va a parecer en cualquier cuerpo solido sometido a esfuerzos. Después de la validar con los ensayos mecánicos, se genera el consumo del material y cumplir con los desafíos de la industria mundial.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Concejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico del Brasil (CNPq), a la Coordinación de A perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior del Brasil (CAPES), y al Departamento de Mecánica de la Universidad Estatal Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) del campus de Guaratinguetá (FEG) por el apoyo incondicional para la realización y financiación del trabajo.

#### 6. REFERENCIAS

- [1] ASTM D5766\_D5766M-11R18. Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates. ASTM International, 2018. [https://doi.org/10.1520/D5766\\_D5766M-11R18](https://doi.org/10.1520/D5766_D5766M-11R18). Consulta en 2022.
- [2] Bhowmik K., Mukhopadhyay T., Tarfaoui M., Khutia N., Roy Chowdhury A., & Lafdi K. Damage modeling of MWCNT reinforced Carbon/Epoxy composite using different failure criteria: a comparative study. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, Springer. Vol. 128, N° 7, Art. 549. 128(7), 2022. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05670-2>.
- [3] Callister William D., Rethwisch David G. *Ciência e Engenharia de Materiais, uma introdução*. 7ª Edición. Edit. Reverté, 2018.
- [4] Fedorenko A., Fedulov B., Safonov A., Lomakin E. Nonlinear shear behavior and failure of composite materials under plane stress conditions. *Acta Mechanical*, Vol. 228, N° 6, pp. 2033–2040. Springer, 2017 <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.185>. Consulta en 2022.
- [5] Feito N., Calvo J.V., Belda R., Giner E. An experimental and numerical investigation to characterize an aerospace composite material with open-hole using non-destructive techniques. *Sensors (MDPI)*, Vol. 20, N° 15, Art. 4148, pp. 1 - 18. 2020. <https://doi.org/10.3390/s20154148>. Consulta en 2022.



- [6] Gao X., Yu G., Xue J., Song Y. Failure analysis of C/SiC composites plate with a hole by the PFA and DIC method. *Ceramics International*, Vol. 43, N° 6, pp. 5255-5266. ScienceDirect, Elsevier, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.01.051>. Consulta en 2022.
- [7] Khechai A., Tati A., Guerira B., Guettala A., Mohite P.M. Strength degradation and stress analysis of composite plates with circular, square and rectangular notches using digital image correlation. *Composite Structures*, Vol. 185, pp. 699-715. ScienceDirect, Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.060>. Consulta en 2022.
- [8] Krishnaraj V., Zitoun R., Davim J.P. Drilling of Polymer-Matrix Composites. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. Springer, 2013. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-38345-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38345-8_1). Consulta en 2022.
- [9] Mohamed Makki M., Chokri B. Experimental, analytical, and finite element study of stress concentration factors for composite materials. *Journal of Composite Materials*, Vol. 51, N° 11, pp. 1583-1594. SAGE Journals. 2017. <https://doi.org/10.1177/00219983166599>. Consulta en 2022.
- [10] Pilkey W.D., Pilkey D.F., Bi Z. *Peterson's Stress Concentration Factors*. 4th edition. John Wiley & Sons, 2020.
- [11] Russo A., Russo F., Palumbo C., Riccio A. Numerical Assessment on the Fatigue Behavior of Composite Open-Hole Tensile Specimens. *Macromolecular Symposia*, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma14123348>.
- [12] Sangaletti S., García I.G. Fracture tailoring in 3D printed continuous fibre composite materials using the Phase field approach for fracture. *Composite Structures*. Vol. 300, 116127. Science Direct, Elsevier, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116127>.
- [13] Sanei, S. H. R., Arndt, A., & Doles, R. Open hole tensile testing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, Vol. 54, N° 20, pp. 2687–2695. 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998320902510>. Consulta en 2022.
- [14] Sattar S., Pedrazzoli D., Zhang M., Kravchenko S.G., Kravchenko O.G. Notched tensile strength of long discontinuous glass fiber reinforced nylon composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 163, 107217. ScienceDirect, Elsevier, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107217>.
- [15] Taheri-Behrooz F., Bakhshi N. Neuber's rule accounting for the material nonlinearity influence on the stress concentration of the laminated composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 36, N° 3, pp. 214–225, 2017. <https://doi.org/10.1177/0731684416680302>. Consulta en 2022.



## "Diseño y Simulación de trenes de Engranajes utilizando softwares CAE-CAD"

Guillermo R. Facal <sup>1</sup>, José M. di Iorio <sup>2</sup> y Rafael A. Schiazzano <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Profesor Departamento Ingeniería Mecánica, UBA, Facultad de Ingeniería  
[gfacal@fi.uba.ar](mailto:gfacal@fi.uba.ar)

<sup>2</sup> Profesor Departamento Ingeniería Mecánica, UBA, Facultad de Ingeniería  
[jdiorio@fi.uba.ar](mailto:jdiorio@fi.uba.ar)

<sup>3</sup> Consultor Independiente-Ex Profesor FIUBA, ITBA  
[rschiazzano@gmail.com](mailto:rschiazzano@gmail.com)

### RESUMEN

En la actualidad todas las etapas del proyecto de los componentes mecánicos, desde el diseño hasta los diferentes análisis a que se somete al modelo previo a la fabricación de un prototipo, se realizan mediante softwares CAD/CAE con ventajas técnicas y reducción del costo global del proceso. Distintos tipos de análisis de difícil desarrollo y evaluación siguiendo las normas por métodos tradicionales, pueden llevarse a cabo adecuadamente aplicando el método FEM, en casi todos los casos de proyecto. Surgen en ocasiones divergencias de resultados entre distintos softwares; en estos casos el proyectista debe discernir si la diferencia surge de diferencias en las normas respetadas por los programas, en los algoritmos de resolución, en diferencias en el mallado o en las condiciones de operación requeridas que se aportan como datos para los análisis. En el presente trabajo, con el objetivo de evaluar las posibles diferencias intrínsecas entre los distintos programas se ha utilizado: un par de engranajes. Se los ha diseñado y analizado mediante un programa CAD/CAE en particular y luego se ha exportado el diseño a otro programa para repetir los análisis. Se ha tenido atención en verificar las normas bajo las que operan los programas, en asignar iguales condiciones de potencia, velocidad de rotación, condición de trabajo, vida prevista, grados de confiabilidad. Se ha utilizado para el diseño de una etapa de un tren de engranajes el software KISSsoft utilizando la Norma AGMA2001 D04 (métrica). Se ha realizado el mismo análisis por elementos finitos sobre un modelo diseñado con el software Solidworks respetando la misma Norma utilizando el software ANSYS de Elementos Finitos. Se han informado todos los datos y coeficientes adoptados y los resultados de los análisis. Finalmente se han comparado resultados para arribar a las conclusiones finales.

:

**Palabras clave:** Engranajes, CAD- CAE, Diseño y Verificación.



## 1. OBJETIVO

En las aplicaciones de Ingeniería se utilizan para las transmisiones mecánicas reductoras y multiplicadoras de velocidad con engranajes, dado las ventajas que ofrecen respecto a otros métodos de transmisión. El objetivo de este trabajo es combinar softwares de cálculo (CAE), diseño (CAD) y simulación por elementos finitos (CAE). Se ha diseñado un reductor de velocidad de engranajes helicoidales de tres etapas de un sistema elevador de cargas industrial y se presenta aquí la primera etapa, su diseño y verificación.

## 2. METODOLOGIA

Para realizar el trabajo primeramente se hicieron unos cálculos básicos obteniéndose la potencia de diseño a transmitir, la velocidad de entrada y de salida, la relación de transmisión total y parcial de cada etapa. Con base en la carga a elevar, la velocidad de elevación, los rendimientos mecánicos, el régimen de servicio y la vida esperables de esos cálculos resultó una Potencia de diseño de 16,81 KW, por lo que se adoptó como dato de entrada al software KISSsoft [1] [una potencia de 17 KW, se estableció que la velocidad del motor es de 1500 RPM y la velocidad de giro del tambor de izaje es de 20 RPM. La relación de transmisión total es de 75 y siguiendo las referencias bibliográficas [2,3] se adoptó la relación de la primera etapa  $m_1=3,458$ . Estos son los datos iniciales con que se diseñaron y verificaron engranajes cilíndricos helicoidales según la NORMA AGMA 2101 D04 (Métrica) [4] para flexión y pitting incluidas en el software KISSsoft [1]. Independientemente se modeló el par de engranajes mediante el software Solidworks [5] y el modelo resultante se exportó al software ANSYS [6] para su análisis por método FEM. Finalmente se compararon los resultados obtenidos.

### 2.1. Diseño Etapa 1

Para el diseño de la primera etapa se usaron las consideraciones realizadas. Los datos ingresados a KISSsoft [1] son la potencia de diseño,  $N_s= 17$  KW, la velocidad de entrada que es  $n_1= 1500$  RPM, la norma utilizada para el cálculo [4] y los materiales utilizados para el piñón, SAE-AISI 8620 (20 NiCrMo 2-2) Dureza del núcleo  $\geq 30$  HRC – 50 HRC. (Cementado), y para el engranaje conducido: SAE 4140- 42CrMo4 (Flanco y pie templados) ambos según ISO 6336-5 Imagen 5/6 (MQ).(5) [7]: Características en las tablas 1 y 2.



Tabla 1 Características Mecánicas de Acero SAE-AISI 8620 tratado

Tratamiento Térmico	Cementado
Dureza Superficial	59 HRC
Tensión última	1100 N/mm <sup>2</sup>
Límite Elástico	775 N/mm <sup>2</sup>
Tensión Admisible a la Flexión (AGMA)	460 N/mm <sup>2</sup>
Tensión Admisible a la Dureza Superficial (AGMA)	1500 N/mm <sup>2</sup>

Tabla 2: Características Mecánicas de acero AISI 4140 tratado

Tratamiento Térmico	Bonificado (templado a la llama/Inducción)
Dureza Superficial	56 HRC
Tensión última	1100 N/mm <sup>2</sup>
Límite Elástico	900 N/mm <sup>2</sup>
Tensión Admisible a la Flexión (AGMA)	370 N/mm <sup>2</sup>
Tensión Admisible a la Dureza Superficial (AGMA)	1220 N/mm <sup>2</sup>

Estos datos fueron obtenidos de la librería de KISSsoft [1] según norma [5] y todos los datos de resistencia y dureza son requeridos por ese software para los cálculos de resistencia a la flexión y al pitting.

Para establecer los números de dientes ingresados al software Kisssoft se seleccionó la cantidad mínima que no produzca interferencia para un ángulo de presión de 20° y que ocupe el volumen mínimo posible para la relación de transmisión antes definida. Debido a ello se seleccionó e ingreso al software [1] para el piñón Z1= 17 dientes y la relación de transmisión  $m = 3,46$ .

El primer cálculo que se realiza con el soft KISSOT es un cálculo grueso macro. Dentro del cuadro de diálogo previo al cálculo se incorporó la relación de transmisión para la primera etapa que nos da en los cálculos previos 3,46. Una vez que se realizó el cálculo grueso donde se determinó  $Z1 = 17$ ,  $Z2=59$ ;  $A1 = 80,5$  mm,  $\alpha = 20^\circ$  y  $\beta = 20^\circ$ . En la selección de todas las opciones prevaleció el que da la relación de transmisión más cercana a la dada como dato y un módulo normalizado de diente. Una vez realizada la selección se procedió al cálculo fino



Dimensionado fino de la macrogeometría

Nr.	a [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]	m <sub>s</sub> [mm]	α <sub>a</sub> [°]	β [°]	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> + x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	h <sup>*</sup> <sub>ap1</sub>
0	80.5000	36.2200	35.0320	2.0000	20.0000	20.0000	17	59	-0.1858	0.3095	-0.4953	1.0000
1	80.5000	36.2200	35.0320	2.0000	20.0000	20.0000	17	58	0.3529	0.1832	0.1697	1.0000
2	80.5000	36.2200	35.0320	2.0000	20.0000	20.0000	17	58	0.3529	0.2832	0.0697	1.0000
3	80.5000	36.2200	35.0320	2.0000	20.0000	20.0000	17	58	0.3529	0.3832	-0.0303	1.0000
4	80.5000	36.2200	35.0320	2.0000	20.0000	20.0000	17	59	-0.1858	0.2095	-0.3953	1.0000
5	80.5000	36.2200	35.0320	2.0000	20.0000	20.0000	17	59	-0.1858	0.3095	-0.4953	1.0000

Figura 1: Vista parcial de las alternativas de proyecto generadas por el software en cálculo fino

De las 10 opciones dadas el sistema elige, la que tiene la relación de transmisión que se acerca más a la que se dio de dato.

En la Figura 2 se puede observar en el gráfico la seguridad en pie de diente en el eje de abscisas y la seguridad en flanco de diente en el eje de las ordenadas.

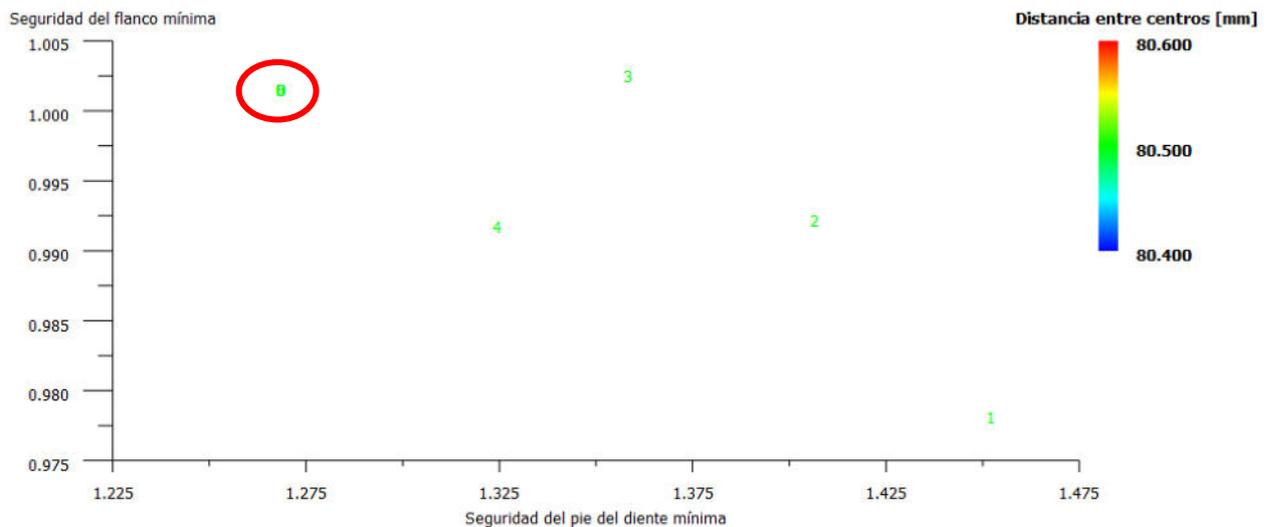


Figura 2. Coeficientes de seguridad flexión en pie de diente vs. Seguridad de flanco con distancia entre centros optimizada.

La relación de transmisión calculada por el software es de 3,471. Entre los datos que se introdujeron al programa se consideró una duración de 20.000 hs. Los cálculos efectuados por el software dieron una duración de 21.620 hs. En la Tabla 3 se volcaron los datos resultantes



Tabla 3: Resultados de proyecto según software Kisssoft [1]

	Engranaje 1(piñón)	Engranaje 2 (Conducido)
Número de dientes	17	59
Modulo Normal	2 mm	2 mm
Distancia entre centros	80,5 mm	-----
Angulo de Hélice	20°	20°
Diámetro Primitivo	36,182 mm	125,573 mm
Ancho del diente	36,22 mm	35,032 mm

Los datos de seguridad a pie de diente y de seguridad en flanco de diente se muestran en la Tabla 4 en el engranaje 1 en línea 1, en el engranaje 2 en línea 2. . Los mínimos se destacan en la línea 3

Tabla 4: Coeficientes de seguridad en pie y de flanco de diente según software [1]

	Seguridad a Pie de diente	Seguridad de flanco de diente
Engranaje 1	1,9738	1,1970
Engranaje 2	1,2684	1,0018
Seguridad Mínima	1,2684	1,0018

El coeficiente de seguridad surge para flexión de:  $spd = (SFP * Y_n) / (sf * Y_o * Y_z)$  (4)

El coeficiente de seguridad a durabilidad superficial:  $sfd = (Sh * Z_n * Z_w) / (sc * Y_o * Y_z)$  (5)

En cuanto a los coeficientes de las expresiones de AGMA el único ingresado es el  $K_o = 1,25$  del factor de sobrecarga. Los otros coeficientes los calcula el software a medida que se realiza el cálculo en el dimensionamiento grueso. Los calculados se detallan en la siguiente tabla:

$K_o$ (factor de sobrecarga)	1,25
$K_v$ (Factor dinámico – función de la calidad de fabricación)	1,104
$K_z$ (Factor de Tamaño)	1
$K_B$ (factor de espesor de llanta)	1
$K_t$ (factor de temperatura)	1
$K_r$ (Factor de confiabilidad)	1
$C_p$ (Coeficiente elástico)	189,81 (N) <sup>1/2</sup> /mm
$K_m$ (Factor de distribución de carga)	1,196

En cuanto a los análisis de tensiones a pie de diente mediante el método de elementos finitos (FEM) 3D que efectúa el software se obtuvieron los siguientes gráficos y resultados

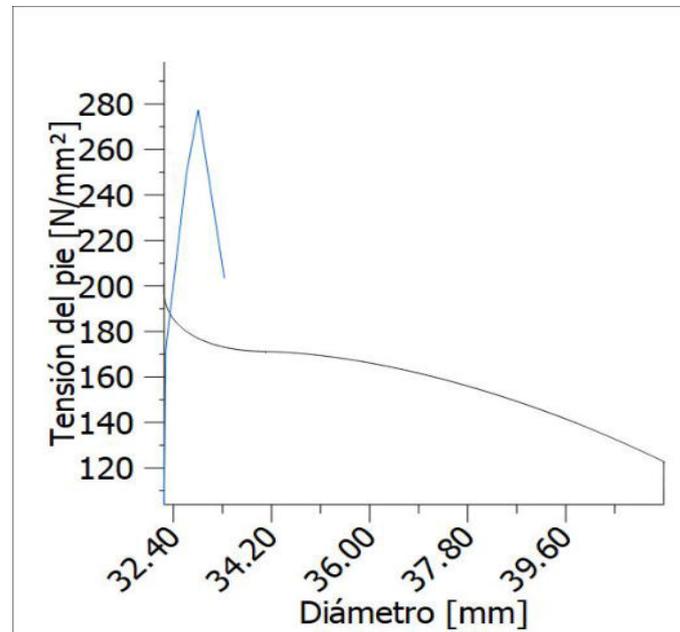


Figura.3 Distribución de tensiones normales en pie de diente

En la Figura.3 se puede ver la distribución de tensiones normales a pie de diente donde se puede observar que las máximas tensiones están el orden de 180 N/mm<sup>2</sup>.

Los resultados del análisis informan según las tensiones que se soliciten:

**a) Tensiones representadas: Tensión principal máxima**

- con punto de contacto de la tangente de 30°, calculado según la norma  
Diámetro (mm) [dsFn] 33.49

**Tensión nominal del pie del diente (N/mm<sup>2</sup>) [σF0] 221.38**

- en el punto con mayor tensión

Diámetro (mm) [dσmax] 32.73

Posición sobre el ancho de la rueda dentada (mm) [bσmax] 1.83

**Tensión nominal del pie del diente (N/mm<sup>2</sup>) [σmax] 311.45**

- en el punto con tensión mínima

Diámetro (mm) [dσmin] 32.68

Posición sobre el ancho de la rueda dentada (mm) [bσmin] 3.66

**Tensión nominal del pie del diente (N/mm<sup>2</sup>) [σmin] -374.36**

**b) Tensiones representadas: Tensión equivalente de von Mises**

- con punto de contacto de la tangente de 30°, calculado según la norma  
Diámetro (mm) [dsFn] 33.49

**Tensión nominal del pie del diente (N/mm<sup>2</sup>) [σF0] 191.02**

- en el punto con mayor tensión

Diámetro (mm) [dσmax] 32.73

Posición sobre el ancho de la rueda dentada (mm) [bσmax] 1.83

**Tensión nominal del pie del diente (N/mm<sup>2</sup>) [σmax] 269.32**

- en el punto con tensión mínima

Diámetro (mm) [ $d_{\text{omin}}$ ] 32.68

Posición sobre el ancho de la rueda dentada (mm) [ $b_{\text{omin}}$ ] 3.66

Tensión nominal del pie del diente ( $\text{N/mm}^2$ ) [ $\sigma_{\text{min}}$ ] -301.5

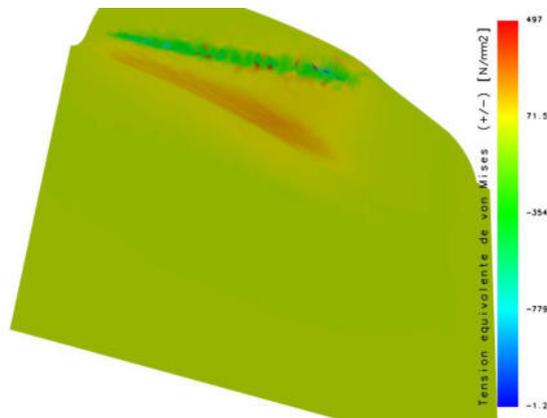


Figura.4 Distribución de tensiones de Contacto de los dientes

## 2.2. Exportación a Sistemas CAD

Para proceder a analizar la primera etapa en el software CAE de elementos finitos se exporta los resultados calculados por KISSsoft a un sistema CAD. En este trabajo se ha exportado al software SolidWorks en su versión educativa para luego exportarlo a ANSYS para repetir el análisis. El sistema exportado a Solidworks se puede ver en la Figura.6.

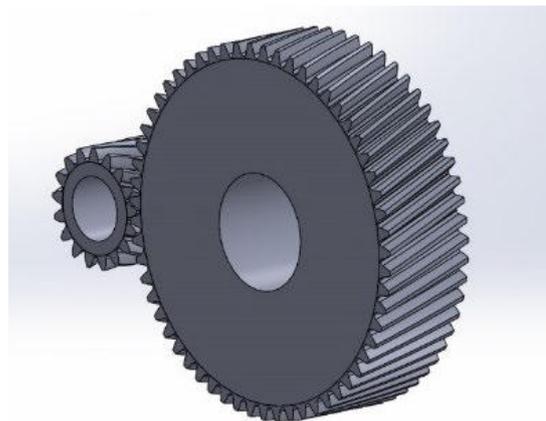


Figura 5 Diseño Solidworks sobre dimensiones calculadas por Kisssoft

Se realizaron en Solidworks modificaciones con respecto a lo exportado. En los orificios correspondientes al alojamiento de los árboles de entrada y del intermedio no se calcularon los diámetros porque ese tema se hará en un trabajo posterior donde se abordará el diseño total de



un reductor de velocidad. Además, se dividieron ambos engranajes en dos partes, con el objeto de introducir las distintas características que presentará el material en la llanta y en el cubo del engranaje, esto debido al tratamiento térmico en los dientes de los engranajes. Cabe hacer notar, que solamente se han introducido pequeñas modificaciones en los archivos generados por KISSsoft en SolidWorks para poder comparar los resultados obtenidos en KISSsoft con los obtenidos en ANSYS. El aspecto que presentan las geometrías al exportarlo de Solidworks a ANSYS es en el que se muestra en la Figura.7, donde se aprecia la diferencia; el piñón está formado por dos sólidos y el Engranaje conducido por otros dos.

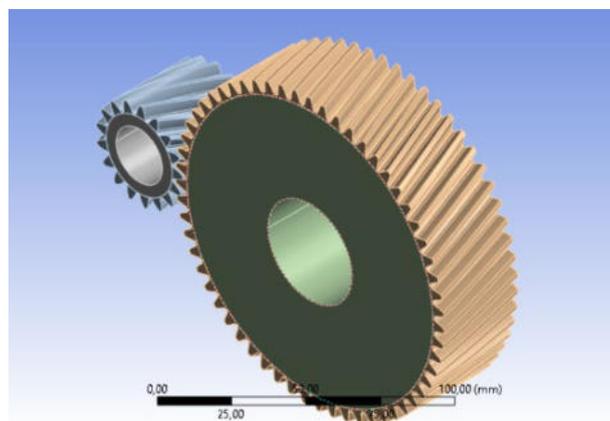


Figura 6. Geometría del par en Workbench ANSYS

### 2.3. Análisis en Software de Elementos Finitos

Se abre el Worbench 2023 del sistema ANSYS y se inicia un análisis estructural. El primer paso es editar los materiales porque en la librería GRANTA no se encuentran estos materiales. Al acero AISI 8620 se le dan propiedades de la Norma IRAM -IAS en la zona del cubo y se le incrementan sus características en la zona de los dientes, debido a que los mismos están tratados térmicamente.

El material de piñón es SAE- AISI 8620 cementado y en la Figura.8 se ven las propiedades cargadas para este material cuando está cementado.

Se han cargado todos los datos de los del SAE-AISI 8620 y SAE 4140 para el engranaje conducido, con los datos que provee la librería de materiales de KISSsoft y en cuánto a los materiales del cubo se cargaron los datos de la NORMA IRAM-IAS. Los contactos que se detectan automáticamente se suprimen y se agregan juntas cinemáticas



cilíndricas a las caras de los dientes que están en contacto. En cuanto al mallado se eligió para la zona de los dientes un mallado automático y para las zonas centrales un mallado tipo Sweep.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's...			
6	Young's Modulus	2,1E+05	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa		
9	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa		
10	Strain-Life Parameters				
11	Display Curve Type	Strain-Life			
12	Strength Coefficient	2000	MPa		
13	Strength Exponent	-0,091			
14	Ductility Coefficient	0,48			
15	Ductility Exponent	-0,6			
16	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa		
17	Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2			
18	S-N Curve	Tabular			
22	Tensile Yield Strength	1500	MPa		
23	Compressive Yield Strength	1500	MPa		
24	Tensile Ultimate Strength	1600	MPa		

Figura 7. Tabla de características mecánicas acero SAE-AISI 8620 en GRANTA-ANSYS

Finalmente se utilizó en los dientes 2,5, 2,25 y 1,8 para el engranaje 1 (piñón) y 3,25; 3,4 y 3,75 para el engranaje 2.(conducido) : El aspecto del mallado final se puede observar en la Figura 8.

En la Tabla 5 siguiente se observa la convergencia respecto a las tensiones medias:

Tamaño de Malla (mm) (Engranaje 2 )	Tensiones Equivalentes VM (Mpa)
3,75	372,88
3,4	397,29
3,25	399,13

No se probó con un tamaño de mallado menor debido a las limitaciones en nodos de la licencia utilizada.

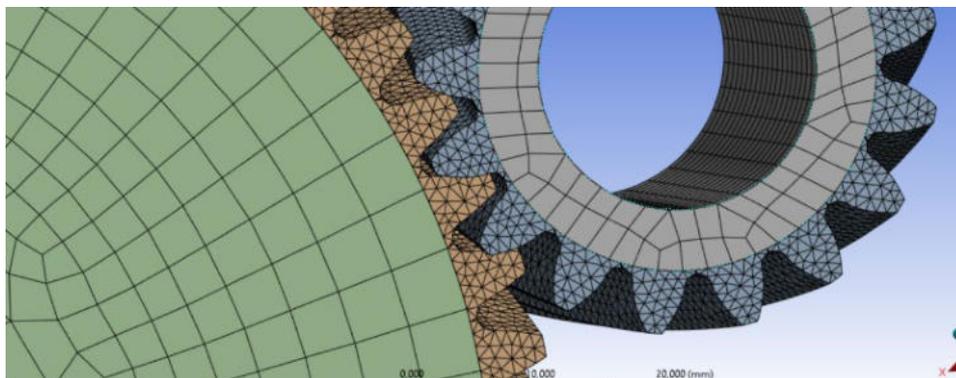


Figura 8. Mallado compuesto en piñón y engranaje conducido en Workbench ANSYS

A continuación se agregaron los vínculos en las superficies cilíndricas internas de los cubos. Se eligió un vínculo cilíndrico fijo en las direcciones radial y axial y libre en la tangencial. Las cargas son los pares de torsión en el engranaje 1 de 108.200 Nmm y para el engranaje 2 de 375.600 Nmm. Los resultados obtenidos en tensiones de Von Mises se pueden observar en la Figura.9. La tensión máxima equivalente es 399,13 MPa en el engranaje 2

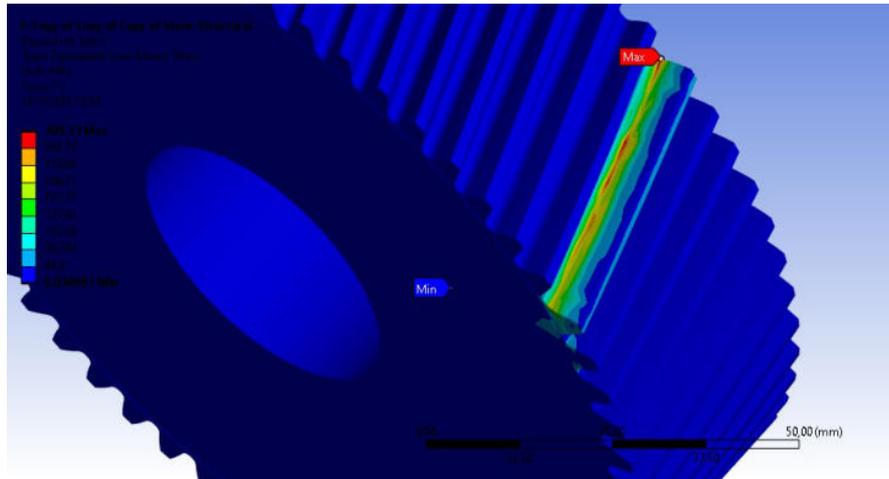


Figura.9. Distribución de tensiones de Von Mises

El valor indicado en el inicio del contacto de los dientes es de 280,62 Mpa, Figura 10.

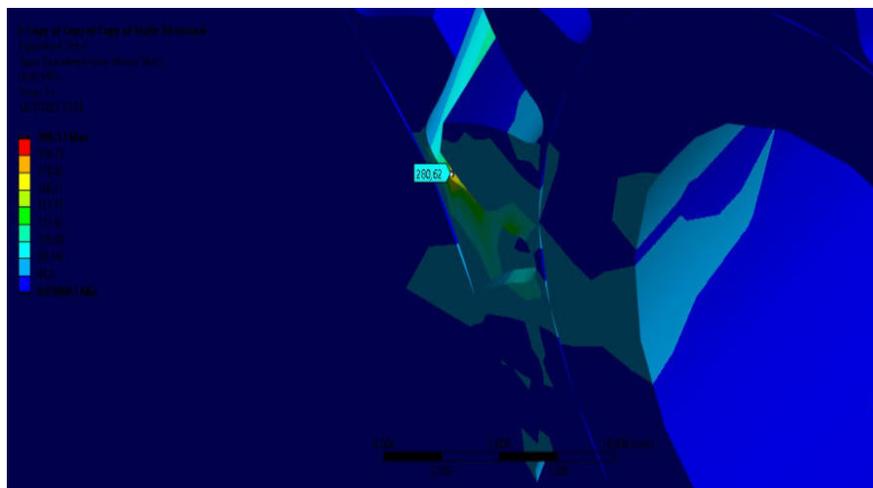


Figura 10 . Tensión en el instante de contacto inicial entre dientes

En cuántos a las tensiones normales se pueden observar en la Figura .11  
La tensión normal máxima se sitúa en el engranaje 2 es de 448,37 MPa

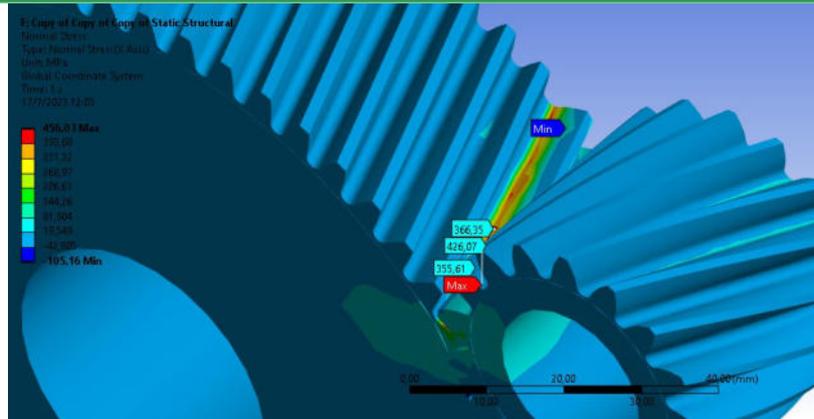


Figura: 11. Máxima Tensión normal se produce en el Engranaje 2 y su valor es de 456,03 Mpa

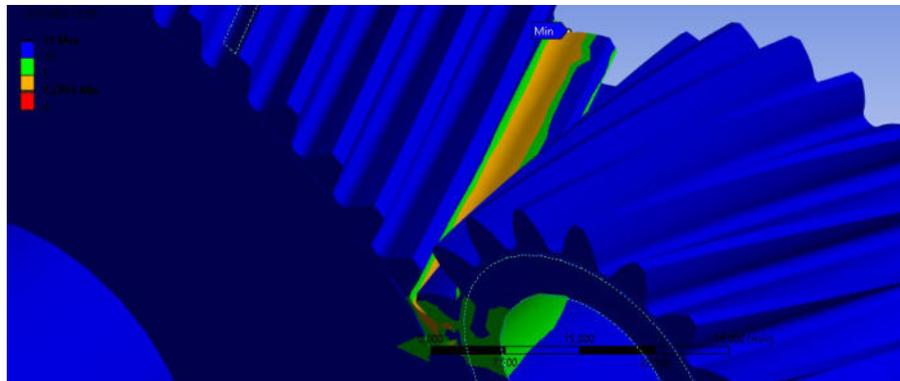


Figura.12. Distribución de la Seguridad por Fatiga en el diente.

Se verifican a continuación los coeficientes de seguridad determinados en Workbench-ANSYS. Comparando los coeficientes de seguridad a fatiga (Figura.12) podemos observar que dan factores cercanos a los obtenidos para el KISSsoft. Valor mínimo de 1,2991 en el engranaje 2. El valor de la mínima es de 1,2991 en el engranaje 2. En la Tabla 6 siguiente se resumen los resultados comparados en los softwares.

Tabla 6. Resumen de resultados comparados

	Seguridad a Pie de diente (KISSsoft)	Seguridad de flanco de diente (KISSsoft)	Coefficiente de Seguridad a la Fatiga (Goodman) (ANSYS)
Engranaje 1	1,9738	1,1970	2,4025
Engranaje 2	1,2684	1,0018	1,2991
Seguridad Mínima	1,2684	1,0018	1,2991



### 3. CONCLUSIONES

- 1) Los valores de Seguridad al pie de diente en KISSsoft y los obtenidos en ANSYS (columnas 2 y 4) difieren entre sí muy poco en el engranaje 2 (conducido) en tanto que existe una diferencia de aproximadamente 20% en el engranaje 1 (piñón), que es a la fecha motivo de análisis. En ANSYS se ha utilizado un factor de confianza de 0,85 del valor de la tensión de fatiga del material obtenido en ensayo de flexión alternante.
- 2) La comparación de los coeficientes de seguridad se realiza sobre la seguridad a pie de diente (flexión), porque en lo referido a tensiones de contacto deberíamos modificar la forma de carga y el modelo CAD utilizado. Análisis a realizar en un trabajo posterior.
- 3) El presente trabajo es una primera aproximación al análisis de engranajes por medio de softwares CAE. Se seguirá investigando con el fin de obtener una verificación con softwares de elementos finitos a lo calculado por softwares de diseño de Elementos de Máquinas.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Software KISSsoft Release 2022 – Académico-
  - [2] Gear Geometry and Applied Theory – Faydor Litvin, Alfonso Fuentes- Cambridge Press- 2° Edición.2011
  - [3] Proyecto de Máquinas – Pablo Tedeschi- Eudeba-Edición 1979
  - [4] Norma AGMA2001 D04 (métrica). Factores de clasificación fundamentales y métodos de cálculo para dientes de involuta de engranajes helicoidales y rectos Edición 2016.
  - [5] Software SolidWorks 2017-2018 Académico
  - [6] Software ANSYS 2023 R1 Académico
  - [7] ISO 6335-5 Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth.
-



## DESARROLLO DE MODELO DE COMPRESIÓN PARA ACERO TRIP

Luciano Buglioni<sup>1</sup>, Valeria de la Concepción M.<sup>1,2</sup> y Hernán G. Svoboda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, Av. Gral. Paz 5445, B1650KNA, San Martín, Buenos Aires, Argentina  
correo-e: [buglioni@inti.gov.ar](mailto:buglioni@inti.gov.ar)

<sup>2</sup> Universidad de Buenos Aires, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materiales y Estructuras, GTSyCM3, Av. Las Heras 2214, C1127AAR, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

### RESUMEN

Para la evaluación del comportamiento mecánico de materiales se emplean distintos ensayos como los de tracción, compresión, torsión, etc. El ensayo de compresión presenta la ventaja de alcanzar una mayor deformación uniforme que el de tracción. Sin embargo, cuenta con limitaciones como el efecto de la fricción. Un modelo constitutivo en conjunto con el Método de Elementos Finitos (FEM) que simule este ensayo supone un gran interés debido a que la fricción entre la superficie de apoyo y la probeta (la cual es difícil de cuantificar y es particular de las condiciones de ensayo) produce un estado de tensiones complejo, que resulta en deformaciones plásticas no homogéneas. En este sentido, es escasa la información disponible. Los aceros TRIP (TRansformation-Induced Plasticity) presentan una elevada resistencia mecánica y ductilidad, así como una alta capacidad de absorción de energía, siendo en muchos casos insuficiente la cantidad de deformación que puede aplicarse en ensayos de tracción para estudiar dicha transformación, por lo que los ensayos de compresión pueden ser una buena alternativa. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo que sea capaz de describir el comportamiento de aceros TRIP durante ensayos de compresión y analizar el efecto de la fricción sobre el campo de deformaciones obtenido. Se desarrolló un modelo FEM cuasi estacionario y axil-simétrico con un material bilineal, teniendo como parámetros de ajuste las curvas de carga desplazamiento obtenidas en diferentes ensayos a diferentes deformaciones, así como el relevamiento geométrico de las probetas para cada nivel de deformación. Se evaluaron diferentes coeficientes de fricción y se obtuvieron mapas de deformaciones, permitiendo analizar la distribución de las mismas en la sección y su correlación con valores de microdureza medidos.

**Palabras Clave:** TRIP, Austenita, Compresión, Método de los Elementos Finitos (FEM)



## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han incrementado los requerimientos en cuanto a seguridad, eficiencia y control de emisiones de los vehículos automotores. Para hacer frente a estos requerimientos, se ha ido ampliando el desarrollo e implementación de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS). Dentro de la familia de AHSS se encuentran los aceros TRIP (plasticidad inducida por transformación), que contienen en su microestructura al menos 5% de austenita retenida. Al ser deformados, dicha austenita va transformándose progresivamente en martensita (efecto TRIP) [1]. En particular, los aceros TRIP ferrítico-bainíticos (TBF) presentan una microestructura compuesta por ferrita bainítica y algo de martensita, además de austenita retenida, que se encuentra mayormente en forma “interlath” entre las láminas de ferrita. Esta fina microestructura, más el efecto TRIP, hace que los aceros TRIP-TBF presenten una elevada tasa de endurecimiento por deformación y una buena combinación de alta resistencia y ductilidad [2].

El ensayo de compresión uniaxial presenta una ventaja respecto al ensayo de tracción, ya que al no producirse el “necking”, se pueden alcanzar mayores deformaciones [3]. Una de las limitaciones del ensayo de compresión es la fricción existente entre los platos y las caras de las probetas, lo que genera deformaciones plásticas no homogéneas en la muestra [3], siendo escasa la información disponible al respecto. Dicho fenómeno está definido por el coeficiente de fricción (CF), las condiciones de ensayo, el material, entre otros factores, por lo que la simulación numérica puede ser una herramienta de utilidad en este sentido.

El modelado numérico es un método utilizado en todas las áreas de la ingeniería. Tiene fundamental importancia en el cálculo de variables que son difíciles de medir. Este es el caso de la deformación plástica y el campo de tensiones en cada punto de la probeta. Anteriormente, se han realizado modelos de compresión como primeras aproximaciones utilizando materiales bilineales [4]. Sin embargo, interesa asumir ahora un material multi-lineal que se asemeja más al comportamiento real de estos materiales.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) compatible con diferentes ensayos de compresión de un acero TRIP-TBF, considerando el efecto de fricción, las deformaciones plásticas y desplazamientos, comparando los resultados obtenidos con valores determinados experimentalmente.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Materiales

Se partió de tres aceros TRIP-TBF obtenidos experimentalmente mediante tratamientos térmicos a diferentes temperaturas (300, 350 y 400 °C), partiendo de una barra cilíndrica laminada en



caliente de un acero al C-Mn-Si. Toda la información asociada a la obtención de los materiales se describe en [5].

## 2.2. Ensayos de Compresión

Para cada uno de los materiales analizados, se mecanizaron probetas cilíndricas, con un diámetro  $d_0 = 16$  mm y altura  $h_0 = 22$  mm, para ensayos de compresión uniaxial. Las muestras fueron deformadas por compresión en una máquina universal de ensayos *Amsler* de 500 Ton, hasta una altura que varía en cada uno de los materiales, de acuerdo a la capacidad de deformación de cada material. Se empleó lubricación entre la probeta y los platos de compresión. En la Tabla 1 se muestran las dimensiones de las probetas y las deformaciones alcanzadas.

Tabla 1. Dimensiones y deformación introducida en los ensayos de compresión para cada acero.

Mat	d0 [mm]	h0 [mm]	Df [mm]	hf [mm]	AR	Def[%]	sy [MPa]
300	16.09	21.92	21.60	13.20	1.362	39.8	1500
350	15.96	21.41	22.30	11.50	1.341	46.3	1010
400	16.04	21.85	23.38	11.12	1.362	49.1	850

d0: diámetro inicial; h0: altura inicial; df: diámetro final; hf: altura final; AR: relación de aspecto; Def: deformación; sy: tensión de fluencia

Se emplearon probetas con AR similares. Las deformaciones alcanzadas están relacionadas con la capacidad de deformarse plásticamente de cada acero.

Durante los ensayos de compresión se obtuvieron las curvas carga-desplazamiento en cada caso.

## 2.3. Modelos Numéricos

En el presente trabajo se ajustaron tres modelos numéricos con tres materiales diferentes correspondientes a los aceros TRIP-TBF 300, 350 y 400. En todos los casos se utilizaron los datos obtenidos de los ensayos de compresión. El modelo es bidimensional axil-simétrico, correspondiente a un octavo de la probeta [4]. Los elementos utilizados son planos cuadráticos (de 8 nodos, PLANE183), con el fin de capturar las irregularidades en la zona de agarre. La densidad de malla es de 0,1mm, resultando en 2378 nodos y 7450 elementos. Como en modelos anteriores, el plato se asume rígido con (módulo elástico 1E20). Esta simplificación se realiza para no modelar toda la geometría de los platos, y para facilitar el contacto y los tiempos de cálculo.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el desarrollo de los modelos, se comenzó definiendo en cada caso al material multi-lineal, ajustando la curva obtenida del ensayo de compresión punto a punto de forma iterativa, de manera tal que por un lado la tensión de fluencia inicial se corresponda a la calculada con los datos del ensayo y por otro lado que la curva tensión deformación del modelo, obtenida a partir de la curva carga-desplazamiento, sea similar a la del ensayo, para un coeficiente de fricción arbitrario. Posteriormente se verá que este coeficiente no presenta un efecto relevante en la curva carga-desplazamiento, para estos niveles de deformación.

En la Tabla 2 pueden verse la comparación entre los resultados experimentales (Exp) obtenidos para el diámetro final de las probetas ensayadas en compresión (Df) y las obtenidas para cada modelo de material considerando CF=0,1 y 0,2 (mejor ajuste). Se presentan también los errores porcentuales obtenidos (Err) en cada caso. Se puede ver que en general los errores son muy bajos oscilando entre 0,2 y 2% para los distintos materiales y CF analizados. El valor del CF puede depender de las condiciones particulares de cada ensayo.

Tabla 2. Diámetros finales (Df) experimentales y obtenidos del modelo para CF=0,1 y 0,2, para cada material, así como el error (Err).

Mat	Df [mm]			Err [%]	
	Exp	CF 0,1	CF 0,2	CF 0,1	CF 0,2
300	21.60	21.34	21.65	1.20	0.23
350	22.30	22.25	22.61	0.22	1.39
400	23.38	22.87	23.18	2.18	0.86

#### 3.1 Acero 300

En la Figura 1 se muestra la curva Tensión-Deformación modelada. Como se mencionó anteriormente, el mismo fue ajustado con una tensión de fluencia inicial de 1500 MPa y fueron ajustándose los puntos de forma iterativa para que la respuesta de carga desplazamiento (traducida a tensión deformación) sea coincidente con la del ensayo. Puede verse que la forma de la curva difícilmente puede ser ajustada mediante un material bilineal o incluso tampoco con una curva potencial.

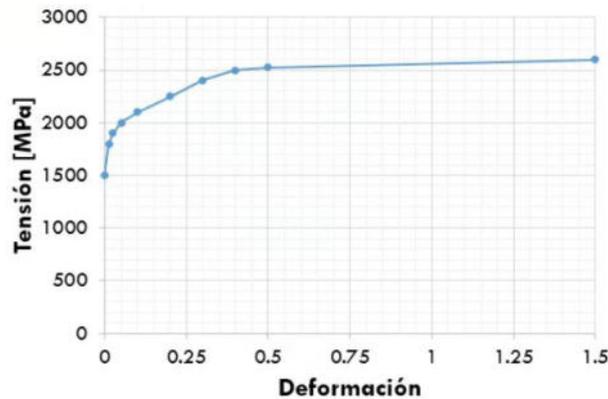


Figura 1. Curva Tensión – Deformación modelada del acero 300.

En la Figura 2 se muestra la tensión (obtenida mediante carga y diámetro inicial) vs deformación para CF 0,1 y 0,2. Puede verse que la forma de la curva es acorde a lo previsto por la teoría en relación al efecto de la fricción en el ensayo de compresión [3]. Asimismo, puede verse la curva no varía significativamente al variar el CF entre 0,1 y 0,2. Para ambos CF se observa un muy buen ajuste con la curva experimental. Sin embargo, para este material, se ve que para cierto rango de deformaciones la tensión es levemente superior para el caso de menor coeficiente de fricción, aunque en un valor no muy significativo. Para corroborar que esto no esté relacionado con un problema de densidad de malla, se corrió el mismo modelo con un largo de elemento 0,1mm (30000 nodos), obteniendo resultados similares.

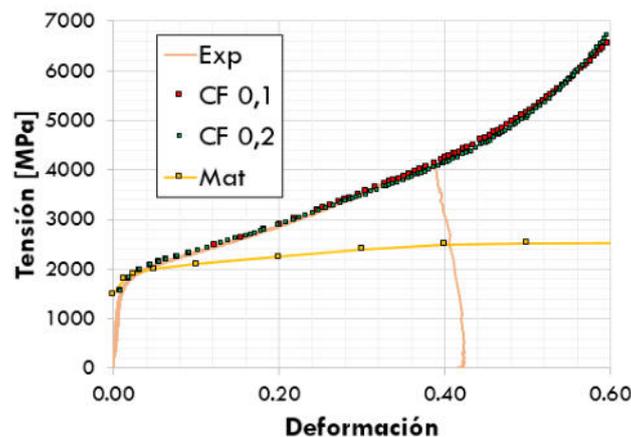


Figura 2. Acero 300. Ajuste Tensión Deformación de la probeta para diferentes CF.

En la Figura 3 se muestran la distribución de deformaciones plásticas equivalentes en un corte transversal de la probeta, para CF 0,1 y 0,2.

En principio se observa el cono de baja deformación en la zona de contacto con el plato. Asimismo, se detecta la zona de elevada deformación en la zona central y contigua al cono de

baja deformación en dirección diagonal. Puede verse que la variación de las deformaciones máximas en el centro de la probeta es significativa con un aumento del CF de 0,1 a 0,2, mientras que en el apoyo presentan valores similares para diferentes CF (y son muy puntuales dependiendo también de la densidad de malla). Esto se debe a que ambos casos se tiene un flujo plástico desde la superficie lateral de la probeta que entre en contacto con el plato.

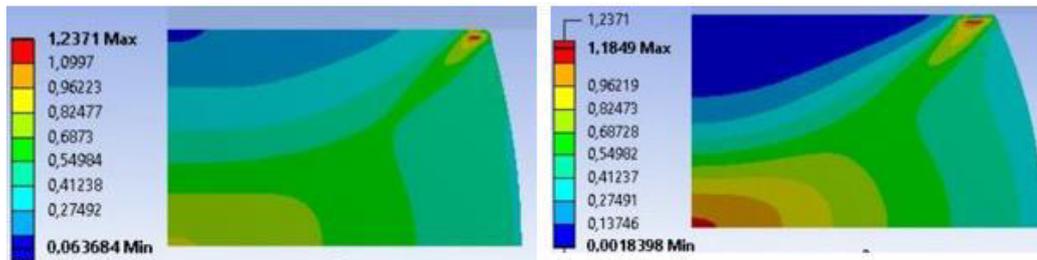


Figura 3. Acero 300. Deformación plástica equivalente. CF 0,1 (izq.) y 0,2 (der.)

En la parte izquierda de la Figura 4 se ve que se llama  $d_1$  al diámetro final original en la base de la probeta, a  $d_2$  como el diámetro original, más el anillo de pared original de la probeta que se apoya en el plato a medida que aumenta la deformación. Esto es consistente con la observación experimental sobre la superficie de la probeta de un anillo periférico más brillante. En la parte derecha de la figura se ve la influencia del coeficiente de fricción en el diámetro final en el centro de la probeta ( $df$ ) y de apoyo  $d_1$  y  $d_2$ , todos en relación al diámetro inicial ( $d_0$ ).

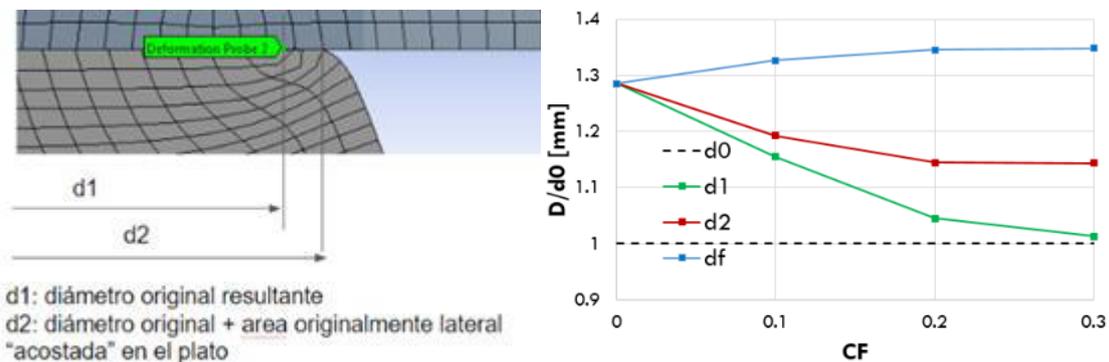


Figura 4. Acero 300. Diámetros de interés (izq.) e influencia del CF en la geometría final

Para CF hasta 0,2 se observa un efecto significativo en los diámetros mencionados, disminuyendo el  $d_1$  y  $d_2$  con el CF.

### 3.2 Acero 350

El acero 350 se ajusta con una tensión de fluencia de 1010MPa de acuerdo con lo determinado en el ensayo. En la Figura 5 puede verse la curva utilizada. Se agrega además una línea de



tendencia potencial que incluye las deformaciones contiguas a 0 y hasta 50%. Puede verse claramente que el ajuste con este tipo de función puede realizarse dentro de un cierto rango, al incluirse deformaciones mayores no será correcto.

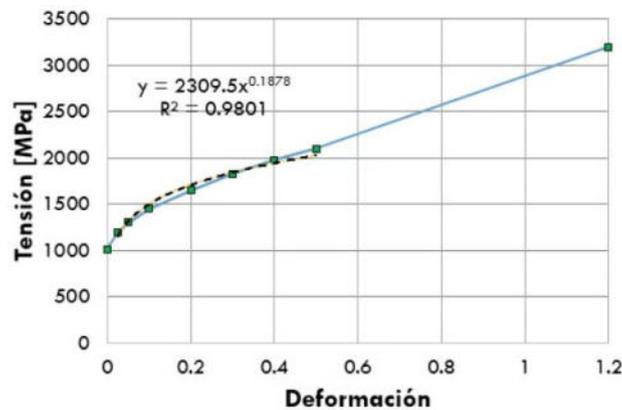


Figura 5. Acero 350. Tensión vs. Deformación

En la Figura 6 se muestran las curvas tensión deformación para diferentes coeficientes de fricción. Se muestra también la curva de material multi-lineal aproximado en esta zona de deformación. Puede verse un excelente ajuste de la curva modelada, respecto de la experimental. Asimismo, se observa resultados similares para CF de 0,1 y 0,2.

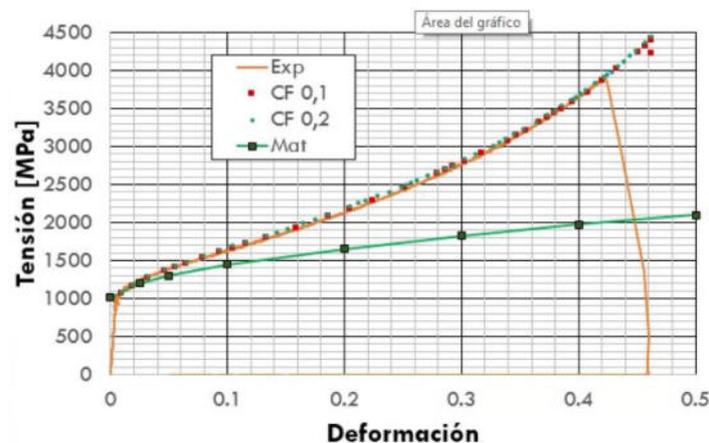


Figura 6. Acero 350. Ajuste Tensión Deformación de la probeta para diferentes CF.

En la Figura 7 se muestra una comparación de la geometría de la probeta al final del ensayo con la del modelo para un CF de 0,1 (recuadro línea blanca), que es el que mejor ajusta, tal como puede verse en la Tabla 2. Puede verse que la curvatura predicha por el modelo es muy satisfactoria.

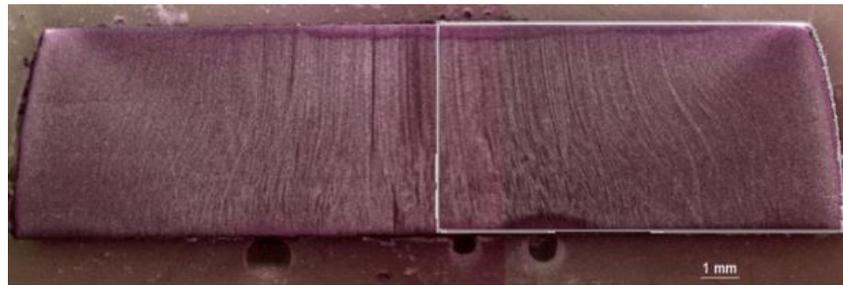


Figura 7. Acero 350. Geometría de probeta experimental vs modelo. CF 0,1.

Puede verse que el diámetro final crece al aumentar la fricción, mientras que los diámetros de apoyo disminuyen, acercándose al diámetro original de la probeta. Se observa un comportamiento similar al descrito para el acero 300.

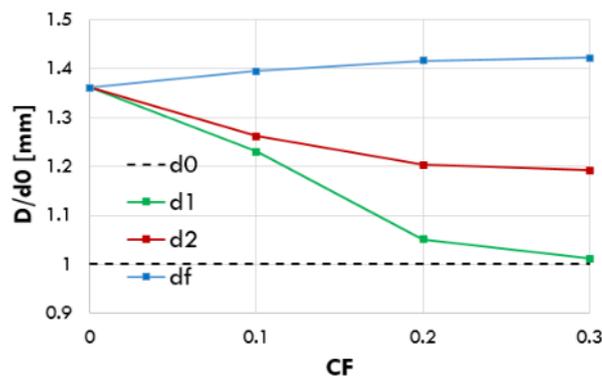


Figura 8. Acero 350. Variación de geometría en función de CF.

En la Figura 9 se muestra una comparación entre las deformaciones plásticas equivalentes para CF 0,1 y 0,2.

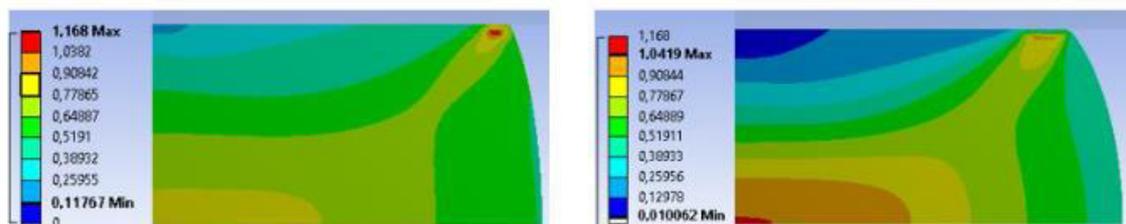


Figura 9. Acero 350. Deformaciones plásticas equivalentes para diferentes CF: 0,1 (izq); 0,2 (der)

Puede verse que las deformaciones máximas difieren notablemente en el centro de la probeta. Si se compara con la deformación teórica suponiendo abarillamiento nulo, que debería ser



aproximadamente de 46%, se ve que en ambos casos este valor es superado ampliamente en el centro de la probeta, con máximos de aproximadamente 70% en el caso de CF 0,1 y de 100% en el caso de CF 0,2. Los máximos en los apoyos varían entre sí levemente y se hacen menores para CF mayor, probablemente porque el área de apoyo aumente y la concentración de tensiones sea inferior. En futuros trabajos se prevé el refinamiento de la malla en esta zona debido a la localización de las deformaciones.

### 3.3 Acero 400

Para este material la tensión de fluencia se estableció en 850 MPa, como puede verse en la Figura 10. El material ajustado se corresponde al ensayado en [4]. Este caso es el que mejor se ajusta a una función potencial, la cual se muestra en la figura. Si bien el valor de ajuste es bueno, la diferencia con las tensiones para deformaciones máximas es notable.

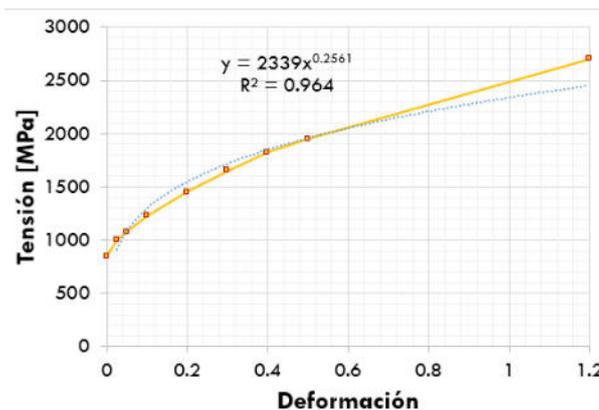


Figura 10. Acero 400. Tensión vs. Deformación.

En la Figura 11 se muestra el comportamiento del modelo para diferentes CF. Puede verse que como en los materiales anteriores la respuesta es prácticamente similar a la experimental. Al igual que antes, el CF no tiene influencia en el comportamiento para este rango de deformaciones y de valores de CF analizados.

En la Figura 12 se muestra la influencia de CF en la geometría de la probeta. Puede verse que como en los casos anteriores, el diámetro final aumenta levemente, con valores mayores a los anteriores (material más blando y mayor deformación final).

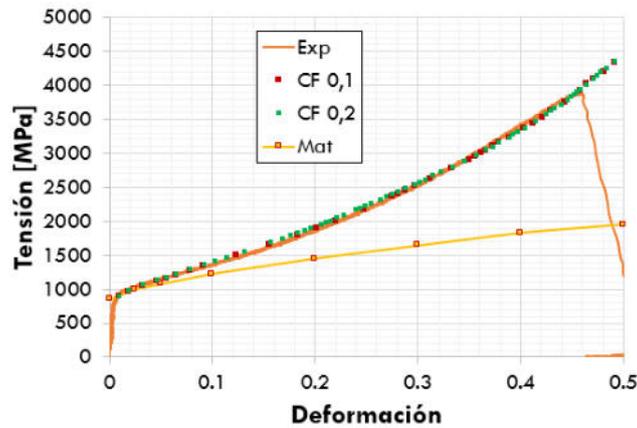


Figura 11. Acero 400. Ajuste Tensión Deformación de la probeta para diferentes CF.

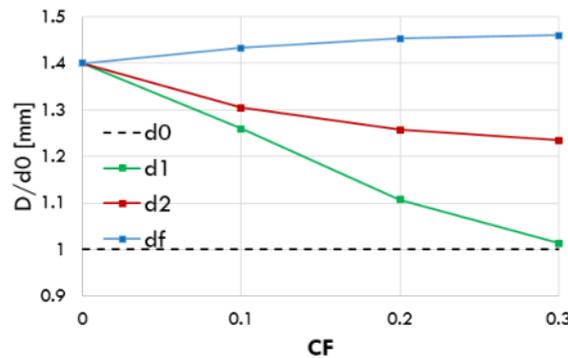


Figura 12. Acero 400. Variación de geometría en función de CF.

En la Figura 13 se muestran las deformaciones plásticas equivalentes para CF 0,1 y 0,2, comparadas con los mismos valores máximos. En este caso los máximos varían entre 90% y 110%. Con los máximos en los apoyos ocurre lo mismo que en el caso anterior.

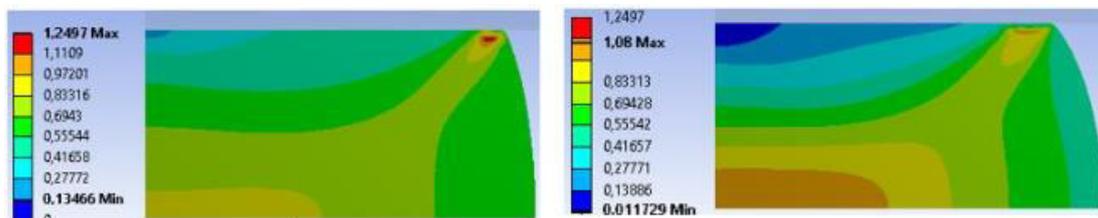


Figura 13. Acero 400. Deformaciones plásticas equivalentes para CF 0,1 (izq.) y 0,2 (der.)

### 3.4 Deformaciones plásticas equivalentes en función del CF



En la Figura 14 se muestran las deformaciones plásticas equivalentes en el centro de la probeta en función del CF para cada uno de los materiales. Puede verse que a medida que aumenta la fluencia máxima del material (300 a 400), la evolución de esta deformación pasa de ser lineal homogénea (en el caso de 400), a tener un comportamiento más acentuado en coeficientes de fricción bajos, siendo el caso de 300 un caso extremo en el que no sólo la deformación no aumenta desde CF 0,2 a 0,3 sino que disminuye, aunque la disminución es muy baja en valor absoluto. Se ha verificado este mismo comportamiento para una malla con el doble de elementos. Este comportamiento puede estar relacionado con la forma de la curva de tensión-deformación obtenida anteriormente para este material.

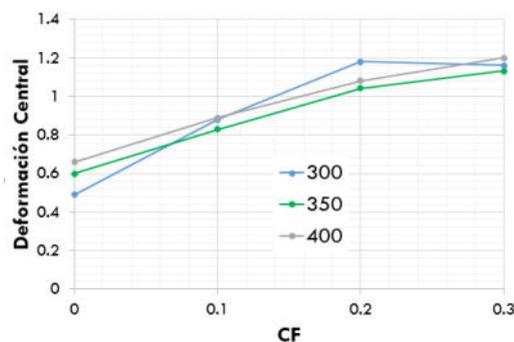


Figura 14. Deformaciones plásticas equivalentes en el centro de la probeta

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrollaron tres modelos numéricos para representar los ensayos de compresión de tres materiales TRIP diferentes. Para todos los casos se obtienen diámetros finales con errores muy bajos frente a los experimentales. Puede verse que el CF no tiene una influencia significativa en la carga (tensión) para la zona de deformación de interés, con lo cual el valor óptimo de éste puede evaluarse según el diámetro máximo y las geometrías finales. Según el diámetro final, resulta óptimo el de 0,1 para el acero de 350, pudiéndose verificar incluso que la geometría final es similar a la experimental. Para los otros materiales los errores son más bajos en diámetro final para CF 0,2. El valor de CF es sin embargo muy dependiente de las condiciones del ensayo. Las deformaciones plásticas equivalentes resultaron, mínimas en el caso del acero 400, y máximas en el caso del material 300. Esto se corresponde con los valores de la curva tensión deformación representativa de cada material.

Se analizó también la deformación de la superficie lateral de la probeta sobre los platos, viéndose que en todos los casos hay un contacto de la superficie lateral sobre los platos que provoca un aumento del diámetro de un 10% a un 20%, teniendo en cuenta que los materiales y las deformaciones finales no son las mismas. Se observa que en el acero 400 el comportamiento es



más homogéneo para los diferentes valores de CF, mientras que en 300 y 400 el aumento de esta área es mayor para coeficientes de fricción más bajos.

Finalmente, se analizó el comportamiento de la deformación plástica en el centro de la probeta en función de CF. Puede verse que en el material de menor fluencia y curva más similar a una potencial, prácticamente es lineal. Sin embargo, en los aceros 350 y 400 que tiene curvas de fluencia del material menos suaves, puede verse que esta deformación tiene mayor variación para coeficientes de fricción más bajos. Este comportamiento es similar al de la geometría de la probeta, con lo que puede concluirse que en el acero 400 el CF influye hasta valores más altos, mientras que en 300 las variaciones se dan más para valores más bajos.

Los modelos desarrollados en el presente trabajo pueden ser aplicados a diferentes materiales y permiten analizar el comportamiento en compresión y los fenómenos asociados, convirtiéndose en una herramienta valiosa para dicho análisis.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a INTI y a la Universidad de Buenos Aires por el apoyo económico para el desarrollo del presente trabajo y al Ing. L. Tufaro por sus discusiones en relación al ensayo de compresión.

## REFERENCIAS

- [1] S. Keeler, M. Kimchi, P. J. Mooney. *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines 6.0*. World Auto Steel, [www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org), 2017.
- [2] K. Sugimoto, T. Hojo, J. Kobayashi. *Critical assessment 29: TRIP-aided bainitic ferrite steels*. Materials Science and Technology, vol. 33, n°17, 2005-2009, 2017.
- [3] R. W. Hertzberg, R. P. Vinci, J. L. Hertzberg. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. John Wiley & Sons, EUA, 1996.
- [4] L. Buglioni, V. de la Concepción M., H.G. Svoboda. *Caracterización de un acero TRIP mediante ensayo de compresión: aproximaciones numéricas y experimentales*. Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, CAIM 2020.
- [5] K. Sugimoto, T. Hojo, A.K. Srivastava. *Low and Medium Carbon Advanced High-Strength Forging Steels for Automotive Applications*. Metals, 9, 1263, 1-14, 2019.



## DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE CÁLCULO POR MÉTODO SPH PARA PROCESOS DE GRANDES DEFORMACIONES

Luciano Buglioni <sup>1</sup>, Hernán G. Svoboda <sup>2,3</sup>

1 Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica,  
Av. Gral. Paz 5445, B1650KNA, San Martín, Buenos Aires, Argentina

correo-e: [buglioni@inti.gov.ar](mailto:buglioni@inti.gov.ar)

2 Universidad de Buenos Aires, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materiales y  
Estructuras, GTSyCM3, Av. Las Heras 2214, C1127AAR, Ciudad Autónoma de Buenos Aires,  
Argentina

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917,  
C1033AAJ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

### RESUMEN

La mecánica computacional es una poderosa herramienta utilizada de manera extensa en todas las áreas de la ingeniería y en particular, en diferentes procesos mecánicos para obtener valores de ciertas variables difíciles de medir. El método *SPH* (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) es un método sin malla, recientemente utilizado con éxito para procesos de grandes deformaciones, que presenta la ventaja de no contar con los inconvenientes de mallado del método de elementos finitos (*FEM*) tradicional. Actualmente, se reporta que el procesamiento mediante placas gráficas (*GPU*) permite alcanzar tiempos de cálculo de hasta 70 veces menores al obtenido por *CPU*. Finalmente, el desarrollo de programas de fuente abierta (*Open Source*) permite a los usuarios utilizar dichas herramientas en forma gratuita y optimizarlas para soluciones particulares. El objetivo del presente trabajo es desarrollar en paralelo dos programas libres y gratuitos, uno de ellos para *CPU* y el otro para *GPU*, para simulación de procesos que involucran grandes deformaciones plásticas de corta duración. Se utilizaron diferentes *benchmarks* que involucran procesos *FSW* y distintos ensayos mecánicos, los cuales fueron realizados en softwares comerciales con el fin de comparar con el programa desarrollado resultados de deformaciones plásticas, tensiones, cargas de contacto, temperatura y energía, entre otros, obteniendo en todos los casos resultados altamente satisfactorios.

**Palabras Clave:** *Mecánica computacional, grandes deformaciones plásticas, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)*



## 1. INTRODUCCIÓN

La mecánica computacional es una herramienta cada vez más utilizada en todas las áreas de la ingeniería, para la simulación de diferentes procesos, permitiendo obtener valores de ciertas variables que no pueden ser medidas. Los autores han trabajado recientemente en la simulación numérica de procesos de Soldadura por Fricción- Agitación (FSW) y su variante de punto (FSSW) [1,2]. Estos procesos involucran diferentes fenómenos tales como ciclos térmicos, extenso flujo plástico y tensiones residuales que pueden ser analizados desde diversos enfoques. Diversos investigadores, incluidos los autores de este trabajo, han utilizado métodos como el de Elementos Finitos (FEM) con movimiento de malla (ALE) [1,2]. Sin embargo, se han observado problemas de convergencia por grandes distorsiones de malla, sumado a extensos tiempos de resolución, incluso para procesos de soldadura de pocos segundos y utilizando técnicas de mejora de la velocidad de cálculo como el *mass scaling*. Otro de los inconvenientes de la técnica ALE es que es altamente difusiva, debido a los medios por los cuales el material es conducido de un elemento al otro [3]. Este método también pierde precisión cuando el flujo no es perpendicular a las caras del elemento. Por otra parte, el método *Smoothed Particle Hydrodynamics* es un método sin malla, utilizado para una gran cantidad de problemas dinámicos. Dada su naturaleza libre de malla, puede ser fácilmente formulado en un marco de referencia *lagrangiano*. Esto también provee un poderoso marco para resolver problemas de gran deformación plástica. El método fue propuesto por dos grupos independientes en 1977 en el campo de la astrofísica. En 1982 fue modificada la formulación para conservar la cantidad de movimiento lineal y angular [5]. Dicho método ha sido recientemente utilizado con éxito para el proceso FSW y su variante de punto [3], con la ventaja de no contar con los inconvenientes de mallado del método FEM tradicional. Asimismo, con ciertas modificaciones ha presentado tiempos de cálculo ventajosos.

Por otra parte, el desarrollo de programas gratuitos de fuente abierta (*Open Source o FOSS*) permite a los usuarios utilizar dichas herramientas y optimizarlas para soluciones particulares. Los autores han trabajado anteriormente en la simulación numérica de procesos de Soldadura por Fricción- Agitación (FSW) y su variante de punto (FSSW), así como en ensayos mecánicos que involucran grandes deformaciones, recurriendo a herramientas comerciales que emplean el método FEM, con las limitaciones antedichas para estas aplicaciones [4].

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de un programa de cálculo numérico para resolver problemas relacionados a los procesos termo-mecánicos presentados. En particular, como primera etapa en este desarrollo, interesa que el programa resuelva problemas térmicos. Para esto se elige el método de integración temporal explícito y el método SPH con el fin de ampliar este programa para la resolución de problemas de grandes deformaciones plásticas. Esto implica introducir relaciones constitutivas de diferentes materiales (Bilineal, Hollomon,



Jonhson-Cook), ecuaciones de calor, contacto, acoplamiento mecánico-térmico y cálculo de energía, todo esto en diferentes lenguajes de programación (C++/Fortran/CUDA).

## 2. DESARROLLO

La herramienta de software desarrollada y puesta a prueba en este trabajo (*WeldForm*)(I, II), ha sido escrita tomando como base la librería existente *PersianSPH*, agregándose las ecuaciones de plasticidad, flujo de calor, contacto con fricción e intercambio de calor, acoplamiento térmico, y materiales bilineales, *Hollomon* y *Johnson-Cook* y condiciones de borde en lenguaje C++. Se planea que esta herramienta resuelva problemas elastoplásticos con formulaciones de materiales de grandes deformaciones y que trabaje tanto en CPU como en la placa gráfica (GPU), en su propio lenguaje (CUDA C++). Actualmente trabaja en CPU con varios núcleos en simultáneo, mientras que la herramienta GPU se encuentran en un estado avanzado de desarrollo. Para las pruebas se han realizado casos de testeo extraídos y probados en otros trabajos, así como otros propuestos aquí. Dentro de estos últimos se encuentran casos prácticos de particular interés, fundamentalmente el de FSW, sobre el cual los autores han realizado diferentes trabajos tanto experimentales como numéricos [1,2]. Para este programa se ha escrito alrededor de 5.500 líneas de código fuente para la versión CPU del programa y más de 30.000 líneas de código en casos de testeo, mientras que se han escrito más de 9.000 líneas de código para la versión GPU hasta el momento.

Debido a la gran cantidad de ecuaciones y algoritmos involucrados, se detallan los rasgos generales del método SPH y las consideraciones de resolución. En el método SPH, las ecuaciones de conservación son resueltas por interpolación a partir de un set de partículas  $j$  que están dentro de la influencia del dominio de la partícula  $i$  (Fig. 1).

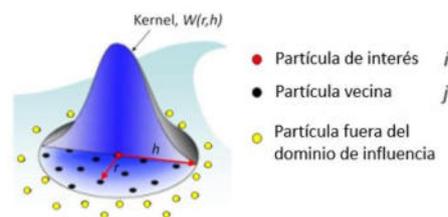


Figura 1: interpolación en el método SPH [3]

El tamaño de influencia está determinado por la longitud de suavizado ( $h$ ), la cual es generalmente tomada como múltiplo de la distancia entre partículas  $\Delta S$  (Ec. 1).

$$h = h_{scale} \Delta S \quad (1)$$



En este trabajo se toma el factor de escala  $h_{scale}$  como 1,2 de acuerdo con [3]. En el método SPH, una función continua es aproximada mediante una integral de convolución (Ec. 2).

$$f(\bar{x}) = \int f(\bar{x}')W(\bar{x} - \bar{x}', h)d\bar{x}' \quad (2)$$

Donde  $W(\bar{x} - \bar{x}', h)$  es llamada la función *Kernel* o función de suavizado. Es una función de la distancia donde se desea calcular la función ( $\bar{x}$ ) y la ubicación de interpolación ( $\bar{x}'$ ). La función *Kernel* es la base del método SPH y es la clave para la naturaleza de malla libre del método. De acuerdo con Liu et al. [6,7], la función *Kernel* debe cumplir diferentes requerimientos, a saber: unicidad, soporte compacto, positividad, decrecimiento monótono, propiedad de función delta de Dirac, simetría y suavidad.

El *Kernel* utilizado en este trabajo es el *Cubic Spline* [4,7] (Ec. 3).

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3 & 1 \leq R < 2 \\ 0 & R \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

Siendo  $R = |x_i^\alpha - x_j^\alpha|/h = r/h$ . La popularidad de esta función se basa en que satisface todos los requerimientos y es sencilla de implementar. La derivada primera es suave, mientras que la segunda es lineal a trozos.

La ecuación de conservación de momento es discretizada de la siguiente manera [3]:

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^{N_i} m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (4)$$

Donde  $v_i$  es la velocidad de la partícula  $i$  en la dirección  $\alpha$ ,  $m_i$  la masa,  $\sigma$  la tensión,  $\rho$  la densidad y  $\partial W_{ij}/\partial x_i^\beta$  la derivada parcial de la función *Kernel*. La conservación de masa se calcula de la siguiente manera [3]:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_{j=1}^{N_i} \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (5)$$

La relación entre la tasa de tensión desviadora  $S$  y deformación  $\varepsilon$  es la ecuación de *Jaumann*:

$$\dot{S}^{\alpha\beta} = 2G \left[ \dot{\varepsilon}^{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \dot{\delta}^{\alpha\beta} \varepsilon^{\gamma\gamma} \right] + S^{\alpha\beta} \Omega^{\beta\gamma} + \Omega^{\alpha\gamma} S^{\gamma\beta} \quad (6)$$



Donde  $G$  es el módulo de corte,  $\dot{\epsilon}$  la velocidad de deformación,  $\Omega$  la parte antisimétrica del tensor gradiente de deformación. En [3,4] se detallan extensamente la discretización de la ecuación de flujo de calor y condiciones de borde térmicas. Se escribieron diferentes algoritmos de contacto, siendo utilizado en este trabajo el de [8]. En este, se considera la fricción estática y dinámica. El algoritmo se ha escrito para problemas bidimensionales (contacto con líneas) como tridimensionales (superficies). En ambos casos se consideran los criterios de [3] para evaluar superficies.

Para la evolución de cada paso temporal (algoritmo principal con todos los pasos de resolución), se modificó el *solver* original implementando un esquema de integración temporal del tipo Euler modificado [3]. Es notable la mejoría del paso de tiempo mínimo de acuerdo con [9]. Se escribieron *solvers* alternativos de integración de los métodos de *Verlet* y *Leapfrog*.

La elección del paso de tiempo se hace a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \min \left[ \chi \frac{0.3\rho c_p}{k} h^2, CFL \frac{h}{c + |v|}, \epsilon m \frac{2|v|}{|F_n|} \right] \quad (7)$$

El primer término es el paso de tiempo mínimo térmico, el segundo es el paso de tiempo mínimo basado en el criterio de Courant-Friedrichs-Lewy que depende de la velocidad de propagación de la onda elástica en el medio, y el tercero, el tiempo mínimo debido al contacto. En la ecuación  $\rho$  es la densidad,  $c_p$  la capacidad calorífica,  $k$  la conductividad,  $h$  la distancia entre partículas,  $c$  la velocidad del sonido en el medio,  $m$  la masa,  $v$  la velocidad,  $F_n$  la carga de contacto normal y  $\chi$ ,  $CFL$  y  $\epsilon$  constantes. Debido al alcance del trabajo, para mayor detalle referirse a [3].

En el método SPH existen algunas inconsistencias, las más importantes son carencia de completitud y consistencia en el borde, inestabilidad tensional y modos de energía cero (consecuencia de calcular las variables y sus derivadas en los mismos puntos). Para la inestabilidad tensional se ha implementado viscosidad artificial [3]. Para la inconsistencia en el borde se programó un algoritmo basado en Bonet explicado en [3]. En este trabajo no se han corregido estas inconsistencias, dado que se han obtenido resultados por demás aceptables para representar la ecuación de calor y las variables mecánicas, siguiendo con el trabajo de [3].

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Ensayo de Tracción para validación de material de Johnson-Cook

En primer lugar, se validó un ensayo de tracción con un material de Johnson-Cook, donde la tensión de fluencia  $\sigma_y$  depende de la deformación  $\epsilon$ , la velocidad de deformación  $\dot{\epsilon}$  y la temperatura  $T$ , donde  $T_m$  es la temperatura de fusión y  $T_t$  la de transición:

$$\sigma_y = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)][(T - T_t)/(T_m - T_t)]^m$$

Las características del ensayo son similares a [3], pero el material es modificado. El ensayo se realiza a temperatura constante. Los parámetros se muestran en la Tabla 1, en la que se agregan además los incluidos en el ensayo de FSW.

	A[MPa]	A[MPa]	n	c	eps_0	m	T_m	T_t
Tracción	175	380	0,34	0,0015	1	0	-	-
FSW-CompRot	276	255	0,3	0,0015	1	1	582	0

Tabla 1. Parámetros de Johnson-Cook utilizados en este trabajo

En la Figura 2 puede verse la tensión vs. Deformación obtenida en un punto central de la probeta y la comparación con la ecuación de Johnson Cook. Se ven resultados similares a la curva teórica, lo cual indica que el mecanismo de cálculo de tensiones de *Jaumann* y el algoritmo de retorno radial funcionan correctamente.

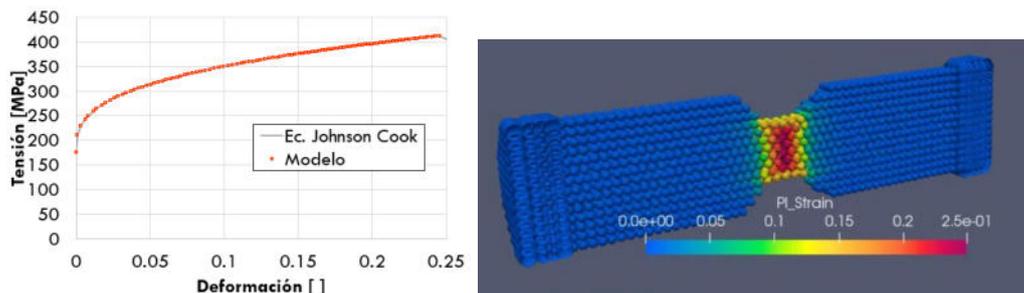


Figura 2. Tensión vs deformación Johnson Cook (izq.), deformación plástica equivalente (der.)

### 3.2 Ensayo de compresión de acero 1010

El siguiente caso de testeo muestra la capacidad de la herramienta de resolver problemas elasto-plásticos, contacto que involucra más de una superficie y material de *Hollomon*. La velocidad de desplazamiento se varió notablemente, desde velocidades muy lentas hasta el caso mostrado que se toma de 1m/s, donde los efectos dinámicos ya no son despreciables. Este caso demuestra la capacidad de la herramienta de trabajar con más de una superficie de contacto. El material se modela mediante la ecuación de Hollomon con una tensión de fluencia inicial de 260MPa, una constante  $K = 715,68 \text{ MPa}$  y un exponente de endurecimiento  $n = 0,22$ . Las dimensiones de la probeta son de 25mm de diámetro y 30mm de altura inicial, y se comprimen 12 mm en total. El modelo FEM se realizó en *ABAQUS* (como todos los subsiguientes) y se modeló como bidimensional. Se realizaron diferentes modelos con distancias entre partículas de 0,9 mm, dando un total de 19272 partículas para la probeta y 800 partículas en cada plato. En la Figura 3 se comparan los desplazamientos laterales obtenidos con FEM y SPH, lo cual verifica el comportamiento correcto del algoritmo de contacto.

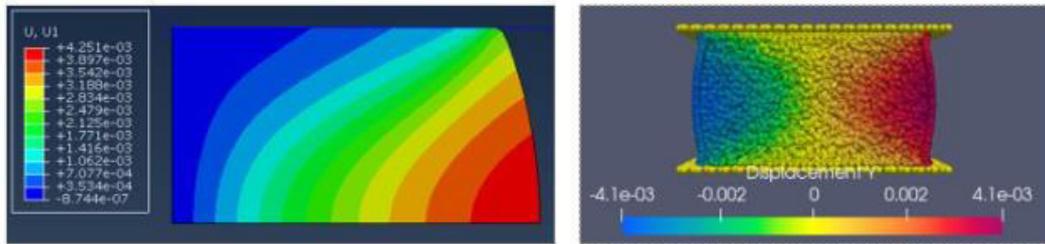


Figura 3. Desplazamientos en el plano lateral. FEM (izq.) vs SPH (der.)

En la Figura 4 se muestran las deformaciones plásticas equivalentes obtenidas por ambos métodos. Se verifica que los valores son muy similares tanto en el centro como en la zona de contacto con los platos.

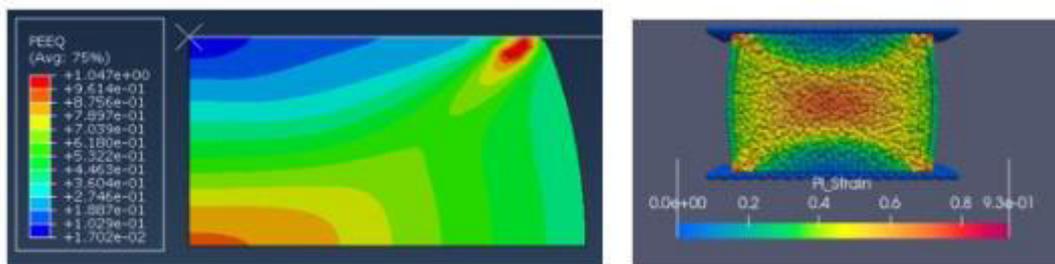


Figura 4. Deformación plástica equivalente. FEM vs. SPH

En la Figura 5 se muestra la carga vs. tiempo obtenida por SPH y FEM. Se ve que los resultados son satisfactorios, con leves diferencias. Estas diferencias no se veían en los testeos con velocidades menores de los platos, y pueden deberse a densidades de malla, la deficiencia del método en los bordes (recordar que no se introdujo la corrección de gradientes en este trabajo).

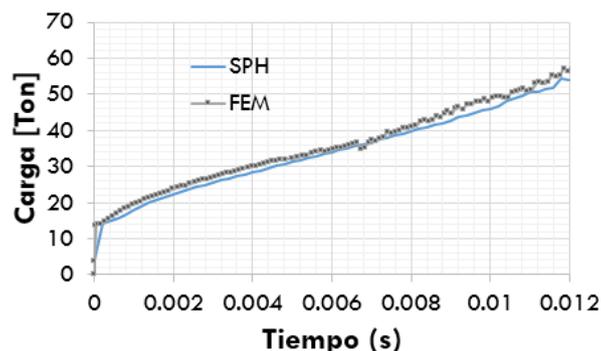


Figura 5. Ensayo de compresión. Carga Total vs tiempo

### 3.3 Compresión con rotación y acoplamiento térmico en diferentes materiales

El siguiente caso de testeo consiste en un cilindro similar al desarrollado en [3]. Si bien las dimensiones de la probeta son extremas (radio de 150mm y altura 560mm) sirve como ejemplo

para testear el algoritmo de contacto y generación de calor. A fines de testear el algoritmo de generación de calor por contacto, se modifica el material y las sollicitaciones (se le agrega rotación de 600 rpm siendo la velocidad del plato la misma), agregándose un coeficiente de fricción de 0,2. Se asume que no hay conducción térmica entre piezas, y que el 90% de la deformación plástica es convertida en calor. Se define un material bilineal con módulo tangente del 10% del módulo elástico y un material de Johnson-Cook cuyas constantes se muestran en la Tabla 1. La distancia entre partículas es de 15mm lo que da alrededor de 12000 partículas.

En la Fig. 6 se muestran las deformaciones plásticas equivalentes obtenidas por SPH y FEM. Para una mejor comparación se ajustan los máximos obtenidos por FEM a los de SPH. Puede verse que los resultados son bastante similares, especialmente en la zona de máximos. Puede verse que debido a que no se utilizó la corrección de gradientes, en los bordes de la probeta las deformaciones plásticas son menores.

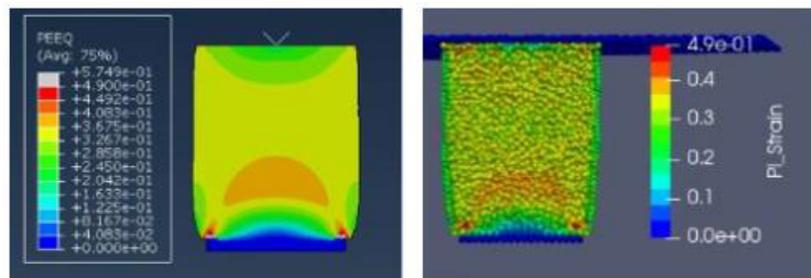


Figura 6. Deformación plástica equivalente 20ms. Material Bilineal

En la Figura 7 se muestran los desplazamientos en una dirección luego de 20 ms, los cuales dan similares a los obtenidos por FEM. Lo mismo ha sido verificado con las velocidades, lo cual tiene sentido dada su relación. Esto demuestra que el algoritmo de contacto por fricción funciona adecuadamente.

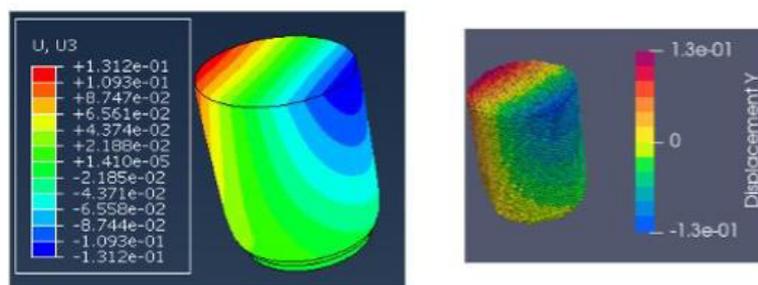


Figura 7. Desplazamientos laterales luego de 20ms. Material Bilineal.

En la Figura 8 se muestran la carga axial y la energía por deformación plástica y fricción obtenidas. Puede verse que los resultados son muy satisfactorios.

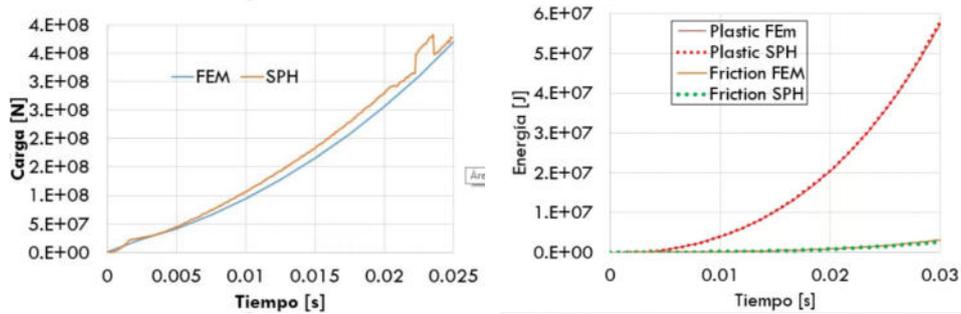


Figura 8. Carga axial (izq) y energías disipadas (der.) Material Bilineal

A continuación, se muestran las temperaturas alcanzadas a los 20 ms para el material bilineal. Puede verse que los valores de temperatura máxima en el centro de la probeta (producto del calor generado por deformación plástica) son similares. Por otra parte, puede verse que en el borde (marcado con rojo), los valores máximos difieren de los obtenidos por *FEM*. Esto puede deberse a no haber utilizado la corrección de gradientes, o un inconveniente de densidad de malla. De todas formas, los valores extremos de *FEM* son un orden de magnitud superiores a los contiguos, lo cual debería revisarse.

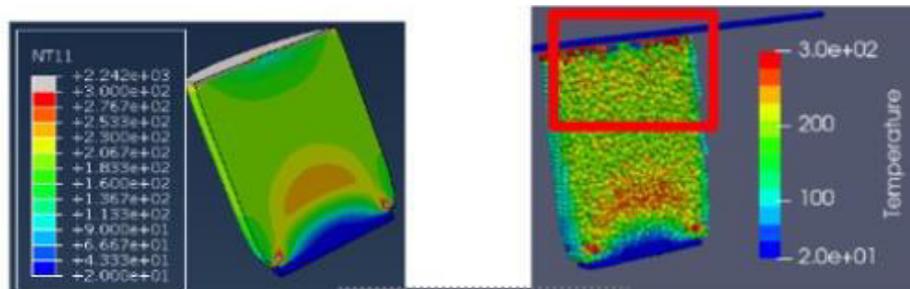


Figura 9. Temperaturas FEM (izq.) vs SPH (der.) Material Bilineal.

En la Figura 10 se muestran las deformaciones plásticas para el caso de *Johnson-Cook*, a los 20 ms. En este caso se ajustaron los máximos obtenidos por el método SPH para hacerlos similares a ABAQUS. Puede verse que los resultados son muy similares.

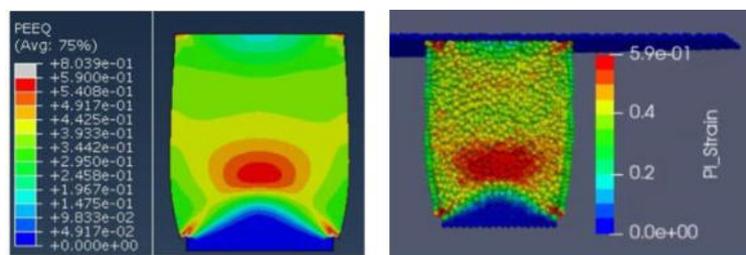


Figura 10. Deformaciones plásticas 20 ms. SPH vs FEM para JOHNSON COOK

En la Figura 11 se muestra la carga axial y la energía por disipación para el material de Johnson-Cook. Puede verse que por el método SPH se obtienen valores más altos de carga y de energía

disipada por deformación plástica. Sin embargo, se han analizado los desplazamientos como en el caso bilineal y dan exactamente iguales, con lo cual es probable que estas diferencias sean por densidad de malla o por la no aplicación de la corrección por gradientes. El comportamiento visto se ha visto también en problemas de pocas partículas.

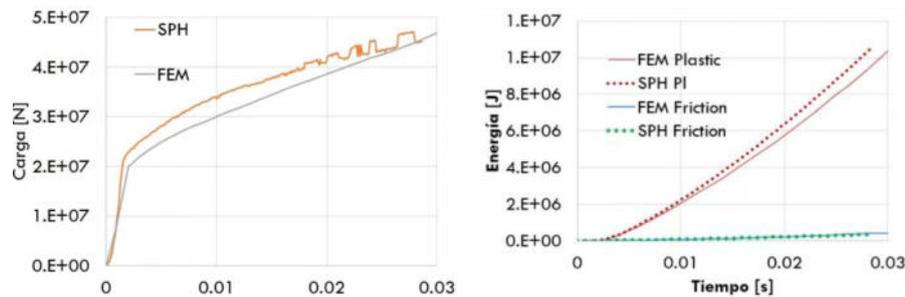


Figura 11. Carga axial (izq.) y energías disipadas (der.) Material Johnson-Cook

### 3.4 Friction Stir Welding (FSW)

Este ejemplo se presenta como prototipo con el fin principal de mostrar las capacidades de la herramienta. Para validarlo por FEM, implica introducir las complejidades de una malla ALE (*Euleriana Lagrangiana*) con remallado constante. Aún no se ha validado pero las magnitudes se encuentran en el orden de los trabajos presentados realizados anteriormente [1,2]. La herramienta (rígida) de 12mm de diámetro con un pin con un diámetro de base de 2,8mm y un diámetro de raíz de 4,4 mm, y una profundidad de 1,5mm. La concavidad del hombro es de 1°. El material de *Johnson-Cook* se presenta en la Tabla 1. El dominio se tomó de 20x20x3mm. Las velocidades de rotación y avance son de 1200rpm y 1mm/s respectivamente. La distancia entre partículas es de 0,6mm lo cual da un total de aproximadamente 7000 partículas. El coeficiente de fricción se toma de decreciente de 0,3 a 0,1 de 0°C a 500°C, respectivamente. Se adopta un coeficiente de convección de 1000 W/m<sup>2</sup>-k en la parte inferior y de 5000W/m<sup>2</sup>-k en las superficies laterales. Para reducir los tiempos de cálculo, se aplica una aceleración por *Time Scaling* de un factor de 30 (todas las magnitudes que incluyen al tiempo son escaladas con un este factor) [3].

En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos a 1,35s luego de insertado el pin, momento en el cual comienza el contacto del hombro con la chapa

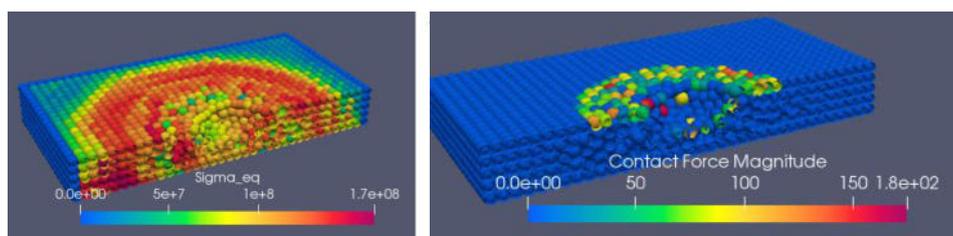


Figura 12. Tensión de Von Mises (izq.) y Fuerza de contacto (der.)

Se ve que los valores de tensión están dentro del orden estudiado, mientras que se ve que las cargas de contacto son importantes en la zona del hombro, pero son muy dispersas en el pin. Esto también puede deberse a la poca densidad de malla utilizada. En la Figura 13 se muestran las deformaciones plásticas equivalentes y la temperatura alcanzada a los 1,35s, obteniéndose resultados similares a los obtenidos en bibliografía [3].

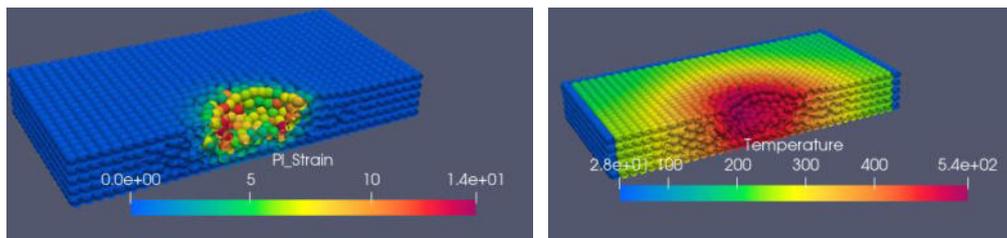


Figura 13. Deformación plástica efectiva (izq.) y temperatura (der.)

En la Figura 14 se muestra la carga axial de la herramienta a lo largo del tiempo. La misma está en el orden que la obtenida en trabajos anteriores para geometrías similares [1,2]. Queda pendiente la verificación exhaustiva con el método FEM de estos resultados.

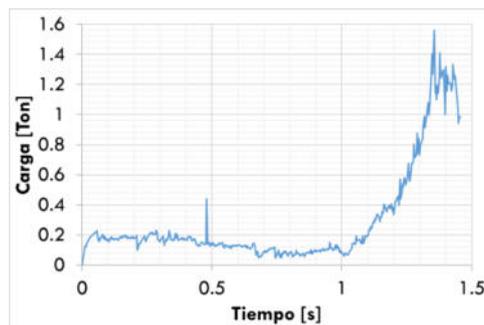


Figura 14. Carga axial vs tiempo. SPH

En este trabajo, todos los cálculos se han hecho con CPU, sin embargo, se han hecho los primeros exámenes que indican que la eficiencia por GPU es de 12X más veloz para ciertas características de equipo (*GTX1660 vs Intel Core i7*).

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta por el método *SPH* para resolver problemas mecánicos en general. La variante es muy poderosa para resolver casos con gran deformación plástica (como *FSW*) donde el método convencional FEM tiene numerosas limitaciones. Se han presentado las capacidades para resolver la plasticidad y las ecuaciones constitutivas de diferentes materiales, como bilineales, *Hollomon* y *Johnson-Cook*. Se ha demostrado la capacidad del método para resolver problemas de tracción, compresión, contacto



con fricción, generación de calor por plasticidad y fricción, obteniéndose en la mayoría de los casos resultados similares a los obtenidos en herramientas comerciales.

Se encuentran diferencias en la generación de calor por el mecanismo de fricción en el borde del dominio, esto puede estar relacionado con las deficiencias del método en los bordes si no son aplicadas correcciones, las cuales han sido programadas, pero no aplicadas por el momento.

Quedan pendientes aún numerosas verificaciones y migración a la herramienta GPU, sobre la cual se obtiene tiempos de cálculo de 12x los de CPU. Estas ventajas, sumadas a la capacidad del método por resolver problemas con deformaciones extremas, proveen una alternativa muy interesante para el cálculo de problemas de estas características, como el de FSW, forjado y mecanizado, entre otros.

## REFERENCIAS

- [1] Buglioni L., Piccini J.M., Svoboda H.G. *Desarrollo de modelos explícitos para soldadura de punto por fricción-agitación (FSSW): evaluación de la geometría de la herramienta*. Proc. del XXIV Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. 2019.
  - [2] Buglioni L., Piccini J.M., Svoboda H.G., *Análisis de proceso de soldadura de Fricción-Agitación de punto (FSSW): modelo numérico y comparación con diferentes condiciones experimentales*. Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, CAIM 2020
  - [3] K. Fraser (2017). *Robust And Efficient Meshfree Solid Thermo Mechanics Simulation of Friction Stir Welding*. Université du Québec à Chicoutimi, UQAC.
  - [4] L.Buglioni, A. Miranda, L.N., Tufaro, H.G. Svoboda. *Desarrollo de herramientas de cálculo por SPH orientadas a la resolución de problemas térmicos*. Congreso Argentino y Latinoamericano de Ingeniería, CADI/CLADI 020
  - [5] Gingold RA, Monaghan JJ. *Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics*. Journal of Computational Physics. 1982;46: 429-53.
  - [6] Liu MB, Liu GR, Lam KY (2003). *Constructing smoothing functions in smoothed particle hydrodynamics with applications*. Journal of Computational and Applied Mathematics, 155,263-84
  - [7] Liu GR, Liu MB. *Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method*. Hackensack, New Jersey: World Scientific; 2003.
  - [8] Wang. J., Wu H. CS. Gu y H.Hua (2013). *Simulating frictional contact in smoothed particle hydrodynamics*. Science Chine Technological Sciences,56, 1779-1789.
  - [9] Randles P.W., Libersky L.D. *Smoothed Particle Hydrodynamics: Some recent improvements and applications*. Computer Methods in Applied Mechanics and engineering, 139, 375-408. 1996.
- (I) <https://github.com/luchete80/WeldForm>  
(II) <https://github.com/luchete80/WeldFormGPU>



## CÁLCULO NUMÉRICO DE LAS VELOCIDADES CRÍTICAS DE UNA BOMBA DE CIRCUITO PRIMARIO DE UNA CENTRAL NUCLEAR

Fernando Palmieri <sup>1</sup>, Andreas Klempnow <sup>2</sup> y Wadi Chiapparoli <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Vibraciones Mecánicas – UTN Facultad Regional San Nicolás  
Colon 332, San Nicolás, Buenos Aries, Argentina- fpalmieri@frsn.utn.edu.ar

<sup>2</sup> Grupo de Vibraciones Mecánicas – UTN Facultad Regional Delta  
San Martín 1175, Campana, Buenos Aires, Argentina- andreas.klempnow@gmail.com

<sup>3</sup> Grupo de Vibraciones Mecánicas – UTN Facultad Regional San Nicolás  
Colon 332, San Nicolás, Buenos Aries, Argentina- wchiapparoli@frsn.utn.edu.ar.

### RESUMEN

Las centrales de generación nuclear emplean grandes bombas para introducir agua en el circuito primario, estas bombas son elementos críticos y su falla puede obligar a detener toda la planta. Es por ello que, normalmente, están instrumentadas con sensores de vibraciones para monitoreo continuo. Si bien el tipo de sensores utilizados cumplen adecuadamente la función de control en línea y alerta temprana ante posibles fallas, no permiten tener una gran capacidad de análisis sobre las vibraciones en funcionamiento. Esto se debe principalmente a la baja frecuencia de muestreo.

Durante pruebas de rutina de una de estas bombas, se determinó que experimentaba una cierta inestabilidad de vibraciones durante el arranque y la parada de la misma. Esta inestabilidad se asumió que se producía presuntamente por estar atravesando una velocidad crítica. Para confirmar esta conjetura, y ante la carencia de datos del fabricante, se decidió hacer un modelo matemático de la misma.

Como los datos geométricos eran reducidos, dado que solamente se contaban con planos generales, se empleó el método de la matriz de transferencia para modelar el rotor de la bomba y encontrar las velocidades críticas y la respuesta a las condiciones de desbalance. Para llegar a un buen resultado se debió aproximar el comportamiento de los cojinetes y la distribución de masa utilizando distintos valores probables y suposiciones tomadas de trabajos similares encontrados en la literatura específica.

Finalmente, se encontraron los valores más probables para la primera velocidad crítica del rotor de la bomba y la respuesta en el arranque y se confirmó la suposición inicial de los analistas que habían hecho las mediciones de arranque y parada de la bomba.

**Palabras clave:** *Dinámica de Rotores; Bomba; Velocidades críticas; Modelado numérico.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La generación nuclear es una de las alternativas empleadas en muchos países que tienen que abastecer una demanda creciente de energía eléctrica, en un escenario global de reducción de disponibilidad de combustibles fósiles y como alternativa que disminuye la emisión de gases de efecto invernadero en comparación con el carbón, el gas o el petróleo [1]. Es por ello que, a pesar de los requisitos de seguridad y regulatorios que tienen todos los procesos que involucran a las plantas de generación nuclear, y de las posibles consecuencias que tienen los accidentes en este tipo de centrales, aún hoy en día son una alternativa atractiva en desarrollo en varios países, dado que posibilitan generar grandes potencias de forma continua.

En febrero de 2019 se encontraban operables 450 centrales nucleares de potencia distribuidas en 30 países, totalizando una capacidad instalada de 397 GW, que representaba aproximadamente el 11% de la capacidad total de generación de energía en el mundo [2]. No obstante, desde el accidente de Fukushima en 2011, algunos países se están replanteando su continuidad en la generación nuclear, principalmente en Europa. Los países del continente asiático, en cambio están apostando fuertemente a su crecimiento.

Los accidentes como el de Fukushima o Chernóbil han generado impacto en el crecimiento de esta forma de generación. Al analizar estudios del tema [3] se observa que el número centrales nuevas que entraron en construcción se incrementó año a año hasta principio de los 80's, luego se redujo hasta mediados de los 90's y había comenzado a crecer hasta el 2012, donde vuelve a descender. No obstante, la capacidad instalada fue siempre en aumento debido a que las centrales que nuevas que entraron en servicio son, en general, de mayor potencia que las que salían de servicio.

Actualmente las nuevas tecnologías en desarrollo podrían permitir que el impacto de los residuos de este tipo de centrales se reduzca significativamente a partir del reciclado de los elementos combustibles, logrando reducir la radiación residual por debajo del nivel del uranio natural de casi 10000 años con el proceso de reciclado común usado actualmente a tan solo 500 años con los nuevos procesos [4].

El marco regulatorio y el nivel de exigencia en los controles durante la operación de estas centrales es mayor que para otras formas de generación. La detección de fallas y el monitoreo de los fenómenos que ocurren en el reactor, son temas centrales que motivan muchas inversiones y actualizaciones de los sistemas en operación.

En este contexto global, Argentina cuenta con tres centrales nucleares de potencia, Atucha I, Atucha II y Embalse. Las dos primeras son de reactor presurizado de agua pesada PHWR. La primera entró en servicio en 1974, y desde 2008 a la fecha se encuentra en un proceso de extensión de vida útil para prolongar su servicio 25 años, su potencia instalada es de 362MW.



Atucha II, fue un proyecto que estuvo parado muchos años y entró en servicio en 2014, su tecnología y equipos originales son similares a los de Atucha I, pero la duplica en potencia. La Central Nuclear Embalse, en cambio, es de tipo CANDU (Canadian Uranium Deuterium), pertenece al tipo de centrales de tubos de presión horizontales, que utiliza como combustible el uranio natural y su refrigerante y moderador es el agua pesada. Esta se puso en operación en 1984. En 2015, salió de servicio y se llevó a cabo un proyecto de extensión de vida por 30 años más, volviendo a entrar en servicio en 2019 [5].

En la figura 1 se presenta el esquema del circuito primario típico para las centrales nucleares de potencia operativas en Argentina. En ambos casos, el elemento o los elementos encargados de realizar el movimiento del agua pesada del reactor a los generadores de vapor son una o más bombas verticales que reciben el nombre de bombas principales del sistema primario.

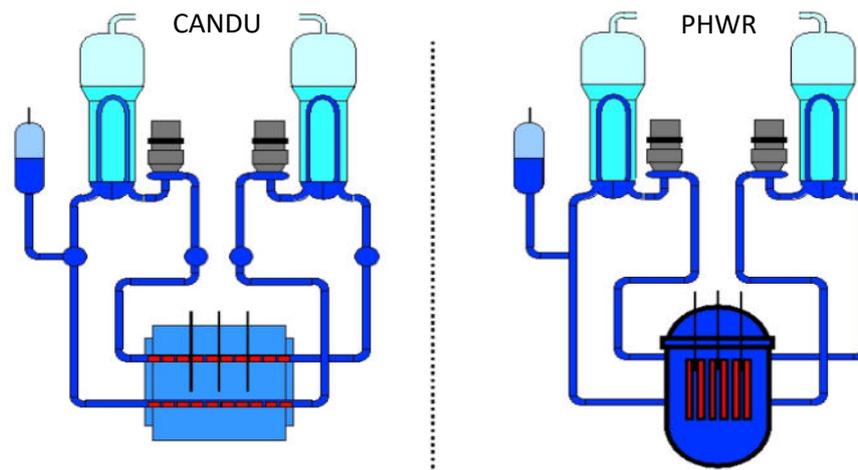


Figura 1: Esquemas de circuito primario de reactores tipo CANDU y PHWR [6].

Dichas bombas son equipos críticos para garantizar el flujo de agua y la extracción de calor del reactor en funcionamiento. En el caso de las centrales Argentinas, son máquinas que tienen ya un tiempo considerable en servicio y están instrumentadas con sensores de monitoreo de vibraciones que cumplen adecuadamente la función de control en línea y alerta temprana ante posibles fallas, pero no permiten tener una gran capacidad de análisis sobre las vibraciones en funcionamiento dada la antigüedad de los mismos y que no fueron pensados con esa función.

No obstante, durante pruebas de rutina de una de estas bombas, los analistas observaron que en los datos de vibraciones se experimentaba una cierta inestabilidad durante el arranque y la parada de la misma, esta inestabilidad puede ser atribuida a estar atravesando una velocidad crítica. Si bien, la resolución del sistema de monitoreo continuo con sensores de proximidad



instalado en la máquina, porque tomaba un registros cada 2 segundos, los valores de vibración experimentaban un incremento en la zona de 900-1000 rpm. Dada la poca cantidad de datos medidos y la carencia de datos del fabricante, se decidió hacer un primer modelo matemático de la misma para dar sustento a esta conjetura.

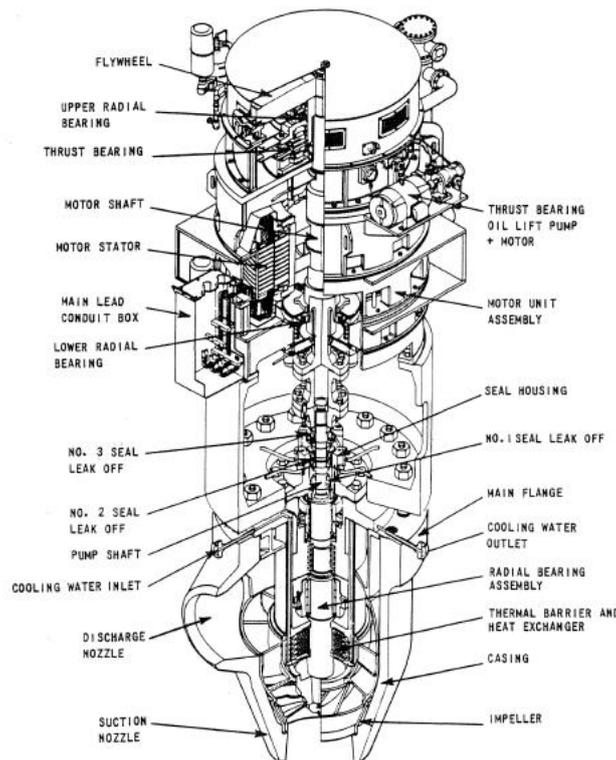


Figura 2: Bomba tipo de circuito primario [7].

El conocimiento de las velocidades es muy importante para la operación segura de las bombas. En este trabajo se describe un modelo numérico de una bomba del circuito primario del Reactor de Central Nuclear a partir de esquemas simples para poder determinar la posibilidad de existencia de una velocidad crítica en el rango de arranque de la bomba. En este trabajo se propone la primera aproximación de modelado, para luego en caso de ser requerido, poder llevar adelante la realización de un modelo más elaborado que permita simular otros problemas más complejos.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Esta bomba es de eje vertical (figura 2) con un motor de 6000 kW, en la parte superior del motor se encuentra el cojinete de soporte axial de todo el conjunto junto con un cojinete radial y un



volante de inercia. Luego el motor tiene un cojinete radial en la parte inferior. Tanto el cojinete superior e inferior están lubricados con aceite. Cuenta con una bomba que eleva el cojinete axial antes de arrancar para evitar roces. El motor se conecta con la bomba con un acople rígido y un espaciador.

En la parte inferior de la bomba, al lado del impulsor, se encuentra el cojinete inferior que es lubricado por agua. En la carcasa está el sensor de velocidad de vibraciones exterior, en la misma altura. Por sobre el cojinete inferior se encuentra el sello de la bomba de tres etapas. Todos los acoples son rígidos tipo bridas. Por lo cual el eje del motor y de la bomba se comporta como un solo eje flexible. En la figura 3 se presenta el plano de las dos partes principales del equipo estudiado.

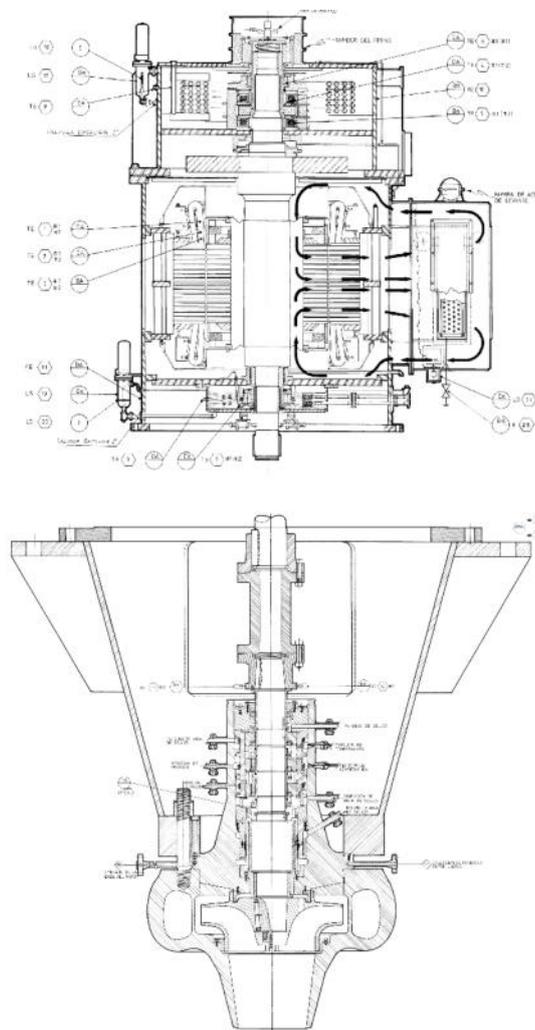


Figura 3: Corte de los subconjuntos principales de la bomba.

### 3. MODELO MATEMATICO

#### 3.1. Formulación

Para modelar el rotor se eligió el método de la matriz de transferencia en una forma similar a la propuesta originalmente por Myklestad para sistemas sometidos a la flexión [8]. A partir del cual el rotor se divide en tramos de ejes flexibles llamados campos y discos rígidos llamados estaciones (figura 4). Para cada uno de ellos, usando principios de la mecánica de Newton y de teoría de la Elasticidad, se plantean ecuaciones que relacionan deflexión lateral, el ángulo de giro y los esfuerzos del eje en determinados puntos característicos a lo largo del eje (cambios de sección, apoyos intermedios, rodetes de álabes, etc.), avanzando en forma progresiva hasta llegar al otro extremo. La satisfacción de las condiciones de contorno de en los extremos y en todos los puntos intermedios permite plantear un sistema de ecuaciones lineales para determinar las velocidades críticas. Luego para cada velocidad se puede obtener el estado del rotor en esos puntos característicos intermedios, a través de las mismas ecuaciones, y de esa manera se obtienen las formas modales [9]. Como sugiere Murphy [10] en algunos casos puede presentar errores en la determinación de algunas de las velocidades críticas, pero existen técnicas para asegurar la precisión y mejorar los resultados. En general, como se ha estudiado en aplicaciones previas, el error de determinación numérica del método para la primera velocidad crítica es menor al 4% y para la segunda al 6% [11].

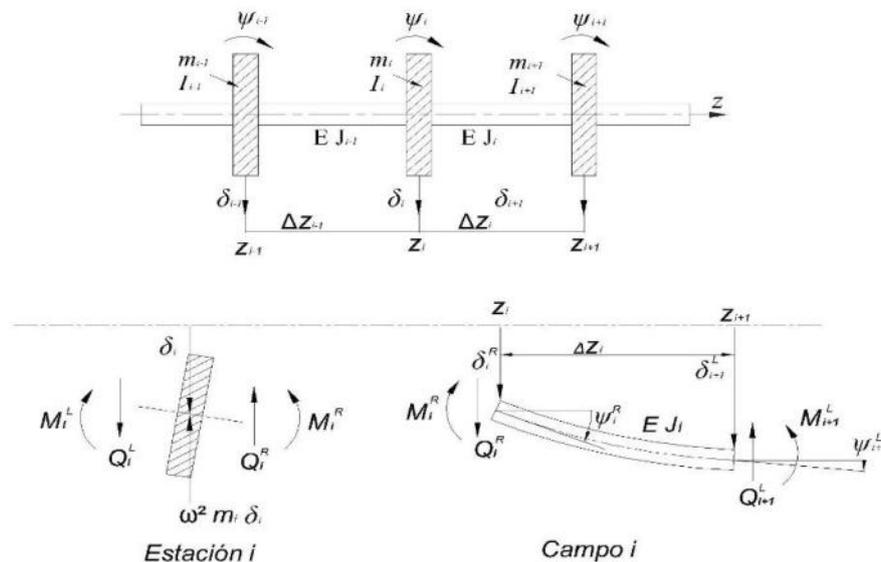


Figura 4: Ejemplo de descomposición de un rotor en campos y estaciones.

En trabajos anteriores [9, 11, 12, 13] se puede encontrar detallada la formulación del método. Pero en resumen, para cada estación o campo se plantea un sistema de ecuaciones que relacione la deflexión lateral  $\delta$ , el ángulo de giro  $\psi$ , el esfuerzo de corte  $Q$ , y el momento flector



$M_r$  a ambos lados de dicho elemento. Ese sistema se presenta como una matriz de coeficientes o matriz de transferencia.

$$\left\{ \delta_i^r \quad \psi_i^r \quad M_i^r \quad Q_i^r \right\}^T = [T_{f/s}]_i \left\{ \delta_i^l \quad \psi_i^l \quad M_i^l \quad Q_i^l \right\}^T \quad (1)$$

Por último, considerando todos los campos y estaciones se llega al sistema de ecuaciones que rige el comportamiento del rotor y se puede expresar de la forma.

$$\left\{ \delta_{n+1}^r \quad \psi_{n+1}^r \quad M_{n+1}^r \quad Q_{n+1}^r \right\}^T = [T_s]_{n+1} [T_f]_n \dots [T_f]_2 [T_s]_2 [T_f]_1 [T_s]_1 \left\{ \delta_1^l \quad \psi_1^l \quad M_1^l \quad Q_1^l \right\}^T \quad (2)$$

En este trabajo se eligió la formulación de matriz de campo considerando el modelo de masa distribuida [9] y la teoría de vigas de Timoshenko [14], que ha sido empleado con éxito para turbinas en el pasado [13], donde se propone que la deflexión a lo largo del eje es una serie de funciones trigonométricas.

$$\delta_y(z,t) = \delta_y(z) e^{i\omega t}, \text{ siendo } \delta_y(z) = A \cosh(\lambda_1 z) + B \sinh(\lambda_1 z) + C \cos(\lambda_2 z) + D \sin(\lambda_2 z) \quad (3)$$

Trabajando se puede llegar a distintas formas de la matriz de transferencia según: la cantidad de términos de la serie y las direcciones que se consideren para el movimiento. Pudiendo usar matrices de transferencia de 4x4, 8x8 o de 16x16 elementos.

Para obtener las matrices de transferencia de cada disco o estación se plantean las ecuaciones clásicas de movimiento de un cuerpo rígido expresando el momento cinético en un sistema solidario al disco [15]. Partiendo de esta manera, considerando el efecto giroscópico y la masa del disco, se puede llegar a un sistema de ecuaciones que permite obtener una matriz de transferencia relativamente simple para el disco.

$$\begin{Bmatrix} \delta_i^L \\ \psi_i^L \\ M_i^L \\ Q_i^L \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & I\Omega\omega - I_p\omega^2 & 1 & 0 \\ -m_d\omega^2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_i^R \\ \psi_i^R \\ M_i^R \\ Q_i^R \end{Bmatrix} = [T_f]_i \begin{Bmatrix} \delta_i^R \\ \psi_i^R \\ M_i^R \\ Q_i^R \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Donde  $\Omega$  es velocidad de rotación,  $I$  es momento de inercia de masa del disco respecto al eje de giro,  $I_p$  es el momento de inercia del disco respecto a un eje perpendicular al de giro,  $\omega$  es la velocidad crítica y los superíndices R y L indican derecha e izquierda del disco.

Por último, en Método de la Matriz de Transferencia los soportes son considerados también como estaciones y la matriz de transferencia de estas se obtiene considerando que los apoyos tienen una determinada rigidez  $K_i$  constante y aplicando la ley de Newton a un elemento de eje de longitud despreciable ubicado en el centro del apoyo, se llega a la siguiente ecuación:

$$\begin{Bmatrix} \delta_i^R \\ \psi_i^R \\ M_i^R \\ Q_i^R \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -K_i & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_i^L \\ \psi_i^L \\ M_i^L \\ Q_i^L \end{Bmatrix} = [T_s] \begin{Bmatrix} \delta_i^L \\ \psi_i^L \\ M_i^L \\ Q_i^L \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Donde  $K_i$  es la rigidez del soporte. La estimación de este parámetro es un tema bastante complejo, pero algunos autores [16] lo resuelven exitosamente suponiendo que la misma es equivalente a  $10^4$  veces la rigidez de los campos (tramos de ejes) adyacentes a la estación.

### 3.2 Construcción del modelo numérico

Como solo se tenían planos de conjunto con cotas generales similares a los presentados en la figura 3, se procedió a escalar las imágenes dentro del programa Autodesk AutoCAD para redibujar el eje y tomar las medidas de cada tramo del mismo. Con esas medidas se construyó una tabla (tabla 1) que contiene los diámetros y largos aproximados de cada tramo de eje.

También se generó un sólido 3D del eje completo (figura 5) con todos sus accesorios para estimar la masa de cada elemento del mismo. Algunos datos como el peso del impulsor estaban en los planos.

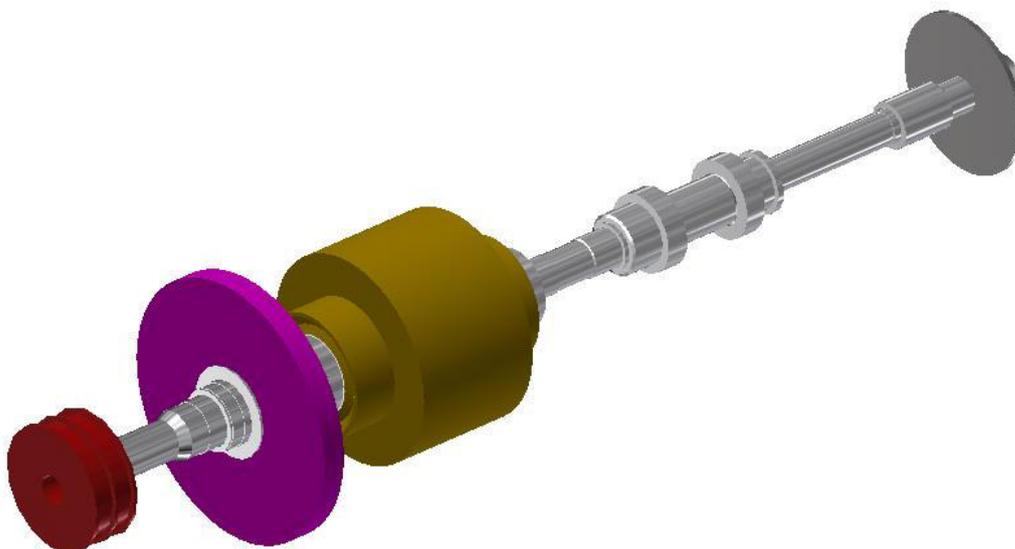


Figura 5: Dibujo reconstruido del rotor completo



Tabla 1. Datos de modelo numérico: campos.

Número	Longitud (mm)	$\phi_e$ (mm)	$\phi_i$ (mm)	F (m <sup>2</sup> )	m/l (kg/m)	M (kg)	J (m <sup>4</sup> )
1	85	178	0	0,0249	194,10	16,50	0,000049278
2	157	190	0	0,0284	221,15	34,72	0,000063971
3	58	199	0	0,0311	242,60	14,07	0,000076981
4	345	228	0	0,0408	318,46	109,87	0,000132651
5	66	254	0	0,0507	395,23	26,09	0,000204317
6	121	284	0	0,0633	494,11	59,79	0,000319333
7	114	295	0	0,0683	533,12	60,78	0,000371756
8	105	360	0	0,1018	793,94	83,36	0,000824480
9	148	524	0	0,2157	1682,08	248,95	0,003700795
10	207	570	0	0,2552	1990,37	412,01	0,005181665
11	66	494	0	0,1917	1494,99	98,67	0,002923329
12	183	436	0	0,1493	1164,55	213,11	0,001773846
13	602	455,4	0	0,1629	1270,49	764,83	0,002111261
14	602	455,4	0	0,1629	1270,49	764,83	0,002111261
15	187	440	0	0,1521	1186,01	221,78	0,001839842
16	188	224	0	0,0394	307,38	57,79	0,000123584
17	246	212	0	0,0353	275,33	67,73	0,000099155
18	173	230	0	0,0415	324,07	56,06	0,000137367
19	20	224	0	0,0394	307,38	6,15	0,000123584
20	25	266	0	0,0556	433,46	10,84	0,000245752
21	191	350	0	0,0962	750,45	143,34	0,000736618
22	54	448	224	0,1182	922,15	49,80	0,001853759
23	75	448	159	0,1378	1074,66	80,60	0,001945970
24	411	288	159	0,0453	353,25	145,19	0,000306334
25	60	554	159	0,2212	1725,33	103,52	0,004592532
26	60	554	0	0,2411	1880,20	112,81	0,004623906
27	134	297	0	0,0693	540,38	72,41	0,000381940
28	40	356	0	0,0995	776,40	31,06	0,000788442
29	47	570	0	0,2552	1990,37	93,55	0,005181665
30	832	190	0	0,0284	221,15	184,00	0,000063971
31	43	200	0	0,0314	245,04	10,54	0,000078540
32	330	268	0	0,0564	440,00	145,20	0,000253226
33	165	206	0	0,0333	259,97	42,89	0,000088397
34	222	189,5	0	0,0282	219,99	48,84	0,000063300
35	62	112	0	0,0099	76,85	4,76	0,000007724

La tabla 1 resume los datos de los campos o tramos de ejes en los que se descompuso el rotor de la bomba a partir del plano.

En cuanto a las estaciones, se resumen en la tabla 2, pero en su mayoría eran cambios de sección, excepto por los cojinetes que eran 3, el impulsor, el volante de inercia, el rotor eléctrico y el sistema de frenado. De los dos primeros se tenían los datos certeros de la masa y medidas para incluir en el modelo, pero no así, del sistema de frenos ni del rotor eléctrico. En este caso



se realizaron estimaciones que se describen más adelante. Para los cojinetes se usó la estimación antes mencionado de  $10^4$  veces la rigidez de los campos (tramos de ejes) adyacentes a la estación [16].

Tabla 2. Datos de modelo numérico: estaciones

Número	Apoyo/disco/cambio de sección	Masa (kg)
1	Extremo libre	---
2	Disco tambor de freno	???
3	Cambio de sección	---
4	Cambio de sección	---
5	Cojinete	
6	Cambio de sección	
7	Cambio de sección	---
8	Cambio de sección	---
9	Cambio de sección	---
10	Disco volante de inercia	1695
11	Cambio de sección	
12	Cambio de sección	---
13	Cambio de sección	
14	Disco rotor eléctrico	???
15	Cambio de sección	
16	Cambio de sección	
17	Cambio de sección	
18	Cojinete	---
19	Cambio de sección	
20	Cambio de sección	
21	Cambio de sección	
22	Cambio de sección	
23	Cambio de sección	
24	Cambio de sección	
25	Cambio de sección	
26	Cambio de sección	
27	Cambio de sección	
28	Cambio de sección	
29	Cambio de sección	
30	Cambio de sección	
31	Cambio de sección	
32	Cambio de sección	
33	Cojinete	
34	Cambio de sección	
35	Disco impulsor	450
36	Extremo libre	---



#### 4. RESULTADOS

Como existían datos insuficientes sobre el rotor del motor eléctrico y del sistema de frenado en el extremo de este elemento, se realizaron varias iteraciones de cálculo numérico considerando distintas masas de los mencionados elementos.

Se supusieron valores máximos y mínimos de la masa del rotor eléctrico y del freno, por analogía con otros motores similares. Luego se hicieron cálculos para todo el rango de valores intermedios y se obtuvieron por matriz de transferencia las velocidades críticas para cada combinación.

Estas iteraciones se agruparon en una distribución normal y se determinaron los extremos para el rotor completo más pesado y liviano y el valor medio (más probable) usando una planilla de cálculos. En la tabla 3 se resumen las velocidades críticas para la estimación más probable versus estimaciones de valores extremos.

Tabla 3. Primeras dos Velocidades críticas para distintos pesos de rotor eléctrico y freno

Velocidad crítica	Rotor más liviano	Rotor peso mas probable	Rotor más pesado
1 <sup>ra</sup>	1151 rpm	1026 rpm	951 rpm
2 <sup>da</sup>	3488 rpm	3132 rpm	2984 rpm

#### 5. CONCLUSIONES

El modelo construido permite estimar que la primera velocidad crítica se encuentra aproximadamente a 1026 rpm. La precisión de esta estimación depende de los datos disponibles que al momento de este modelo son solo aproximados. Esta estimación coincide con el rango de arranque dado que la bomba opera hasta 1500 rpm.

Con mayor información de los cojinetes y de las medidas reales se podría elaborar un modelo más complejo, que pueda permitir estudiar otros fenómenos.

#### REFERENCIAS

- [1] Sadekin S., Zaman S., Mahfuz M., Sarkar R. *Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review*. Energy Procedia, vol. 160, pp. 513-518, 2019.
- [2] Fraguas F., *Energía nuclear en el mundo: estado del arte y proyecciones futuras*. Tesis de Maestría interdisciplinaria en energía de la Universidad de Buenos Aires, 2019.
- [3] Rogner H.H., *World outlook for nuclear power*. Energy Strategy Reviews, vol. 1, pp. 291-295, 2013.
- [4] Horvath A., Rachlew E., *Nuclear power in the 21st century: Challenges and possibilities*. Ambio- A Journal of Environment and Society, vol. 45,1, pp. 38-49, 2016.



- [5] <https://www.na-sa.com.ar/> sitio web Nucleoeléctrica Argentina S.A. consultado el 13/4/2023
- [6] <https://canteach.candu.org/Pages/Image%20Library.aspx> consultado el 13/04/2023.
- [7] Kitch D. M., *Pump Selection and Application in a pressurized water reactor electric generating plant*. Proceedings of the second international pump symposium, Turbomachinery Laboratories, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University. Pp. 47-58, 1985.
- [8] Meirovitch, L. *Analytical Methods in Vibrations*. The Macmillan Company, Londres, 1967.
- [9] Palmieri, F., Violante, D., Klemnow, A., *Análisis de rotores por el M.M.T. usando el modelo de eje con distribución continua de masa o el modelo de viga ideal*. VI CAIM - VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. ISBN 978-987- 46987-0-4. Del 10 al 12 de octubre de 2018, Tucumán, Argentina.
- [10] Murphy, B.T. Vance, J. M., *An improved method for calculating critical speeds and rotordynamic stability of turbomachinery*. Transactions of the ASME- Journal of Engineering for Power, vol. 105, pp. 591-595, 1983.
- [11] Violante, D., Palmieri, F., Klemnow, A. "Aplicación del método de la matriz de transferencia para la determinación de las formas modales y velocidades críticas en rotores flexibles" III CAIM- III Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. ISBN: 978-987-1063-94-9. Del 2 al 5 de octubre de 2012, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- [12] Violante, D., Palmieri, F., Klemnow, A. "Análisis de variaciones de las velocidades críticas de un rotor producto de cambios de rigidez de los cojinetes" V CAIM- V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. ISBN: 978-987-1676-63-7. Del 5 al 7 de octubre de 2016, Santiago del Estero, Argentina.
- [13] Palmieri, F., Violante, D., Klemnow, A. *Análisis mediante el método de la matriz de transferencia de turbogenerador de energía eléctrica*. VII CAIM-II CAIFE - VII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica y II Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria. ISBN 978-950-42-0210-3. Del 15 al 17 de setiembre de 2021, San Nicolás, Argentina.
- [14] Timoshenko, S. *Vibrations problems in engineering*, D. Van-Nostrand C. New York, 1937.
- [15] Ghasemalizadeh, O., Reza Mirzaee, M., Sadeghi, H., Taghi Ahmadian, M. *Rotor bearing System Analysis Using the Transfer Matrix Method with Thickness Assumption of Disk and Bearing*. International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering, vol. 2, 4, pp.206-213, 2008.
- [16] Al-Bahkali, E., ElMandany, M., (2009). *Dynamic Analysis of Rotating Machinery Using Computer Aided design Approach*. Research Center, King Saud University. pp. 1-10, 2013.



## ESTRATEGIAS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE MOTOCICLETA PARA ANÁLISIS ESTRUCTURAL

José E. Stuardi <sup>1</sup>, Guillermo D. Chiappero <sup>2</sup> y Alejandro J. Giudici <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba  
Vélez Sársfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina,  
[jose.stuardi@unc.edu.ar](mailto:jose.stuardi@unc.edu.ar),

<sup>2</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba,  
[guillermo.chiappero@unc.edu.ar](mailto:guillermo.chiappero@unc.edu.ar)

<sup>3</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba, [ajjudici@unc.edu.ar](mailto:ajjudici@unc.edu.ar)

### RESUMEN

El chasis de motocicleta constituye una pieza clave en la seguridad, constatada además por la ocurrencia de algunas fallas por fatiga en puntos críticos de piezas de fabricación nacional. Los estudios de investigación del presente trabajo se enmarcan en un proyecto que persigue obtener documentos técnicos específicos sobre la seguridad funcional de los chasis de motocicleta para su diseño, construcción y homologación. El objetivo específico del trabajo es la definición de un modelo computacional de Elementos Finitos de un sistema compuesto por la motocicleta en condiciones de rodaje, esto es considerando la presencia del conductor, para así contribuir al diseño del chasis basado en premisas de seguridad, viabilidad y costo. El modelo resulta de la composición de subsistemas de distinta naturaleza y propiedades mecánicas diferenciadas, en casos con presencia de fricción y elevado amortiguamiento no proporcional. Por esta razón, resulta un especial desafío el objetivo de lograr correspondencia entre el comportamiento de un modelo lineal y del vehículo real.

La metodología utilizada se basa en el desarrollo progresivo de distintos modelos de variada complejidad, mediante los cuales es posible el ajuste de parámetros seleccionados en cada etapa y obtenidos experimentalmente mediante el análisis de la respuesta en ensayos sobre distintos componentes. La imposibilidad de obtener resultados satisfactorios en un modelo de alta no linealidad, llevó a ensayos de distintas versiones de la motocicleta y al uso de modelos simplificados en el mismo entorno computacional que el algoritmo de calibración.

Las experiencias realizadas tanto en el ámbito computacional como experimental permitieron desarrollar una estrategia a fin de obtener un modelo que se muestra fiable para estudios de comportamiento dinámico, además de obtener variadas conclusiones respecto a la factibilidad de la consecución de los objetivos ligados a las limitaciones de los procedimientos utilizados.

**Palabras clave:** *Simulación computacional, Análisis Estructural, Motocicleta, Chasis, Fatiga*



## 1 INTRODUCCIÓN

Se enfoca la atención en el chasis de la motocicleta, que constituye una pieza clave en la seguridad, teniendo además en cuenta la ocurrencia de algunas fallas por fatiga en puntos críticos de piezas de fabricación nacional. Sin embargo, es necesaria una adecuada modelación del sistema vehículo-conductor para determinar la respuesta dinámica del conjunto. La determinación de las cargas que actúan en los distintos componentes durante la vida útil del vehículo es el punto inevitable de partida y por ello de fundamental importancia. Basándose en esta información, y mediante la simulación computacional [1-3], es posible el diseño y verificación de distintos componentes, incluyendo el chasis soldado. Esta tarea queda a cargo y responsabilidad de los fabricantes, siendo notable -en conocimiento de los autores- la ausencia de normativas internacionales al respecto, lo que hace necesaria una activa sinergia entre las empresas y los organismos técnicos y administrativos encargados de velar por la seguridad, véase [4]. El presente trabajo se basa en la implementación del diseño y modelación computacional mediante el Método de los Elementos Finitos (EF) [5] del motovehículo ya realizado por los mismos autores de este trabajo [6], para la simulación del comportamiento y de la respuesta dinámica del vehículo. Para que el proceso sea confiable, resulta menester la calibración del modelo mediante el ajuste de datos obtenidos en forma experimental, tanto en campo como en laboratorio. Ante la imposibilidad de una calibración de una etapa, debido a las no linealidades del sistema, se define una estrategia de dos etapas de calibración, ayudado de modelos parciales y mediciones de laboratorio acordes con los objetivos.

## 2 METODOLOGÍA

El objetivo específico del trabajo es la definición de un modelo computacional de EF de un sistema compuesto por la motocicleta en condiciones de rodaje y considerando la presencia del conductor. El modelo debe ser fiable para estudios del comportamiento dinámico para así contribuir al diseño estructural y verificación de la vida útil del chasis. El modelo biomecánico resultante es una composición de subsistemas de distinta naturaleza y propiedades bien diferenciadas. Para lograr la correspondencia de su comportamiento en relación al del vehículo real se requieren ajustes de parámetros basados en respuestas experimentales. El procedimiento consiste en la definición de modelos intermedios donde es posible la determinación de algunos parámetros en forma secuencial con ayuda de mediciones experimentales. Como objetivos más generales, el trabajo pretende contribuir al diseño de chasis de motocicletas basados en premisas de seguridad, viabilidad y costo, como así también a establecer las especificaciones que deben cumplir los chasis y los medios de control de su calidad.

### 2.1 Concepción estructural del sistema moto-conductor

Desde el punto de vista estructural, el sistema motocicleta en condiciones de marcha puede ser descompuesto en distintos subsistemas de propiedades dinámicas bien diferenciadas y que,

según su aporte al conjunto estructural, pueden ser modeladas de distinta forma reconociendo conveniencias y ajuste, en función de la imprecisión de los datos y posibilidades prácticas de obtenerlos. El **Chasis** es una subestructura de relativamente poca masa y gran rigidez, que puede ser representado en forma suficientemente exacta mediante una modelación de EF, con suficiente nivel de detalle en los puntos de control donde se harán estudios tensionales y de falla por fatiga. El subsistema de **Suspensión** caracterizado por una relativa baja rigidez y alto amortiguamiento no lineal friccional, donde las propiedades dinámicas fueron relevadas y sus parámetros obtenidos por medio de ensayos de laboratorio. Además, se modela un grupo de componentes tales como motor, tanque de combustible, batería, asiento, manubrio, componentes de transmisión, faros, caño de escape, etc., que constituyen las **Masas adicionales** vinculadas al chasis metálico mediante bujes de goma y que no aportan rigidez significativa al sistema. Finalmente, el subsistema **Conductor-Asiento**, que provee una masa en general mayor que la masa suspendida de la moto propiamente dicha, adoptándose un sistema pasivo por simplicidad y bajo la hipótesis de baja interacción vehículo-conductor.

## 2.2 Modelo del Sistema Moto-Conductor completo

En la Figura 1 b) se muestra un esquema del modelo completo del sistema moto-conductor, donde se distinguen los distintos subsistemas. El modelo de EF de subsistema del chasis se modeló con Abaqus y observa en la Figura 1 a). El marco fue modelado mediante elementos cuadriláteros de cáscara con 4 nodos e integración reducida.

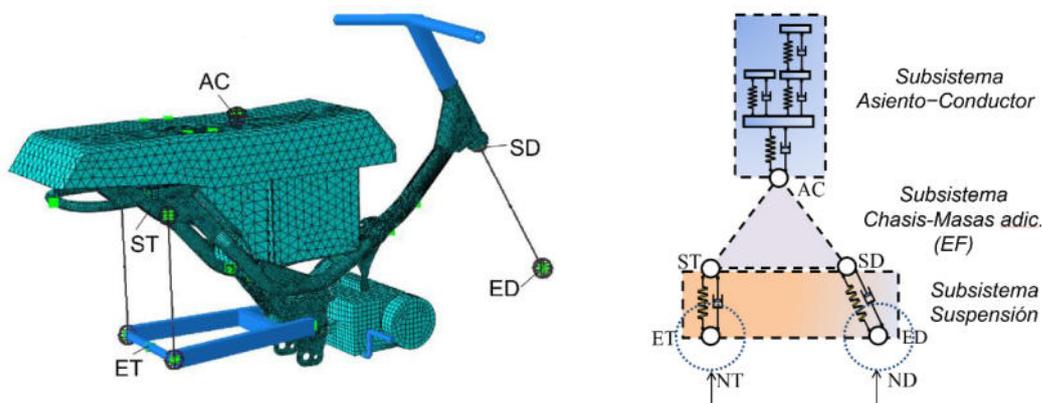


Figura 1: a) subsistema chasis-masas adicionales, b) esquema de modelo moto-conductor

Para la modelación del chasis tubular se utilizaron 43929 elementos cuadriláteros y 1076 elementos triangulares, ambos lineales. Se utilizaron una cantidad menor (en relación al chasis) de elementos tetrahédricos cuadráticos y hexahédricos lineales para modelar los elementos auxiliares con volumen, tales como motor y asiento. La parrilla trasera de suspensión se modeló con elementos de viga lineales con propiedad másica y fue vinculada mediante conectores para permitir su rotación en el chasis. En forma análoga se consideró el manubrio. Un conector del tipo deslizador fue utilizado para completar la modelación del resorte y amortiguador delanteros



y lograr la restricción de los movimientos fuera de la línea de acción de los dispositivos. Otras restricciones fueron utilizadas en el asiento del conductor, para vincular el modelo humano al asiento, se utilizó un *constraint* para solidarizar un conjunto de puntos del asiento en concordancia con la zona de contacto del conductor en AC. El conjunto de masas adicionales fue considerado en la forma de masas puntuales agregadas, ya que las inercias rotacionales propias son en principio de valor poco significativo. Otras restricciones fueron utilizadas para vincular el modelo del conductor, de acuerdo con la norma ISO 5982:2001, con el asiento mediante un conjunto de puntos de contacto AC. En la figura se identifican también los puntos de conexión de los subsistemas: suspensión delantera y trasera (SD, ST), los ejes de ruedas (ED, ET) y puntos de contacto de neumáticos (ND y NT). Datos específicos del modelo y de los ensayos realizados pueden encontrarse en [6].

### 2.3 Procedimiento de calibración

Basándose en experiencias internacionales en vehículos automotores [7], se intentó utilizar un ensayo que consiste en traspasar una lomada a velocidad constante (*hump test*), que tiene como ventaja su corta duración y relativa simplicidad para conseguir una respuesta dinámica del vehículo a partir de una excitación conocida. Sin embargo, la experiencia realizada por los autores con este ensayo indica que no resulta conducente para el análisis de sistemas con alta no linealidad, en este caso debido al efecto de fricción seca y pegado de las suspensiones. Por otro lado, las pequeñas inclinaciones laterales de la moto durante el ensayo generan un error por cambio de componente gravitatoria, que debe ser corregido. Este efecto fue reportado en el ámbito de la ingeniería civil [8]. Se implementó entonces un ensayo de barrido en frecuencia con desplazamiento vertical constante en una mesa vibratoria aplicada secuencialmente en los puntos de contacto de los neumáticos ND y NT que asegura ausencia de inclinación lateral. La presencia de fricción seca en los sistemas de suspensión genera importantes no linealidades, las que resultan especialmente agravadas en una moto de baja cilindrada por su baja calidad constructiva. En la horquilla delantera las barras concéntricas friccionan directamente entre sí generando una respuesta marcada por la resistencia estática al deslizamiento. Debido a esta razón, un ensayo experimental de calibración no puede consistir en señales impulsivas y deben generarse señales de larga duración que tengan la posibilidad de ser promediadas a fin de minimizar errores.

### 2.4 Estrategia

El procedimiento involucró a distintos modelos y mediciones experimentales en los que se fueron ajustando parámetros en forma secuencial. Para mayor claridad, el proceso se describe por medio del diagrama de la Figura 2, en donde se observan mediciones experimentales (ME), Modelos Computacionales utilizados (MC) y procesos de calibración (CA) realizados y numerados con un dígito secuencial. El modelo computacional completo del sistema no calibrado se denomina MC1, mientras que su versión calibrada final es MC6. El diagrama se describirá en la medida de las



explicaciones del proceso. En una primera instancia, se realiza un ensayo de barrido de la moto completa es decir ME3, que se describe a continuación.

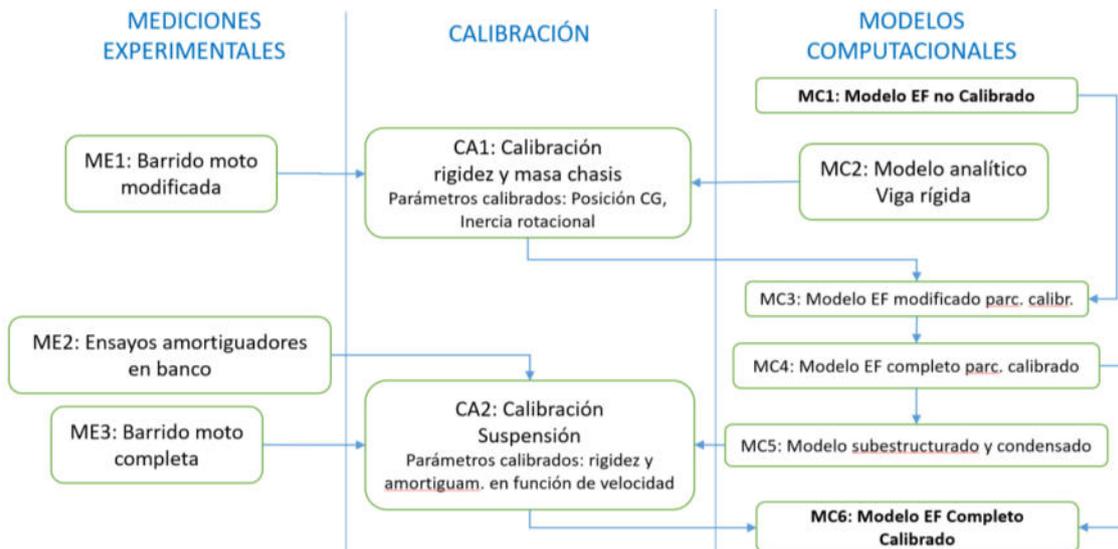


Figura 2: Diagrama sintético del procedimiento de calibración adoptado

#### 2.4.1 Ensayo de barrido de frecuencia de moto completa (ME3)

Este ensayo se realizó en un banco de ensayo imponiendo un desplazamiento armónico sobre la rueda trasera (nudo NT del modelo) de amplitud 0-pico constante igual a 2.5 mm y de frecuencia variable. Se mantuvo la rueda delantera apoyada sobre suelo nivelado y se restringió su movimiento horizontal. Se registraron los desplazamientos de los puntos SD, ST, AC y NT, ver Figura 1 tomando registros de 20 segundos para cada frecuencia fija discreta y en condición de respuesta dinámica estabilizada. Se variaron frecuencias entre 1 y 8 Hz con intervalos de 0.05 Hz logrando un total de 140 registros. A partir de los registros temporales se calcularon las funciones de respuesta en frecuencia de primer orden (FRF) [9] de los puntos SD, ST y AC respecto del punto NT. En la Figura 3 se muestra la amplitud y fase de las funciones de respuesta de los puntos SD y ST. La coherencia resultó en términos prácticos igual a uno en todo en rango de análisis, debido a la forma de medición implementada. El análisis de las curvas las muestra suaves, como indicativas de un amortiguamiento elevado. El punto ST posee una amplificación máxima algo mayor a 2 en cercanías a 3.5 Hz, frecuencia en la que se observa también amplificaciones máximas en el punto SD con elevado ancho de banda. El punto SD presenta además una amplificación en 5.6 Hz. apenas insinuada. Otro rasgo característico de las curvas es la notable incertidumbre en la definición de las magnitudes, ya que, a pesar de la excelente coherencia entre entrada y salida obtenida, las curvas de barrido con frecuencia ascendente no coinciden en ciertos rangos de frecuencias con las de frecuencia descendente.

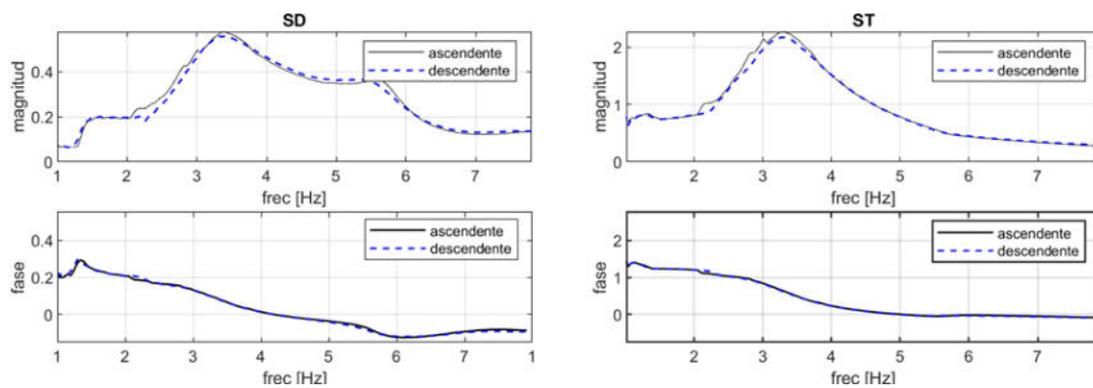


Figura 3: FRF del ensayo moto completa, excitación rueda trasera (ME3)

Además, las curvas presentan localmente marcadas irregularidades y algunos “quebres” que evidencian el efecto “stick-slip” en los sistemas de suspensión, de acuerdo con lo observado durante el ensayo. En efecto, las curvas FRF deben entenderse como la respuesta a variaciones del sistema, generadas por los bloqueos en las suspensiones. En el intervalo de frecuencias de medición existen dos variaciones: *i*) bloqueo suspensiones delantera y trasera en las frecuencias más bajas, *ii*) desbloqueo de la suspensión delantera en aprox. 2.2 Hz, valor que depende del estado inicial.

## 2.5 Estrategia completa de calibración adoptada

Las funciones FRF experimentales del apartado anterior no permiten identificar a los parámetros dinámicos, ya que los modos verticales y pendulares esperados se encuentran enmascarados por la fricción. Se propone una estrategia de calibración consistente en dos etapas y basada en ajustes de parámetros elegidos trabajando en modelos modificados y su respectiva contraparte experimental, lo que se describe a continuación.

*a) La calibración CA1* de la posición del centro de gravedad, la inercia rotacional y el amortiguamiento propio del chasis sin suspensión de la motocicleta. Se trabaja sobre una versión modificada (linealizada) de la motocicleta, donde se extrajeron los amortiguadores traseros y la horquilla delantera completa, la que se reemplazó por un resorte de rigidez conocida. La calibración fue realizada comparando los resultados experimentales de este ensayo ME1 con los obtenibles en un modelo analítico de viga rígida (MC2), que representa a un chasis rígido sobre un sistema de resortes. La programación de un algoritmo genético permitió el ajuste de las curvas por medio de la variación de los parámetros mencionados, con suficiente exactitud ya que la hipótesis del chasis rígido frente al sistema de suspensión se verifica como válida. Por medio de la variación de la posición y magnitud de componentes de MC1 se consiguió replicar los parámetros calibrados en un modelo de EF obteniendo MC3. Finalmente, mediante la incorporación de los valores de rigidez de suspensión y masas de las ruedas se consigue el modelo de EF completo calibrado parcialmente (MC4).



b) La calibración CA2 del amortiguamiento y la rigidez de las suspensiones, que son calibradas como funciones de la velocidad. Para la consecución de este objetivo se contrasta la respuesta del ensayo de barrido de la moto completa (ME3) respecto de un modelo condensado (MC5) que representa al modelo de EF completo parcialmente calibrado (MC4) conseguido en el paso anterior. Se utilizó para esto un algoritmo genético en el ambiente Matlab, siendo la función objetivo las funciones de respuesta experimentales. Las funciones de amortiguamiento propuestas fueron obtenidas de ensayos experimentales de los amortiguadores en banco en forma separada (ME2). Finalmente, el modelo de EF completo y calibrado (MC6) se obtiene incorporando al modelo MC4 los parámetros de la suspensión ajustados conseguidos.

### 2.5.1 Ensayo de barrido moto modificada (ME1)

Por los motivos anteriormente expuestos, se reemplazó el sistema de horquilla-rueda delantera de la moto por un resorte helicoidal de rigidez conocida  $k_y = 17.8$  N/mm colocado en dirección vertical y se proporcionó a su punto de contacto con el chasis un apoyo en dirección horizontal mediante una barra horizontal biarticulada, larga, liviana y axialmente rígida, que no restringe los movimientos verticales. Se desmontaron además los amortiguadores traseros dejando sólo los resortes. Con el objeto de linealizar la respuesta, y debido a la pretensión de los resortes, fue necesario colocar una masa muerta de 50 kg en la posición del asiento del conductor. La motocicleta fue calibrada para un peso medido experimentalmente en los puntos SD de 585N y NT de 685N, lo que incluye la masa muerta de 50 kg. El peso final de esta versión de la motocicleta de calibración fue de 118.5 kg, valor que proviene del valor pesado  $1270$  N = 129.46 kg luego de restar 11 kg de la rueda trasera. La masa rotacional de la moto completa medida en ensayo experimental [6] reportó el valor de  $J_{yy} = 17.7$  kg m<sup>2</sup>, mientras que en el modelo simplificado se tiene  $J_{yy} = 13.92$  kg m<sup>2</sup> siendo las diferencias atribuibles a la masa de 50 kg, rueda delantera y rueda trasera, horquilla delantera y amortiguadores. El error obtenido compensando la contribución de estas masas en el centro de gravedad no alcanza el 2%.

En la Figura 4 se observan las funciones de respuesta de los puntos SD, ST y AC para el ensayo de barrido en frecuencias de la moto modificada. La excitación proviene del punto NT con una semiamplitud de 3.27 mm. A diferencia del ensayo de la moto completa, se distinguen dos picos en todas las curvas correspondientes a los modos vertical y pendular, respectivamente. Nótese que el amortiguamiento residual no es bajo que se atribuye proveniente mayoritariamente del buje de goma en la articulación de la parrilla de suspensión trasera con el chasis. Las dos primeras formas operacionales  $\phi_i = \{y_{ST} \ y_{AC} \ y_{SD}\}^T$  ( $i = 1, 2$ ) en las frecuencias propias 2.91 y 4.30 Hz resultan  $\phi_1 = \{0.577 \ 0.674 \ 1\}^T$   $\phi_2 = \{-1 \ -0.584 \ 0.850\}^T$  y presentan como forma distintiva la relación de los desplazamientos SD/ST, lo que en el primer modo resulta 1.73 y para el segundo - 0.85. Para evitar trasladar errores se realiza una estimación del amortiguamiento residual mediante el ajuste de amortiguadores viscosos virtuales posicionados de la misma forma que los quitados.

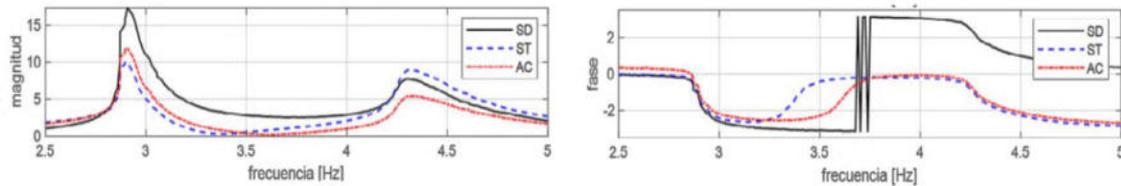


Figura 4: Funciones de Respuesta para el ensayo de barrido de moto modificada

El ajuste realizado mediante algoritmo genético [10] comparando ambas curvas FRF (experimental no lineal y calculada lineal) los amortiguamientos modales calculados, que ascienden a  $c_d = 0.013$  y  $c_t = 0.105$  Ns/mm, proveen una amplificación y un ancho de banda similar para ambas curvas calculada y experimental.

### 2.5.2 Calibración de etapa CA1, modelo de viga rígida (MC2)

Debido al desacoplamiento del primer modo flexional del marco con los modos anteriormente citados, un modelo simplificado del modelo ME1 puede ser construido a partir de un cuerpo rígido que une los puntos SD, ST y apoyado sobre resortes, ver Figura 5. En forma coincidente con el ensayo del apartado anterior se restringe el movimiento del punto superior del resorte delantero en la dirección horizontal. Los puntos ST y SD tienen coordenadas fijas respecto al sistema de coordenadas del modelo, mientras que la posición de CG es alterada en la calibración a partir de la propuesta inicial. El nodo del CG es el único que posee propiedades de masa traslacional y rotacional  $m, J_{CG}$ . Los parámetros de calibración son la posición final del CG, la inercia rotacional total y la rigidez del resorte de reemplazo en el punto SD.

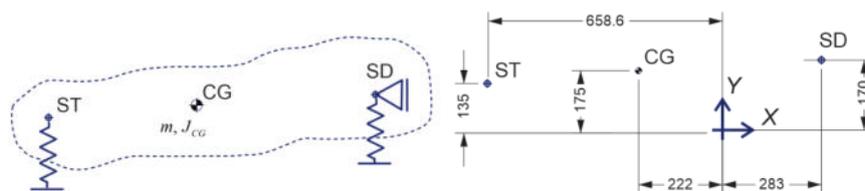


Figura 5: Modelo de calibración (izq.), Distribución de puntos (der.)

El procedimiento de calibración contempla el ajuste de parámetros por medio de un algoritmo genético, este minimiza el error entre la respuesta calculada proveniente de registros experimentales y la proveniente del modelo de calibración. La respuesta calculada se cuantifica con cuatro parámetros que responden a las dos frecuencias propias y las dos formas de los modos. Los parámetros de ajuste fueron:  $\Delta x_{CG}, \Delta y_{CG}, J_{CG}, k_d$ , que representan las variaciones de las coordenadas del CG en X e Y, la inercia rotacional respecto al CG y finalmente la rigidez del resorte delantero de reemplazo. Conseguido el ajuste del modelo de calibración, sus resultados fueron trasladados al modelo de EF convenientemente modificado, para que represente al modelo de calibración (MC3). Los parámetros  $\Delta x_{CG}, \Delta y_{CG}, J_{CG}$  no constituyen datos a establecer en el modelo



de EF, sino resultados obtenibles de la ejecución del programa. Por este motivo, y trabajando sobre una tabla de componentes, pesos y posiciones se corrigieron la magnitud y posición de componentes seleccionados de la motocicleta de a uno por vez y en el orden citado, para lo cual una simple proporcionalidad causa-efecto para dos estados diferentes es suficiente y no se necesitaron iteraciones. Finalmente, se restituye al modelo MC3 la suspensión delantera, amortiguadores traseros y se reemplaza la masa de precarga por el modelo del humano consiguiendo el modelo MC4 completo parcialmente calibrado.

### **2.5.3 Modelo subestructurado y condensado (MC5)**

Con el fin de facilitar la implementación del algoritmo de ajuste, se construyó un modelo condensado, que basado en el modelo MC4 contiene un número de GLD reducido utilizando el método de síntesis de componentes modales (CMS Method ó Craig Bampton method), [11,12]. El modelo original computacional de EF es particionado en una subestructura que comprende el *chasis y los componentes adicionales* del modelo de masas suspendidas y la subestructura del *sistema de suspensión*. Las matrices de rigidez y masa de la subestructura chasis y componentes adicionales son obtenidas como salida del programa de EF en formato xlsx en los GLDs retenidos. El sistema completo es regenerado en un código computacional que implementa el método de los desplazamientos y adiciona las subestructuras de suspensión con los vínculos cinemáticos mecánicos correctos. Las matrices de rigidez y masa del chasis quedan definidas en los grados de libertad *retenidos* en el proceso de subestructuración, esto es 3 GLD de pórtico plano para cada uno de los 3 nodos que definen el chasis: la suspensión delantera (SD), suspensión trasera (ST) y asiento del conductor (AC). Adicionalmente se retiene un GL adicional para conservar un modo flexional, que representa la flexibilidad del chasis y completa la cantidad de 10 GLD de las matrices del subsistema chasis y componentes adicionales.

### **2.5.4 Calibración del sistema de suspensión (CA2)**

Las funciones de la Figura 6 a) muestran los coeficientes de amortiguamiento viscoso equivalentes en función de la velocidad provenientes del procesamiento de mediciones experimentales ME2 y son -sumadas al amortiguamiento del sistema condensado- utilizadas como propuesta inicial en el modelo de la moto MC5. En la Figura 6 b) se muestran el valor absoluto de las FRF de los puntos SD y ST comparado con un promedio de las respuestas experimentales obtenidas (ver Figura 3). Para el cálculo fue necesario resolver un problema de vibraciones armónicas en el dominio de la frecuencia de carácter no lineal, debido a la presencia de amortiguadores concentrados (sistema no proporcional) cuyos valores dependen de la velocidad. Para ello es necesario implementar computacionalmente el uso de matrices de observación de las velocidades en las suspensiones. El sistema no puede ser resuelto en forma matricial directa, sino que es necesaria la implementación de un algoritmo de resolución no lineal, tal como el método iterativo de Newton-Raphson. La solución es obtenida para frecuencias

discretas y crecientes, en donde la solución inicial propuesta requerida por el método es la respuesta estática para la frecuencia más baja. Para el resto de las frecuencias se utiliza como propuesta la solución obtenida en la frecuencia anterior. Esto asegura la convergencia del método para el nivel de no linealidad de los amortiguadores considerados y acorta los tiempos computacionales. Idénticos resultados fueron obtenidos en el modelo de Elementos Finitos calibrado, ya que representan al mismo conjunto de parámetros.

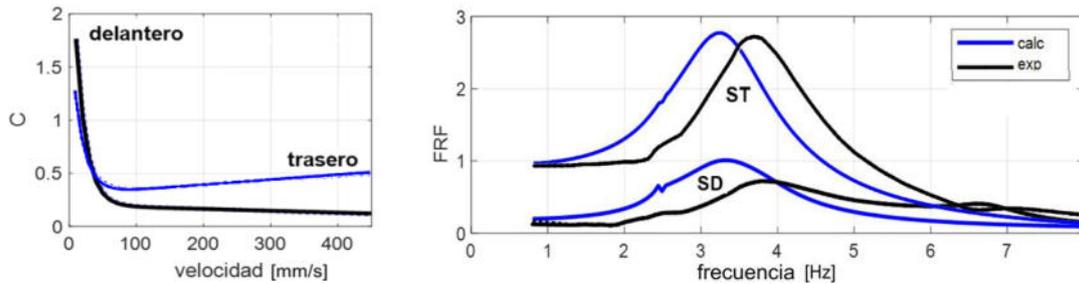


Figura 6: a) Coeficientes de amort. equiv. experimentales, b) FRF de los puntos SD y ST

Comparando ambas curvas de la Figura 6 b), se observa aun una relativamente burda aproximación de las magnitudes de la respuesta máxima, con los picos de la respuesta diferenciados en varias décimas de Hz. Estas diferencias son lógicas considerando que el modelo de amortiguamiento utilizado es lineal viscoso, mientras que el sistema real presenta fricción y bloqueos en la suspensión delantera y trasera en rangos de frecuencia amplios de acuerdo con lo ya expresado. Para superar los inconvenientes de la contrastación anterior de curvas, se define una rigidez dependiente de la velocidad por medio de una función de Heaviside suavizada  $H_s(v)$ , que responde a la siguiente ecuación

$$k_t(v) = k_t + \Delta k_b H_s(v, v_b) \quad ; \quad H_s(v) = 0.5 - 0.5 \tanh\left[\frac{(v - v_b)}{v_s}\right] \quad (1)$$

y  $v_b$  es la velocidad de bloqueo/desbloqueo de la suspensión, mientras que  $v_s$  puede para este caso adoptar un valor cercano a 10 mm/s. Además,  $\Delta k_b = 60$  mm/s asegura un valor de rigidez en bloqueo suficientemente alta, mientras que  $v_b$  es dejado como parámetro de calibración, con un valor inicial de 50 mm/s. Las funciones de amortiguamiento viscoso equivalente experimentales correspondientes a las suspensiones delantera y trasera fueron representadas por medio de funciones definidas por parámetros de ajuste, esto es

$$c_e = x(1) \exp(-x(2)v) + x(3) \exp(-x(4)v) + x(5)v + x(6) \quad (2)$$

donde los vectores conteniendo a los parámetros experimentales para la suspensión delantera y trasera (supraíndice  $d$  y  $t$  respectivamente) resultaron

$$x^d = [1.497 \ 0.062 \ 1.529 \ 0.062 \ -0. \ 0.206] \ ; \ x^t = [3.406 \ 0.058 \ -1.732 \ 0.059 \ 0. \ 0.314] \quad (3)$$

Las funciones de la Ecuación 2 son una representación simple de las curvas mediante mínimos cuadrados. Los parámetros de ajuste son calibrados mediante un algoritmo genético basado en la minimización de la una función error definida como la suma de las diferencias cuadráticas de los elementos del vector de la respuesta experimental y el de la respuesta calculada en base a los parámetros propuestos.

### 3 RESPUESTA DINÁMICA FINAL CALIBRADA

La implementación computacional de la solución requirió la definición de una función matricial de rigidez dinámica en el dominio de la frecuencia. Los amortiguadores y el resorte fueron definidos por medio de 14 parámetros, según las Ecuaciones (1) y (2), esto es, seis parámetros por cada amortiguador y  $k_t$ ,  $v_b$  del resorte trasero. En la Figura 7 se muestran el valor absoluto de las FRF de los puntos SD y ST en valor absoluto y fase calculados mediante la calibración con algoritmo genético vs. los valores experimentales. Los resultados logrados mediante esta implementación no lineal son excelentes, teniendo en cuenta las hipótesis realizadas y los errores inherentes a las mediciones experimentales. Los parámetros calibrados finales fueron  $k_t = 38.14$  N/mm y  $v_b = 52.81$  mm/s. Adicionalmente se verifica que las estimaciones de las mediciones experimentales de  $c_d$  concuerdan con un error de 3% y las de  $c_t$  con un error del 8% para velocidades mayores a 100 mm/s, siendo la forma de las curvas idénticas a las experimentales.

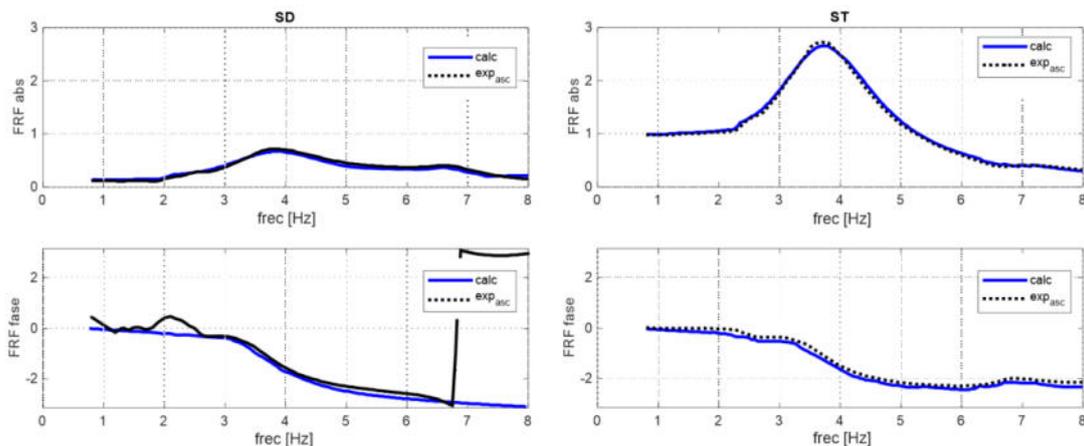


Figura 7: FRF de los puntos SD y ST calculadas en base a calibración final vs. mediciones

### 4 CONCLUSIONES

A pesar de las cuidadosas mediciones y ensayos previos realizados en la etapa de modelación, se necesitaron estudios más detallados para la determinación de los parámetros que ajustan la respuesta dinámica. La imposibilidad de obtener resultados satisfactorios en un modelo de alta no linealidad, llevó a ensayos de distintas versiones de la motocicleta y a modelos simplificados en el mismo entorno computacional que el algoritmo de calibración (Matlab). De la experiencia realizada es evidente que los ensayos experimentales transitorios, como el de hump test, presentan



severas limitaciones debido a la necesidad de sintonizar el ancho de banda de la excitación con las propiedades del sistema para obtener una respuesta con buena sensibilidad a los parámetros de ajuste. Por otro lado, la respuesta debe ser acotada evitando despegues de la rueda del suelo y no linealidades no deseadas. La mayor limitación sin embargo resulta del análisis de sistemas de alta no linealidad debido al efecto de *stiction*. Los ensayos de barrido resultaron necesarios para la comprensión de la dinámica de la motocicleta y la calibración del sistema en un entorno de parámetros elegido. El modelo calibrado logrado, basándose en el caso específico del ensayo, ha demostrado su aptitud para representar las propiedades dinámicas del sistema. Considerando las simplificaciones realizadas, el modelo puede poseer limitaciones en la precisión para aproximar la dinámica no lineal del vehículo para otros niveles de respuesta. Estas hipótesis simplificativas son necesarias, para posibilitar los cálculos de cada respuesta determinística específica, para la cual será necesario un nuevo ajuste de parámetros.

## 5 REFERENCIAS

- [1] Capitani R., Meneghin A., Rosti D., *Virtual Prototyping of a Two Wheeled Vehicle*, SAE Technical Paper 2003-01-0672, 10.4271/2003-01-0672, 2003.
- [2] Mauro L., Meneghetti G., Petrone N., *Structural analysis and fatigue life prediction on a welded tubular motorcycle frame*, Virtual prototyping today. Bergamo, 341-352, 2002.
- [3] Zhang L., Lu C., Kiet Tieu A., *Fatigue Analysis of a Motorcycle Frame System Based on a Road Test and the Finite Element Method*, Materials Science Forum, 773 – 774, 842-850, 2013.
- [4] *Australian Design Rules applicability summary for L-Category-Two and Three Wheeled Vehicles*, extraído de <https://www.infrastructure.gov.au/department/media/publications>, 07/23.
- [5] Cossalter V., Dorian A., Massaro M., Taraborrelli L., *Experimental and numerical investigation on the motorcycle front frame flexibility and its effect on stability*, Mechanical Systems and Signal Processing, 60-61, 452–471, 2015.
- [6] Stuardi J., Chiappero G., Giudici A., *Estudios Preliminares para la Simulación Computacional del Comportamiento Dinámico de un Sistema Moto-Conductor*, VIII Congreso Arg. de Ingeniería Mecánica y III Congreso Arg. de Ing. Ferr., CAIM 2023, Santa Fe, 2023.
- [7] Zhao B., Nagayama T., Xue K., *Road profile estimation, and its numerical and experimental validation, by smartphone measurement of the dynamic responses of an ordinary vehicle*, Journal of Sound and Vibration, 457, 92-117, 2019.
- [8] Brincker R., Ventura C., *Introduction to Operational Modal Analysis*, ISBN 9781119963158, John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [9] Maia, N., Silva, J., *Theoretical and Experimental Analysis*, Research Studies Press Ltd., 1997.
- [10] Koh, C., Perry, M., *Structural identification and damage detection using genetic algorithms*, CRC Press, 2010.
- [11] Craig, R., Kurdila, J., *Fund. of Structural Dyn.*, 2nd Edition, Wiley & Sons. Inc., 2006.
- [12] Wijker, J., *Mechanical Vibrations in Spacecraft Design*, Springer Verlag, 2004.



## SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO DE CATEGORÍA L6 (b) en Matlab Simulink

**Gustavo Cazzola, Juan Dusau, Horacio Mirassou, Brian Buchhammer Papiasian**

Departamento Académico de Mecánica - UTN Facultad Regional General Pacheco  
Hipólito Yrigoyen 288, General Pacheco, Buenos Aires, Argentina  
[gcazzola@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:gcazzola@docentes.frgp.utn.edu.ar)  
[jdusau@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:jdusau@docentes.frgp.utn.edu.ar)  
[hmirassou@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:hmirassou@docentes.frgp.utn.edu.ar)  
[brian.buchhammerpapiasian@alumnos.frgp.utn.edu.ar](mailto:brian.buchhammerpapiasian@alumnos.frgp.utn.edu.ar)

### RESUMEN

La creciente necesidad de soluciones de movilidad en las grandes ciudades ha llevado a un aumento en la producción de vehículos eléctricos livianos y urbanos. En particular, los móviles eléctricos de categoría L6 (b) ofrecen una alternativa atractiva debido a su bajo consumo de energía, tamaño compacto y amigabilidad con el medio ambiente. En este estudio, se ha llevado a cabo una simulación de la dinámica vehicular longitudinal de un vehículo prototipo urbano liviano puramente eléctrico categoría L6 (b) utilizando Matlab/Simulink. Se ha analizado la dinámica de aceleración y la curva de torque-velocidad del motor eléctrico y su controlador, como aspectos del comportamiento del vehículo y su tren de potencia. Los parámetros utilizados en los algoritmos de simulación se basaron en un modelo físico y experimental realizado previamente sobre el móvil prototipo. Los resultados dinámicos obtenidos se han comparado con las mediciones de velocidad vía GPS realizadas sobre el móvil. Las comparaciones indican que la simulación se aproxima a los resultados experimentales, lo que confirma la validez del modelo físico y experimental utilizado. Este análisis facilita la comprensión del comportamiento del motor y su controlador en el tren de potencia, lo que puede ayudar a mejorar el rendimiento y la eficiencia de los vehículos eléctricos livianos y urbanos. En conclusión, los resultados de esta simulación proporcionan un aporte al campo de la tecnología en movilidad eléctrica y pueden ser útiles para el diseño y la optimización de futuros vehículos eléctricos.

**Palabras Clave:** Auto eléctrico, dinámica vehicular, simulación numérica, Matlab Simulink



## 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la transición hacia una movilidad más sostenible, los vehículos eléctricos se han convertido en una alternativa cada vez más popular a los vehículos tradicionales con motor de combustión interna.

La penetración en el mercado de los Vehículos eléctricos puros (VEP) aumentará significativamente en los próximos años y décadas. Un ejemplo de esto es que la Unión Europea confirmó que, a partir de 2035, solo se podrán vender en sus territorios autos eléctricos e híbridos. En este sentido, los fabricantes más importantes del mundo están trabajando para adaptarse a esta situación [1]. Sin embargo, para maximizar su eficiencia y rendimiento, es necesario entender en detalle su comportamiento dinámico. En particular, la aceleración es un factor clave para la experiencia de conducción y la eficiencia energética del vehículo.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo crear un modelo en Matlab-Simulink que permita simular el comportamiento dinámico longitudinal de un vehículo eléctrico prototipo categoría L6 (b) en un proceso de aceleración. Esto proporcionará una herramienta inicial y aproximada para evaluar futuros estudios de rendimiento y la eficiencia del vehículo en términos de aceleración y velocidad máxima.

Este modelo matemático se desarrolló considerando todas las fuerzas que actúan sobre el vehículo, incluyendo las fuerzas resistivas, la fuerza inercial y la fuerza de tracción. Las principales características del modelo son su precisión y capacidad para simular el comportamiento del vehículo en el proceso de aceleración.

En este estudio, se utilizan los parámetros medidos y estimados del vehículo prototipo, así como la correspondiente curva de torque-velocidad de su motor y controlador en el modelo matemático de Matlab Simulink. Estos datos fundamentales se obtuvieron a partir de un trabajo reciente presentado en VIII CAIM / III CAIFE 2023 (Cazzola G., Mirassou H., Dusau J. Estudio teórico y experimental de la dinámica longitudinal de un vehículo eléctrico de categoría L6 (b), 2023). La inclusión de estos parámetros y la curva experimental del motor controlador en el modelo permite una representación precisa y detallada del comportamiento dinámico longitudinal del vehículo eléctrico.

El modelo desarrollado se evaluó experimentalmente. Para ello, se compararon los resultados obtenidos mediante la simulación en Matlab Simulink con las mediciones, en una pista de prueba, de velocidad instantánea del vehículo eléctrico prototipo durante un proceso de aceleración con el pedal al 100%. Esta validación experimental es necesaria para evaluar la precisión y la confiabilidad del modelo, así como para asegurar que refleje fielmente el comportamiento dinámico del vehículo en condiciones reales.

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo matemático implementado en Matlab Simulink es altamente preciso y capaz de simular de manera efectiva el comportamiento del vehículo durante el proceso de aceleración. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para avanzar en el desarrollo de un futuro modelo integral que pueda simular con precisión ciclos de conducción urbanos, incluyendo aceleración, desaceleración, velocidad constante y frenado regenerativo.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO LONGITUDINAL DEL VEHÍCULO PROTOTIPO

En la literatura relevada [2–8] se observa que las prestaciones del tren de potencia se analizan a partir dinámica longitudinal del vehículo [9] dicho análisis se realiza a partir de la segunda ley formulada por Sir Isaac Newton (1642-1727). La Ley se aplica tanto a los sistemas de traslación como a los de rotación.

Las fuerzas que actúan sobre un vehículo terrestre (Figura 1) cuando este se desplaza longitudinalmente son:

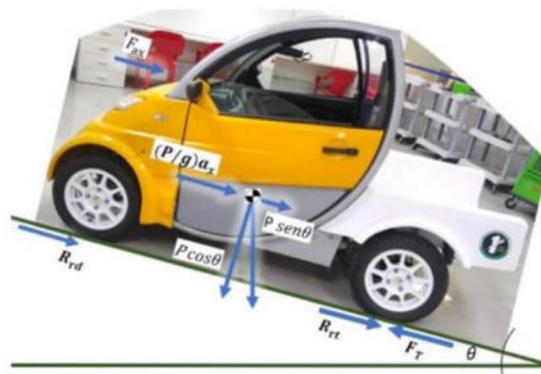


Figura 1: Fuerzas principales que actúan sobre el automóvil al desplazarse longitudinalmente

Donde,  $P/g$  es la masa del vehículo ( $M$ ),  $a_x$  es la Aceleración longitudinal,  $F_T$  es la Fuerza de propulsión que se aplica sobre el suelo en las ruedas traseras,  $R_r$  es la Resistencia a la rodadura,  $P \sin \theta$  es la Resistencia gravitatoria ( $R_g$ ) y  $F_{ax}$  es la Resistencia aerodinámica al avance.

Respecto a la estimación de la fuerza de propulsión, es importante mencionar, que se requiere modelar los sistemas mecánicos que permiten transmitir la potencia del motor al suelo. En la Figura 2, se muestran los elementos claves que intervienen.

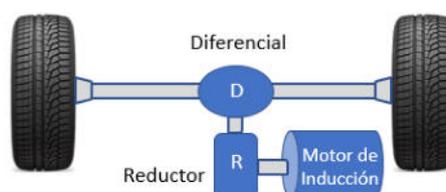


Figura 2 Elementos del Tren de Potencia del Vehículo eléctrico



La aceleración del vehículo afecta al aumento de velocidad de traslación del conjunto de sus masas (M) y al aumento de las velocidades de rotación de las masas giratorias [9]. Entonces la expresión de la fuerza de tracción obtenida a partir del motor eléctrico y que será transmitida al suelo mediante las ruedas se calcula mediante la Ecuación (1):

$$F_T = \frac{T_e N_{rd} \eta_{rf}}{r_w} - \{ (I_e + I_r) N_{rd}^2 + I_w \} \frac{a_x}{r_w^2} \quad (1)$$

Donde  $T_e$  es el par del motor eléctrico (que depende de la velocidad en el eje del rotor ( $\omega_m$ ),  $N_{rd}$  es la relación de transmisión combinada del reductor y diferencial,  $I_e$  es el momento de inercia del rotor del motor de inducción,  $I_r$  es el momento de inercia del reductor,  $I_w$  es el momento de inercia de las ruedas motrices y palieres,  $\eta_{rf}$  es la eficiencia combinada del reductor y diferencial y finalmente  $r_w$  es el radio de las ruedas bajo carga.

Esta Ecuación (1) tiene dos términos del lado derecho, el primero representa la fuerza de tracción en estado estable disponible en el suelo para superar la resistencia aerodinámica, la resistencia de rodadura, para acelerar o para subir una pendiente. El segundo término la "pérdida" de la dicha fuerza de tracción debida a la inercia del motor y los componentes de la transmisión.

Con el conocimiento de la fuerza de tracción, ahora es posible simular la forma en que el vehículo acelera. La expresión para la aceleración debe considerar todas las fuerzas que se muestran en la Figura 1, entonces aplicando la segunda ley de Newton se obtiene la Ecuación (2)

$$M a_x = \frac{P}{g} a_x = F_T - R_r - F_{ax} - P \sin \theta \quad (2)$$

El cálculo de la Resistencia aerodinámica ( $F_{ax}$ ) y la Resistencia rodadura ( $R_r$ ) se realizan de la siguiente manera

$$F_{ax} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f V_x^2 \quad (3)$$

$$R_r = P f_r = P 0,01 \left( 1 + \frac{V_x}{44,7 [m/s]} \right) \quad (4)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $C_d$  es el coeficiente resistencia aerodinámica,  $A_f$  es la sección transversal del vehículo,  $V_x$  es la velocidad longitudinal del vehículo y  $f_r$  es el coeficiente de rozamiento por rodadura.  $f_r = 0,01 (1 + V / 100)$  es la ecuación (4-14) de [9] pág.117 para la unidad:  $[V] = [mph]$  y  $f_r = 0,01 (1 + V / (44,7 [m/s]))$  es la ecuación anterior adaptada para la unidad:  $[V] = [m/s]$

$F_T$  incluye los términos de par motor e inercia rotacional. Como conveniencia, las inercias rotacionales de la Ecuación (1) se suelen agrupar con la masa del vehículo para obtener la Ecuación (5) en forma simplificada:

$$(M + M_r)a_x = \frac{(P+P_r)}{r_w} a_x = \frac{T_e N_{rd} \eta_{rf}}{r_w} - R_r - F_{ax} - P \sin\theta \quad (5)$$

Donde  $M_r$  y  $P_r$  son la Masa y el Peso equivalente de los componentes rotantes

Las ecuaciones anteriores conducen al diagrama de la Figura 3, que resulta útil para comprender la forma en que se procesan las señales del tren de potencia en el movimiento del vehículo eléctrico.

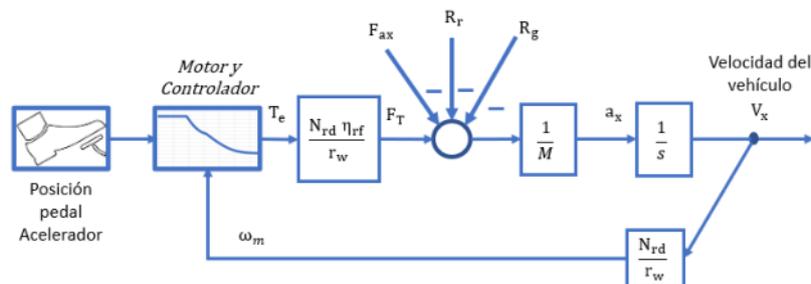


Figura 3 Procesamiento de señales del tren de potencia

### 3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO EN MATLAB SIMULINK

El modelo matemático en Matlab Simulink para describir la dinámica longitudinal del vehículo eléctrico prototipo se desarrolló considerando todas las fuerzas que actúan sobre el móvil, incluyendo las fuerzas resistivas, la fuerza inercial con la influencia de las masas rotantes y la fuerza de tracción en las ruedas obtenida a partir de la curva experimental de Torque- Velocidad del motor propulsor del móvil L6 (b).

#### 3.1 Parámetros del vehículo

En el desarrollo del modelo, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 1. Parámetros del Vehículo

Parámetros	Valores
La masa del vehículo con ocupantes ( $M$ )	665 [kg]
Masa equivalente de los componentes rotantes ( $M_r$ )	33,4 [kg]
Peso del automóvil con sus ocupantes $P$	6521 [N]
aceleración de la gravedad convencional ( $g$ )	9,8 [m/s <sup>2</sup> ]
Radio bajo carga de una rueda motriz ( $r_w$ )	0,255 [m]
La sección transversal del vehículo ( $A_f$ )	1,8 [m <sup>2</sup> ]
El ángulo de pendiente de la pista de prueba ( $\theta$ )	0°
Relación de transmisión combinada del reductor y diferencial ( $N_{rd}$ )	12,3
Eficiencia de la transmisión combinada del reductor y diferencial ( $\eta_{rf}$ )	0,96
Coeficiente resistencia aerodinámica ( $C_d$ )	0,36
La densidad del aire ( $\rho$ ) a 16°C y $p_{atm}$	1,22 [kg/m <sup>3</sup> ]



En el automóvil ensayado, algunos de los parámetros se han obtenido directamente del fabricante (como  $N_{rd}$ ), mientras que otros se han medido directamente (por ejemplo  $P$  o  $r_w$ ). Los valores restantes han sido calculados o estimados utilizando datos aproximados.

El valor de la Masa equivalente de los componentes rotantes ( $M_r$ ) se obtuvo de la ecuación (2) del reciente trabajo presentado en VIII CAIM / III CAIFE 2023 (Cazzola G., Mirassou H., Dusau J. Estudio teórico y experimental de la dinámica longitudinal de un vehículo eléctrico de categoría L6 (b), 2023).

La eficiencia de la transmisión combinada del reductor y diferencial  $\eta_{r-f} = 0,96 = 0,98^2$ , se estimó según [10] pág. 12.1 considerando 2 etapas de reducción.

El coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_d$  fue estimado según carrocerías semejantes.

La sección transversal del vehículo ( $A_f$ ) se calculó a partir de una imagen frontal del vehículo en el programa Solid Edge de diseño CAD.

### 3.2 Curva experimental del Motor de Inducción propulsor y su controlador

En el trabajo recientemente presentado en VIII CAIM / III CAIFE 2023 (Cazzola G., Mirassou H., Dusau J. Estudio teórico y experimental de la dinámica longitudinal de un vehículo eléctrico de categoría L6 (b), 2023), se llevó a cabo una investigación experimental para determinar la curva de torque-velocidad del motor propulsor de inducción controlado por un variador de frecuencia. En la Figura 4, se observa el gráfico de la curva obtenida, donde se muestra la relación entre el torque máximo generado por el motor y la velocidad de rotación del mismo. Esta información es crucial para el desarrollo del modelo en Matlab Simulink, ya que permite incorporar de manera precisa la fuerza de tracción generada por el motor en las ruedas del vehículo durante las simulaciones.

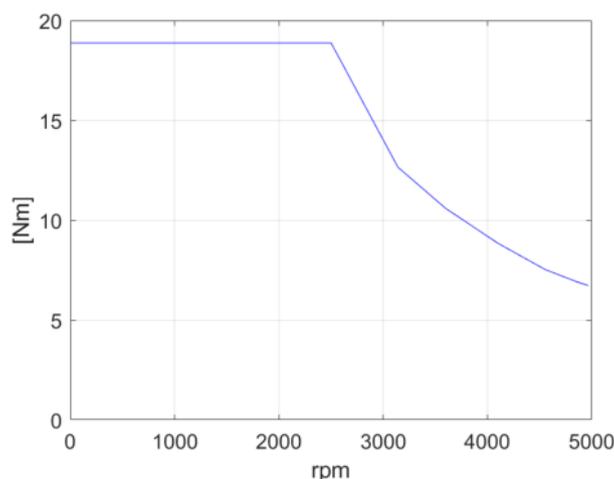


Figura 4: Torque del motor ( $T_e$ ) en función de la frecuencia de giro ( $n$ )

### 3.3 Modelado en entorno Matlab Simulink

Utilizando el modelo dinámico de la Ecuación (5) correspondiente al sistema del vehículo y la curva experimental del motor controlador de la Figura 4, se realizó dicho modelo en el entorno de Matlab-Simulink (R2018b). A continuación, se muestran los diagramas de bloques utilizados para simular el proceso de aceleración, como se ilustra en la Figura 5.

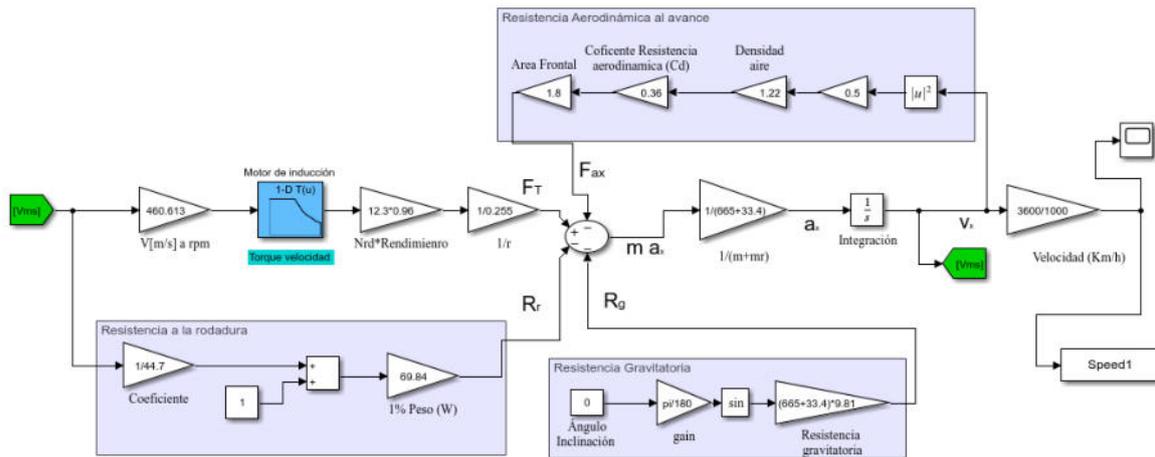


Figura 5 Simulación de la dinámica vehicular en Matlab-Simulink

Con el objetivo de mejorar la eficiencia computacional y la modularidad del modelo de Matlab Simulink utilizado anteriormente, se propone un esquema simplificado para el vehículo eléctrico. En la Figura 6 se muestra este esquema, el cual se basa en un sistema de tres componentes principales: el motor propulsor, las cargas pasivas del vehículo y la dinámica de la inercia rotacional total referido a las ruedas del móvil. Esta configuración permite un desarrollo y ajuste más eficiente de los modelos individuales, ya que cada componente puede ser estudiado y optimizado de forma independiente.

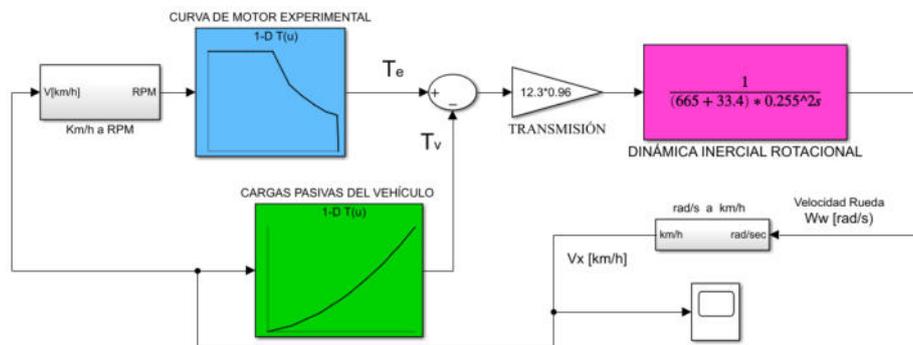


Figura 6 Simulación de la dinámica vehicular simplificada

Además, se planea llevar a cabo un futuro desarrollo para optimizar las pérdidas del motor de inducción utilizando este modelo de vehículo. Se buscará analizar y ajustar los parámetros del control del motor de inducción propulsor, para mejorar la eficiencia del sistema en ciclos de



conducción. Esta optimización se realizará con el objetivo de lograr un rendimiento óptimo del motor y maximizar la eficiencia energética en el funcionamiento del vehículo eléctrico.

La carga pasiva del vehículo se obtiene mediante el modelo del sistema del vehículo, representado en la Figura 5. En ese modelo, se aplica un par constante proveniente del motor de inducción, como entrada, para obtener la velocidad en régimen estacionario del vehículo [11]. La Tabla 2 muestra las velocidades en estado estable, alcanzadas por el vehículo para diferentes pares constantes aplicados.

En el modelo representado en la Figura 6, se utiliza la mencionada Tabla 2 a través del bloque de Simulink "Look up Table". Este bloque permite obtener un par de carga resistente ( $T_V$ ) que se aplica al eje del motor y varía en función de la velocidad del vehículo. La relación entre el par de carga resistente y la velocidad del vehículo se ilustra en la Figura 7.

Tabla 2. Velocidad en régimen estacionario para torque de motor constante

Torque del Motor (Nm)	Velocidad (km/h) en estado estable
1.41	0.00
1.50	6.90
1.60	11.37
1.70	15.43
1.80	18.63
1.90	21.48
2.00	24.06
2.20	28.66
2.40	32.72
2.50	34.61
2.60	36.41
2.70	38.14
2.75	38.93

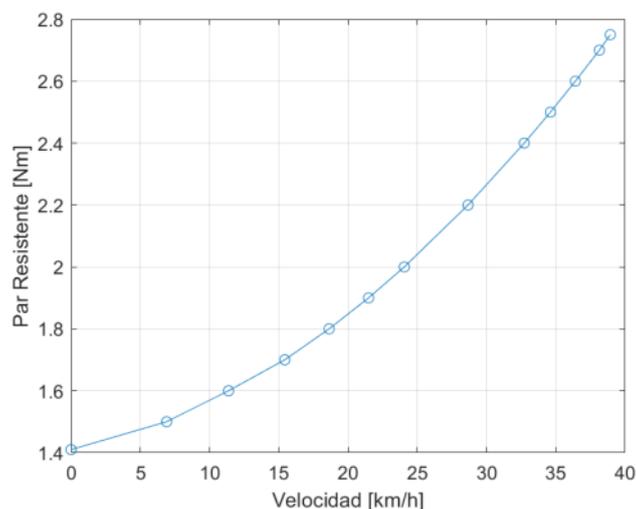


Figura 7 Característica de Par Resistente  $T_V$  y Velocidad del Vehículo (Tabla 2)



Para determinar la inercia rotacional del vehículo, se asume que el vehículo es un cuerpo cilíndrico con una masa ( $M + M_r$ ) y un radio igual al radio de la rueda bajo carga. Entonces la inercia de traslación (masa) del vehículo se convierte en inercia rotacional cuando se multiplica por el cuadrado del radio de la rueda ( $r_w^2$ ) y su magnitud se calcula mediante la Ecuación (6):

$$I_a = (M + M_r) r_w^2 \quad (6)$$

Para complementar la descripción del modelo representado en la Figura 6, se presentan las Ecuaciones (7) y (8). Estas describen el comportamiento dinámico del vehículo en el dominio del tiempo y en la variable “s” de Laplace, teniendo en cuenta la inercia rotacional del prototipo y sus componentes rotantes, así como la influencia del par resistente ( $T_V$ ) obtenido mediante el análisis de carga pasiva del vehículo.

$$(T_e - T_V) N_{rd} \eta_{rf} = I_a \frac{d\omega_w}{dt} \quad (7)$$

$$\Omega_w(s) = \frac{N_{rd} \eta_{rf} (T_e - T_V)}{I_a s} \quad (8)$$

Para la simulación de los modelos en el entorno Matlab-Simulink (R2018b), se empleó el solucionador numérico ode3 con un tamaño de paso fijo de 0.1 segundos. Este solucionador proporcionó resultados precisos y eficientes para la resolución de las ecuaciones dinámicas del sistema del vehículo. Cabe destacar que las simulaciones se llevaron a cabo en una computadora equipada con un procesador Intel(R) Core(TM) i7-4710MQ CPU @ 2.50GHz y una memoria RAM de 16.0 GB. Los tiempos de simulación fueron prácticamente inmediatos, para el modelo simplificado del vehículo eléctrico, lo que evidencia un muy bajo costo computacional.

#### 4. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN MATLAB SIMULINK

El presente apartado se centra en la validación del modelo matemático desarrollado para describir la dinámica longitudinal del vehículo. Para ello, se compararon mediante métricas de validación, los resultados obtenidos a partir del modelo, con los datos experimentales de velocidad instantánea del vehículo eléctrico prototipo durante un proceso de aceleración al 100% en una pista de prueba. Esta comparación se ilustra en la Figura 8, donde se muestra la gráfica de la velocidad instantánea del modelo y la velocidad medida experimentalmente.

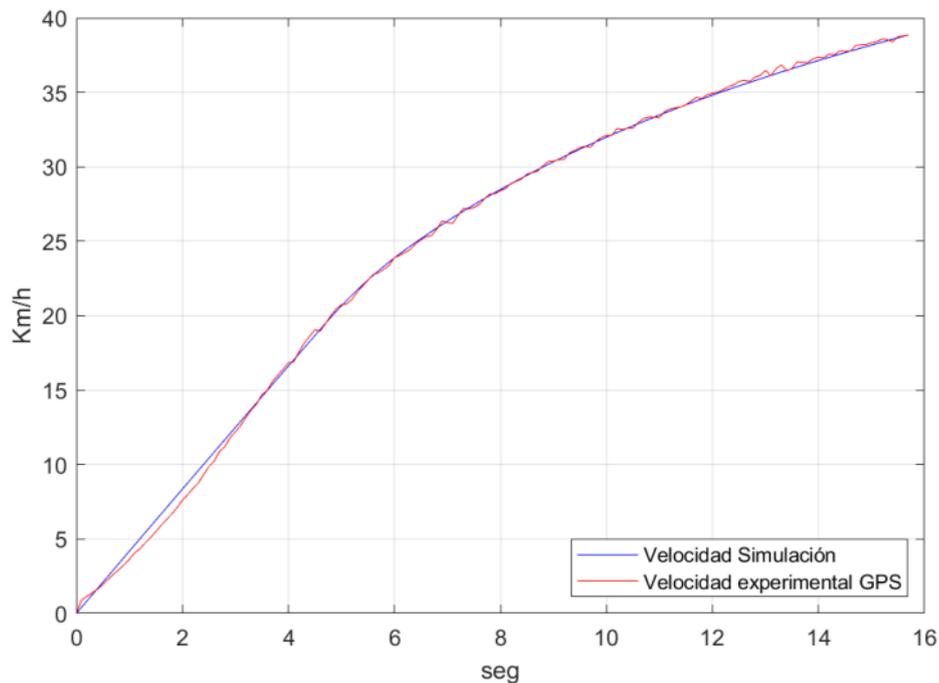


Figura 8 Comparación de velocidades durante aceleración al 100%

Los resultados de la validación muestran una alta correlación entre los datos experimentales y el modelo, con un valor de correlación de 0.999787. Además, se calcularon diversas métricas para evaluar el error entre los datos experimentales y los resultados del modelo. En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos para estas métricas.

Tabla 3. Métricas de validación del Modelo

métricas	Valores
Correlación entre datos experimentales y modelo	0.999787
Error absoluto medio (MAE)	0.227049
Error cuadrático medio (MSE)	0.091782
Error porcentual medio (MAPE)	3.3 %
Error porcentual cuadrático medio (MSPCE)	1.06 %

Los valores muestran que el modelo matemático es capaz de representar de manera precisa la dinámica de velocidad del vehículo. El bajo valor del error absoluto medio (MAE) y del error cuadrático medio (MSE) indica una buena concordancia entre el modelo y los datos experimentales. Además, el error porcentual medio (MAPE) y el error porcentual cuadrático medio (MSPCE) demuestran una precisión aceptable en la predicción de la velocidad del vehículo. Y de esta manera se respalda la utilización de dicho modelo para estudios y análisis posteriores en el ámbito de la ingeniería de vehículos.



## 5. CONCLUSIONES

En conclusión, se ha desarrollado un modelo matemático en Matlab Simulink que permite simular el comportamiento dinámico longitudinal de un vehículo eléctrico prototipo categoría L6 en un proceso de aceleración. El modelo considera todas las fuerzas que actúan sobre el vehículo, incluyendo las fuerzas resistivas, la fuerza inercial y la fuerza de tracción, así como la dinámica del motor eléctrico, la inercia de las ruedas y la transmisión. La precisión del modelo se validó experimentalmente mediante pruebas realizadas en el vehículo prototipo. Los resultados obtenidos mediante la simulación en Matlab-Simulink se compararon con los resultados experimentales de la validación para determinar su precisión, lo que permitió verificar la capacidad del modelo para simular el comportamiento del vehículo en un proceso de aceleración. La herramienta proporcionada por este modelo matemático es inicial y aproximada, pero resulta útil para evaluar futuros estudios de rendimiento y eficiencia del vehículo en términos de aceleración y velocidad máxima. Los resultados obtenidos mediante el modelo matemático en Matlab-Simulink podrían utilizarse para optimizar el rendimiento del vehículo eléctrico de cuatro ruedas urbano en futuras investigaciones.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, al CIDIV y al Departamento de Ingeniería Mecánica de UTN FRGP por el apoyo brindado para realizarlo.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Sourtech. Autos eléctricos apuntan a 2030, *El Economista*, 2021.  
<https://eleconomista.com.ar/autos/autos-electricos-apuntan-2030-n49074> (accedido 31 de marzo de 2023).
- [2] Ali S. M., Sharma V., Hossain M. J., Mukhopadhyay S. C., y Wang D. Optimized Energy Control Scheme for Electric Drive of EV Powertrain Using Genetic Algorithms, *Energies*, vol. 14, nro. 12, Art. nro 12, ene. 2021, doi: 10.3390/en14123529.
- [3] Bing Z., Qinghua J., Yi Y., Jisheng W. Analysis of energy consumption and powertrain parameters optimization of BEV based on running cycle, en 2010 IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design Conceptual Design 1, pp. 1284-1290, nov. 2010. doi: 10.1109/CAIDCD.2010.5681973.
- [4] Du G., Cao W., Hu S., Lin Z., Yuan T. Design and Assessment of an Electric Vehicle Powertrain Model Based on Real-World Driving and Charging Cycles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, nro 2, pp. 1178-1187, feb. 2019, doi:10.1109/TVT.2018.2884812.



- [5] EU-LIVE. <https://eu-live.eu/> (accedido 13 de julio de 2021).
- [6] Lei F., Bai Y., Zhu W., y Liu J., A novel approach for electric powertrain optimization considering vehicle power performance, energy consumption and ride comfort, *Energy*, vol. 167, pp. 1040-1050, ene. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.11.052.
- [7] Sieklucki G. Optimization of Powertrain in EV, *Energies*, vol. 14, nro 3, Art. nro 3, ene. 2021, doi: 10.3390/en14030725.
- [8] Zhang L. y Cai X. Control strategy of regenerative braking system in electric vehicles, *Energy Procedia*, vol. 152, pp. 496-501, oct. 2018. doi: 10.1016/j.egypro.2018.09.200.
- [9] Gillespie T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE Inc., USA, 1992.
- [10] Townsend D.P. *Dudley's Gear Handbook, Second Edition*. McGraw Hill, USA, 1992.
- [11] Makwana J. A., Agarwal P., y Srivastava S. P. Novel simulation approach to analyses the performance of in-wheel SRM for an Electrical Vehicle, *International Conference on Energy, Automation and Signal*, pp. 1-5, dic. 2011. doi: 10.1109/ICEAS.2011.6147103.



## SIMULACION TERMOELASTICA DE ACCIDENTE EN RECIPIENTE DE PRESION DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA I

**Santiago M. Rabazzi<sup>a</sup>, Alejandro E. Albanesi<sup>b</sup>, Javier W. Signorelli<sup>a</sup>, Juan Ramos Nervi<sup>c</sup> y  
Ezequiel M. Fernández<sup>c</sup>**

<sup>a</sup> Instituto de Física de Rosario, Universidad Nacional de Rosario, CONICET, Av. 27 de Febrero  
210bis, Rosario, Santa Fe, Argentina, <http://www.ifir-conicet.gov.ar>

<sup>b</sup> Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC), CONICET/UNL, Predio  
CONICET Santa Fe - Colectora Ruta Nac Nro 168, Paraje El Pozo, Santa Fe, Argentina,  
<http://www.cimec.org.ar>

<sup>c</sup> Departamento de Ingeniería en Materiales, Gerencia de Ingeniería, Nucleoeléctrica Argentina  
S.A, Sede Nodus, Francisco Narciso de Laprida 3163, Villa Martelli, Prov. de Buenos Aires,  
Argentina, <http://www.na-sa.com.ar>

### RESUMEN

**Palabras clave:** Recipiente de Presión, Atucha I, Elementos Finitos,

**Resumen.** Se muestra el desarrollo de un modelo computacional de elementos finitos para analizar las tensiones en el Recipiente de Presión y otros internos de la Central Nuclear Atucha I durante un evento transitorio térmico y mecánico. Como ejemplo de aplicación se presenta un caso de un accidente de pérdida de líquido refrigerante, el cual combina enfriamientos rápidos y altas presiones, haciendo foco en las tensiones generadas en boquilla. Se tuvieron en cuenta precargas en espárragos, contacto entre distintas piezas y proyección de resultados térmicos de CFD sobre la pared del Recipiente de Presión.

**Keywords:** Reactor Pressure Vessel, Atucha I, FEM.

**Abstract.** The development of a finite element computational model to analyze the stresses in the Pressure Vessel and other internals of the Atucha I Nuclear Power Plant during a thermal and mechanical transient event is shown. As an example of application, a case of a loss of coolant accident is presented, which combines rapid cooling and high pressures, focusing on the stresses generated in the nozzle. Preloads on studs, contact between different parts and projection of CFD thermal results on the wall of the Pressure Vessel were considered.

## 1 INTRODUCCIÓN

El Recipiente de Presión o Reactor Pressure Vessel (RPV) es el encargado de soportar todos los conjuntos internos de la Central Nuclear Atucha I (CNAI), como Tanque de Moderador (MT), Canales Combustibles, Barras de Control, Cuerpos de Rellenos, Lanzas de Inyección, etc. Así mismo, contiene al fluido moderador y sistemas de cañerías que componen los circuitos de refrigeración primario (boquillas) y secundario (toroides).

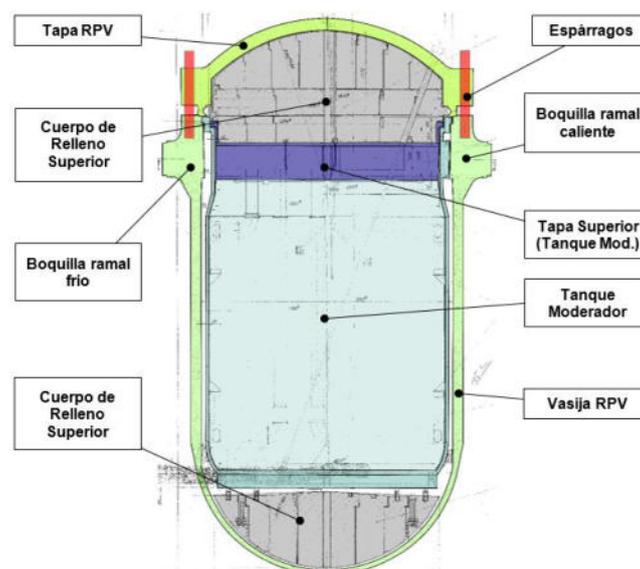


Figura 1: Descripción conjuntos reactor nuclear CNAI

En la Figura 1 se muestran los principales componentes del reactor nuclear CNAI. Como se observa, la Tapa de Cierre del RPV se encuentra sujeta mediante espárragos a la Vasija del RPV. La debida precarga suministrada evita la descompresión del conjunto a presión y, a su vez, mantiene en posición al Tanque y Tapa del Moderador, Tapa de Cierre RPV y Cuerpos de Relleno Superior.

El presente trabajo tiene por objetivo mostrar el desarrollo de un modelo computacional de elementos finitos 3D del recipiente de presión de CNAI. Como caso de aplicación se muestra la configuración de un evento transitorio termomecánico que combina enfriamientos rápidos manteniendo presiones elevadas, también conocidos como Presurized Thermal Shock (PTS). Finalmente, se muestran resultados de tensiones generadas en el conjunto en una de las boquillas de ingreso de agua fría.

El modelado de las piezas, como el mallado de las mismas, se realizaron con los módulos de diseño contenidos en el software Salome\_Meca 2019/2021. El estudio por elementos finitos se realizó en Code-Aster (14.4.0).



## 2 DESARROLLO

### 2.1 Descripción del transitorio

En una central nuclear existen sistemas de seguridad que se activan en caso de un accidente de pérdida de fluido refrigerante o Loss of Coolant Accident (LOCA). Dos de estos sistemas lo constituyen el tanque Acumulador y las bombas del sistema integral de protección (SIP). El primero de estos actúa como reserva de fluido de refrigeración asegurando la reposición del volumen de líquido perdido, mientras el segundo de estos sistemas garantiza la circulación del fluido evitando sobrecalentamientos.

Ambos sistemas inyectan fluido refrigerante en distintos puntos del Loop Seal, esto es, en la cañería de salida del generador de vapor, previo a la bomba principal. El propósito de la inyección de agua es desplazar el agua caliente presente en el Loop Seal y en la bomba hasta alcanzar la rama fría que está conectada al recipiente de presión (RPV). Durante este recorrido, el agua se va enfriando debido al intercambio de calor con las estructuras circundantes, como las tuberías y la bomba principal, y se mezcla con el agua existente antes de llegar a la rama fría.

La inyección de los acumuladores comienza a los 535 segundos y finaliza a los 1600 segundos, mientras que las inyecciones de los SIP comienzan a los 1217 segundos y no se interrumpen durante el transitorio. Se seleccionan instantes específicos y relevantes para el estudio en la boquilla del recipiente de presión. Los mismos se resumen a continuación:

Tabla 1: Instantes de cálculo seleccionados

INST	Detalle
0	Condición normal.
105	Salto de presión significativo.
505	Salto térmico debido a inyección de Acumuladores.
605	Evolución transitoria intermedia.
1005	Evolución transitoria intermedia.
1305	Salto térmico debido a inyección de bombas SIP.
1705	Evolución transitoria final.
1905	Evolución transitoria final (último instante de cálculo).

La elección de los instantes responde a instantes relevantes de la evolución del transitorio, la Figura 2 muestra evolución de la presión y la temperatura (datos de entrada) evaluadas en un punto en el radio interior de la boquilla rama fría en estudio.

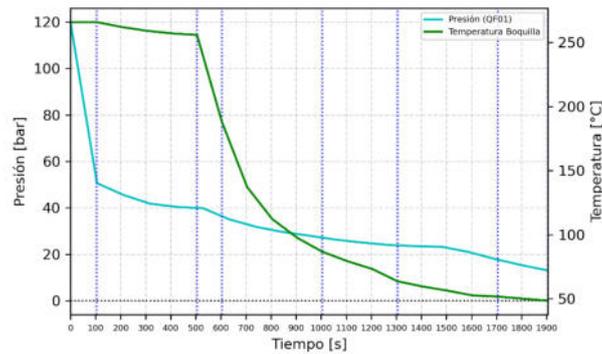


Figura 2: Evolución de la presión y la temperatura interior en la rama fría del recipiente de presión.

## 2.2 Geometría

Considerando la simetría del modelo se optó por simular un cuarto del conjunto RPV. El mismo contiene una de las boquillas de la rama fría (BRF). Los planos y la información de diseño pertinente fueron provistas por Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NA-SA).

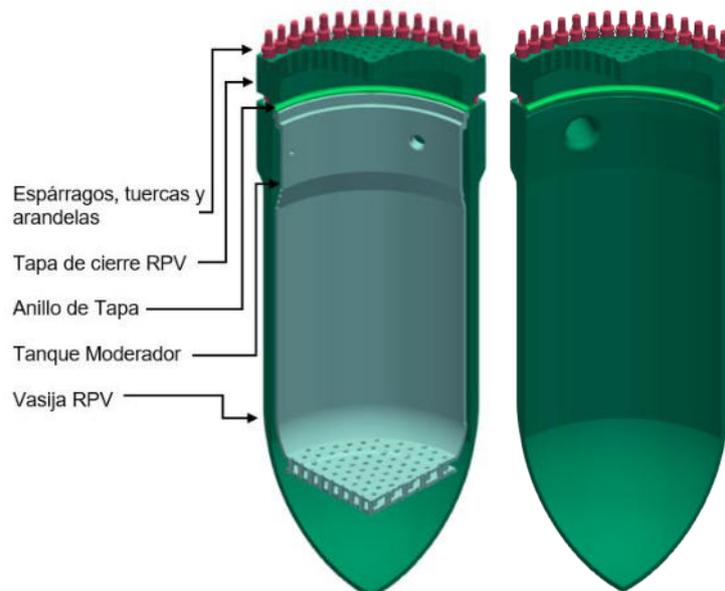


Figura 3: Vista de piezas modeladas para la simulación. Der: Se quitó el tanque del Moderador para visualizar la boquilla en estudio.

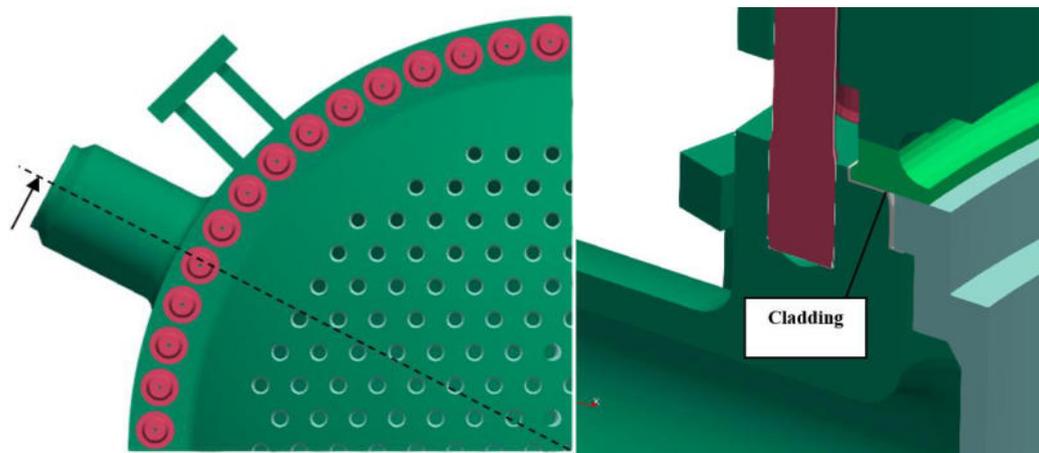


Figura 4: (Izq.) Vista superior del conjunto RPV. (Der.) Vista de corte longitudinal a la boquilla, para detalle de asientos y *cladding*.

Tal como es posible observar, los cuerpos de relleno (superior e inferior), Tapa Superior del Tanque del Moderador, Canales Combustibles y demás internos, no se tuvieron en cuenta en el modelo de elementos finitos. No obstante, se incluyeron los mismos mediante algún tipo de condición de borde mecánica que replica su efecto según se detalla posteriormente.

Se incluyó la Tapa de Cierre del RPV a fin de caracterizar correctamente la influencia de los espárragos con su debida precarga, en la zona de la boquilla. Tanto la cara interna de la vasija del RPV como la Tapa de Cierre están recubiertas por una capa de 5 [mm] de acero austenítico, que actúa como protector contra la corrosión. Este recubrimiento o *cladding* se tuvo en cuenta de forma parcial, únicamente en la zona del asiento del Tanque Moderador, a fin de satisfacer condiciones de diseño y contacto. El peso propio aportado por esta capa en todo el conjunto es despreciable y no se tuvo en cuenta en la simulación. Así mismo, el campo de temperatura aplicado es resultado calculado en el material base del RPV.

### 2.3 Mallado

Una vez realizados los diseños en software paramétrico se procedió a realizar el mallado o discretización en elementos finitos de los componentes. La experiencia indica que las mallas con mayor número de elementos 3D hexaédricos por sobre tetraedros tienen mejor desempeño en estudios termo mecánicos.

No obstante, esto insume mayor tiempo de trabajo a la vez que se requieren ciertos criterios de mallado y posterior configuración del análisis. Es necesario particionar las distintas piezas en subdominios para facilitar su mallado, priorizando planos de simetría, superficies de revolución, etc. Atendiendo a las consideraciones detalladas, se generaron distintas mallas enteramente con elementos 3D, como se observa a continuación. Se incluye cantidad de nodos y elementos 3D resultantes:



Tabla 2: Resumen componentes por subdominios de malla de elementos finitos.

Componente	Nodos	Tetraedros	Hexaedros	Pirámides	Prismas
Asiento RPV	439,951	0	413,023	0	0
Espárragos y tuercas	404,527	328,470	283,860	16,560	360
Tanque Moderador	245,333	0	197,456	0	1,940
Virola RPV Inferior	123,677	0	102,600	0	2,970
Tapa RPV	120,939	0	101,568	0	3,024
Soporte Radial	10,082	0	7,492	0	0
Anillo de estanqueidad	7,280	0	5,400	0	0
Total	1,351,789	328,470	1,111,399	16,560	8,294

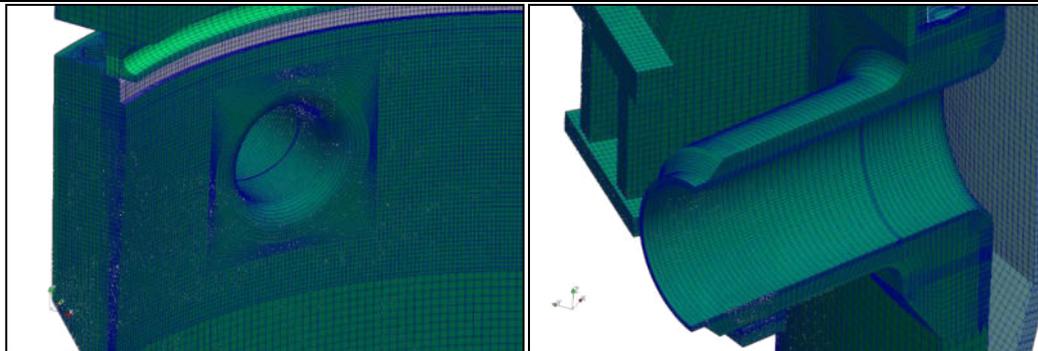


Figura 5: Mallas de elementos finitos en zona de boquilla

## 2.4 Materiales

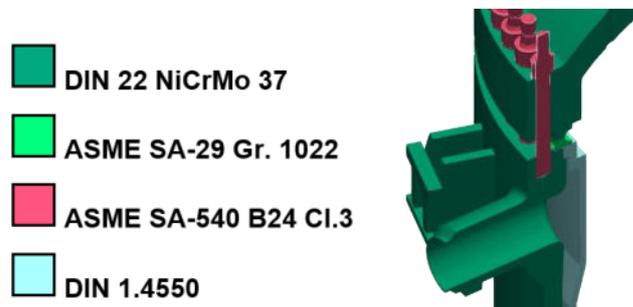


Figura 6: Figura indicativa de materiales de los distintos dominios

**DIN 22 NiCrMo 37:** Este acero se encuentra presente tanto en la Tapa de Cierre como en la Vasija del RPV. El mismo es equivalente a un acero ASTM SA-508 Gr. 2 Cl. 1. Así mismo, se empleará este mismo material en el volumen representativo del *cladding*.

**ASME SA-29 Gr. 1022:** Este material se encuentra presente en el Anillo de Estanqueidad o de Tapa. Según el plano M20-0022 corresponde a un Acero DIN 20 Mn 5. Este material es equivalente a un acero A-29 Gr. 1022.

**ASME SA-540 B29 Cl.3:** Este acero se encuentra presente en espárragos, tuercas y arandelas del conjunto del RPV.

**DIN 1.4550:** Este acero es empleado en el Tanque del Moderador. Este componente se tuvo en cuenta para considerar el efecto de dilatación térmica relativa respecto al RPV.

## 2.5 Condiciones de Borde

Tal como se mencionó anteriormente, se haciendo uso de la simetría del modelo en planos frontales y laterales, se impusieron las siguientes condiciones de borde a los lados del modelo:

- Restricción del desplazamiento en dirección eje x ( $DX = 0$ ), en las caras planas pertenecientes al plano  $X = 0$ .
- Restricción del desplazamiento en dirección eje Y ( $DY = 0$ ), en las caras planas pertenecientes al plano  $Y = 0$ .
- Bloqueo el desplazamiento vertical (eje z) en las caras indicadas del soporte radial y la boquilla del RPV.

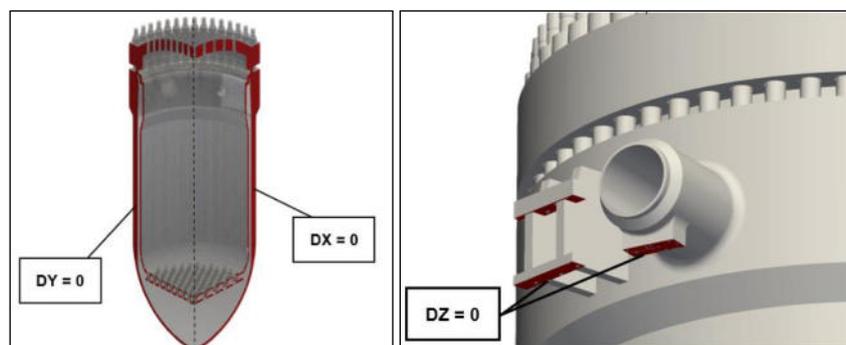


Figura 7: Caras seleccionadas y condición de borde aplicada

## 2.6 Contactos

En esta sección se resume el modelo de contacto empleado y los distintos conjuntos en contacto en el RPV.

Se tienen las siguientes superficies en contacto por interacción entre conjuntos:

- Contacto entre Tapa RPV y Anillo Sello: **Pegado Rígido.**
- Contacto entre Anillo Sello y asiento en Vasija RPV: **Pegado Rígido.**
- Contacto entre Anillo Sello y cara superior de TM: **Pegado Rígido.**
- Contacto entre TM y asiento en Vasija RPV: **Pegado Rígido.**

## 2.7 Cargas externas

### 2.7.1 Cargas Térmicas

- **Cara interior de RPV y boquilla:** Temperatura impuesta transitoria. Proyección de temperatura resultado de (Lencina, 2017). Ver Figura 9.
- **Cara interior fondo de RPV:** Temperatura impuesta, según promedio resultados en última línea de nodos (Lencina, 2017). Ver Figura 9, zona A.
- **Cara interior Tapa de Cierre RPV:** Temperatura impuesta en INST = 0, igual a 266 [C], correspondiente con Condicion Normal. Luego, adiabatica para el resto de los instantes. Ver Figura 9, zona B.
- **Caras exteriores del RPV y boquilla:** Ver Figura 11. Se aplican condiciones de borde tipo intercambio térmico con una temperatura exterior, mediante la aplicación de distintos coeficientes de transferencia, obtenidos de (Bourguigne, 2017). Más precisamente la fórmula utilizada es:

$$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = h (T_{ext} - T) \quad (1)$$

- **Tanque Moderador:** Temperatura impuesta según RELAP – NASA.

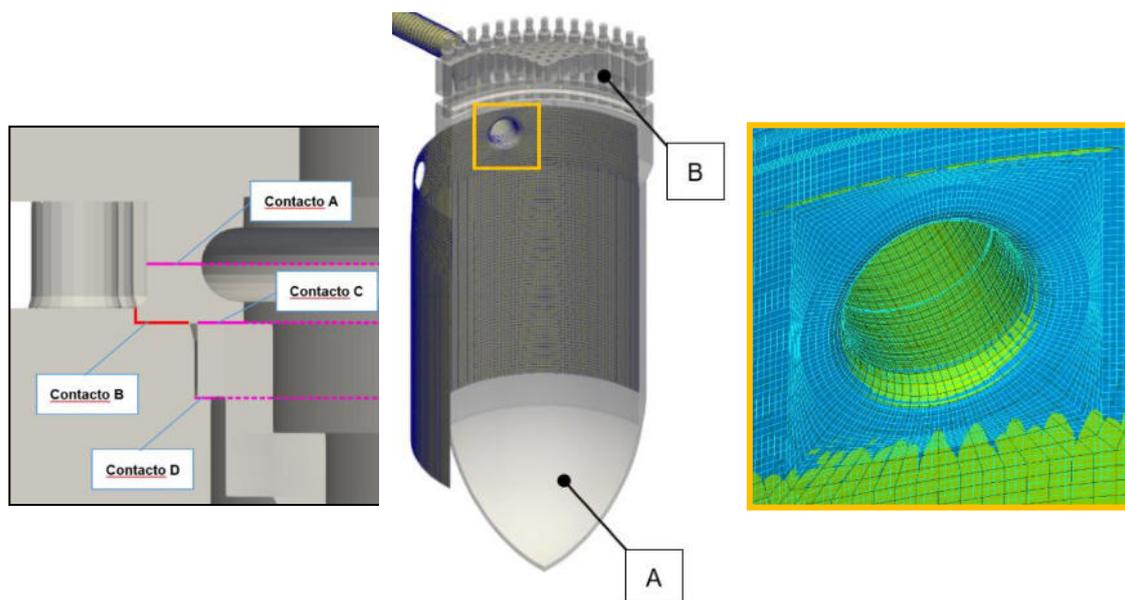


Figura 8: Superficies en Contacto.

Figura 9: Detalle superposición malla sobre presente trabajo y superficies de imposición manual de temperatura

Figura 10: Detalle superposición malla sobre presente trabajo y en zona boquilla

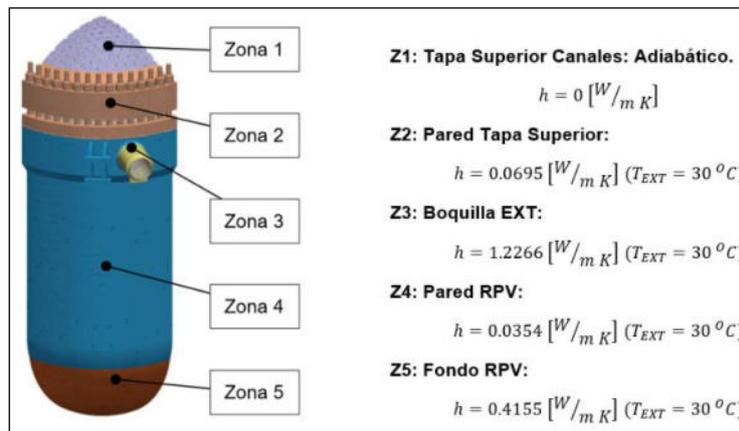


Figura 11: Esquema indicativo de subgrupos de caras exteriores recipiente de presión con coeficiente de transferencia  $h$ .

### 2.7.2 Cargas mecánicas:

**Peso propio:** Se tuvo en cuenta acción de la gravedad sobre los distintos dominios activos. Con respecto a los conjuntos ausentes (Cuerpo de Relleno Inferior, Cuerpo de Relleno Superior, Tapa Superior de Tanque Moderador, 254 Canales Combustibles), se calcularon los volúmenes y peso propio. Se incorporaron al modelo como una fuerza distribuida por área.

**Precarga espárragos:** Se utilizó un modelo propio de precarga, el cual aplica un desplazamiento en cada esparrago equivalente al generado por una fuerza de precarga conocida, extraída de (Bourguigne, 2017). A continuación, se resume el proceso:

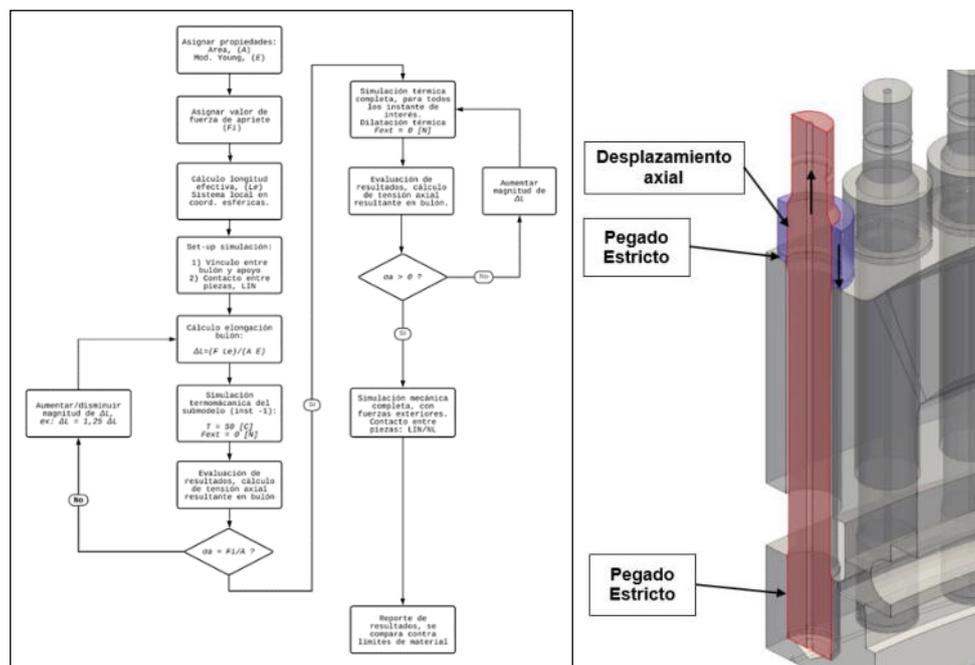


Figura 12: (Izq.) Esquema de aplicación y verificación de precarga. (Der.) Contacto entre componentes.

**Presión interior RPV y Tanque Moderador:** Se aplicaron presiones transitorias, cuyos datos fueron provistos por NASA. Por fuera del RPV, se aplicó presión atmosférica.

**Fuerzas sobre soldadura de Boquilla:** Producto de las dilataciones de las cañerías se generan esfuerzos adicionales en las soldaduras de las boquillas. Se tuvieron en cuenta como una fuerza impuesta, y sus valores fueron provistos por NA-SA. La evolución en el tiempo se puede ver en la Figura 13. Para incorporar los momentos flectores al modelo 3D, se generó una malla de cáscara (QUAD9) coincidente con la sección de soldadura en estudio. Finalmente, se vinculando se vincularon ambas mallas generándose la fuerza equivalente sobre la soldadura.

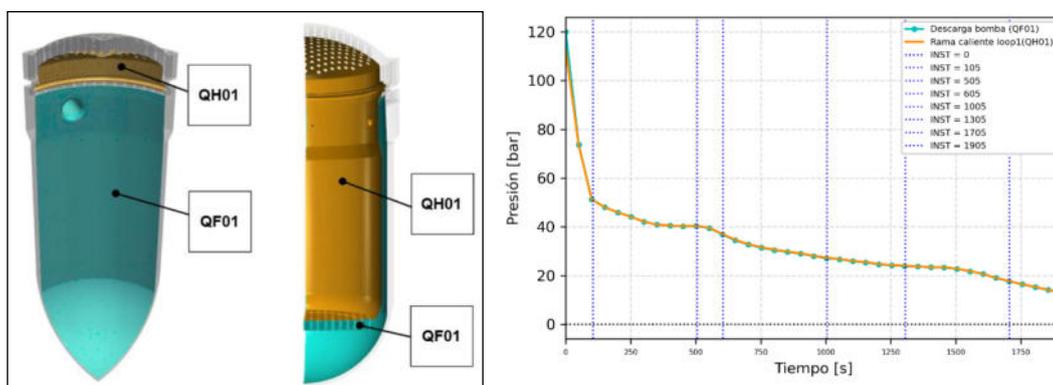


Figura 13: (Izq.) Caras con presión similar. (Der.) Evolución de presiones en durante el evento.

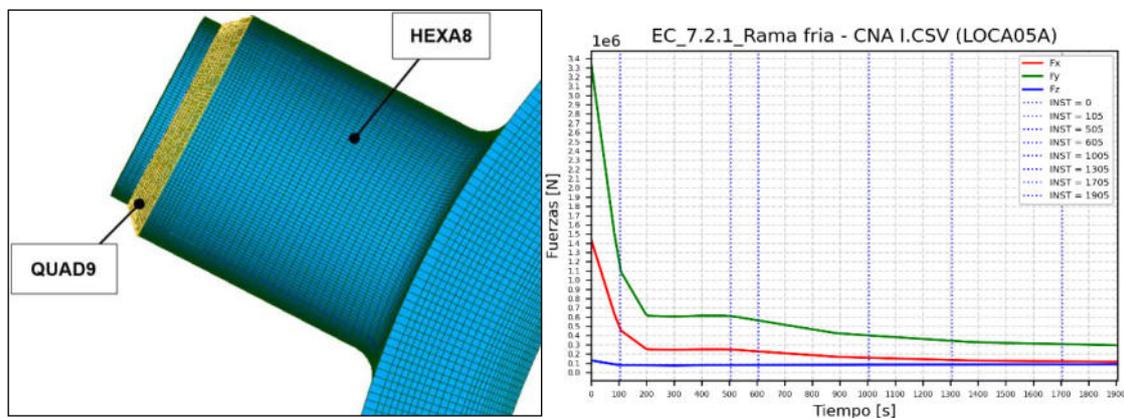


Figura 14: (Izq.) Elementos cascara y área de aplicación esfuerzos soldaduras. (Der.) Evolución de Fuerzas.

### 3 APLICACIÓN

Como ejemplo de aplicación del modelo, se muestran resultados termoelástico obtenidos de las distintas simulaciones. El cálculo de tensiones resultantes es importante para predecir la vida útil de los conjuntos, por ejemplo, mediante el posterior cálculo del Factor de Intensidad de Estrés (SIF, por sus siglas en ingles), de fisuras propuestas.

Se muestran resultados de tensiones equivalente de Von Mises en la Tapa de Cierre del RPV para la fase de precarga (Figura 15, izq.), en la cual todo el modelo se encuentra a 50 [°C]. Se observa mayor tensión en la zona de los espárragos, como era de esperarse.

Luego de iterar entre varios modelos de contacto entre componentes, se comprobó que el más efectivo en relación tiempo de simulación y desplazamientos es el mencionado anteriormente. Finalmente, muestran resultados térmicos y tensiones equivalentes de Von Mises, para el último instante del transitorio, siendo este el más solicitado para el material, debido al gradiente térmico (Figura 16).

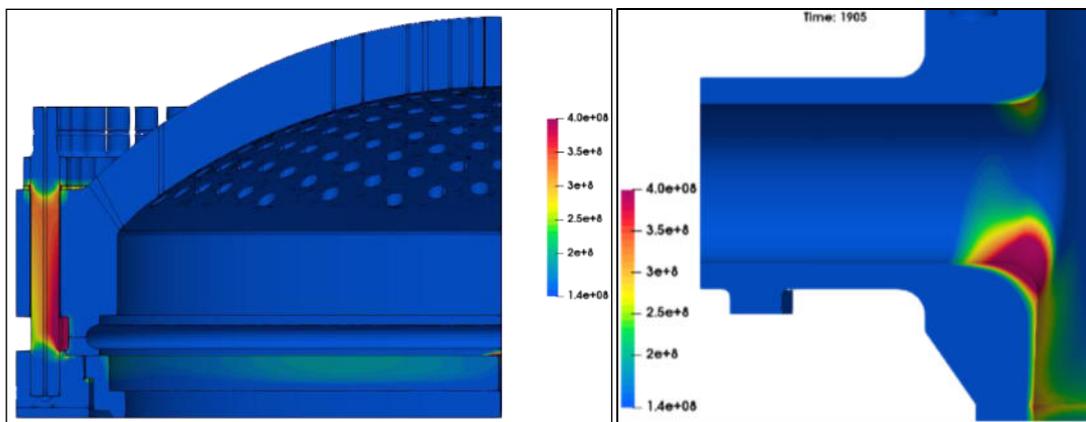


Figura 15: (Izq.) Tensión de Von Mises en [Pa]. (Der.) Resultante de tensiones Von Mises [Pa] en el interior de la boquilla.

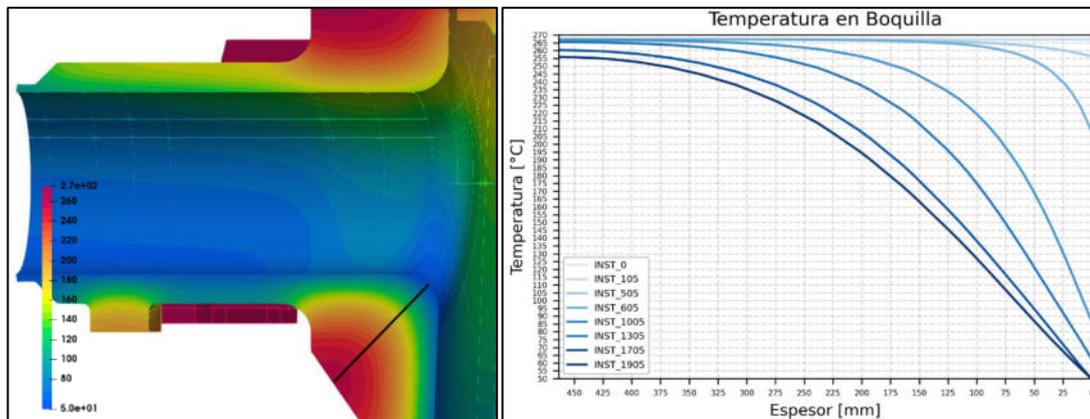


Figura 16: (Izq) Temperatura boquilla en INST = 1905 [s] y línea de extracción de resultados (color negro). (Der.) Temperatura a distintos instantes del transitorio, extraídos sobre la línea indicada.



#### 4 CONCLUSIONES

Se demostró la factibilidad de disponer y aplicar un modelo termoelástico de CNAI a un transitorio complejo, con varios componentes interactuando entre sí. Debido al particular interés en las tensiones resultantes, no es posible prescindir de conjuntos, tales como tapa de cierre o espárragos con precarga, dado a que esto podría minimizar la magnitud de la tensión obtenida.

Como ejemplo de aplicación, las condiciones de borde impuestas tanto en temperatura como en presión para un accidente tipo LOCA generan picos de tensiones en la zona del radio interior de la boquilla. El origen de estas tensiones se debe principalmente al gradiente térmico producto del enfriamiento brusco. En otras pruebas, se desactivaron las cargas mecánicas, obteniéndose prácticamente el mismo resultado. Esta tensión elevada localizada se encuentra acorde a lo esperado. Las boquillas de entrada y salida de los recipientes de presión de centrales nucleares, en general, son críticos y requieren particular atención al momento de asegurar la integridad estructural. Por tal motivo, las validaciones incluyen postular fisuras para el cálculo de SIF.

A futuro, continuando con el presente trabajo, se presenta la postulación de dichas fisuras dentro del modelo de elementos finitos, tal como se muestra en (Chih-Hsuan & Hsoun-Wei, 2022). En este, se realiza una comparación con respecto al Apéndice G Sección XI del código ASTM para Calderas y Recipientes sometido a presión.

#### 5 REFERENCES

Bourguigne, G. (2017). IT-GI-SM-56-2017-Rev0: CALCULO DE TENSIONES Y FATIGA DE ESPARRAGOS DE CIERRE DE LA TAPA DE RPV DE CNAI. Villa Martelli, Buenos Aires: Nucleoeléctrica Argentina SA.

Chih-Hsuan, L., & Hsoun-Wei, C. (2022). Stress intensity factor assessment for reactor pressure vessel nozzles containing postulated corner cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, 275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108838>

Lencina, L. J. (2017). ND-23A-17: Determinación de la evolución temporal de la temperatura de la pared del RPV de Atucha 1, para el escenario de rotura de 50 cm<sup>2</sup> en rama caliente del circuito 2 con Corriente de Emergencia para el análisis del PTS. Villa Martelli, Buenos Aires: NA-SA UG-PN.



## VALIDAÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO CFD APLICADA À PREDIÇÃO DE DESEMPENHO AERODINÂMICO DE MICROTURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

Guilherme Toquini<sup>1</sup>, Elisa Pereira<sup>2</sup>, Celso Bittencourt<sup>3</sup>, Angie L. Espinosa Sarmiento<sup>4</sup> e Diego M. Y. Maya<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Instituto de Engenharia Mecânica – UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, Brasil. – <sup>1</sup>[guilhermetoquini@unifei.edu.br](mailto:guilhermetoquini@unifei.edu.br); <sup>2</sup>[d2019013731@unifei.edu.br](mailto:d2019013731@unifei.edu.br); <sup>3</sup>[celsosalesjunior@unifei.edu.br](mailto:celsosalesjunior@unifei.edu.br); <sup>4</sup>[angieespinosa@unifei.edu.br](mailto:angieespinosa@unifei.edu.br); <sup>5</sup>[diegoyepes@unifei.edu.br](mailto:diegoyepes@unifei.edu.br)

### RESUMO

Microturbinas eólicas são turbomáquinas geralmente com diâmetros de rotor menores que 2,5 m, são ideais para gerar eletricidade em locais com ventos fracos/moderados e em localizações isoladas da rede. Nesse âmbito, simulações de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) estão sendo frequentemente utilizadas para prever o desempenho aerodinâmico deste tipo de turbomáquina, frente às recentes evoluções tecnológicas e das capacidades computacionais. Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo a validação de uma metodologia de simulação *CFD* para predição do desempenho de microturbinas eólicas de eixo horizontal (micro TEEH) utilizando o software *ANSYS*®. Para tanto, com intuito de se obter um equilíbrio entre tempo de simulação e recurso computacional, é realizado simulações de um único canal do rotor, utilizando o software *ANSYS Fluent*®, mediante a aplicação de condições de contorno de periodicidade a partir de um referencial não-inercial (*Moving Reference Frame - MRF*). O domínio fluido é definido em duas regiões: uma zona rotativa, que envolve a área da turbina, discretizada por uma malha tetraédrica não-estruturada pelo software *ANSYS Fluent Meshing*®, e uma zona estacionária, discretizada por uma malha hexaédrica estruturada pelo software *ANSYS ICEM CFD*. Além disso, complementando a metodologia, foram implementados o uso de números adimensionais, *GRV* (*Grid-Reduced Vorticity*) e  $y^+$ , os quais indicam a adequabilidade da discretização espacial, assim, sendo possível estabelecer diretrizes para configurações da malha e aumentar sua confiabilidade. A partir dos resultados foi possível analisar os parâmetros operacionais fundamentais, como o Coeficiente de Potência ( $C_p$ ) e sua razão de velocidade de ponta (*Tip Speed Ratio – TSR*) correspondente, bem como a variação de pressão ao longo das pás. Dessa forma, foi gerada a curva característica da turbina e tais resultados foram comparados com o artigo de referência, obtendo resultados semelhantes com a referência, validando a metodologia.

**Palavras-chave:** Microturbina eólica de eixo horizontal; Energia eólica; CFD; Validação.

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica é um importante indicador do desenvolvimento de uma nação, sendo um indicativo para além do crescimento econômico, mas também da melhoria da qualidade de vida da população [1]. Tal fato é notável tendo em vista que países com maior consumo de energia são os que apresentam maior PIB (Produto Interno Bruto) per capita. Nesse sentido, a Figura 1(a) apresenta a relação entre a demanda de energia elétrica e o PIB de 143 países ao redor do mundo [2].

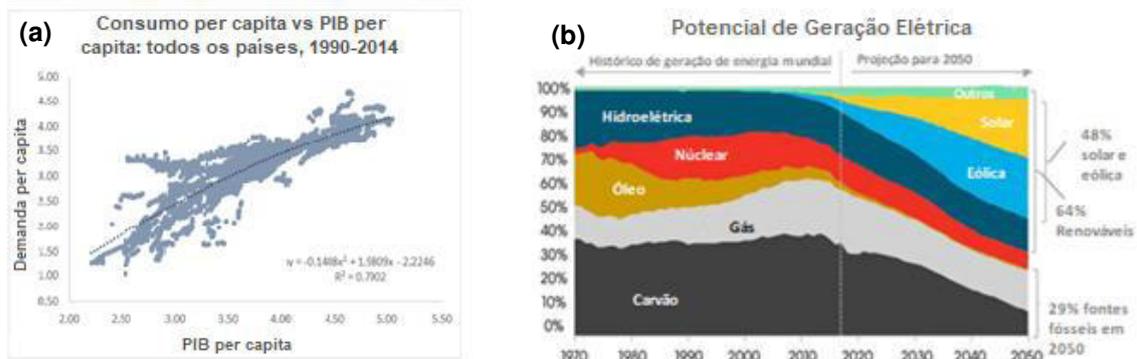


Figura 1: (a) Demanda per capita vs PIB per capita de países analisados entre 1990 e 2014. (b) Projeção da matriz energética mundial (1970-2050). Fonte: Adaptado de [2] e [3].

Dito isso, as projeções para 2050 indicam que a demanda de energia elétrica aumentará de 20.204 TWh/ano para 41.508 TWh/ano, o que implicaria na duplicação de empreendimentos de geração de energia elétrica [4]. Contudo, faz-se importante analisar a composição da atual matriz energética mundial, na qual cerca de 81,1% da produção é derivada de fontes não-renováveis [3], o que gera grande impacto ambiental, visto que o consumo de energia é uma das principais causas das mudanças climáticas e da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE).

Em vista desse cenário, o uso das energias renováveis tem sido cada vez mais incentivado no mundo, através de ações políticas e acordos internacionais, o que causou a aceleração no desenvolvimento energético sustentável. A capacidade instalada de energia renovável no mundo cresceu 45% entre 2010 e 2020, totalizando 2.799 GW [3]. Ademais, a projeção para o emprego de energias renováveis indica alta tendência de crescimento, conforme pode ser observado na Figura 1(b). Dentre as fontes renováveis de energia, a energia eólica é uma das mais utilizadas, tendo alcançado uma capacidade instalada de 743 GW em 2020, a qual deve multiplicar sua capacidade em quase dez vezes entre 2018 e 2050 [3].

A energia eólica utiliza a energia cinética do vento convertendo-a em potência útil de eixo para produção de eletricidade. Os dispositivos de conversão são, geralmente, classificados quanto a direção de seu eixo de rotação, sendo denominadas de Turbina Eólica de Eixo



Horizontal (TEEH) e Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV) [5]. Em particular, micro TEEH são turbomáquinas com no máximo 2,5 m de diâmetro e são uma tecnologia emergente que tem se mostrado uma opção interessante para a geração de energia renovável em pequena escala, principalmente em áreas urbanas [6], visto que turbinas eólicas convencionais requerem áreas com alta incidência de vento e vasto espaço para instalação [7]. Além disso, a utilização de microturbinas eólicas pode contribuir para universalização da eletrificação, tendo em vista que cerca de 733 milhões de pessoas no mundo ainda não têm acesso à eletricidade [8].

Uma análise imprescindível para o desenvolvimento e instalação de micro TEEH é a predição de seu desempenho aerodinâmico. Para esse tipo de estudo, segundo a referência [11], a simulação *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta poderosa, sendo considerado o método mais eficiente e econômico. Muitas abordagens *CFD* utilizam o domínio fluido apenas para uma pá da turbina, ou seja, a simulação é realizada em apenas um dos canais de escoamento, mediante a utilização de condição de contorno de periodicidade rotacional, a partir de um referencial não inercial (*MRF* – *Moving Reference Frame*), o que simplifica a simulação por não utilizar a geometria completa do rotor. Um exemplo disso pode ser visto na referência [9], onde foi desenvolvida uma metodologia de simulação no *software ANSYS Fluent* a partir de uma malha hexaédrica com cerca de 2,6 milhões de elementos, subdividida em duas zonas, uma rotativa (ZR) e outra estacionária (ZE). A simulação produziu resultados que predisseram com sucesso o desempenho da TEEH, onde os resultados foram próximos aos dados experimentais e códigos baseados na teoria do momento do elemento de pá (*Blade Element Momentum - BEM*).

O método de simulação de vórtices desprendidos (*Detached Eddy Simulation – DES*) também pode ser utilizado como a mesma configuração de domínio fluido supracitada [10]. Para o uso deste método foi utilizada uma configuração em regime não-permanente no *software STARCCM+*, uma malha poliédrica contendo 70% dos elementos na ZR, com camadas prismáticas ao redor das pás, chegando a 40 milhões de elementos. Os resultados de predição de desempenho aerodinâmico foram condizentes com códigos *BEM*, o que demonstra um bom potencial do método *DES* para simulação de TEEH. Contudo, o método necessita de um alto recurso computacional, atrelado ao alto número de elementos necessários, o que demanda mais tempo.

Dessa forma, o estudo [11] utilizado como metodologia de referência do presente estudo aplica uma metodologia na qual na ZR é aplicada uma malha tetraédrica não-estruturada, com camadas prismáticas na região das pás, sendo o domínio fluido discretizado por uma malha estruturada apenas na ZE. Foram utilizados a abordagem *RANS* (*Reynolds averaged Navier-Stokes*) e o modelo de turbulência *k- $\omega$  SST*, com uma malha contendo cerca de 5,6 milhões de elementos. Os autores também realizaram o ensaio experimental no qual obtiveram resultados condizentes aos da simulação fluidodinâmica.



Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo validar e complementar a metodologia de simulação *CFD* proposta por [11] para predição de desempenho de micro TEEH, utilizando o *software ANSYS®*. A complementação da metodologia foi realizada mediante a implementação de números adimensionais, os quais indicam a adequabilidade da discretização espacial, sendo possível estabelecer diretrizes para configurações de melhorias de malhas. Dessa forma, é possível utilizar uma metodologia simplificada e flexível que apresenta resultados condizentes com dados experimentais, e que não necessita da discretização completa do rotor e, conseqüentemente, apresenta menor tempo de simulação comparada a outros métodos.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada é dividida principalmente na modelagem da geometria do rotor (item 2.1), na geração da malha (item 2.3) e nas configurações do solucionador (item 2.3), sendo fundamentada na utilização de dois subdomínios de fluido e na simulação de somente um canal do rotor da turbina, a fim de se diminuir o número de elementos discretizados pelo método dos volumes finitos, obtendo uma redução no tempo de simulação e no recurso computacional necessário.

Dessa forma, com o objetivo de avaliar o desempenho da turbomáquina, a velocidade de incidência do vento é fixa enquanto é variada a velocidade angular da turbina, o que é caracterizado por diferentes valores para a Razão de Velocidade da Ponta da Pá (*Tip Speed Ratio - TSR*). Assim, para cada condição é aferido um valor de Coeficiente de Potência ( $C_p$ ), o qual representa a eficiência da turbina eólica, obtendo-se a sua curva característica. As Equações 1 e 2 expressam matematicamente esses principais parâmetros de projeto de TEEH que foram utilizados no presente trabalho.

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho AU_\infty^3} \quad (1)$$

$$TSR = \frac{\omega R}{U_\infty} \quad (2)$$

Sendo  $T$ ,  $\omega$ ,  $A$  e  $R$ , o torque, a velocidade angular, a área varrida e o raio da TEEH, respectivamente, e  $\rho$  e  $U_\infty$ , a massa específica e a velocidade de escoamento do ar.

Como aprimoramento, também foram implementados à metodologia de referência a utilização dos números adimensionais *GRV* (*Grid-Reduced Vorticity*) e  $y^+$ , para avaliar o grau de refinamento da discretização espacial: o primeiro, estabelecido por [12], especificamente para simulações de TEEV Darrieus H de pequeno porte, basicamente se trata de valor adimensionalizado da vortacidade e com isso estima a variação de velocidade dentro de um volume da malha, indicando a adequabilidade da predição dos gradientes de velocidade em uma determinada região; o segundo, nomeado como distância adimensional à parede, se trata de um



critério para o qual é requerido um determinado valor máximo, a depender do modelo de turbulência empregado, para realizar a adequada discretização na região da camada limite do problema. Dessa forma, como no presente trabalho foi utilizado o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST, o valor máximo recomendado de  $y^+$  é 1. As Equações 3 e 4 expressam matematicamente esses números adimensionais.

$$GRV = \frac{\omega_V}{V_o/L_o} \quad (3)$$

$$y^+ = \frac{yu_t}{\nu} \quad (4)$$

Onde  $\omega_V$  representa a vorticidade,  $V_o$  a velocidade local,  $L_o$  o comprimento representativo,  $y$  a distância absoluta da parede,  $u_t$  a velocidade de fricção e  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido.

## 2.1 Geometria da Pá e Domínio Computacional

A turbina analisada tem um diâmetro (D) de 250 mm e possui 3 pás de perfil aerodinâmico NACA4412 com bordo de fuga arredondado. A pá não possui comprimentos de corda e ângulos de torção constantes, os quais variam ao longo do seu comprimento de acordo com a Figura 2.

Para a modelagem geométrica da pá, foi definido um número de 9 estações igualmente espaçadas (ver marcações na Figura 2). Com isso, foram gerados os pontos coordenados dos perfis com o auxílio do *website Airfoil Tools*® e foram plotados no software *SolidWorks*®, juntamente com o esboço circular para a raiz da pá, criando-se uma superfície plana auxiliar para cada estação, como pode ser visto na Figura 2 (b). Feito isso, essas superfícies auxiliares foram exportadas para o *software ANSYS SpaceClaim*® e realizou-se a varredura da pá, gerando sua geometria final (Figura 2(c)).

O domínio fluido se trata de uma seção de 120° da corrente principal e é dividido em dois subdomínios: Zona Rotativa (ZR) e Zona Estacionária (ZE). A extensão do domínio foi determinada a partir das dimensões especificadas por [11], assim como as condições de contornos, que podem ser observadas na Figura 3.

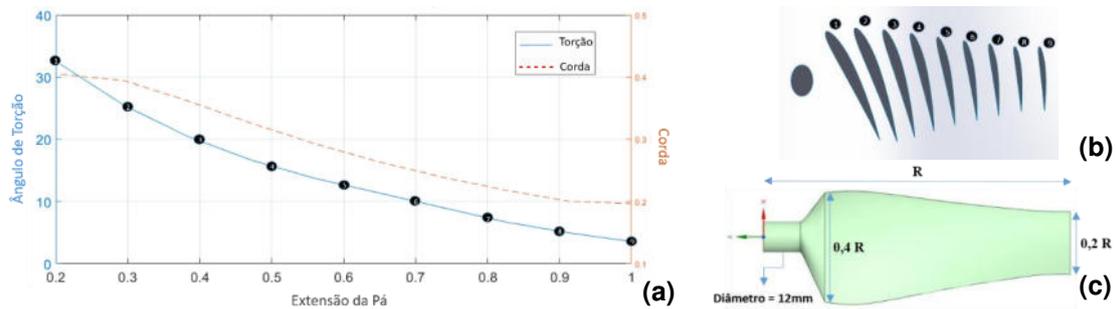


Figura 2: (a) Distribuição do Ângulo de torção e da Corda ao longo da Extensão da pá. Dimensões divididas adimensionalizadas pelo Raio. Fonte: Adaptada de [11]. (b) Superfícies planas auxiliares. (c) Geometria final da pá. Fontes: Autores.

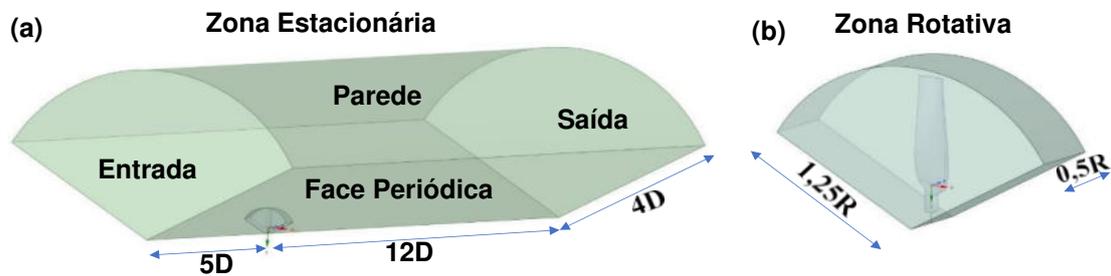


Figura 3: Domínio computacional e condições de contorno. (a) ZE. (b) ZR. Fonte: Autores.

## 2.2 Malha

A discretização espacial foi realizada a partir de diferentes abordagens nas duas zonas do domínio computacional. A malha da ZR foi gerada pelo software *ANSYS Fluent Meshing*®, utilizando elementos tetraédricos, configurando uma malha não-estruturada, excetuando-se na região próxima a camada limite, a qual foi discretizada por 8 camadas de elementos prismáticos. Já para a ZE, foi utilizado o software *ANSYS ICEM CFD*® para construir uma malha estruturada com elementos hexaédricos, a fim de diminuir o número total de elementos e assim obter a convergência da simulação mais rapidamente.

A ZR é a região que contém o maior refinamento de malha, tendo em vista que compreende os maiores gradientes nos campos do escoamento. O parâmetro mais influente no resultado do torque gerado pelo rotor e no número final de elementos é o grau de discretização espacial na superfície da pá, ou seja, a dimensão dos elementos nessa superfície, sendo, portanto, estabelecido um valor máximo igual a 3 mm. As demais dimensões dos elementos também foram definidas com o objetivo de obter uma malha semelhante à dos autores [11], sendo iguais a: 0,25 mm no bordo de fuga, 2,3 mm no intradorso e no extradorso da pá, 3 mm no bordo de ataque e em toda extensão da ZR, 6 mm para no topo da ZR e 0,055 mm para a primeira camada prismática.

O resultado da discretização da ZR foi uma malha de aproximadamente 5,3 milhões de elementos e uma aparência muito próxima da referência [11], como é mostrado na Figura 4.

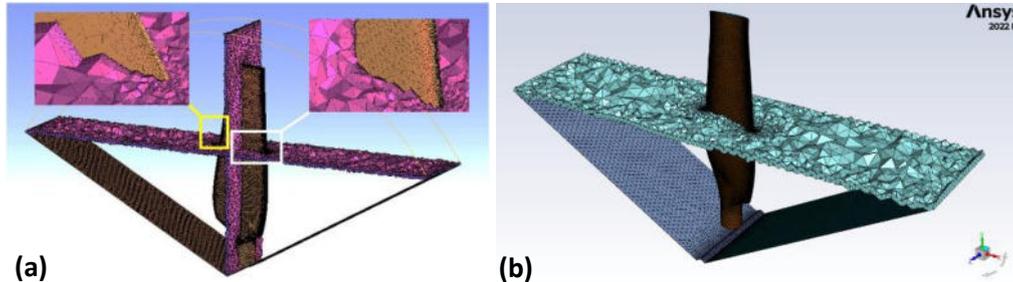


Figura 4: Comparação entre as malhas da ZR. (a) [11]. (b) Autores.

Ainda segundo recomendações dos autores [11], para a geração da malha na ZE foi utilizada uma abordagem que a segrega em diferentes blocos (“*blocking*”), os quais por sua vez são gerados automaticamente pelo *software ANSYS ICEM CFD*®. Nesse método de geração de malha é definido o número de divisões para cada aresta do domínio fluido, e as respectivas quantidades utilizadas podem ser observadas na Figura 5 (a), sendo que as arestas paralelas e semelhantes entre si possuem o mesmo número de divisões.

As métricas de qualidade de malha avaliadas foram a assimetria (*skewness*), qualidade ortogonal (*orthogonal quality*) e determinante (*determinant*), para os quais os valores mínimos recomendados pelo *software ANSYS*® são próximos a 0,3, 0,02 e 0,4, respectivamente. Assim, para atender estes valores foi realizado um arredondamento de raio 3 mm nas arestas de encontro das faces periódicas, conforme pode ser visto nas Figuras 5(b) e 5(c). O resultado da discretização espacial da ZE foi uma malha com 476 mil elementos e uma aparência muito semelhante à referência [11], como é apresentado na Figura 6.

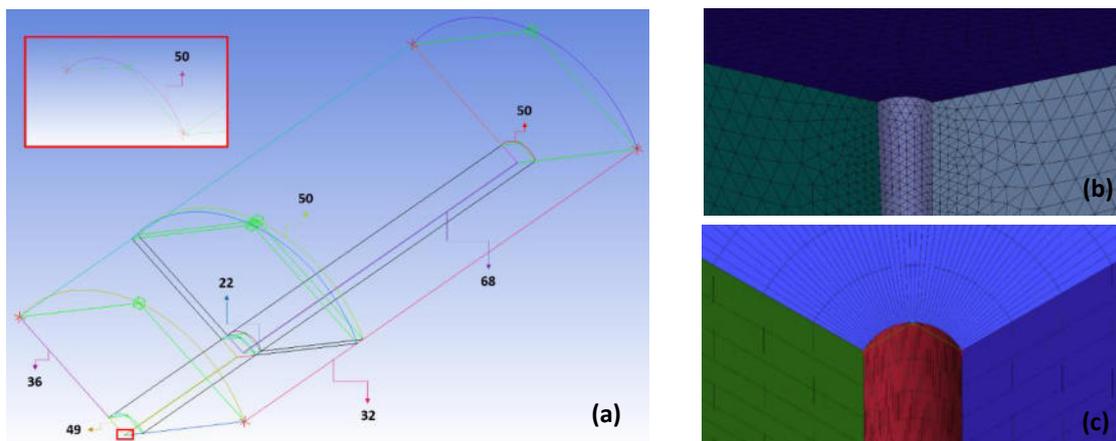


Figura 5: (a) Refinamento da ZE. Faces do arredondamento do domínio, na ZR (b) e na ZE (c).

Fonte: Autores.

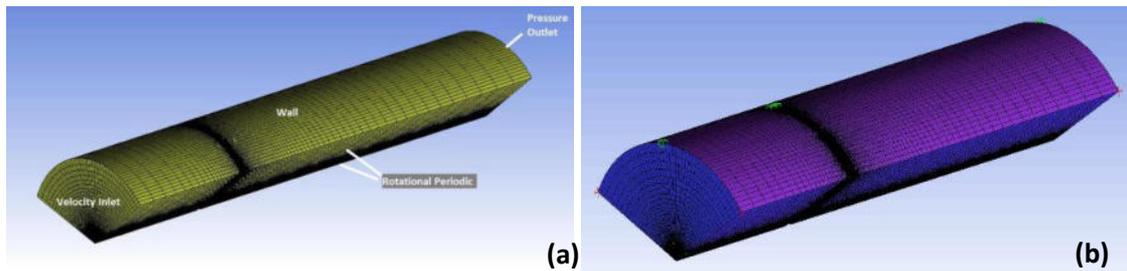


Figura 6: Comparação entre as malhas da ZE. (a) [11]. (b) Autores.

Por fim, a malha final apresentou um número total de aproximadamente 5,8 milhões de elementos, um valor inferior a 4% de diferença em relação à referência [11], de 5,6 milhões. Ademais, as métricas de qualidade atingidas foram de 0,85 para a assimetria máxima e 0,057 e 0,4 para a qualidade ortogonal determinante mínimos; em comparação com os valores de 0,3 para a assimetria mínima e de 0,02 para a qualidade ortogonal nas regiões mais críticas da referência [11].

### 2.3 Configurações do Solucionador

O software utilizado foi o ANSYS Fluent®, onde utilizou-se o solucionador *pressure-based* e em regime permanente. Foi utilizada a condição de contorno de periodicidade a partir de um referencial não-inercial (*Moving Reference Frame - MRF*). O modelo de turbulência foi o *k- $\omega$  SST* e o fluido de trabalho foi o ar, com massa específica constante igual 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Utilizando o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade *coupled*, as equações de discretização espacial foram configuradas como de segunda ordem a montante (*upwind*), sendo utilizado o método baseado em células de mínimos quadrados (*least squares cell based*) para os gradientes. Além disso, os fatores de sub-relaxação para a massa específica e para as forças de corpo foram definidos iguais a 0,45.

Para as condições de contorno, as seguintes configurações foram especificadas:

- Velocidade do vento na entrada: 4 m/s, constante, com intensidade de turbulência igual a 4% e comprimento representativo igual ao diâmetro do redirecionador do escoamento do túnel de vento (neste caso, 25 mm);
- Pressão de saída: 0 Pa (manométrica), com intensidade de turbulência igual a 4% e comprimento representativo igual ao raio da pá (125 mm);
- Paredes: condição de escorregamento nulo na face curvilínea superior da ZR e na superfície da pá;
- Interfaces: condição de interface nas superfícies em contato com a ZR e a ZE;

- Faces Periódicas: condição de periodicidade rotacional a  $120^\circ$  ( $1/3$  do canal do rotor), do tipo conforme, nas superfícies laterais dos dois subdomínios;
- Faces do arredondamento do domínio: condição de eixo.

Como critério de convergência, a ordem mínima para os residuais das equações de transporte foi de  $10^{-3}$ , e foram monitorados o coeficiente de torque e a pressão estática no rotor. Ademais, também foram calculados os valores médios dos adimensionais  $GRV$  e  $y^+$  para avaliar a adequabilidade da malha, na ZR e na superfície da pá, respectivamente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 7 são apresentados os contornos de pressão estática resultantes da simulação da turbina na sua condição de  $TSR$  nominal (torque máximo), igual a 3,5, em comparação com os contornos do artigo de referência [11]. Observando a figura, a partir da escala de cores disponibilizada, percebe-se que o lado de pressão (c) teve um valor médio inferior, assim como o lado de sucção (d) um valor médio superior ao do artigo de referência (a,b). Além disso, os menores valores se concentraram na parte do bordo de ataque no lado de sucção, igualmente à referência [11], devido ao fato de ser a região onde ocorre a maior aceleração do escoamento.

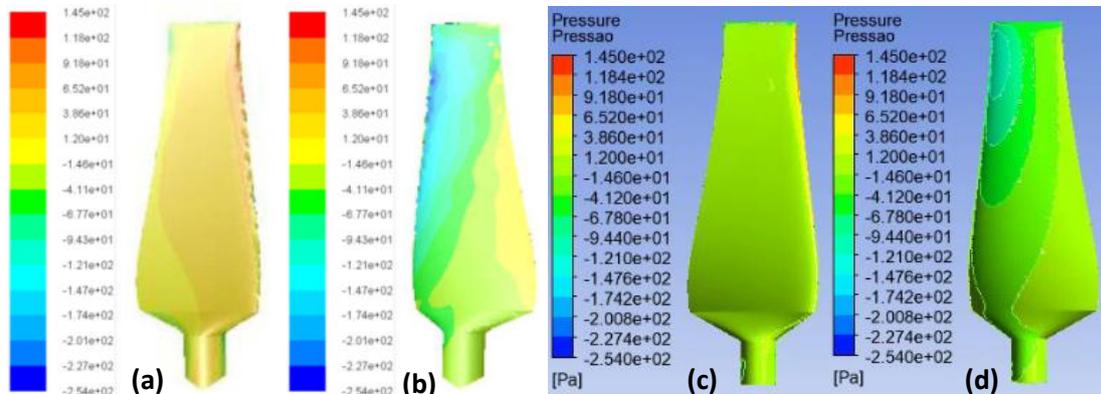


Figura 7: Contornos de pressão para os lados de pressão (a,c) e sucção (b,d).

Fontes: (a,b) [11]. (c,d) Autores.

Para a construção da curva característica da turbina foram simulados cinco pontos de operação, ilustrada pela Figura 8(a), na qual também pode ser observado os erros relativos percentuais entre os resultados do presente trabalho e de [11]. Os resultados dos números adimensionais  $GRV$  e  $y^+$  para cada  $TSR$  simulada são apresentados na Figura 8(b).

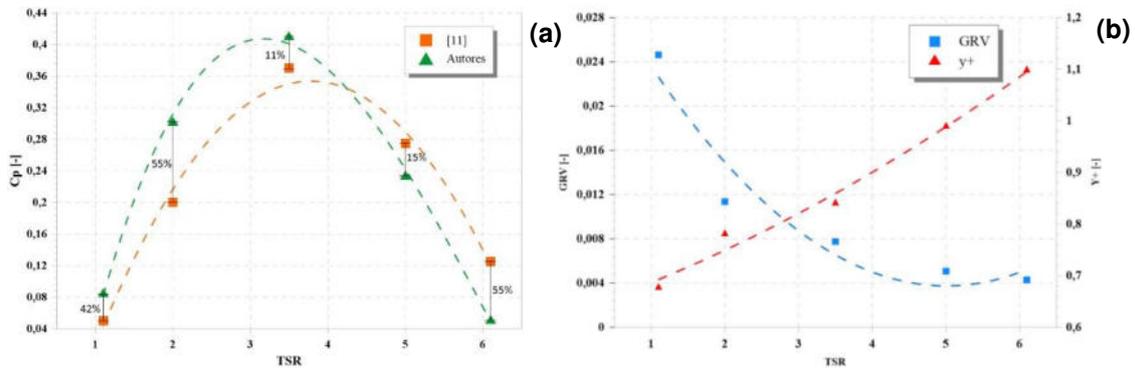


Figura 8: (a) Comparação das curvas característica da turbina. (b) Valor médio dos números adimensionais em diferentes pontos de operação. Fonte: Autores.

#### 4. CONCLUSÕES

Analisando a Figura 7, pela presença da zona de baixa pressão no bordo de ataque do lado de sucção, é possível inferir que a física do problema está correta. Sendo essa a região de maior aceleração do problema, haverá uma maior velocidade e, conseqüentemente, uma menor pressão. O gradiente de pressão entre o intradorso e o extradorso da pá é responsável pela geração da força de sustentação que, conseqüentemente, produz torque no eixo da turbina.

Em relação a malha, a discretização espacial constituiu-se muito semelhante, com uma variação de apenas 3,6% no número final de elementos. As condições de contorno também foram todas definidas igualmente a [11], com exceção do arredondamento do domínio (ver Figuras 5(b) e 5(c)), para a qual foi atribuída a condição de contorno de eixo. Essa alteração possivelmente se trata da maior diferença entre os trabalhos, sendo realizada com intuito de atender os valores mínimos dos critérios de qualidade de malha aceitos pelo ANSYS®, o que pode ter interferido em certo grau nos resultados das simulações.

Em relação as configurações do solucionador, os autores [11] não deixam claro quais os fatores de sub-relaxação que foram utilizados. Tais fatores, quando alterados inadequadamente, podem gerar instabilidades numéricas no cálculo dos residuais, como ocorreu em algumas condições de operação (principalmente com  $TSR = 2$ ) simuladas no presente estudo.

Na Figura 8(a) é possível observar que a curva característica do presente estudo ficou deslocada e superestimada, em relação a [11]. Uma hipótese para esse comportamento estaria na diferença entre os contornos de pressão, e uma possível explicação para tal diferença poderia ser a desconformidade entre as duas geometrias. Os autores não fornecem todas as informações necessárias referentes às dimensões da pá como, por exemplo, na região da raiz, na qual seu diâmetro e formato foram estimados; ou como o bordo de fuga, o qual foi arredondado (para fins de facilidade na discretização espacial), porém sem haver tal informação na referência [11].



Ademais, é importante destacar que os pontos de operação das extremidades da curva característica ( $TSR$  mínimas e máximas) tendem a apresentar maiores instabilidades no funcionamento da TEEH. O escoamento nos pontos de menores  $TSR$  possuem maiores magnitudes de vorticidades, o que dificulta a predição dos gradientes de velocidade em uma malha não refinada suficientemente. Já nos pontos de maiores  $TSR$ , a pá está sujeita a maiores forças de arrasto, devido às maiores velocidades. Tais fatos podem sugerir um porquê dos maiores erros serem obtidos nos pontos de operação mais extremos, como é identificado na Figura 8(a).

Analisando a Figura 8(b) observa-se que os valores de  $GRV$  na ZR têm uma tendência de aumentar com a diminuição dos valores de  $TSR$ . O porquê disso está no fato de que para menores valores de rotação, há maiores graus de vorticidade, o que resulta em maiores gradientes de velocidade. Os maiores valores de  $GRV$  indicam uma menor adequabilidade da malha na predição dos gradientes, o que resulta na conclusão de que, em futuros trabalhos, em vez de utilizar a mesma malha para todas as condições de operação, poderia ser realizado uma discretização mais refinada nos pontos inferiores de  $TSR$ . Além disso, o cálculo do  $GRV$  foi feito para a ZR, porém em TEEH a região de maior vorticidade está à jusante da turbina. Assim, através da implementação de novas linhas de controle no domínio computacional, o  $GRV$  poderia ser calculado para a exata região do escoamento onde é formado a esteira, o que ampliaria a confiabilidade dos valores encontrados para esse adimensional.

Em relação ao  $y^+$ , como a simulação utiliza o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST, seu valor máximo recomendado é igual a 1, sendo este o valor utilizado para estimar a altura da primeira camada prismática, visto que não foi fornecido informações acerca de tal camada pelos autores. Analisando a Figura 8(b), é possível observar uma pequena variação do  $y^+$  para os diferentes valores de  $TSR$ , se mantendo todos próximos a 1. Ademais, foi observado que somente para a condição de  $TSR$  máxima (igual a 6,1) o valor máximo de  $y^+$  foi ultrapassado, mas atingindo somente o valor de 1,1. Esses resultados, então, ficaram dentro do esperado e a discretização feita na camada limite foi adequada, não podendo ser atribuída como uma possível fonte de erro da simulação.

Finalmente, a partir dos resultados das simulações do presente estudo, comparados com os da referência [11], pode-se afirmar que a metodologia foi validada e com isso poderá ser aplicada a diferentes micro TEEH. Além disso, com a aplicação dos números adimensionais, será possível melhorar a confiabilidade de futuras simulações que utilizem essa metodologia, estabelecendo diretrizes para a construção das malhas e para a discretização espacial na camada limite, contribuindo para simulações CFD de micro TEEH mais confiáveis.



## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), PROCESSO APQ-00653-22, referente ao projeto: “Análise Numérica e Experimental de Microgeradores Eólicos para Aplicações em Regiões Remotas no Brasil” edital 001/2022, registro na DPI UNIFEI No: PVDI297-2022, pelo financiamento desta pesquisa. Também, ao PPGREEN (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), ao PIBIC CNPq (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica financiado pelo CNPq) pelo apoio financeiro e ao PIVIC (Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica) da UNIFEI.

## REFERÊNCIAS

- [1] IEA, 2017, "Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity".
- [2] Werlang A.B.C.; Geller I. Uma Análise da Relação Entre o Consumo de Energia Elétrica e o Crescimento Econômico Mundial. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2018.
- [3] IEA, 2018, "Statistics". Disponível em: < <https://www.iea.org/statistics>>.
- [4] IRENA [International Renewable Energy Agency] Renewable Power Generation Costs in 2018, 2019, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-126-3
- [5] P. F. S. Trentin, P. H. B. de B. Martinez, G. B. dos Santos, E. E. Gasparin, and L. O. Salviano, Screening analysis and unconstrained optimization of a small-scale vertical axis wind turbine, Energy, vol. 240, p. 122782, Feb.2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.122782.
- [6] Stathopoulos T, Alrawashdeh H, Al-Quraan A, Blocken B, Dilimulati A, Paraschivoiu M, Pilay P. Urban wind energy: some views on potential and challenges. J Wind Eng Ind Aerod 2018;179:146e57.
- [7] Murali A, Rajagopalan RG. Numerical simulation of multiple interacting wind turbines on a complex terrain. J Wind Eng Ind Aerod 2017;162:57e72
- [8] IEA, 2022. The Energy Progress Report 2022. Tracking SDG7.
- [9] Hsiao, F. BIN; BAI, C. J.; CHONG, W. T. The Performance Test of Three Different Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Shapes Using Experimental and Numerical Methods. Energies 2013, Vol. 6, Pages 2784-2803, v. 6, n. 6, p. 2784–2803
- [10] Rasam, A. et al. Detached-eddy simulation of a horizontal axis wind turbine. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, v. 137, p. 357–367, 2018.
- [11] Shirzadeh Ajirlo, K. et al. Development of a wind turbine simulator to design and test micro HAWTs. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 43, p. 100900, 1 fev. 2021.
- [12] F. Balduzzi, A. Bianchini, G. Ferrara, and L. Ferrari, “Dimensionless numbers for the assessment of mesh and timestep requirements in CFD simulations of Darrieus wind turbines,” Energy, vol. 97, pp. 246–261, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.ENERGY.2015.12.111.



## CONDENSADOR DE 4 ETAPAS PARA GAS DE PIRÓLISIS PARA OBTENCIÓN DE ACEITE

María Sol Gutierrez<sup>1</sup>, Mercedes Lozano Rus<sup>2</sup>, Leisa Maria Magallanes<sup>3</sup>, Norberto Canale<sup>2</sup>,  
Leonardo Molisani<sup>1</sup> y María Fernanda Gayol<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Acústica y Vibraciones-IDAS UNRC-CONICET

Ruta 36 Km 601, Río Cuarto, Córdoba - [mrgutierrez@ing.unrc.edu.ar](mailto:mrgutierrez@ing.unrc.edu.ar) , [lmolisani@vt.edu](mailto:lmolisani@vt.edu)

<sup>2</sup>División de I+D+i, Canale S.R.L - Pedro Patat Norte 1570, Colonia Caroya, Córdoba  
[mercedeslozanorus@gmail.com](mailto:mercedeslozanorus@gmail.com), [canale@canalesrl.com.ar](mailto:canale@canalesrl.com.ar)

<sup>3</sup> Grupo SIMAP IDAS UNRC-CONICET - Ruta 36 Km 601, Río Cuarto,  
Córdoba [lmagallanes@ing.unrc.edu.ar](mailto:lmagallanes@ing.unrc.edu.ar) , [mgayol@ing.unrc.edu.ar](mailto:mgayol@ing.unrc.edu.ar)

### RESUMEN

La pirólisis es un proceso en el cual se descompone materia orgánica u otros materiales a altas temperaturas en ausencia de oxígeno generando una corriente gaseosa como principal efluente. Esta corriente egresa del reactor a 400 °C aproximadamente y está compuesta por gases volátiles y no volátiles, los cuales, al disminuir la temperatura condensan y forman aceites con alto poder calorífico. El objetivo de este trabajo es diseñar un condensador de calor siguiendo la tipología de tubo y coraza capaz de ser utilizado en un proceso de pirólisis para extraer calor, de forma que todos aquellos compuestos no volátiles presentes en la corriente condensen en forma de aceite. Para esto se diseñó un equipo que cumpla con las condiciones necesarias para enfriar la corriente gaseosa generada en el reactor al introducir 10 kg de neumáticos en desuso. Una vez obtenidas las dimensiones del equipo se procede a realizar pruebas tales como el cálculo de la presión interna sobre las paredes del intercambiador, análisis de deformaciones por temperaturas, pérdida de carga y simulación de flujo de partículas utilizando mecánica computacional, además de un análisis exhaustivo del material a utilizar. De esta investigación se obtuvo como resultado un aparato condensador cuyas dimensiones son 1000 mm de largo y 200 mm de diámetro con 4 salidas para distintas clases de aceites dependiendo de su temperatura de condensación. Para maximizar la zona de contacto se introducen 7 deflectores longitudinales, que aumentaran la trayectoria del gas dentro de la coraza, mientras que el agua utilizada como agente refrigerante circula por 10 tubos a contracorriente. En este trabajo se modeló y diseñó exitosamente un condensador especial para gas pirolítico.

**Palabras clave:** Condensador, Pirólisis, Modelado, Simulación



## 1. INTRODUCCIÓN

En el año 2021 el 77% de la energía consumida a nivel mundial fue generada a partir de la quema de combustibles fósiles [1], a pesar de ser este proceso la principal fuente de formación de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero (GEI). Actualmente, en diversos estudios realizados se detectó que la emisión de GEI no es solo un problema ambiental, sino que afecta significativamente a la salud de los humanos y animales [2,3]. Por esto, se procedió a buscar formas de energía renovable como reemplazo a la quema de combustibles fósiles, con huella de carbono neta igual a 0.

Si bien existen diversas formas de energía renovable, una de las principales es la obtención de energía a partir de biocombustibles. Este grupo de hidrocarburos capaces de generar energía eléctrica se obtienen a partir de diversos procesos que tienen en común la utilización de biomasa o residuos como materia prima. En este trabajo se analizará puntualmente el proceso de pirólisis. La pirólisis es un proceso complejo, multi-etapa, en el cual la materia prima se descompone en ausencia de oxígeno a temperaturas entre 300-600 °C para formar gases y compuestos carbonosos sólidos. La corriente gaseosa de salida se enfría de forma que una porción de la misma condensa generando aceite de pirólisis. Este es un hidrocarburo líquido de color marrón oscuro que al ser destilado puede adquirir propiedades similares al diésel, lo cual lo hace una buena alternativa como biocombustible [4].

Por esto, es importante dentro del proceso de pirólisis la elección de un condensador adecuado. El tipo y tamaño del mismo está basado en el estado de agregación del fluido, sus propiedades (corrosión, viscosidad, entre otras), el rango de temperatura, la presión de trabajo, y otras propiedades termodinámicas. Otro aspecto a tener en cuenta es que durante el enfriamiento de la corriente gaseosa se generan alquitranes, los cuales representan el problema principal de este tipo de procesos. Estos se depositan sobre los tubos o dentro de las cañerías, generando una disminución en el rendimiento del intercambiador y un posible “taponamiento” de las cañerías. Por otro lado, el aceite de pirólisis es ligeramente corrosivo y naturalmente ácido por los compuestos químicos que lo forman, lo que conlleva a que la elección del material a utilizar sea un punto de interés del análisis [5].

El objetivo de este trabajo fue diseñar un condensador capaz de disminuir la temperatura del gas de salida obtenido al pirolizar 10 kg de materia prima hasta la condensación de toda la fracción condensable. Se simuló el flujo de ambas corrientes dentro del intercambiador con el objetivo de obtener las cargas térmicas para ingresar como condiciones de carga en un análisis estructural. Luego se probó la eficiencia y desempeño del modelo obtenido realizando pruebas de esfuerzos, presiones y se determinó el material más adecuado para cumplir con las condiciones del fluido circulante.



## 2. MODELO DE CINÉTICA QUÍMICA

Se simuló un reactor de pirólisis mediante procesos termoquímicos para obtener información de la corriente de salida. Así se determinó la fracción másica de cada componente en el producto, el caudal másico del mismo y su temperatura, parámetros que serán luego utilizados para diseñar el intercambiador de calor adecuado.

Para que la corriente de salida del pirolizador se enfríe debe ponerse en contacto indirecto con una corriente fría. En este prototipo se utilizó agua como fluido refrigerante la cual circulará en un circuito cerrado con un caudal de 100 kg/h. Se planteó un caudal de agua lo suficientemente alto como para cumplir los requerimientos del proceso sin tener cambios significativos en su temperatura, de modo de no ser necesaria una torre de enfriamiento.

Como datos de entrada en la simulación de la corriente caliente, se ingresaron los valores de caudales másicos y su composición junto con las temperaturas, tanto de entrada como la de salida objetivo. En cuanto a la corriente de agua, se ingresó su flujo másico y la temperatura de entrada, dejando a la temperatura de salida como un grado de libertad necesario para que la simulación converja a un modelo adecuado. Se le fijó también la condición de que el fluido caliente circule por la coraza a contracorriente del fluido frío que lo hará por los tubos. Esto se decidió con el objetivo de poder quitar el condensado a medida que se genere y que en caso de generarse alquitranes estos no circulen por dentro de los tubos evitando que puedan ser tapados.

Una vez establecidos estos parámetros en la simulación se obtienen las configuraciones adecuadas para el proceso planteado. Dentro de los modelos propuestos en la simulación se optó por un intercambiador de tubo y coraza tipo BEM de 1000 mm de largo y 200 mm de diámetro. Este contará con 4 boquillas de salida para poder eliminar distintas clases de condensado sin mezclarse entre ellos y 7 deflectores longitudinales de forma que el gas tenga más superficie de contacto con los tubos fríos. El fluido caliente realizará un paso por la coraza de la misma forma que el fluido frío realizará un paso por los 10 tubos que contendrá el arreglo.

Una vez obtenido el modelo propuesto por la simulación se realizan las pruebas estructurales mediante una simulación por elementos finitos (EF). Se muestra en la Figura 1 una imagen del modelo propuesto.

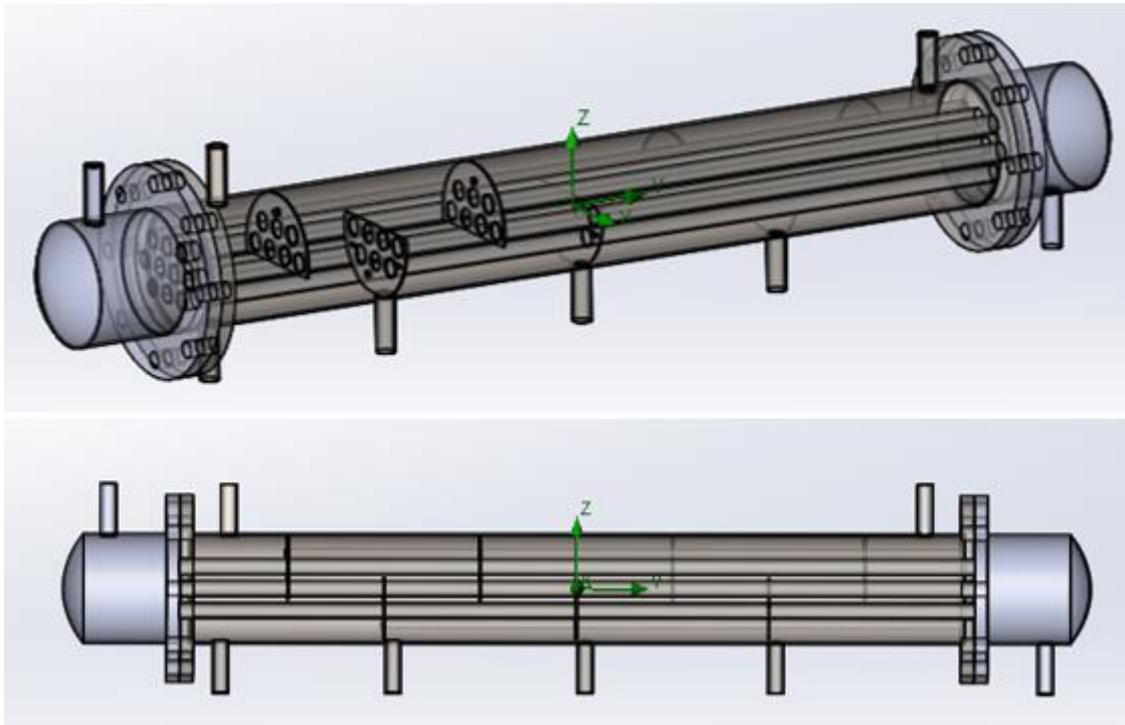


Figura 1: Modelo propuesto.

### 3. PRUEBAS ESTRUCTURALES AL MODELO

Se realizaron análisis estructurales estáticos y simulaciones de flujo. Sin embargo, lo primero que se propuso fue el material a utilizar, ya que como se mencionó anteriormente la corriente es ácida y levemente corrosiva. Se propuso utilizar un acero inoxidable ya que tolera las condiciones químicas de la corriente y soporta altas temperaturas. Para esta aplicación en particular se optó por la familia de los aceros austeníticos ya que tienen una excelente soldabilidad, son funcionales a temperaturas extremas y resisten a la corrosión. Si bien dentro de esta familia hay diferentes aleaciones, las más utilizadas y por lo tanto disponibles en el mercado son el acero inoxidable 304 y 316. Para este diseño se opta por utilizar acero 316 ya que tiene mejor resistencia a la corrosión y un coeficiente de dilatación térmica menor, lo que conlleva menores deformaciones ante la exposición a altas temperaturas. En particular se utiliza el 316L ya que es una mejor opción cuando es necesario realizar soldadura [6].

Como primer estudio se realizó un análisis de flujo, este consiste en simular las características termodinámicas que tendrá la corriente que circulará por el ensamble de forma de poder extraer datos térmicos, de presión y de velocidad de fluido. Esto tiene como objetivo utilizar estos valores luego como cargas en un análisis estático. Se muestran en la Tabla 1 los datos ingresados como condiciones de entrada.



Tabla 1: Condiciones de borde para el análisis de flujo.

Variable	Corriente fría (agua)	Corriente caliente (gas pirolítico)
Caudal másico	100 kg/h	4.3 kg/h
Temperatura de entrada	293K	450K

Cabe destacar que la temperatura de ingreso al intercambiador de calor es menor que aquella de salida del reactor de pirólisis ya que antes de ingresar al condensador atraviesa un ciclón donde, además de eliminar las partículas sólidas, se genera una pérdida de calor.

Como resultado de este análisis se obtienen las velocidades de ambos fluidos a la salida, las temperaturas de cada uno y del material, y el perfil de flujo de cada uno. Se puede observar en la Figura 2 y 3 respectivamente el flujo de fluido caliente por la coraza y el fluido frío por los tubos del condensador. Se puede apreciar en la Figura 2 el incremento de la zona de contacto entre ambas corrientes con el agregado de los deflectores longitudinales con un corte del 40%. A la hora de diseñarlo y decidir la cantidad óptima de estos se utilizó el criterio fijado en las normas T.E.M.A (por su sigla en inglés The Tubular Exchanger, Manufacturers Association) en el cual se propone que la distancia mínima entre dos deflectores no puede ser menor a un quinto del diámetro del intercambiador para que no obstaculice el flujo. Además, se tomó en cuenta que debía ser una cantidad impar de forma de orientar al flujo gaseoso de salida hacia arriba y con un corte de 40% ya que se considera dentro de los valores óptimos. Se presenta en dichas figuras el perfil térmico de cada una de las corrientes donde se aprecia el rendimiento del arreglo propuesto. Por el lado de la corriente fría se observa que, como se había propuesto, el cambio de temperatura no es significativo, mientras que la corriente caliente disminuye 150K su temperatura de forma de asegurar que toda la fracción condensable lo haya hecho. Como resultado de este análisis se obtiene que de la corriente gaseosa original que ingresa al condensador, el 70% se condensa en aceite pirolítico.

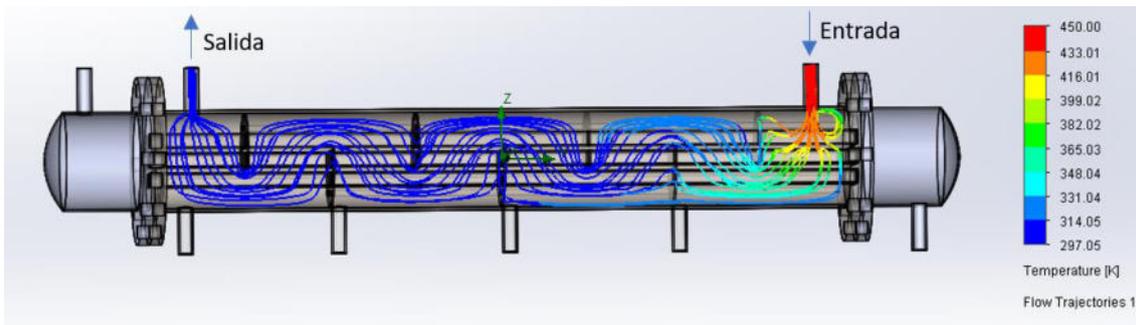


Figura 2: Temperatura del flujo de corriente gaseosa caliente por la coraza.

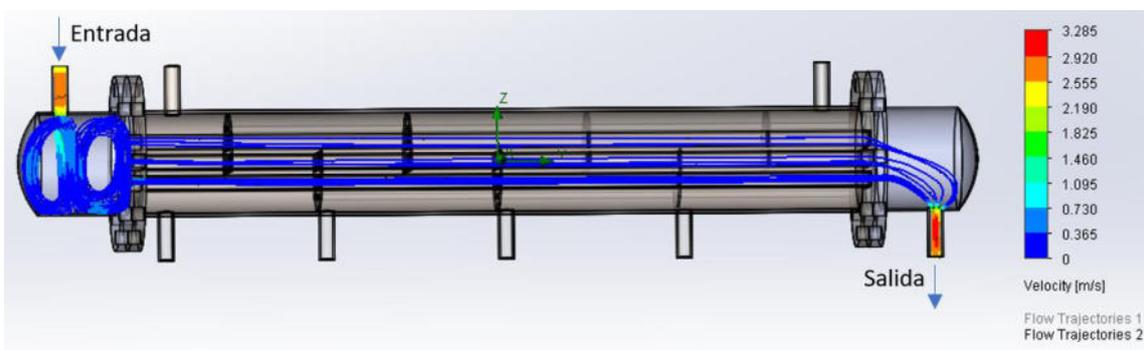


Figura 3: Velocidad del flujo de corriente de agua por los tubos.

Los resultados de la simulación se ingresaron al análisis estático como cargas externas a los fines de obtener los esfuerzos a los que se someterá el acero inoxidable del condensador. Puntualmente, se plantearon como cargas el perfil térmico, la presión del fluido y la tensión de corte de fluido en los tres ejes. Otro parámetro necesario para hacer el estudio es indicar los puntos de sujeción de la pieza. Se consideró que se mantiene fija la brida a la cual está sujeto el haz de tubos (la de la derecha en la Figura 4) y se le agrega condiciones de desplazamiento horizontal a cada uno de los tubos y a la coraza. Con todas estas condiciones establecidas y seleccionando el material, se realizó un estudio por elementos finitos. Para ello se creó la malla deseada y se llevó a cabo el análisis, obteniendo como resultados los perfiles de tensión, desplazamientos y deformaciones unitarias.

Se observa en la Figura 4 el perfil de tensión obtenido al realizar dicho estudio. Al analizar dicha figura se puede observar que en ningún punto del arreglo se supera la tensión máxima permitida.

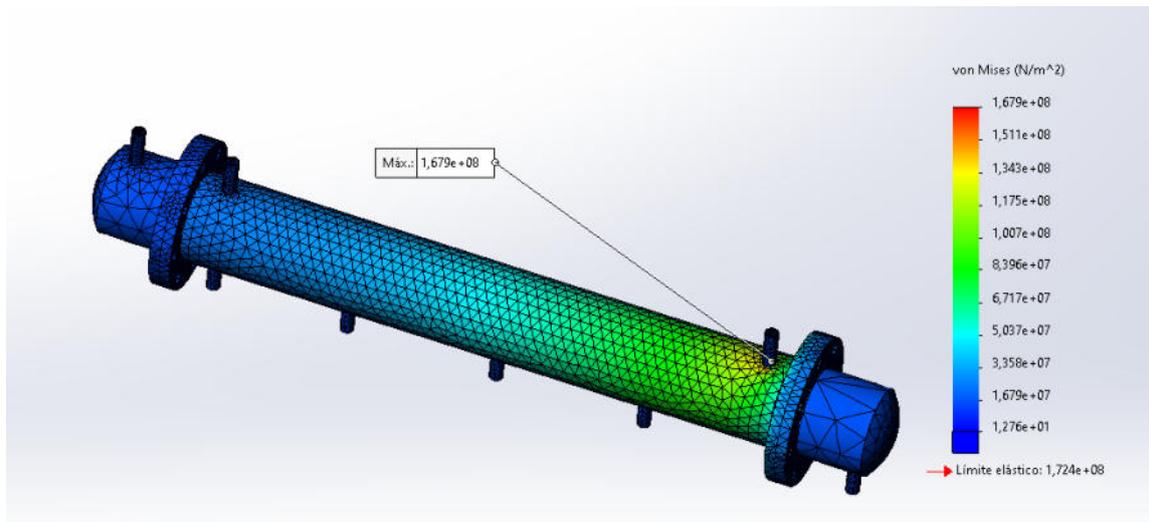


Figura 4: Tensiones de Von Mises en la corza de acero inoxidable 316L.

Se analizaron las tensiones según el criterio de Von Mises para determinar si en algún punto del arreglo estas superan el límite y como era esperado, la tensión máxima se encuentra sobre la corza en la zona donde entra en contacto la corriente caliente gaseosa con el acero inoxidable. Se concluye entonces que, para este tipo de proceso, los mayores esfuerzos se relacionan con las cargas térmicas y la diferencia de temperatura entre el gas circulante dentro de la corza y la temperatura ambiente donde se encuentra el equipo. Este fenómeno también era esperado debido a que se plantea un proceso de pirólisis a presión atmosférica, por lo que esta no debería generar ningún problema al material.

En la Figura 5 se pueden observar los desplazamientos en las distintas zonas del condensador analizado.

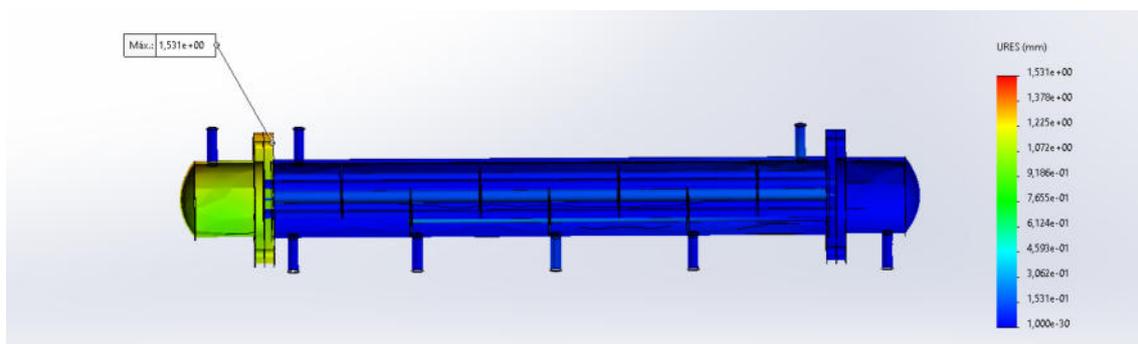


Figura 5: Desplazamientos.

Como se mencionó anteriormente, la brida derecha se considera fija y tanto la corza como el haz de tubos se considera deslizante hacia la izquierda. Por lo tanto, era esperado que el máximo desplazamiento se encontrara en el casquete izquierdo del condensador debido a la dilatación



de la coraza por efecto térmico. Sin embargo, el máximo desplazamiento encontrado es de 1.5 mm, valor que puede ser compensado al utilizar un sellador de alta temperatura que, al ser un elastómero, absorbe el desplazamiento y no permite el paso del gas evitando así fugas.

#### 4. CONCLUSIONES

Mediante el uso de dinámica computacional se diseñó un condensador de 4 etapas con el objetivo de maximizar la eficiencia del proceso de pirólisis para generar aceites pirolíticos. En primer lugar, se desarrolló un modelo termoquímico para conocer la cantidad y características de gas de pirólisis obtenido. Con estos datos se simuló configuraciones adecuadas para cumplir con el objetivo propuesto de disminuir la temperatura de la corriente hasta que toda la fracción condensable lo haya hecho. Así se optó por un intercambiador de calor tipo BEM de 1000 mm de largo y 200 de diámetro, con 7 deflectores longitudinales con un corte del 40%. El fluido frío (100 kg/h de agua) circula por los tubos, mientras que el fluido caliente (4.3 kg/h de gas pirolítico) lo hacen por la coraza, de forma que se pueda extraer el aceite por las 4 aberturas propuestas a medida que los compuestos condensan. Como la corriente caliente es levemente ácida y corrosiva se opta por un acero 316L como material para este intercambiador de calor.

Una vez seleccionado este arreglo se procedió a realizar análisis estáticos y de flujo para comprobar que sea apto para el proceso. En segundo lugar, se realizó un análisis de flujo de forma de obtener los parámetros termodinámicos que serán ingresados como cargas en un análisis estático. Luego, mediante elementos finitos, se realizó el análisis estático donde se observó el perfil de tensiones y desplazamientos de la pieza. Al analizar dichos perfiles se concluyó que las mayores cargas presentes en este arreglo son térmicas, ya que los valores de tensiones más altos se encuentran en el punto donde el gas caliente (450K) que ingresa, se pone en contacto con la coraza. Sin embargo, en ningún punto se observó que se sobrepase la tensión máxima al ser analizada por el criterio de Von Mises, por lo que el acero 316L es un material adecuado para el proceso. Por último, se observó que el máximo desplazamiento ocurre en el cabezal izquierdo producto de la dilatación de la coraza.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la empresa Canale S.R.L. por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

#### 6. REFERENCIAS

[1] Ritchie H., Roser M., Rosado P., (2022) - "Energía". Publicado en línea en OurWorldInData.org. Obtenido de: '<https://ourworldindata.org/energy>'



- [2] Perera, F. *Pollution from Fossil-Fuel Combustion is the Leading Environmental Threat to Global Pediatric Health and Equity: Solutions Exist*. International Journal of environmental research and public health; 15(1): 16, 2018.
- [3] Lu W., Hackman D., Schwartz J. *Ambient air pollution associated with lower academic achievement among US children*. Environmental epidemiology, 5(6): e174, 2021;
- [4] Al-Rumaihi A., Shahbaz M., McKay G., Mackey H., Al-Ansari T. *A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167, 2022
- [5] Salvi B.L., Soni T., Jindal S. et al. *Design improvement and experimental study on shell and tube condenser for bio-oil recovery from fast pyrolysis of wheat straw biomass*. SN Applied Science, 3, 173, 2021.
- [6] Alhazaa A., Haneklaus N. *Diffusion Bonding and Transient Liquid Phase (TLP) Bonding of Type 304 and 316 Austenitic Stainless Steel—A Review of Similar and Dissimilar Material Joints*. Metals, 10, 613, 2020



## ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE DIÁMETROS EN LA EFICIENCIA DE UN TUBO VORTEX

J. M. Penillas<sup>1</sup>, F. J. Suarez<sup>1,2</sup> y N. J. Mariani<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina - [juanmanuel.penillas@ing.unlp.edu.ar](mailto:juanmanuel.penillas@ing.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina – [felipe.suarez@ing.unlp.edu.ar](mailto:felipe.suarez@ing.unlp.edu.ar)

<sup>3</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas “Dr. J. J. Ronco” (CINDECA) CONICET- UNLP - CIC BA

Calle 47 No. 257, CP B1900AJK, La Plata, Argentina - [javier.mariani@ing.unlp.edu.ar](mailto:javier.mariani@ing.unlp.edu.ar)

### RESUMEN

El tubo del vórtice de Ranque-Hilsch (TVRH) es un dispositivo mecánico sin partes móviles que permite generar, a partir de un fluido a presión, dos corrientes a diferentes niveles de temperatura. La gran mayoría de estudios experimentales realizados sobre el TVRH reportados en la bibliografía abierta se llevaron a cabo en dispositivos de una marca comercial. De igual manera, se utilizaron las dimensiones y características constructivas de estos tubos para constituir modelos CFD a fin de estudiar la fluidodinámica dentro del dispositivo. En parte de estos estudios experimentales, se señala una caída en la eficiencia del dispositivo en ciertos rangos de operación. Mientras que, en las simulaciones, se reporta la existencia de una zona de reflujo en la salida correspondiente a la corriente fría en los mismos rangos de operación para los cuales se deteriora la eficiencia.

En este contexto, se propone emplear un modelo CFD simple, validado previamente, para estudiar la influencia de la relación de diámetros (diámetro de salida de la corriente fría sobre el nominal el tubo,  $D_c/D$ ) en la eficiencia del TVRH y vincularla con la generación del reflujo. Para ello se parte de una geometría conocida ( $D_c/D=0.54$ ), correspondiente a un TVRH marca EXAIR® previamente estudiado y se varía la relación de diámetros.

Al estudiar el dispositivo para distintos diámetros de salida de la corriente fría ( $0.3 \leq D_c/D \leq 0.7$ ), se logró identificar la zona de recirculación en el rango  $0.49 \leq D_c/D \leq 0.7$ . Paralelamente, se cuantificó el efecto de la relación de diámetros sobre la eficiencia del dispositivo y se determinó la existencia de una relación de diámetros que maximiza la eficiencia a  $D_c/D=0.44$ .

**Palabras Clave:** *Tubo Vortex, Análisis paramétrico, Recirculación, Eficiencia energética*



## 1. INTRODUCCIÓN

El tubo del vórtice de Ranque-Hilsch (TVRH) es un dispositivo sin partes móviles que, sin aporte externo de energía, permite generar a partir de un fluido a presión que ingresa tangencialmente al tubo a través de toberas, dos corrientes a diferente nivel de temperatura. Una de las corrientes de salida siempre presenta una temperatura mayor respecto a la entrada (flujo caliente) y la otra, una temperatura siempre menor respecto a la entrada (flujo frío). Asimismo, las temperaturas de las salidas pueden variar si se modifican los caudales de cada una, definiéndose un parámetro conocido como “fracción fría”,  $\varepsilon_c$ , el cual representa la relación entre el caudal de salida frío y el de entrada. Parámetro utilizado para caracterizar el comportamiento térmico macroscópico de los TVRH.

Como ventajas de los TVRH, por sobre otros sistemas de refrigeración (o calentamiento), pueden mencionarse su diseño simple y compacto (ocupan muy poco espacio), su bajo costo de fabricación y el prácticamente nulo mantenimiento que requieren. Las aplicaciones de estos dispositivos involucran tanto a la corriente caliente como a la fría, siendo las de esta última las más relevantes, dado que pueden lograrse temperaturas considerablemente bajas (refrigeración en operaciones de maquinado CNC, de componentes electrónicos, de cámaras CCTV, etc.). Una de las principales empresas en manufacturar y comercializar el TVRH es EXAIR®, la cual reporta en su catálogo que puede alcanzarse una temperatura mínima para la corriente fría de  $-50^{\circ}\text{C}$ . La gran mayoría de estudios experimentales realizados sobre los TVRH se han llevado a cabo con sus dispositivos, adicionalmente, los estudios CFD han utilizado las características geométricas de los mismos como referencia.

Los estudios destinados a analizar distintos aspectos de los TVRH abundan, comprendiendo tanto experimentales como CFD [1]. Sin embargo, en su mayoría se limitan a caracterizar el comportamiento térmico sin profundizar en el análisis sobre causas que conducen a los resultados obtenidos. Dentro del amplio espectro de posibles parámetros a estudiar uno de relevancia es la relación del diámetro de la salida fría con respecto al diámetro del tubo ( $D_c/D$ ). El primer estudio paramétrico de naturaleza experimental sobre esta relación fue presentado por Hilsch en 1946 [2]. En el mismo se reporta el vínculo de las temperaturas de salida con respecto a  $D_c/D$ , entre otros resultados. Desde su publicación hasta la actualidad se han presentado un importante número de trabajos que estudian esta relación, experimentales y CFD, en los que se reporta, principalmente, una caída en la eficiencia del dispositivo para  $\varepsilon_c < 0.5$  [3]–[11]. Es decir, que la diferencia entre la temperatura de entrada y las de la corriente fría al contrario de incrementarse se mantiene constante conforme  $\varepsilon_c$  se reduce por debajo de 0.5, o incluso disminuye. Por otro lado, existe una serie de trabajos que reportan la aparición de una zona de recirculación de flujo generada por un reflujo en la salida correspondiente a la corriente fría, zona vinculada a la relación  $D_c/D$  en los mismos rangos de operación (i.e.  $\varepsilon_c < 0.5$ ) para los que se

detecta una disminución de la eficiencia [3], [4], [10]–[12]. Cabe aclarar que el primer reporte referido a la existencia de una zona de recirculación en la salida fría data de 2005 [13] y corresponde a un estudio experimental y de simulaciones utilizando como modelo de referencia al tubo EXAIR® 708 slpm.

En este trabajo, se pretende estudiar en forma sistemática, a través del empleo de un modelo CFD simple previamente validado [14], la influencia de la relación  $D_c/D$  en la eficiencia del TVRH y establecer una vinculación entre el comportamiento de este parámetro con el fenómeno de reflujo en la salida fría.

## 2. MODELADO CFD

### 2.1. Modelo matemático

#### 2.1.1 Dominio e hipótesis de modelado

El TVRH de referencia es el tubo EXAIR® 708 slpm, diseñado con 6 toberas de entrada para operar con aire como fluido de trabajo, del cual se dispone en bibliografía de una caracterización experimental [13]. Su modelo geométrico, que se muestra en la Figura 1a, consiste en una geometría 2D con simetría axial (incluyendo la predicción de la componente tangencial de la velocidad, “axysymmetric with swirl”). Un modelo 2D similar al aquí presentado fue propuesto por primera vez en 2005 por Aljuwayhel et. al [15] para analizar el comportamiento de un TVRH de una manera simplificada con el mínimo costo de cómputo posible. Esta forma de modelar la geometría del TVRH fue adoptada por diversos autores [10], [13], [16]–[26]. En estos trabajos las toberas de entrada han sido modeladas como una sección radial o una sección axial, fijando un vector director para la velocidad de entrada con un ángulo característico.

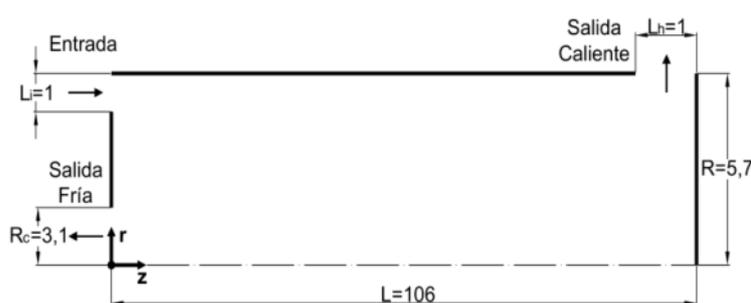


Figura 1a. Modelo geométrico (medidas en mm)

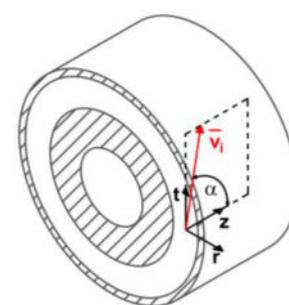


Figura 1b. Vector director

Simultáneamente se plantean las siguientes simplificaciones:

1) Las toberas de entrada son las encargadas de proporcionarle al flujo un ángulo que induzca la circulación interior en la dirección tangencial, cada una de estas presenta un área transversal al flujo ( $A_{tobera}$ ), por lo tanto, el área total de entrada al TVRH ( $A_{real}$ ) resulta la suma del área de cada tobera. La sección de entrada propuesta en el modelo es anular ( $A_{modelo}$ ) imponiendo un



vector director con componente radial nula que forma un ángulo  $\alpha$  con la dirección axial tal como se muestra en la Figura 1b (para el TVRH EXAIR® 708 slpm  $\alpha=75^\circ$ ). El vínculo entre el área del modelo y el área real responde a la ecuación de continuidad:

$$A_{\text{modelo}} = \frac{A_{\text{real}}}{\cos(\alpha)} \quad (1)$$

- 2) El difusor ubicado a continuación de la salida de la corriente fría no es considerado.
- 3) La válvula ubicada a la salida de la corriente caliente es modelada como una sección lateral del cilindro con una contrapresión ( $P_h$ ) que se modifica de acuerdo con la fracción fría deseada. El proceso resulta iterativo, se fija la contrapresión tal que  $P_c < P_h < P_i$  (presión de salida fría y, de entrada, respectivamente), ambas fijas. Una vez que la simulación del modelo converja, arrojando un valor de fracción fría, se verifica con el valor deseado. En caso de no coincidir se modifica  $P_h$  hasta alcanzar el valor de  $\varepsilon_c$  pretendido.

Vale la pena realizar una breve discusión respecto a la validez de las simplificaciones adoptadas. Shamsoddini y Nezhad [19] estudiaron el comportamiento fluidodinámico y térmico interno del TVRH a partir de cinco modelos tridimensionales con 2, 3, 4, 6 y 8 toberas de entrada y un sexto modelo bidimensional con simetría axial y remolino (equivalente al utilizado por Aljuwayhel [15]) A partir del análisis realizado confirmaron que los campos de velocidad y los perfiles de temperatura radiales obtenidos con los modelos tridimensionales de 4, 6 y 8 toberas de entrada resultan prácticamente idénticos a los obtenidos en el modelo bidimensional con simetría axial y remolino. Vale aclarar que el TRVH que se propone analizar en este trabajo cuenta con 6 toberas. Respecto a la segunda simplificación, se indica que la función del difusor en un TVRH es disminuir la velocidad de salida de la corriente fría, aumentando la presión estática hasta superar la presión externa (atmosférica). De modo que, más allá de introducir una ligera pérdida de presión por la fricción no se espera que incida significativamente sobre el comportamiento del TVRH. En cuanto a la tercera simplificación, su única finalidad es permitir la simulación de distintos valores de la fracción de la corriente fría.

### 2.1.2 Ecuaciones de conservación

Las ecuaciones de conservación a resolver en el modelo geométrico establecido, considerando flujo compresible de aire con un comportamiento ideal y propiedades termo-físicas constantes en estado estacionario son: conservación de masa Ecuación (2), cantidad de movimiento Ecuación (3) y energía Ecuación (4).

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}_{\text{eff}}) + \rho \vec{g} \quad ; \quad \text{con } \mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (3)$$



$$\nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + P)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v})) ; \text{ con } E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} \text{ y } k_{\text{eff}} = k + k_t \quad (4)$$

donde,  $\rho$  es la densidad,  $\vec{v}$  es el vector velocidad,  $\nabla p$  es el gradiente de presiones,  $\bar{\tau}_{\text{eff}}$  es el tensor de esfuerzos viscosos efectivo (el cual incluye a la viscosidad efectiva,  $\mu_{\text{eff}}$ ),  $\vec{g}$  es el vector aceleración de la gravedad,  $h$  es la entalpía,  $k_{\text{eff}}$  es la conductividad térmica efectiva y  $\nabla T$  es el gradiente de temperatura. Los términos efectivos incluyen las propiedades turbulentas,  $k_t$  y  $\mu_t$ , dependientes del modelo de turbulencia.

### 2.1.3 Condiciones de contorno

Entrada: presión y temperatura prescritas, vector director de la velocidad de entrada. Salidas: presión prescrita. Paredes: adiabáticas con condición de no deslizamiento.

## 2.2. Modelo numérico

### 2.2.1 Ecuaciones de conservación

El modelado numérico se lleva a cabo en la plataforma Ansys-Fluent™, la cual emplea el método de volúmenes finitos (FVM) para la resolución de las ecuaciones. Se seleccionó el modelo de turbulencia Standard  $\kappa$ - $\epsilon$ , de tipo RANS. Este modelo introduce dos parámetros, la energía cinética turbulenta ( $\kappa$ ) y la tasa de disipación turbulenta ( $\epsilon$ ), que se emplean para el cálculo de la viscosidad turbulenta. Aplicando la ecuación de transporte a estos dos parámetros se obtienen las dos ecuaciones de conservación propias del modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  Ecuaciones (5, 6), las cuales, junto con las Ecuaciones (2-4), forman el conjunto de ecuaciones de conservación a resolver.

$$\frac{D}{Dt}(\rho\kappa) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + S_\kappa - \rho\epsilon \quad (5)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho\epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\kappa} S_\kappa - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (6)$$

donde la viscosidad turbulenta,  $\mu_t$ , y la conductividad turbulenta,  $k_t$ , se definen como:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} ; k_t = \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \quad (7a, 7b)$$

Los valores de las constantes del modelo Standard  $\kappa$ - $\epsilon$  utilizado por Ansys-Fluent™ son:  $C_\mu=0.09$ ;  $C_{\epsilon 1}=1.44$ ;  $C_{\epsilon 2}=1.92$ ;  $\sigma_\kappa=1$ ;  $\sigma_\epsilon=1.3$ . A su vez, al trabajar con aire,  $C_p=1006 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Pr_t=0.85$ .

### 2.2.2 Independencia del mallado

Se implementó una malla de tipo estructurada, con elementos cuadrados con los siguientes parámetros: skewness 0, suavidad 1 y relación de aspecto 1, los cuales permiten maximizar su calidad. La condición de convergencia establecida para todos los residuos es de un valor menor a  $1 \cdot 10^{-6}$  y dado que la principal variable de interés es la temperatura de estancamiento ( $T_0$ ), se la tomó como variable para analizar la independencia del mallado.



El estudio de independencia fue descrito en un trabajo anterior [14] en el cual se concluyó que una longitud de celda de  $1.25 \cdot 10^{-4}$  m garantiza resultados reproducibles y precisos.

### 2.2.3 Validación experimental

Como se adelantó, el TVRH simulado es un tubo EXAIR® 708 slpm (ángulo de entrada,  $\alpha_i=75^\circ$ ) del cual se dispone en la bibliografía de una caracterización experimental [13], la cual consiste en ensayos para 10 condiciones de operación entre  $0.23 \leq \varepsilon_c \leq 0.82$ .

La validación del modelo CFD propuesto fue reportada en un trabajo previo [14], en el cual se estudió el comportamiento fluidodinámico y térmico de un TVRH comercial y se reportaron y analizaron los campos de velocidad, presión y temperatura. A modo de resumen se indica que la mayor diferencia relativa con respecto a los valores experimentales para  $T_{0,h}$  se presenta para  $\varepsilon_c=0.82$  resultando de alrededor del 3.6% (13 K), mientras que para  $T_{0,c}$  se presenta para  $\varepsilon_c=0.37$  y es de aproximadamente 3.3% (8 K).

### 2.2.4 Modelo termodinámico macroscópico

Se define un volumen de control (VC) representativo del dispositivo en estudio con una entrada y dos salidas (Figura 1) y se plantean las hipótesis habituales de sistema abierto en régimen permanente, adiabático y sin aporte externo de trabajo. Simultáneamente, se considera gas ideal con propiedades termo-físicas constantes y se emplean propiedades de estancamiento. En ambas salidas la presión es igual a la atmosférica.

Se puede caracterizar macroscópicamente el comportamiento térmico de un TVRH combinando la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica para obtener las expresiones que permiten determinar las temperaturas de salida (Ecuación (8a) para la fría y Ecuación (8b) para la caliente).

$$T_{0,i} e^{Y\Theta} \left( \frac{P_a}{P_i} \right)^Y = \left[ \frac{T_{0,i} - \varepsilon_c T_{0,c}}{(1 - \varepsilon_c)} \right]^{(1 - \varepsilon_c)} T_{0,c}^{\varepsilon_c} \quad (8a)$$

$$T_{0,i} e^{Y\Theta} \left( \frac{P_a}{P_i} \right)^Y = T_{0,h}^{(1 - \varepsilon_c)} \left[ \frac{T_{0,i} - (1 - \varepsilon_c) T_{0,h}}{\varepsilon_c} \right]^{\varepsilon_c} \quad (8b)$$

En las Ecuaciones (8a,8b),  $T_{0,i}$ ,  $\varepsilon_c$ ,  $P_i$ ,  $P_a$  y  $Y = R_g/C_p$  (exponente de enfriamiento isoentrópico) se conocen, a la vez que  $\Theta = \sigma / (\dot{m}_i R_g)$  es la entropía generada adimensional que, en principio, se desconoce.

El rango de posibles valores de  $\Theta$  está acotado entre el de un proceso reversible  $\Theta=0$  y el correspondiente a un proceso con máxima generación de entropía,  $\Theta_{MAX} = \ln(P_i/P_a)$ .

En la Figura 2 se realiza una comparación de las  $T_0$  de salida obtenidas con el modelo CFD y con el termodinámico frente a  $\varepsilon_c$ , siendo las condiciones de temperatura y presión de entrada,  $T_{0,i}=294\text{K}$  y  $P_i=500\text{kPa}$ . Para el modelo termodinámico, inicialmente se tomó el valor de  $\Theta_{MAX}=1.609$  habida cuenta de que el proceso llevado a cabo dentro del TVRH es altamente



irreversible [27]. Posteriormente, si bien para cada valor de fracción fría la entropía generada varía, se ajustó un único valor de  $\theta$  de manera tal que el mismo permita establecer una cota inferior para  $T_{0,c}$  y superior para  $T_{0,h}$  en relación a los resultados de la simulación. De esta forma se obtuvo  $\theta_{aj}=1.581$ .

La máxima diferencia relativa para  $T_{0,h}$  es del 2% (7K) mientras que para  $T_{0,c}$  es del 17% (37K), ambos para  $\varepsilon_c=0.2$ . La diferencia entre los modelos aparece principalmente para la temperatura fría dado que su variación frente a la fracción fría resulta distinta. Específicamente, en el rango de  $0.2 \leq \varepsilon_c \leq 0.5$  se observa que los valores de  $T_{0,c}$  simulados se mantienen prácticamente invariables, mientras que los del modelo termodinámico varían significativamente (aproximadamente 20K). Este resultado implica una caída en la eficiencia del dispositivo, entendiendo que cuanto menor sea la temperatura de salida de la corriente fría y mayor sea la de la caliente, para una misma condición de entrada, más eficiente será el TVRH.

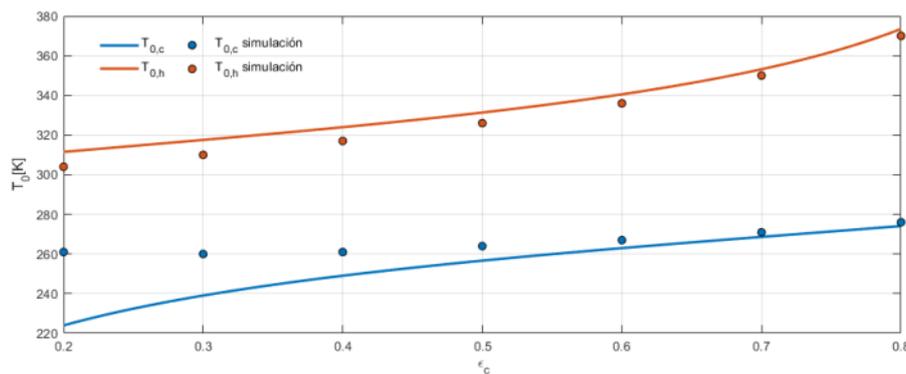


Figura 2.  $T_{0,c}$  y  $T_{0,h}$  obtenidos con el modelo CFD y con termodinámico (línea continua con  $\theta_{aj}=1.581$ ) vs.  $\varepsilon_c$

Simultáneamente, en concordancia con lo reportado en la bibliografía [13], se encontró, para las fracciones frías más bajas, la existencia de un reflujo en la salida fría, que explicaría la caída de la eficiencia. De acuerdo a los resultados de las simulaciones para  $\varepsilon_c=0.2$  el área correspondiente al reflujo es del 27% del área de salida fría, mientras que para  $\varepsilon_c=0.3$  representa un 13%, desapareciendo para mayores valores de  $\varepsilon_c$ . En la siguiente sección se aborda nuevamente esta discusión al estudiar la influencia de la relación  $D_c/D$ .

### 3. INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE DIÁMETROS DEL TVRH SOBRE LA EFICIENCIA

Dado que la zona de recirculación generada por el reflujo se localiza en la salida fría resulta de interés analizar el efecto de la variación del área de tal salida sobre la eficiencia del TVRH.

En este contexto se estudió el efecto de modificar la relación de diámetros  $D_c/D$  en el intervalo 0.3–0.7, siendo el valor de TVRH comercial 0.54 (EXAIR®). Se incluyeron 10 relaciones  $D_c/D$

(0.3, 0.32, 0.35, 0.37, 0.4, 0.44, 0.49, 0.6, 0.65 y 0.7) y para cada una de ellas se simuló el comportamiento del TVRH para  $\varepsilon_c$  entre 0.2 y 0.8 con incrementos de 0.1.

En las Figuras 3a y 3b se muestran los valores simulados de  $T_{0,c}$  y  $T_{0,h}$  frente a  $\varepsilon_c$  y  $D_c/D$ .

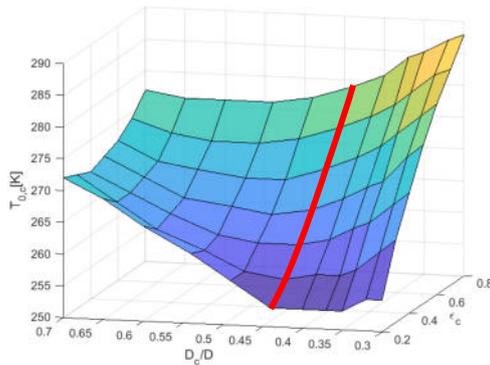


Figura 3a.  $T_{0,c}$  vs  $\varepsilon_c$  y  $D_c/D$

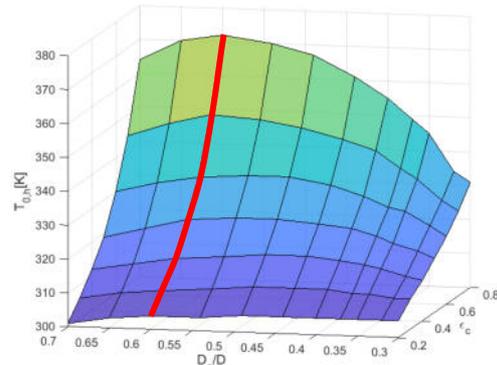


Figura 3b.  $T_{0,h}$  vs  $\varepsilon_c$  y  $D_c/D$

Observando las variaciones de  $T_{0,c}$  y  $T_{0,h}$  en las Figuras 3a y 3b se puede concluir que para ambas existe una relación  $D_c/D$  óptima (i.e., que minimiza  $T_{0,c}$  y maximiza  $T_{0,h}$ ) para cada  $\varepsilon_c$ . Para la corriente fría, la relación  $D_c/D=0.44$  resulta ser la que permite alcanzar el valor mínimo absoluto de  $T_{0,c}$  para  $\varepsilon_c=0.2$ , mientras que  $D_c/D=0.6$ , permite alcanzar el máximo absoluto de  $T_{0,h}$  para  $\varepsilon_c=0.8$ .

Como se comentó en la introducción, las principales aplicaciones del TVRH, y de mayor interés, son aquellas que utilizan a la corriente fría. Debido a ello se profundizará en el análisis sobre el comportamiento de esta corriente. No obstante, en la Sección 3.2, se hará un comentario final sobre el comportamiento de la corriente caliente.

De acuerdo a la Figura 3a el valor del mínimo de  $T_{0,c}$  para  $0.2 \leq \varepsilon_c \leq 0.4$  se produce en  $D_c/D=0.44$ , mientras que para  $\varepsilon_c > 0.4$  se desplaza a mayores valores de  $D_c/D$  y, simultáneamente, su valor aumenta. No obstante, debe aclararse que en estos últimos casos (i.e.,  $\varepsilon_c > 0.4$ )  $T_{0,c}$  presenta una variación mucho menor con  $D_c/D$ , siempre que  $D_c/D > 0.44$ . Asimismo, si  $D_c/D \leq 0.44$ ,  $T_{0,c}$  disminuye fuertemente conforme decrece  $\varepsilon_c$  en todo el rango con un mínimo en  $\varepsilon_c=0.2$ . Para  $D_c/D > 0.44$ ,  $T_{0,c}$  presenta una variación mucho menor y el mínimo se ubica en un valor intermedio de  $\varepsilon_c$  (entre 0.3 y 0.4), lo que significa una menor eficiencia, lo cual resulta consistente con lo reportado en la bibliografía [3]–[6], [12].

### 3.1. Zona de recirculación

El fenómeno de reflujos genera una zona de recirculación, la cual se puede visualizar evaluando el perfil radial de la velocidad axial en la salida fría. En las Figuras 4a y 4b se presentan los perfiles radiales de velocidad axial ( $v_z$ ) para la salida fría correspondientes a las relaciones

$D_c/D=0.54$  y  $D_c/D=0.44$  respectivamente, parametrizados a las distintas  $\varepsilon_c$  en función de  $r/R$  (relación de la coordenada radial del orificio de salida de la corriente fría medida desde el centro del tubo con respecto al radio del tubo). Típicamente, el perfil presenta, por un lado, un máximo que puede producirse en el centro del orificio de salida de la corriente fría o para un valor cercano a la pared de la misma y, por otro lado, un punto de inflexión en un valor intermedio de  $r/R$ , conforme puede visualizarse en las Figuras 4a y 4b. La existencia del reflujo implica una disminución de la velocidad a partir del máximo a tal escala que se invierta su signo (Figura 4a para  $\varepsilon_c=0.2$  y 0.3).

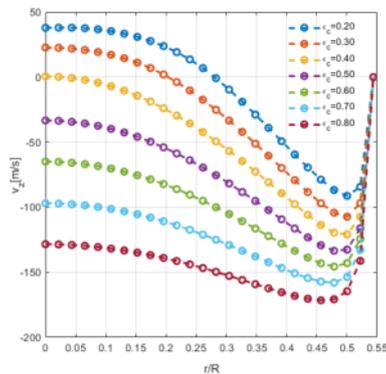


Figura 4a.  $v_z$  vs  $r/R$  ( $D_c/D=0.54$ )

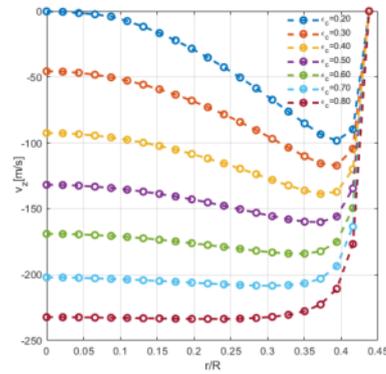


Figura 4b.  $v_z$  vs  $r/R$  ( $D_c/D=0.44$ )

Este resultado se encuentra en línea con lo reportado en la bibliografía [3], [4], [12], [13] respecto a la generación de una zona de recirculación a fracciones frías bajas.

En cuanto a la familia de curvas presentada en la Figura 4b para  $D_c/D=0.44$ , se observa que, si bien el punto de inflexión del perfil en la velocidad existe para la mayoría de ellas (excepto para  $\varepsilon_c=0.8$ ), no se presenta reflujo. En el rango  $0.3 \leq D_c/D \leq 0.44$  tampoco se produce reflujo e incluso, en el límite inferior ( $D_c/D=0.3$ ), los perfiles de velocidad a la salida no presentan inflexión para ningún valor de  $\varepsilon_c$ . Se concluye entonces que  $D_c/D=0.44$  es el valor límite para la aparición del reflujo, el cual resulta coincidente con la relación de diámetros para la cual se obtuvo la máxima eficiencia asociada a la corriente fría.

Por su parte, en el rango  $0.44 < D_c/D \leq 0.7$ , se produce un reflujo con una zona de recirculación. Para  $D_c/D=0.49$  el mismo se limita a  $\varepsilon_c=0.2$ , mientras que para  $D_c/D=0.7$  se produce para la totalidad del rango de  $\varepsilon_c$ . Adicionalmente, se indica que la fracción del área de salida correspondiente a la zona de recirculación también aumenta con  $D_c/D$ , siendo aproximadamente la mitad de la misma para  $D_c/D=0.7$  a  $\varepsilon_c=0.2$ .

### 3.2. Relación de diámetros óptima

Se comprobó que la existencia de reflujo en la salida fría genera una zona de recirculación la cual produce una disminución de la eficiencia del dispositivo. Para  $D_c/D=0.49$  con  $\varepsilon_c=0.2$  se



detectó la zona de recirculación y resultó  $T_{0,c}(\varepsilon_c = 0.2) = T_{0,c}(\varepsilon_c = 0.3) = 257K$  (Figura 3a). Si se incrementa  $D_c/D$  la zona de recirculación se extiende y, como se mencionó, para  $D_c/D=0.7$  se produce para todo el rango de  $\varepsilon_c$ . Para este valor de  $D_c/D$ , las  $T_{0,c}$  tienden a asemejarse (disminución de la eficiencia) desde  $\varepsilon_c=0.2$  hacia fracciones frías mayores (0.8 en el límite), con el aumento de la relación de diámetros (Figura 3a). De esta manera queda explícito el vínculo entre la zona de recirculación y la caída de la eficiencia.

La zona de recirculación, además de reducir el área efectiva de salida, genera un fenómeno de fricción adicional. El trabajo de los esfuerzos viscosos (fricción) produce un aumento en la temperatura debido al fenómeno de disipación viscosa. En las Figuras 5a y 5b se presentan los perfiles radiales de  $T_{0,c}$  correspondientes a las relaciones  $D_c/D=0.54$  y  $D_c/D=0.44$  respectivamente, parametrizados a las distintas  $\varepsilon_c$  en función de  $r/R$ . Se observan dos tipos de perfiles, por un lado, aquellos en los que se produce un mínimo en el centro del tubo, y, por otro lado, aquellos donde existe un punto de inflexión y el mínimo se desplaza hacia valores intermedios de  $r/R$ . Estos últimos están presentes en la Figura 5a para  $\varepsilon_c=0.2$  y  $0.3$ , siendo coincidentes con aquellos valores para los cuales se visualiza reflujo en la Figura 4a.

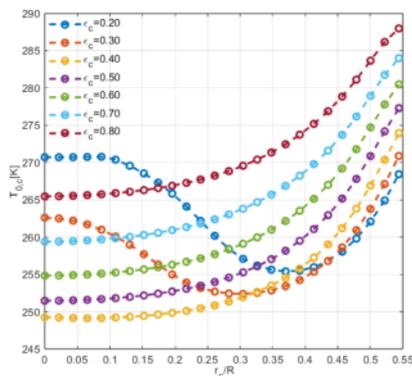


Figura 5a.  $T_{0,c}$  vs  $r/R$  ( $D_c/D=0.54$ )

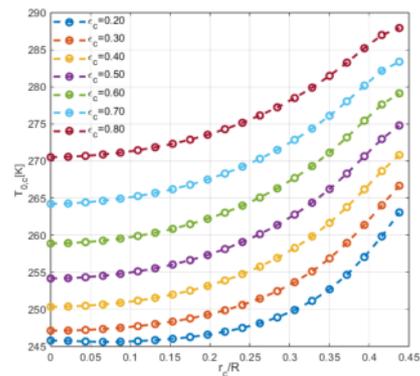


Figura 5b.  $T_{0,c}$  vs  $r/R$  ( $D_c/D=0.44$ )

Respecto a la corriente caliente el aumento de temperatura generado por la fricción adicional (disipación viscosa) asociada a la zona de recirculación puede vincularse con el comportamiento observado en la Figura 3b, en la cual la relación  $D_c/D=0.6$  es la que presenta el mayor valor de temperatura de salida.

La disipación viscosa, que es un fenómeno irreversible, conduce a un incremento en la entropía generada adimensional, que puede obtenerse a partir de las Ecuaciones (8a y 8b) introduciendo los valores de temperatura simulados.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se contrastaron los resultados (i.e, temperaturas de salida) de un modelo CFD de un TVRH con su correspondiente modelo termodinámico macroscópico. Este contraste motivó



el estudio paramétrico de la relación entre el diámetro de la salida fría y el del tubo ( $D_c/D$ ), el que se llevó a cabo a partir de la misma técnica de modelado CFD. Se logró una caracterización del TVRH para todo su rango de operación ( $0.2 \leq \varepsilon_c \leq 0.8$ ) y  $0.3 \leq D_c/D \leq 0.7$ .

Se determinó la existencia de una relación de diámetros óptima,  $D_c/D=0.44$ , que permite que el dispositivo trabaje con la mayor eficiencia en todo su rango de operación, entendiéndose que cuanto menor sea la temperatura de salida de la corriente fría y mayor sea la de la caliente, para una misma condición de entrada, más eficiente será el TVRH.

Paralelamente, se logró identificar una zona de recirculación, la cual es generada por un reflujo producido en la salida fría, para el rango  $0.49 \leq D_c/D \leq 0.7$ . Se evidenció el vínculo y la correspondencia que existe entre ambos fenómenos (i.e., disminución de la eficiencia y generación de una zona de recirculación). Finalmente, se postuló que la fricción adicional producida por la zona de recirculación es la que genera un aumento de la temperatura del fluido en todo el dominio y un incremento en la generación de entropía del sistema.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el aporte financiero de las siguientes instituciones CONICET (PIP 0018) y UNLP. NJM es investigador del CONICET.

## REFERENCIAS

- [1] K. D. Devade y A. Pise, "Parametric review of ranque-hilsch vortex tube", *American Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 4, núm. 3. Columbia International Publishing, pp. 115–145, 2017.
- [2] R. Hilsch, "The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process", *Review of Scientific Instruments*, vol. 18, núm. 2, pp. 108–113, 1947.
- [3] U. Behera *et al.*, "CFD analysis and experimental investigations towards optimizing the parameters of Ranque-Hilsch vortex tube", *Int J Heat Mass Transf*, vol. 48, núm. 10, pp. 1961–1973, 2005.
- [4] S. U. Nimbalkar y M. R. Muller, "An experimental investigation of the optimum geometry for the cold end orifice of a vortex tube", *Appl Therm Eng*, vol. 29, núm. 2–3, pp. 509–514, 2009.
- [5] S. Eiamsa-ard, "Experimental investigation of energy separation in a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube with multiple inlet snail entries", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, núm. 6, pp. 637–643, 2010.
- [6] S. Y. Im y S. S. Yu, "Effects of geometric parameters on the separated air flow temperature of a vortex tube for design optimization", *Energy*, vol. 37, núm. 1, pp. 154–160, 2012.
- [7] E. D. dos Santos, C. H. Marques, G. Stanescu, L. A. Isoldi, y L. A. O. Rocha, "Constructural Design of Vortex Tubes", pp. 259–273, 2013.
- [8] N. Agrawal, S. S. Naik, y Y. P. Gawale, "Experimental investigation of vortex tube using natural substances", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 51–55, 2014.
- [9] M. Farzaneh-Gord y M. Sadi, "Improving vortex tube performance based on vortex generator design", *Energy*, vol. 72, pp. 492–500, 2014.



- [10] H. A. Kandil y S. T. Abdelghany, "Computational investigation of different effects on the performance of the Ranque-Hilsch vortex tube", *Energy*, vol. 84, pp. 207–218, 2015.
- [11] X. Guo, B. Liu, J. Lv, B. Zhang, y Y. Shan, "An optimization method on managing Ranque–Hilsch vortex tube with the synergy between flow structure and performance", *International Journal of Refrigeration*, vol. 126, pp. 123–132, 2021.
- [12] X. Guo, L. Cao, B. Zhang, N. Li, y F. Tang, "Analysis of the flow mixing and energy separation in a Ranque–Hilsch vortex tube based on an area ratio study", *Appl Therm Eng*, vol. 226, 2023.
- [13] H. M. Skye, G. F. Nellis, y S. A. Klein, "Comparison of CFD analysis to empirical data in a commercial vortex tube", *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, núm. 1, pp. 71–80, 2006.
- [14] J. M. Penillas, F. J. Suarez, G. Pary, C. Bosc, y N. J. Mariani, "Simulación del comportamiento fluidodinámico y térmico de un tubo Vortex comercial", CAIM-CAIFE, 978-950-42-0210-3, 2020-2021, F.R.S.N. U.T.N.
- [15] N. F. Aljuwayhel, G. F. Nellis, y S. A. Klein, "Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model", en *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, pp. 442–450, 2005.
- [16] J. Y. Liu, M. Q. Gong, Y. Zhang, H. Hong, y J. F. Wu, "Numerical research on special fluid phenomenon: Ranque-Hilsch effect", vol. 19, núm. 28 y 29, pp. 1723-1726, 2005.
- [17] S. Eiamsa-ard y P. Promvonge, "Numerical investigation of the thermal separation in a Ranque-Hilsch vortex tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, núm. 5–6, pp. 821–832, 2007.
- [18] T. Dutta, K. P. Sinhamahapatra, y S. S. Bandyopdhyay, "Comparison of different turbulence models in predicting the temperature separation in a Ranque-Hilsch vortex tube", *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, núm. 4, pp. 783–792, 2010.
- [19] R. Shamsoddini y A. H. Nezhad, "Numerical analysis of the effects of nozzles number on the flow and power of cooling of a vortex tube", *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, núm. 4, pp. 774–782, 2010.
- [20] H. Khazaei, A. R. Teymourtash, y M. Malek-Jafarian, "Effects of gas properties and geometrical parameters on performance of a vortex tube", *Scientia Iranica*, vol. 19, núm. 3, pp. 454–462, 2012.
- [21] C. H. Marques, L. A. Isoldi, E. D. Dos Santos, y L. A. O. Rocha, "Constructal design of a vortex tube for several inlet stagnation pressures", *Revista de Engenharia Térmica*, vol. 11, núm. 1–2, p. 85, 2012.
- [22] H. Pouraria y M. R. Zangoee, "Numerical investigation of vortex tube refrigerator with a divergent hot tube", en *Energy Procedia*, vol.14, pp. 1554–1559, 2012.
- [23] E. D. dos Santos, C. H. Marques, G. Stanesco, L. A. Isoldi, y L. A. O. Rocha, "Constructal Design of Vortex Tubes", 2013, pp. 259–273.
- [24] T. Dutta, K. P. Sinhamahapatra, y S. S. Bandyopadhyay, "CFD Analysis of Energy Separation in Ranque-Hilsch Vortex Tube at Cryogenic Temperature", *Journal of Fluids*, vol. 2013, pp. 1–14, 2013.
- [25] S. H. Azizi, M. R. Andalibi, S. R. Saleh, y M. Kahrom, "Numerical simulation of different turbulence models aiming at predicting the flow and temperature separation in a Ranque-Hilsch vortex tube", *Thermal Science*, vol. 18, núm. 4, pp. 1159–1171, 2014.
- [26] J. M. Burazer, A. S. Čočić, y M. R. Lečić, "Numerical research of the compressible flow in a vortex tube using OpenFOAM software", *Thermal Science*, vol. 21, pp. S745–S758, 2017.
- [27] J. M. Penillas *et al.*, "Caracterización macroscópica de un tubo vortex", 2021.



## DISTANCIA EFECTIVA DEL PAR DE FUERZAS ACTUANDO EN UNA UNIÓN CON CHAVETA

**Cristian Giner<sup>1</sup>, Adrian Flamant<sup>1</sup>, Gabriel Mattolini<sup>1</sup>, Alfredo Amico<sup>1</sup>, Jose Henkes<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Grupo IEMI – Unidad de Investigación DIDEME

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Mendoza UTN FR Mendoza

Rodriguez 273, Mendoza, Argentina- [cristian.giner@docentes.frm.utn.edu.ar](mailto:cristian.giner@docentes.frm.utn.edu.ar).

### RESUMEN

Cuando se realizan cálculos por el Método de Elementos Finitos sobre arboles de transmisión con uniones con chaveta, las fuerzas actuantes en chavetas resultan sobrestimadas utilizando cálculos de modelos clásicos, introduciendo un error en el cálculo computacional. Este trabajo tuvo como objetivo plantear una metodología para cuantificar las fuerzas de contacto entre un ensamble cubo, chaveta y árbol, y de esta manera determinar la distancia efectiva del par de fuerzas actuantes. A partir de considerar la distancia correcta en la determinación de las fuerzas actuantes, es posible mejorar la precisión de las condiciones de borde planteadas para la introducción de momentos de torsión en los árboles analizados por una simulación por el Método de Elementos Finitos. Dichos resultados, son muy útiles para los futuros trabajos de investigación del grupo planteadas en el campo de la mecánica de fractura aplicada a arboles de transmisión, y cátedras afines a la temática, tales como Elementos de Máquinas y Máquinas y Equipos industriales de la carrera de Ingeniería Electromecánica, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional.

**Palabras clave:** *Uniones Con Chaveta; Distancia Efectiva Del Par De Fuerzas; Fuerzas En Chaveteros.*



## 1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de árboles de transmisión, el uso de chavetas es el método preferido para lograr la transmisión de par entre diferentes componentes. La experiencia ha demostrado que las uniones con chaveta resultan ser económicamente convenientes respecto de otro tipo de uniones, sin embargo, suelen ser uno de los puntos de falla más comunes de los sistemas de transmisión. Los modelos matemáticos clásicos aplicados al diseño de árboles introducen una serie de simplificaciones que no permiten determinar la magnitud real de las fuerzas intervinientes, y por lo tanto, los coeficientes reales de seguridad respecto de los límites de fluencia y de fatiga de los materiales.

En este trabajo se pretende determinar la distancia efectiva entre los centroides de las fuerzas de contacto resultantes que intervienen en una unión cubo, chaveta y árbol, típica para la transmisión de momento de torsión entre los componentes mecánicos. Posteriormente se comparan los resultados obtenidos por medio de modelos matemáticos aplicados al diseño de los árboles de transmisión con acoples por medio de chavetas con los resultados obtenidos en una simulación por Método de Elementos Finitos (MEF).

El objetivo final del artículo es determinar la magnitud de las fuerzas actuantes para permitir una evaluación precisa del diseño que permita conocer los coeficientes de seguridad reales de cada componente del sistema.

En esta publicación se mostrará resumidamente los datos del modelado clásico y el modelado mediante FEA. El trabajo total contiene todos los procesos extendidos, de validación y comparación para el modelo FEA, que forman una parte importante para la fundamentación de las conclusiones.

## 2. MODELO CLÁSICO DE DISEÑO DE UNIONES CON CHAVETA

Mediante un análisis ordinario de esfuerzos de una chaveta, la fuerza actuante sobre la chaveta se suele expresar en función del momento de torsión que ha de transmitirse mediante el elemento y el diámetro del árbol. Para determinar la fuerza, los modelos clásicos de varios autores [1,2,3] sugieren la siguiente ecuación:

$$F = \frac{Mt}{d/2} \quad (1)$$

Donde:

Mt: Momento de torsión transmitido

F: Fuerza aplicada a la chaveta

d: Diámetro del árbol



La hipótesis planteada en el modelo matemático clásico establece que el momento de torsión se transmite de un elemento a otro por medio de un par de fuerzas, particularmente compuesto por dos fuerzas paralelas y de sentido contrario, con una distancia  $D/2$  entre ellas.

El dimensionamiento de la chaveta luego se plantea a partir de esta fuerza, verificando la misma por aplastamiento lateral y cizallamiento por el plano medio de la misma.

La fuerza  $F$  representada actuando en la superficie del árbol es una estimación y no es la línea de acción real, pero a efectos prácticos se asume el error en el cálculo. La línea de acción real de la fuerza entre el cubo y la chaveta estará desplazada hacia arriba desde el centro de la chaveta, y la fuerza entre el árbol y el cubo estará desplazada hacia abajo desde el centro del eje. Debido a las inexactitudes que se presentan para establecer el radio efectivo en el cual se aplica la fuerza para el brazo de momento, muchos autores sugieren, aplicar la misma a una distancia  $D/2$ , induciendo cierto error de cálculo.

### 3. HIPÓTESIS

Mediante el Análisis de Elementos Finitos es posible obtener las reacciones generadas en el contacto de la chaveta con el árbol y con el cubo al aplicar un momento de torsión. Conociendo la reacción generada entre los componentes, es factible obtener la distancia efectiva en la cuál se aplican las fuerzas intervinientes

$$F = \frac{Mt}{Def} \quad (1)$$

De esta manera. la evaluación de la magnitud de la fuerza permitirá establecer la distancia respecto a la fuerza aplicada en la chaveta, para generar una cupla que contrarreste el momento de torsión en el modelado numérico por MEF.

En base a la experiencia de otras investigaciones [4, 5, 6], se ha observado que el modelo clásico para determinar la fuerza en un chavetero representa un escenario conservador, por lo que se supone inicialmente que los centroides de las resultantes de las fuerzas de contacto que componen el par de fuerzas que transmite el par se encuentra a una distancia mayor a  $D/2$ , y por lo tanto las resultantes reales son de una magnitud menor a la considerada por los modelos clásicos.

### 4. MODELO MEF

Para la obtención de la reacción sobre la chaveta se realiza un análisis por elementos finitos a un conjunto de cubo, árbol y chaveta con las siguientes características.

Las dimensiones aplicadas a los elementos para el análisis fueron las siguientes:



- Diámetro del árbol:  $\varnothing 60\text{mm}$
- Diámetro interior del cubo:  $\varnothing 60\text{mm}$
- Diámetro exterior del cubo: 120mm
- Largo chaveta: 42mm
- Altura chaveta: 11 mm
- Ancho chaveta: 18mm
- Calidad Acero árbol y cubo: Acero al carbono con  $E=210000\text{ MPa}$
- Calidad Acero chaveta: Acero al carbono con  $E=210000\text{ MPa}$

El chavetero y la chaveta son de acuerdo a estándar DIN 6885.

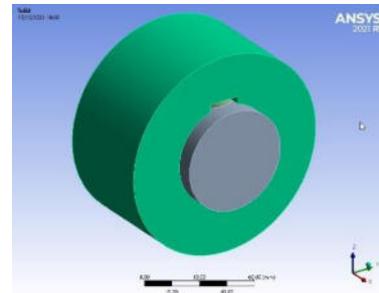
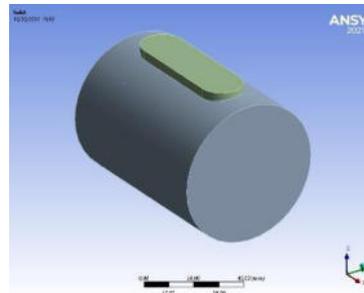
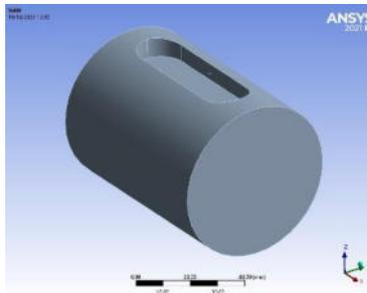


Figura 1: Modelo árbol

Figura 2: Modelo chaveta

Figura 3: Modelo ensamble

Las condiciones de borde e hipótesis planteadas para el modelo de elementos finitos son las siguientes:

- 1) Los materiales son lineales con un módulo de elasticidad  $E=210000\text{ MPa}$ .
- 2) El momento de torsión es aplicado de forma uniforme en el diámetro exterior del cubo. Para el modelo se aplica un momento de torsión ( $M_t=2.00 \times 10^6\text{ Nmm}$ ). (Figura 2)
- 3) El árbol se considera fijo en ambos extremos (Figura 2)
- 4) Los contactos entre árbol, cubo y chaveta son no lineales con un coeficiente de fricción de  $\mu=0.2$  (Figura 3)
- 5) Se han simplificado los radios de acuerdo de los chaveteros, considerando que el objetivo del análisis no son las tensiones de trabajo.
- 6) No se ha considerado contacto en los extremos redondeados de la chaveta, siendo que de acuerdo con el estándar DIN 6885, la chaveta tiene un ajuste con juego en su largo.

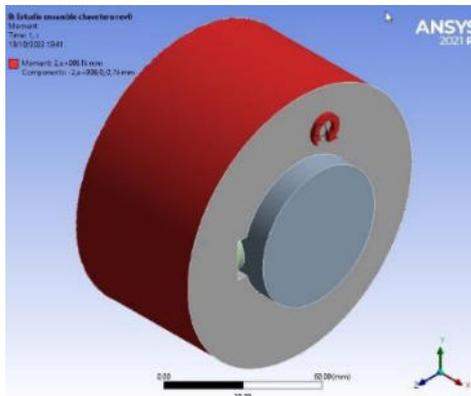


Figura 4: Cargas (izquierda)

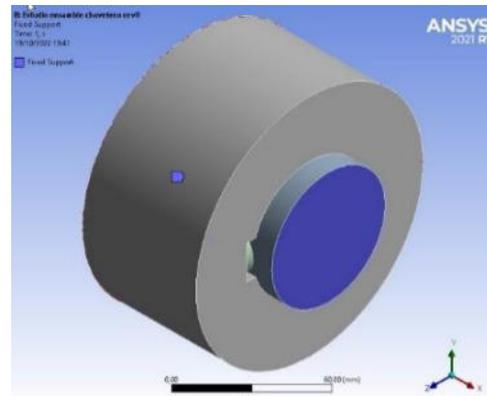


Figura 5: Sujeciones (derecha)

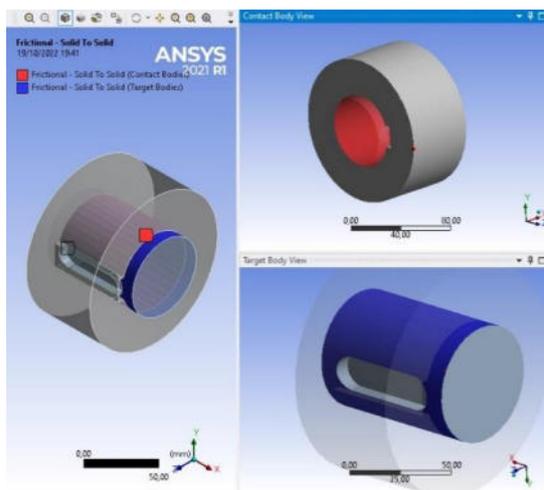


Figura 6: Contacto de fricción cubo y árbol

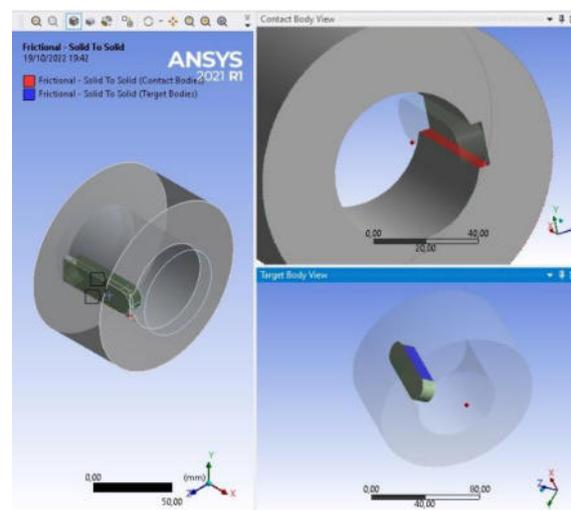


Figura 7: Contacto de fricción entre chaveta y árbol

El mallado del modelo geométrico se realizó considerando controles de tamaño para mejorar la calidad de elementos en las zonas de contacto, donde se requiere la mayor definición de los resultados. Se destaca que el resultado buscado en el modelo de elementos finitos es el valor de la fuerza resultante en las zonas de contacto, y no las tensiones de Von Mises. Esto presenta una gran ventaja frente a los errores de discretización propios del modelo de elementos finitos, los que generalmente no son significativos en los resultados de desplazamientos y fuerzas de cuerpo libre, como lo son en el caso de las tensiones.

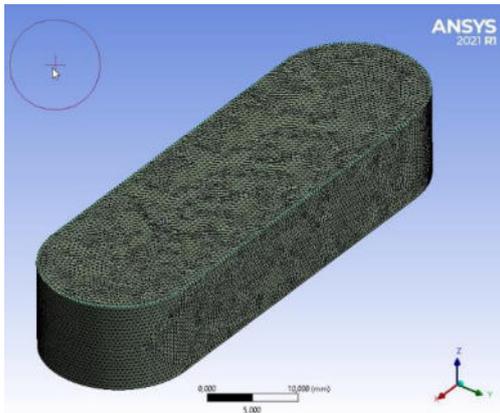


Figura 8: Detalle de malla utilizada en la chaveta

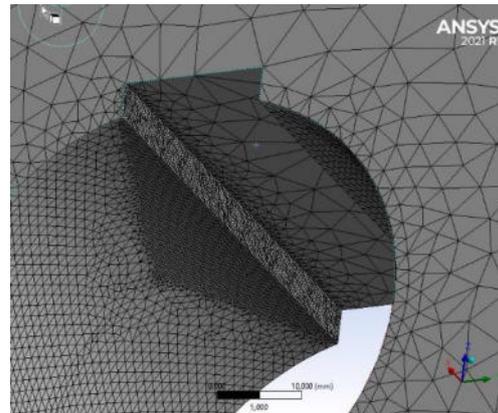


Figura 9: Detalle de malla utilizada en el chavetero del cubo

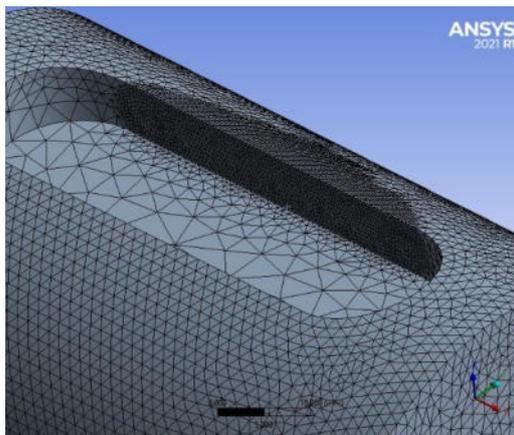


Figura 10: Detalle de malla utilizada en el chavetero del árbol

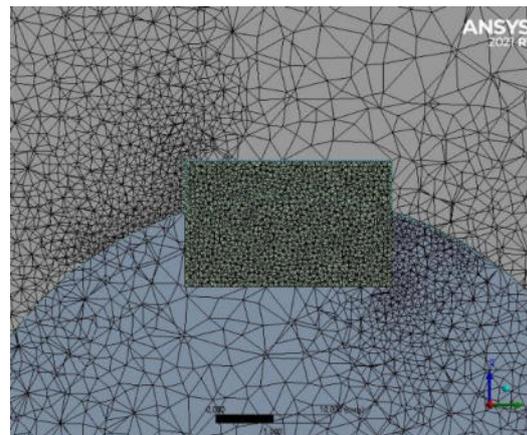


Figura 11: Detalle de malla utilizada en el ensamble

## 5. RESULTADOS

Se ha considerado que el momento de torsión introducido por un acoplamiento es puro, con una fuerza resultante nula. Si analizamos el árbol como un cuerpo libre, para obtener un momento de torsión puro con resultante nula, a este se le deben aplicar dos fuerzas de igual magnitud y dirección, pero diferente sentido.

Estas son:

- 1- Fuerza que aplica la chaveta sobre la cara del chavetero del árbol
- 2- Una fuerza que aplica el cubo del acople apoyándose sobre el árbol. como resultante de las presiones de contacto entre las dos superficies cilíndricas de cubo y árbol.

A partir de la resolución del modelo mediante MEF, se obtienen la magnitud, dirección y sentido de las dos fuerzas mencionadas, una respecto al contacto entre la chaveta y el cubo (Figura 12), y otro respecto la chaveta y el árbol (Figura 14).

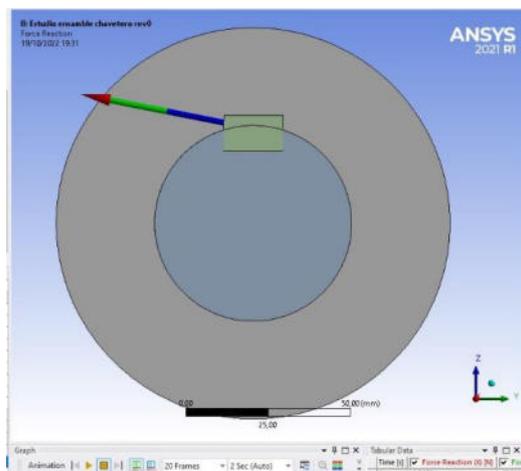


Figura 12: Fuerza resultante entre contacto de cubo y chaveta

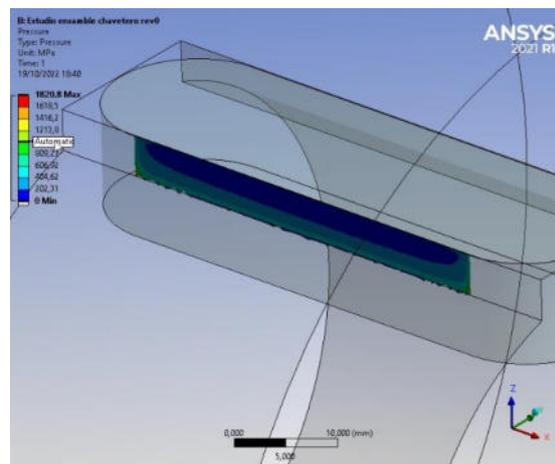


Figura 13: Presiones de contacto de cubo y chaveta

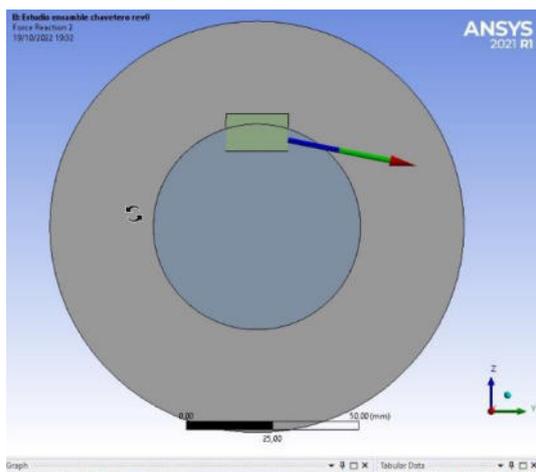


Figura 14: Fuerza resultante entre contacto de árbol y chaveta

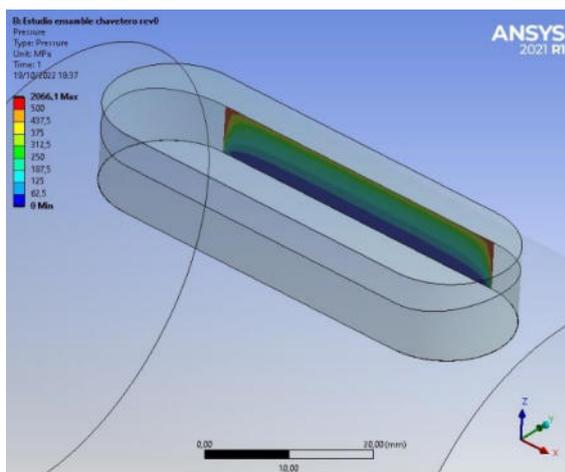


Figura 15: Presiones de contacto de árbol y chaveta

En las siguientes figuras se puede observar que la distribución de las tensiones de contacto entre el cubo y el árbol no es uniforme, verificándose que la hipótesis planteada que existen dos fuerzas resultantes sobre el árbol es válida. Estas son:

- 1- La fuerza de la chaveta aplicada sobre el chavetero mostrada en la figura 16.
- 2- La fuerza adicional entre el cubo y el eje, de igual magnitud, pero diferente sentido a la anterior, mostrada en las figuras a continuación.

Ambas fuerzas resultan en un momento de torsión con resultante nula aplicado sobre el árbol.

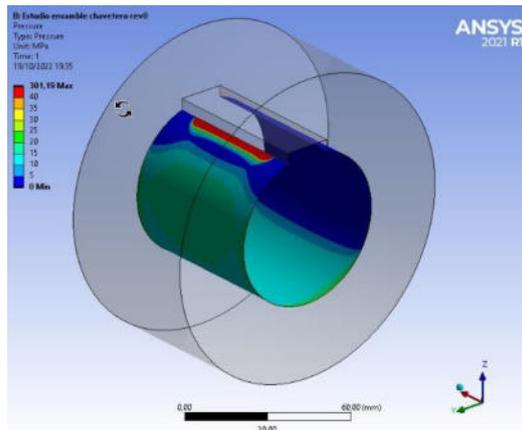


Figura 16: Distribución de tensiones de contacto entre árbol y cubo

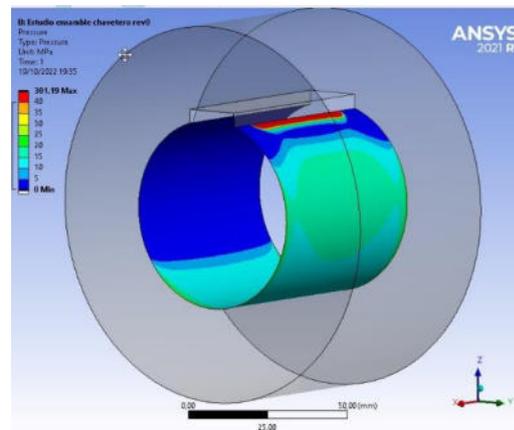


Figura 17: Distribución de tensiones de contacto entre árbol y cubo

Asimismo, se obtuvieron gráficos de distribución de tensiones de trabajo del conjunto armado, a fines de poder comparar la distribución obtenida con la conseguida por métodos fotoelásticos. De la comparación se concluye que la distribución de tensiones tiene un patrón prácticamente similar en las líneas de isotensiones, tomándose este parámetro como un aspecto clave para la validación del modelo MEF producido. En futuras investigaciones, con modelos geométricos que incluyan detalles que aquí han sido simplificados, se evaluarán las magnitudes de las tensiones de trabajo resultantes.

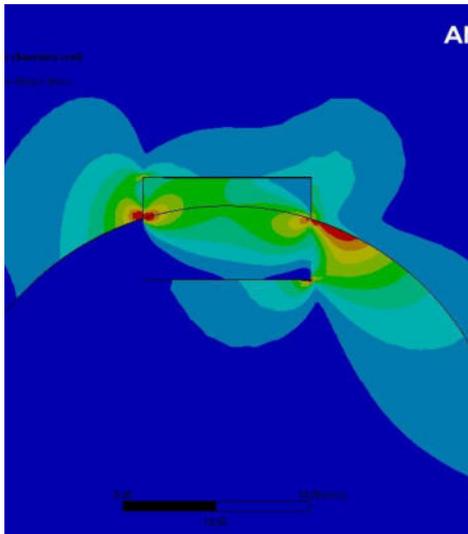


Figura 18: distribución de tensiones en una sección transversal media del ensamble árbol, chaveta y cubo

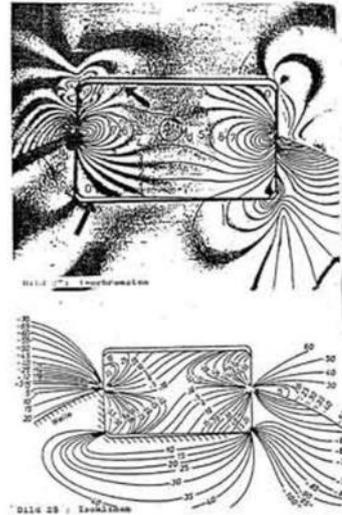


Figura 19: distribución de tensiones en bibliografía de referencia, obtenida por fotoelasticidad

Tomando la magnitud de la fuerza de contacto entre la chaveta y el árbol ( $R$ ), obtenida de la simulación, se puede determinar la distancia efectiva entre el par de fuerzas aplicadas en el árbol.

$$d_{ef} = \frac{M_t}{R} = \frac{2 \times 10^6 \text{ Nmm}}{49282 \text{ N}} = 40.58 \text{ mm} \quad (3)$$

Si se compara esta distancia respecto del diámetro del árbol, se obtiene:

$$\frac{d_{ef}}{D_{real \text{ momento}}} = \frac{40.58 \text{ mm}}{60 \text{ mm}} = 67,6\% \quad (4)$$

## 6. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados de las simulaciones se ha podido validar la hipótesis inicial planteada respecto de la distancia efectiva del par de fuerzas actuante, concluyendo que las fuerzas actuantes resultan ser de una magnitud del 33.3% menos que la considerada en los modelos clásicos.

Sin embargo, los modelos clásicos de cálculos de chavetas son simplificados y no consideran algunos aspectos importantes como, por ejemplo, los efectos de concentración de esfuerzo que existen en los fondos de los chaveteros. Se puede presumir entonces, que la sobreestimación de las fuerzas actuantes incluye implícitamente los efectos de otras particularidades no consideradas en los modelos clásicos, no recomendando entonces la reducción de la fuerza en los cálculos realizados bajo este criterio.



Asimismo, se destaca que los resultados aquí obtenidos son de gran utilidad para la evaluación de causa de fallas en uniones con chaveta mediante MEF, en las que debe considerar una estimación de esfuerzos precisa a fines de obtener conclusiones válidas. Se concluye que la magnitud de la fuerza a aplicar en los modelos MEF se puede estimar a partir de la siguiente fórmula

$$F = \frac{Mt}{\frac{2}{3}d} \quad (5)$$

La aplicación de las condiciones de borde para introducir el momento de torsión será a través de dos fuerzas distribuidas uniformemente en las superficies de contacto de igual magnitud y sentido contrario. Una de ellas será aplicada en la cara lateral del chavetero con una dirección normal a la cara. La otra fuerza será aplicada sobre un sector de superficie definido dentro de la zona de contacto entre el cubo y el árbol, de un ancho igual al alto total de la chaveta y ubicado de tal manera que la distancia entre los centroides de las superficies, medido de forma normal a la dirección de las fuerzas, será de  $\frac{2}{3}$  del diámetro del árbol. En las figuras se muestran las configuraciones sugeridas para las condiciones de borde.

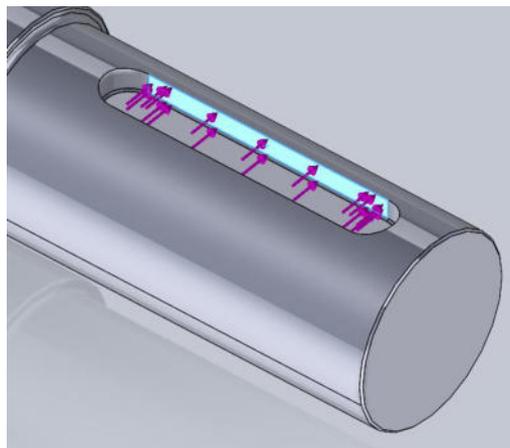


Figura 20: Ubicación y dirección sugerida de la fuerza aplicada al chavetero

Las futuras tareas de investigación en esta línea estarán relacionadas con el estudio de fallas por fractura en árboles con chaveteros, las cuales representan un gran porcentaje de las fallas producidas en los árboles.

## AGRADECIMIENTOS

A nuestro amigo y colega Magister Ingeniero Carlos Bello, quien con su dedicación, paciencia y ejemplo supo mostrar a sus alumnos y colegas el camino del docente investigador.



## REFERENCIAS

- [1] Robert L. Mott., Edward M. Vavrek, Jyhwen Wang, *Machine Elements in Mechanical Design, 6th Edition*. Pearson, New York, 2018.
- [2] Robert L. Norton, *Diseño de Máquinas, un enfoque integrado, 4ta Edición*, Pearson, New York, 2011.
- [3] Richard G. Budynas, J Keith Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 9na Edición*, Mc Graw Hill, New York, 2011.
- [4] Felix Kresinsky, Erhard Leidich, Alexander Hasse. Different Failure Mechanisms in Keyed Shaft-Hub Connections under Dynamic Torque Load, ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity, pages 162 to 169, 2019 .
- [5] H. R. Prajapatia, Dr. B. P. Patelb, N. V. Patelc. nvestigation of Stress Concentration Factor for Keyway on Shaft under Different Loading Conditions: A Case Study, University Journal of Research – Ganpat University, pages 1 to 13, 2015 .
- [6] K. Varadi, D. M. Verguese, Contact state and stress análisis in a key joint by FEM, Institute of Machine Design Technical University of Budapest, Vol 96 pages 45 to 60, 1992 .



## ANÁLISIS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR MEDIANTE TÉCNICAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

María C. Cortizo<sup>1</sup>, Juan C. Catalano<sup>1</sup>, César M. Venier<sup>1,2</sup> y César I. Pairetti<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario,  
Av. Pellegrini 250, CP 2000, Rosario, Argentina

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Métodos Computacionales (UNL -CONICET), Colectora Ruta  
Nacional N° 168, km 0, Paraje El Pozo (3000) Santa Fe, Argentina

<sup>3</sup> Sorbonne Université and CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, UMR 7190, 4 Place  
Jussieu, Paris, France

### RESUMEN

En este trabajo se estudian intercambiadores de calor de uso industrial mediante técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) bajo distintos enfoques. A partir de los resultados obtenidos se calcula el número de Nusselt y el coeficiente global de transferencia de calor para cada equipo. En primera instancia se estudia un intercambiador de calor de doble tubo, contrastando los resultados numéricos con distintos modelos algebraicos basados en mediciones experimentales considerando los principales parámetros de interés: temperaturas de los fluidos en diferentes regiones del intercambiador, el flujo de calor intercambiado entre ellos y el coeficiente global de transferencia de calor. En una segunda etapa se analizan distintos arreglos de tubos normalizados para uso industrial, con el objetivo de caracterizar su eficiencia frente a distintos caudales de ingreso de los fluidos, comparando la tasa de transferencia de calor entre cada uno de ellos. Por último, teniendo en cuenta los estudios anteriores, se realiza un estudio mediante simulaciones computacionales de un intercambiador de casco y tubos, que permite analizar en detalle los fenómenos involucrados en este tipo de equipos.

En este contexto, se presenta una comparación entre los resultados obtenidos con cada metodología de cálculo y se analizan cuáles son los criterios clave a considerar para lograr un proceso de diseño integral en un marco de aplicación industrial.

**Palabras Clave:** *Intercambiadores de Calor, Dinámica de Fluidos Computacional.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Los intercambiadores de calor son dispositivos ampliamente utilizados en la industria, con el fin de lograr el intercambio de energía térmica entre dos fluidos sin que los mismos entren en contacto directo [1]. Es común encontrarlos en el sector alimenticio, energético o petrolero, por mencionar algunos, donde se requiere garantizar determinada temperatura de proceso o también maximizar el aprovechamiento de energía de determinados flujos calientes.

Debido a su importancia, en este trabajo se estudia la transferencia de energía térmica en intercambiadores de calor mediante técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* o CFD), con el objetivo de determinar las condiciones de funcionamiento que maximicen la eficiencia de estos equipos y reduzcan el costo energético de los procesos industriales. Para ello, se realizan las instancias de simulación que se describen a continuación.

En primer lugar, se estudia un intercambiador de calor de doble tubo que posee una geometría sencilla y permite ser analizado desde dos enfoques. Por un lado, se analiza el equipo de forma algebraica, empleando modelos basados en mediciones experimentales, y por otro lado se lo estudia de forma numérica, mediante CFD. Luego se comparan los resultados obtenidos por ambos métodos, teniendo en cuenta los principales parámetros de interés, los cuales son: las temperaturas de los fluidos en diferentes regiones del intercambiador, el flujo de calor intercambiado entre ellos y el coeficiente global de transferencia de calor.

Una vez determinada la configuración numérica adecuada, se comienza una segunda instancia de análisis sobre geometrías de equipos industriales, tales como un intercambiador de casco y tubos o un intercambiador de flujo cruzado. Primeramente, se estudian los efectos de distintos modelos de turbulencia sobre las tasas de transferencia de calor y la temperatura de salida de los fluidos. Esta información es relevante para el diseño y utilización de estos equipos así como también para un correcto ajuste de los métodos numéricos empleados. En segundo lugar, utilizando la configuración numérica definida en el apartado anterior y el modelo de turbulencia acorde para estos casos, se estudia numéricamente la influencia de la velocidad de los fluidos y de la configuración geométrica de los arreglos de tubos en intercambiadores de flujo cruzado, comparando la tasa de transferencia térmica entre los distintos fluidos involucrados.

## 2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se mencionan las ecuaciones involucradas en cada uno de los métodos de resolución implementados en este trabajo.



## 2.1. Enfoque algebraico

Para la resolución algebraica del problema se plantea un sistema de ecuaciones no lineales 3x3 que considera el calor absorbido por el fluido frío ( $\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot \Delta T_c$ ), el calor cedido por el fluido caliente ( $\dot{Q}_h = \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot \Delta T_h$ ) y el calor intercambiado entre ambos fluidos ( $\dot{Q} = U \cdot A_{ml} \cdot \Delta T_{ml}$ ), con el objetivo de calcular este intercambio térmico y la temperatura de salida de cada uno de ellos. En esta última ecuación se aplica el modelo de diferencia de temperatura media logarítmica comúnmente utilizado para analizar este tipo de equipos [1], que involucra la temperatura de entrada y salida de ambos fluidos. Para esto, se debe calcular el coeficiente global de transferencia de calor  $U$  mediante diferentes correlaciones algebraicas.

## 2.2. Enfoque CFD

Desde el punto de vista de las simulaciones numéricas, se realiza un análisis a parámetros distribuidos que brinda una visión global del problema y resuelve la ley de conservación para las variables de interés: la masa, el momento y la energía de los medios involucrados, considerando que los fluidos son incompresibles y newtonianos. Se plantean las ecuaciones para los valores medios de flujo, considerando el caso estacionario.

En este contexto, para los fluidos se plantean las Ecuaciones (1) y (2) que son las ecuaciones de Navier-Stokes [2] en estado estacionario y corresponden a la conservación de masa y de momento lineal respectivamente, y además se considera la conservación de energía según la Ecuación (3) tanto para los fluidos como para los sólidos (donde la velocidad es nula). En la interfase entre dominios sólidos y fluidos se aplican condiciones de continuidad para la temperatura y el flujo de calor.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot (\vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} T) - \frac{\kappa}{\rho c_p} \nabla^2 T = 0 \quad (3)$$

donde  $\vec{u}$  es la velocidad,  $p$  la presión, y  $T$  la temperatura. Las propiedades del medio material son la densidad  $\rho$ , la viscosidad  $\mu$ , la conductividad térmica  $\kappa$  y el calor específico  $c_p$ .

Para realizar las simulaciones se utilizó OpenFOAM, que es un software de código libre [3, 4]. En todas las resoluciones por CFD, los *solver* utilizados emplean el Método de Volúmenes Finitos (*Finite Volume Method* o FVM) para la resolución de las ecuaciones. En cuanto al

acoplamiento de la presión y la velocidad se utiliza el algoritmo segregado tipo *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) [3], el cual consiste en resolver el sistema de ecuaciones mediante una serie de iteraciones hasta cumplir con un criterio de convergencia de la solución establecido. Respecto a la discretización de las ecuaciones se utilizó *upwind* para los esquemas advectivos y *linear* para los esquemas difusivos.

Para resolver el intercambiador de doble tubo y el de casco y tubos se utilizó *chtMultiRegionSimpleFoam*, *solver* que permite calcular la transferencia de calor conjugada entre las regiones sólidas y fluidas en régimen estacionario. Para el intercambiador de flujo cruzado se empleó *buoyantBoussinesqSimpleFoam*, *solver* que permite calcular la transferencia de calor en fluidos incompresibles en estado estacionario, empleando la aproximación de Boussinesq para contemplar la variación de densidad del fluido en función de la temperatura.

### 3. PRESENTACIÓN DE LOS CASOS

En este trabajo se estudian los tres intercambiadores de calor mostrados en la Figura 1.

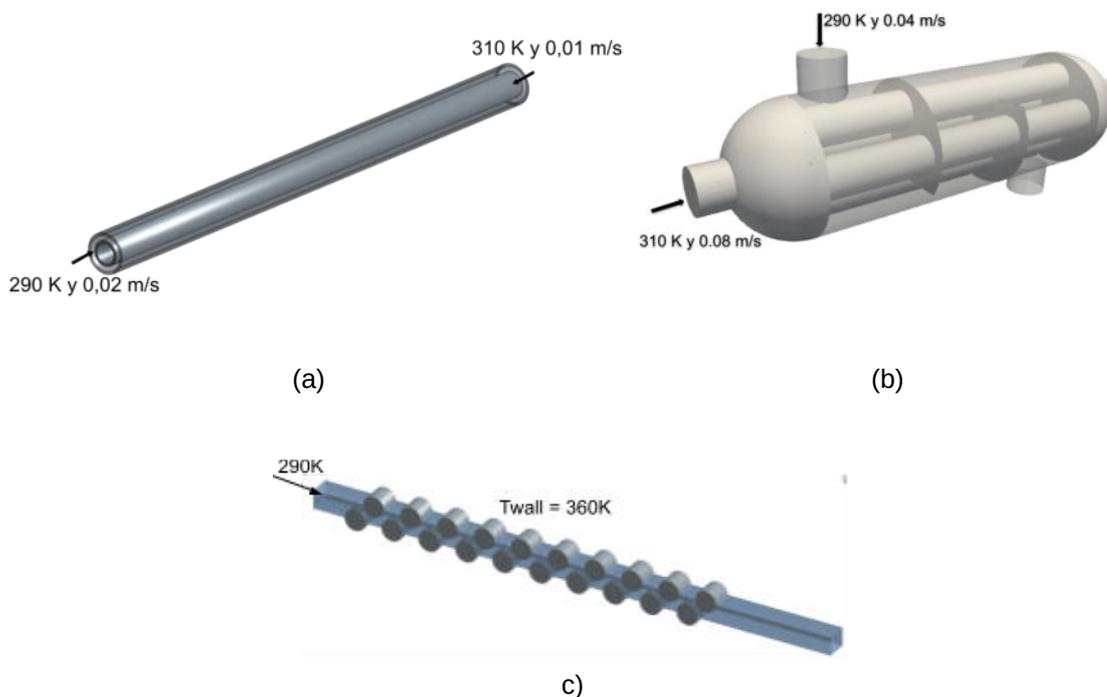


Figura 1: Geometría de los intercambiadores analizados con las condiciones de borde en la entrada para cada uno de los flujos.



El primer caso consiste en un intercambiador de calor de tubos concéntricos a contraflujo, donde el fluido caliente circula por el interior del tubo central y el fluido frío entre ambos tubos (Figura 1a), y se resuelve de forma algebraica y mediante CFD. El segundo caso corresponde a un tipo de intercambiador de calor de casco y tubos utilizado en el ámbito industrial (Figura 1b) y se lo analiza únicamente desde el punto de vista numérico debido a su mayor complejidad geométrica, basando la configuración numérica en el caso anterior y con el objetivo de estudiar el efecto de los distintos modelos de turbulencia en las propiedades térmicas de los intercambiadores de calor. En ambos casos, sobre las superficies de ingreso de los fluidos, se establece una temperatura y velocidad de entrada constante. El tercer intercambiador estudiado es un intercambiador de flujo cruzado de 20 tubos (Figura 1c), para el cual se implementa la configuración numérica y el modelo de turbulencia más apropiado para este caso con el objetivo de estudiar la influencia de la velocidad del fluido exterior y de la configuración geométrica sugerida por la norma aplicable, sobre la tasa de transferencia de calor. En este caso, se establece la temperatura de entrada del fluido exterior y se impone una temperatura constante en las paredes de los tubos transversales. En los primeros dos casos, dentro de los intercambiadores circula agua y las tuberías son de aluminio, mientras que en el último caso, el fluido estudiado es aire.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Intercambiador de doble tubo

El coeficiente global de transferencia de calor  $U$  se calcula según la Ecuación (4) en función de la geometría del intercambiador, la conductividad térmica del sólido involucrado y el coeficiente de convección  $h$  de los fluidos. Este coeficiente brinda una relación entre área de intercambio térmico, la resistencia del equipo y los fenómenos involucrados durante el intercambio térmico.

$$U = \frac{1}{A_{mt} \left( \frac{1}{h_f A_f} + \frac{1}{h_c A_c} + R_{tubo} \right)} \quad (4)$$

El coeficiente de convección se calcula a partir del número de Nusselt ( $Nu$ ), que representa la relación entre la tasa de transferencia de calor por convección y por conducción. Existen distintas correlaciones, dependiendo del régimen del flujo y la geometría analizada, para calcular  $Nu$ . En el caso del flujo caliente por el tubo interior, con un  $Re$  de 2108 y un  $Pr$  de 7.02, se tiene un valor de  $Nu$  constante, independiente del número de Reynolds y de Prandtl [1]. En el caso del flujo frío por el tubo exterior con sección anular, con un  $Re$  de 4734 y un  $Pr$  de 3.405, se utilizan los resultados de Kays y Perkins [1] y la correlación de Hausen definida en la Ecuación (5) [5], válidas ambas para flujos laminares desarrollados.



$$Nu = 1.20 \left( 3.66 + \frac{0.0668 Re Pr \frac{\rho}{L}}{1 + 0.04 \left( Re Pr \frac{\rho}{L} \right)^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (5)$$

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos del número de Nusselt para el intercambiador de doble tubo planteado, utilizando las correlaciones mencionadas, entre los cuales se observa una diferencia del 2.5%. Para los cálculos posteriores de este trabajo se utiliza la correlación de Kays y Perkins [1].

Tabla 1: Cálculo del Nu utilizando diferentes correlaciones.

Correlación	Nu
Kays y Perkins	5.3782
Hausen	5.2494

Se realizaron simulaciones bidimensionales tipo *wedge* del intercambiador, se obtuvieron las temperaturas promedio en la salida de los fluidos y el flujo de calor intercambiado entre ellos, resultados a partir de los cuales se calculó el coeficiente global de intercambio de calor. Se utilizaron tres refinamientos distintos de la malla y se pudo observar que los resultados no varían notablemente en función de la cantidad de celdas. La mayor variación que se obtuvo es de casi 4% en el flujo de calor, entre la malla más gruesa y la más fina. A partir de esto, se consideraron los resultados de la malla más gruesa que reflejan el mejor compromiso entre costo computacional y precisión de los resultados.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos del coeficiente global de intercambio de calor para las dos metodologías mencionadas. También se reporta el resultado de una simulación tridimensional analizada en un trabajo anterior [6]. Se puede ver que el cálculo algebraico subestima el coeficiente respecto de las simulaciones realizadas, cuya confiabilidad se garantiza a partir del análisis de convergencia en malla. Esta situación también fue observada por otros autores [7]. Cabe notar que comparando con los datos experimentales, también se observa una subestimación del coeficiente  $U$  por parte de las correlaciones. Esto podría deberse a que, tanto en los experimentos como en las simulaciones, el flujo se desarrolla en el tubo, lo que difiere de las hipótesis consideradas para las correlaciones.

Tabla 2: Comparación del U algebraico y numérico para el intercambiador de doble tubo.

Caso	U [W/m <sup>2</sup> K]
algebraico - Kays y Perkins	87.2678
simulación 2D	162.0740
simulación 3D	161.6059

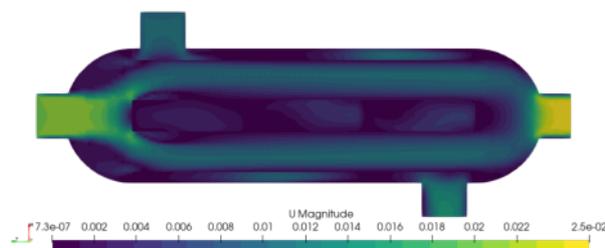
## 4.2. Intercambiador de casco y tubos

En este caso, las condiciones de flujo corresponden a un régimen de transición, tanto dentro como fuera de los tubos, con un  $Re$  de 5367 para el fluido frío y de 10735 para el fluido caliente. Para simular esta condición, se utilizaron tres refinamientos de malla (definidos en la Tabla 3) y se analizaron los resultados obtenidos con cada una de ellas sin utilizar modelos de turbulencia. Se observó que entre las dos mallas más refinadas el flujo de calor difiere en un 5%, por lo que, buscando la mejor relación entre el costo computacional y la precisión de los resultados, se decidió utilizar el refinamiento intermedio para analizar los modelos de turbulencia.

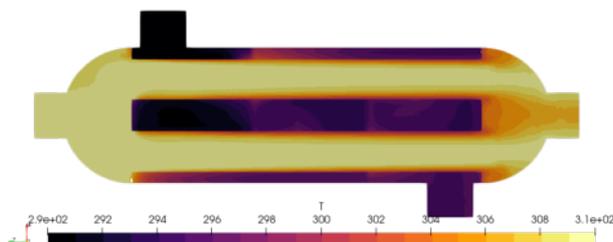
Tabla 3: Mallas utilizadas para el caso del intercambiador de casco y tubos.

Denominación	Cantidad de celdas	Distancia mínima [mm]
R0	207364	2.668
R1	1033645	1.357
R2	2626880	0.766

En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación sin modelos de turbulencia utilizando la malla R1.



(a) Campo de velocidad.



(b) Campo de temperatura.

Figura 2: Resultados obtenidos para el intercambiador de casco y tubos.



En la Figura 2a se muestra la magnitud de la velocidad de los dos fluidos que circulan de izquierda a derecha, donde el fluido caliente recorre el interior de los tubos mientras que por el exterior de los mismos circula el fluido frío. En la Figura 2b se muestra el campo de temperaturas, por lo que teniendo en cuenta el sentido de circulación de los fluidos, se puede observar que el fluido frío se va calentando al mismo tiempo que el fluido caliente se va enfriando mientras se acercan a sus respectivas zonas de salida. También se puede ver la importancia de los deflectores internos para direccionar el fluido frío y aumentar el contacto con los tubos, logrando así un mayor intercambio térmico entre ambos. Se puede observar a simple vista el cambio de temperatura en el fluido frío entre cada una de las secciones definidas por los baffles internos.

La turbulencia es un fenómeno físico que acelera el intercambio de calor, ya que genera estructuras de flujo que favorecen la convección. Sin embargo, resulta costoso resolver numéricamente todas las escalas turbulentas de forma directa. Es por esto que en el código computacional se tienen a disposición diversos modelos de turbulencia que permiten disminuir el costo computacional de las simulaciones de este tipo de fenómenos. Estos modelos actúan aumentando la difusión de momento en el fluido, y en OpenFOAM este aumento impacta en la difusión térmica por medio del número de Prandtl.

En este trabajo se realizaron simulaciones utilizando cuatro modelos de turbulencia distintos, tres modelos *RANS* y un modelo *DES*, sobre la malla de refinamiento intermedio y manteniendo las condiciones de contorno. Los modelos *RANS* modelizan todos los niveles de turbulencia y los modelos *LES* deciden en función del tamaño del vórtice cuáles son modelizados y cuáles son resueltos numéricamente. Mientras que *DES* es un modelo híbrido entre los 2 anteriores [8].

En la Tabla 4 se observan los resultados obtenidos para las principales variables de interés en las simulaciones realizadas sin modelo de turbulencia en contraste con las que sí lo incorporaron.

A partir de estos resultados, se puede ver que el modelo que presenta mayor desviación respecto a los demás es el modelo  $k-\epsilon$ . También se puede observar que en los modelos  $k-\omega$  la difusión introducida hace que los resultados sigan la tendencia del refinamiento al compararlos con los resultados obtenidos sin modelos de turbulencia con una malla más fina.



Tabla 4: Comparación de los resultados obtenidos utilizando distintos modelos de turbulencia.

Variables	Sin modelo de turbulencia		RANS - R1			DES -R1
	R1	R2	k- $\epsilon$	k- $\omega$	k- $\omega$ SST	k- $\omega$ SSTDES
Ts frío	292.48	292.48	293.13	292.55	292.57	292.52
Ts caliente	308.87	308.41	308.47	308.81	308.80	308.83
Q	1874.380	1977.15	2434.82	1932.85	1949.86	1910.06
U	187.30	198.04	251.16	193.86	195.76	191.32

### 4.3. Intercambiador de flujo cruzado

En este caso se estudiaron las diferentes configuraciones geométricas propuestas por las normas TEMA [9], que corresponden a los arreglos triangulares de tubos con un ángulo de 30°, 45° o 60° entre dos tubos consecutivos (véase Figura 3). Para ello, primeramente se realizó un estudio de convergencia en malla y se adoptó el mallado para la cual se obtuvo independencia en los resultados en función de la discretización utilizada. La malla utilizada se compone por 29274 celdas, con un paso mínimo en la pared de los tubos de 0.276 mm.

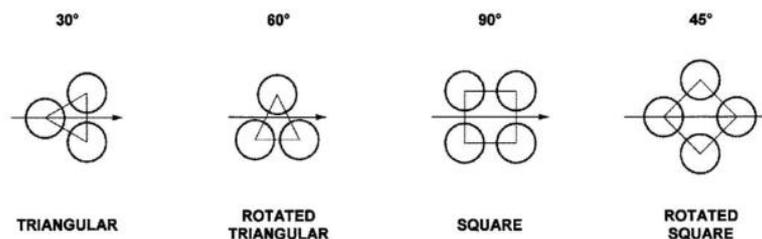


Figura 3: Patrones de tubos estandarizados obtenidos de la norma TEMA [9].

A fin de obtener una comparación semejante entre las tres geometrías bajo estudio, se propone como indicador la energía absorbida por el fluido por cada kg circulante y por m<sup>2</sup> de superficie de intercambio de calor. Se realizaron simulaciones para cinco números de Reynolds que se encuentren en diferentes regímenes de flujo para caracterizar el comportamiento de cada una de las geometrías en diferentes casos.



A partir de lo comentado con anterioridad, en la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos de la energía intercambiada para cada configuración simulada en función de las distintas velocidades de flujo propuestas.

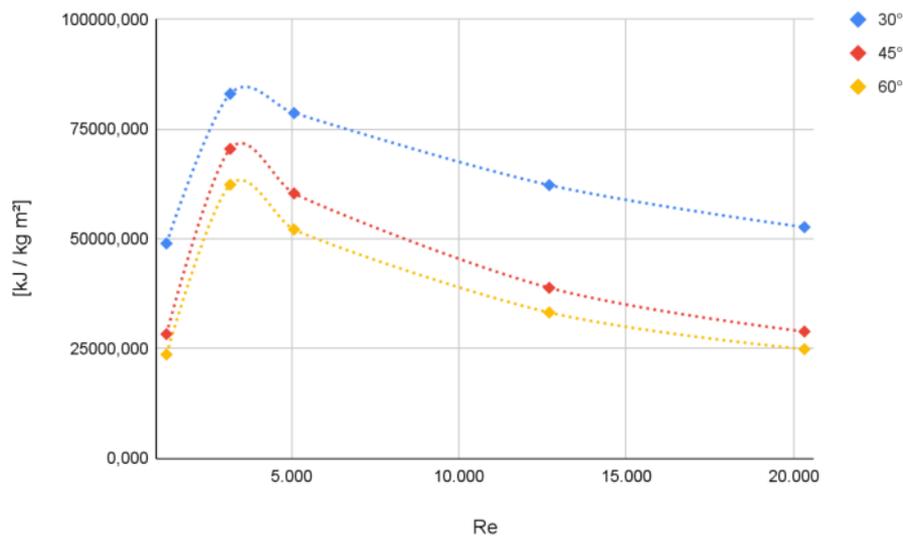


Figura 4: Energía intercambiada para cada geometría analizada en función del  $Re$ .

Se puede observar que el arreglo de tubos más eficiente es el de  $30^\circ$ , ya que, para las mismas condiciones de servicio, esta configuración permite un mayor intercambio de energía térmica entre los fluidos en todo el rango de velocidades estudiado. Este resultado se condice con lo esperado, ya que esta reducción en el ángulo entre tubos implica una mayor restricción al paso del flujo y esto aumenta el tiempo de permanencia del fluido, lo que favorece el intercambio de calor. Como desventaja de esta geometría, se genera una mayor caída de presión en el flujo transversal a los tubos. Además, se observa que, para todas las geometrías estudiadas, existe un régimen que maximiza el intercambio de energía específica entre los fluidos. A partir de este punto la energía específica intercambiada disminuye con el aumento de la velocidad del fluido, ya que a medida que aumenta la velocidad de circulación del flujo entre los tubos, tiende a generarse un canal de circulación con mayor velocidad y menor ingreso del fluido entre los tubos. El aumento del  $Re$  disminuye el tiempo de permanencia del fluido entre los obstáculos y por consiguiente el intercambio de energía específica.

En la Figura 5 se observan los campos de temperatura, presión y velocidad, para un ángulo de  $45^\circ$ . Se puede observar el aumento de la temperatura del fluido frío luego de pasar alrededor de los 20 tubos. Se observa que la caída de presión es de aproximadamente  $2.5 Pa$ , la cual no es significativa en estos casos. En el campo de velocidad se puede ver la formación del canal central de mayor circulación de fluido y zonas de estancamiento con menos movilidad.

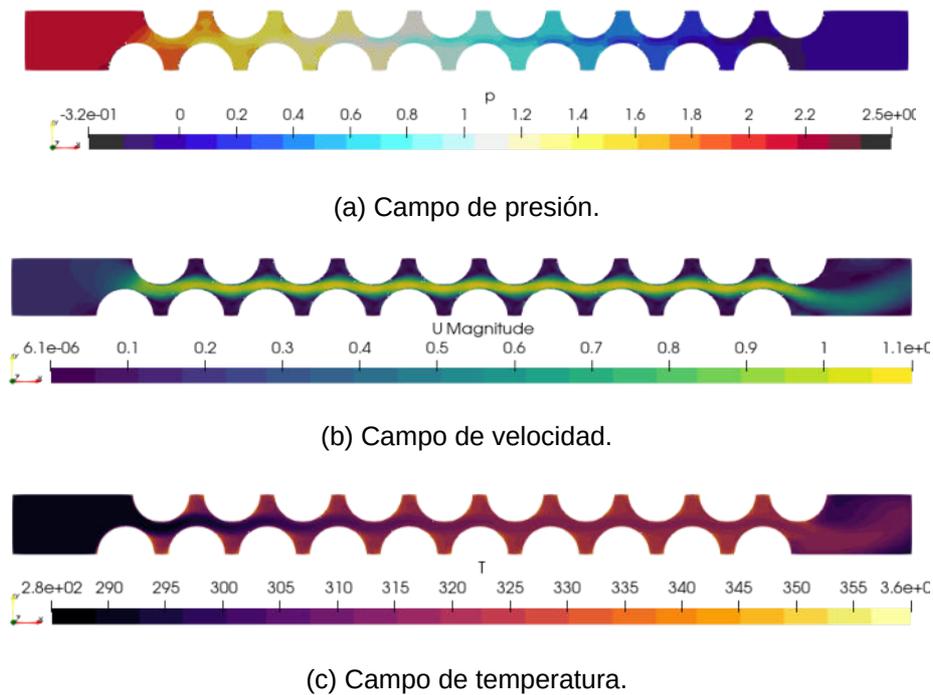


Figura 5: Resultados obtenidos para el intercambiador de flujo cruzado.

### 3. CONCLUSIONES

En este trabajo se puso de manifiesto el potencial de las herramientas CFD para representar fenómenos complejos de transferencia calor conjugada con gran nivel de detalle en un dispositivo de uso industrial, como lo es un intercambiador de calor de casco y tubos o uno de flujo cruzado. Se observaron las limitaciones de las correlaciones algebraicas relacionadas con su fuerte dependencia de la geometría analizada y sus rangos acotados de validez según el régimen del flujo ( $Re$ ) y la relación entre la difusividad de momento y de energía ( $Pr$ ).

En el caso del intercambiador de doble tubo, se observó una discrepancia significativa entre los resultados obtenidos mediante las correlaciones algebraicas y las simulaciones numéricas, situación también observada por otros autores. Es por esto que, en el marco de un proyecto PEIC, en la escuela de ingeniería mecánica se está llevando a cabo el diseño y construcción de un banco de ensayo para realizar un análisis experimental propio, y obtener datos de validación que permitan ajustar mejor los modelos utilizados en una configuración simple.

En el caso del intercambiador de casco y tubo se observó que el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  predice un mayor flujo de calor respecto a las demás simulaciones ya que es un modelo que



agrega mayor difusión numérica. Mientras que, empleando alguno de los modelos del estilo  $k-\omega$ , se obtienen resultados similares que con una malla casi tres veces más fina sin modelo de turbulencia, lo que indica que estos modelos tienden a resolver con mayor precisión la física del problema con un menor costo computacional.

Por último, en el intercambiador de flujo cruzado se estudió el comportamiento del fluido exterior para cada patrón a diferentes velocidades y cómo estos factores influyen en el intercambio térmico. Se observó que el patrón de  $30^\circ$  maximiza la energía específica intercambiada y que la misma depende de la velocidad del flujo, existiendo un valor de la velocidad que maximiza el intercambio por unidad de masa de fluido.

## REFERENCIAS

- [1] Cengel Y. A., Ghajar, A. *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill Interamericana, México, 2007.
- [2] Yunus A. Cengel, Cimbala, J. M., & Sknarina, S. F. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana, 2006.
- [3] Greenshields, C. J., & Weller, H. G. (2022). Note on Computational Fluid Dynamics: General Principles. CFD Direct <https://cfd.direct/>.
- [4] Greenshields, Christopher J. "Openfoam user guide version v2206." *The OpenFOAM Foundation* 237 (2022): 624.
- [5] Holman, J. P., & Valenzuela, R. (1998). *Transferencia de calor* (No. 660.28427 H65 1986.). São Paulo: McGraw-Hill.
- [6] Cortizo Carbone, M. C. & Catalano, J. C. *Análisis comparativo de modelos y estrategias de cálculo para intercambiadores de calor*. XXVIII Jornada de Jóvenes Investigadores AUGM. (pp. 746 - 767). 2021 Santiago de Chile.
- [7] Mehrabian, M. A., Mansouri, S. H., & Sheykhzadeh, G. A. (2002). *The overall heat transfer characteristics of a double pipe heat exchanger: Comparison of experimental data with predictions of standard correlations*.
- [8] Yusuf, Siti Nurul Akmal, et al. "A short review on rans turbulence models." CFD Letters 12.11 (2020): 83-96.
- [9] TEMA. Standards of the tubular exchanger manufacturers association 10th edition. Tubular exchanger manufacturers association, Inc. 2019.



## SIMULACIÓN COMPUTACIONAL PARA LA DETERMINACIÓN ESTRUCTURAL DE TANQUES CON SEPARADOR DE CRUDO ANTE CARGAS SÍSMICAS

**Matías Meroniuc, Héctor Sanzi y Gustavo Elvira**

Grupo de Investigación de Ingeniería Estructural GIIE, UTN Facultad Regional Haedo, Buenos  
París 532 Haedo, Buenos Aires Argentina – [tecsaing@tecsaing.com.ar](mailto:tecsaing@tecsaing.com.ar)

### RESUMEN

En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos a partir del planteo de un procedimiento alternativo de evaluación estructural de un tanque separador de almacenamiento de hidrocarburos de gran capacidad donde se determina, a través de la Simulación Computacional utilizando el programa ANSYS, la interacción entre el líquido en movimiento y la estructura de acero, ante aceleraciones cuasi-estáticas debido a movimientos sísmicos.

Los procedimientos de diseño pseudo-dinámicos contenidos en la norma API 650 se basan en métodos de análisis de espectros de respuestas afectados por el factor de amortiguamiento del sistema, considerando dos modos de vibración del tanque y su contenido.

Los movimientos sísmicos toman importancia en el diseño de tanques cilíndricos verticales provocando dos tipos de reacciones en el tanque, tales como:

- Movimientos de alta frecuencia que provocan un movimiento lateral del terreno donde está construido el tanque, denominado “Efecto Impulsivo”.
- Movimientos de baja frecuencia que provocan un movimiento de la masa del líquido contenido, provocando un oleaje dentro del tanque. Este movimiento lateral genera fuerzas que actúan en el centro de gravedad del tanque, ocasionando la inestabilidad del conjunto, originando un momento de vuelco que produce compresión longitudinal y deforma el cuerpo del tanque, denominado “Efecto Convectivo”.

Este procedimiento alternativo permitiría evaluar cualquier tipo de tanque con distintos tipos de separadores internos, caso de los tanques “Skimmer”, ante el estado de carga por sismo.

**Palabras clave:** Simulación Computacional, Integridad, Tanques API, Sismo

## 1. INTRODUCCIÓN

Los eventos sísmicos generan aceleraciones que se transmiten a las estructuras apoyadas en el suelo y al producto que contienen. En el caso de tanques verticales de grandes dimensiones, Figura 1, dichas aceleraciones dan lugar a grandes fuerzas sísmicas del producto contra la estructura.



Figura 1: Tanques de almacenamiento de hidrocarburos

Estas fuerzas sísmicas de dirección horizontal y paralelas al suelo generan un momento conocido como momento de vuelco (Overturning Moment), que es el causante de los esfuerzos longitudinales de compresión en la envoltura del tanque.

En la interacción dinámica entre el producto y la estructura dividimos al fluido en dos partes, la que se encuentra en la parte inferior, que se mueve solidaria a la estructura y se la denomina porción impulsiva, y por otro lado la parte superior la cual entra en oscilación y es la que genera el “oleaje”, denominándose porción convectiva.

Ambos fenómenos desarrollan deformaciones por inestabilidad del equilibrio (pandeo) sobre la envoltura del tanque, ya sea en la parte superior denominado “Sloshing” (Efecto de la Ola) o “Pie de Elefante” en la parte inferior del mismo, Figuras 2 a y b. Ambos efectos producen la deformación del tanque, la cual es debida principalmente a las tensiones de compresión y circunferenciales, respectivamente.



Figura 2 a y b: Deformaciones Pandeo “Pie de Elefante” y “Efecto de Ola – Sloshing”



### 1.1. Fuerzas Sísmicas sobre la estructura del tanque

La descomposición de las fuerzas debidas al fluido, que actúan sobre el tanque cuando es sometido a la acción del sismo, queda representada a partir de una porción impulsiva ( $W_i$ ) y otra convectiva ( $W_c$ ) del producto. La primera simulada como una masa solidaria a la estructura y la segunda representada de manera flexible, unida por dos resortes (ver Figura 3).

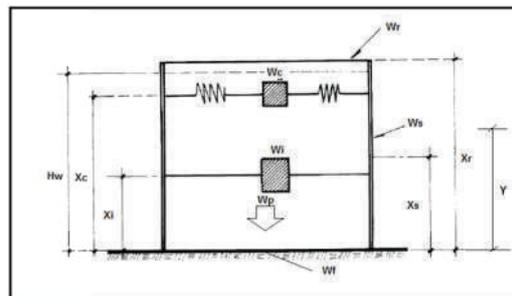


Figura 3: Esquema dinámico de las fuerzas actuantes.

Por otro lado, bajo dicha acción sísmica, se acoplan las fuerzas resistivas correspondientes al peso de la envolvente ( $W_s$ ) y del techo ( $W_r$ ), mientras que  $X_i$ ,  $X_s$ ,  $X_r$  y  $X_c$ , representan las distancias del punto de aplicación de cada fuerza a la base del tanque.

El modo convectivo de vibración del líquido genera una ola sísmica que debe ser menor que el espacio libre de líquido. La unión del techo con la pared del tanque suele ser una junta frágil, por la cual se diseña para que, en caso de una sobrepresión interna, se desprenda el techo antes que se deforme el tanque.

La ola sísmica no debe impactar el techo para no romper la unión, esto se evita con un espacio libre entre el nivel máximo del líquido y el techo, mayor a la de la ola sísmica. Por lo tanto, esta altura debe ser evaluada correctamente ya que, ante la acción sísmica, el efecto de la ola puede deformar la envolvente y romper la unión de la costura con el techo, provocando su falla.

Los procedimientos de diseño se basan en el Espectro de Respuesta presentes en las normas de aplicación, considerando un amortiguamiento del 0,50% para la aceleración convectiva y una del 5% para la impulsiva. En la Figura 4 se presenta el Espectro de Respuesta incorporado en el Cirsoc 103 [1], para una zona sísmica en particular, considerando distintos tipos de suelo.

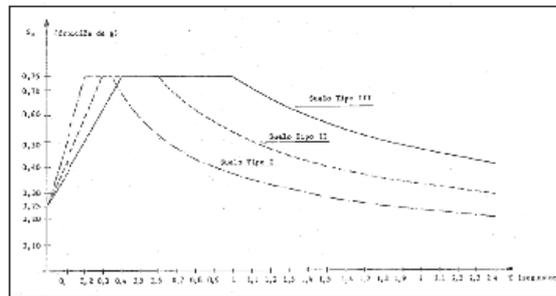


Figura 4: Espectro de respuesta para diseño [1].

Los parámetros de aceleración espectral se definen como fracción o porcentaje de la aceleración de la gravedad y pueden utilizarse tanto métodos probabilísticos como determinísticos, incluyendo los coeficientes de seguridad que tienen los códigos de diseño.

El Apéndice E del código API 650 [2] define la metodología de cálculo para tanques circulares apoyados totalmente al piso ante cargas sísmicas, donde se incluyen las aceleraciones horizontales y verticales debido al sismo.

## 1.2. Efectos horizontales y verticales

Las fuerzas sísmicas lateral y vertical equivalentes de diseño se determinan mediante las siguientes expresiones dadas por [2]:

$$F_L = A_L \times W_{eff} \quad (1)$$

$$F_V = A_V \times W_{eff} \quad (2)$$

Siendo

$A_L$  Coeficiente de aceleración lateral, en porcentaje de la aceleración de la gravedad

$A_V$  Coeficiente de aceleración vertical, en porcentaje de la aceleración de la gravedad

$W_{eff}$  Peso efectivo de la estructura que contribuye en la respuesta del sismo

## 1.3. Periodo Natural Impulsivo

El período impulsivo quedará definido por la expresión [2]:

$$T_i = \left( \frac{1}{27,8} \right) \left( \frac{C_i * H}{\sqrt{t_u}} \right) \left( \frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}} \right) \quad (3)$$

Siendo



$C_i$	Coficiente obtenido de la Figura E.1 de API 650 [2] en función de $H/D$
$E$	Módulo de Elasticidad del material del tanque
$\rho$	Densidad del producto
$H$	Altura del producto
$t_u$	espesor de virola
$D$	Diámetro del tanque

#### 1.4. Periodo Natural Convectivo (Sloshing)

El periodo del primer modo convectivo de la ola se determina como [2]:

$$T_c = K_s \sqrt{D} ; K_s = \frac{0,578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3,68H}{D}\right)}} \quad (4)$$

El Modo Convectivo se caracteriza por un desplazamiento de la masa líquida en la proximidad de la superficie libre, simulando un potencial efecto de ola, mientras que el Impulsivo está caracterizado por un desplazamiento lateral de la masa de fluido, que produce una deformación sobre la virola inferior, contigua con la base del tanque.

Conociendo dichos períodos, convectivo e impulsivo del producto, a partir del espectro del sismo presentado en Figura 4, es posible determinar las aceleraciones  $A_i$  y  $A_c$ , y de aquí el esfuerzo de Corte Total ( $V$ ) en la base del tanque es definido a partir de la componente impulsiva ( $V_i$ ) y convectiva ( $V_c$ ) -que a su vez son función del peso efectivo del tanque y de su contenido- (método SRSS) por medio de las expresiones dadas en [2]:

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} \quad (5)$$

$$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_f + W_i) \quad (6)$$

$$V_c = A_c * W_c \quad (7)$$

resultando en un momento ( $M_{rw}$ ) con respecto a un punto de apoyo situado en la base (siendo los valores "X" los radios de aplicación de las fuerzas mostrados en la Figura 3) :

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i * (W_i * X_i + W_s * X_s + W_r * X_r)]^2 + [A_c * (W_c * X_c)]^2} \quad (8)$$

Para los casos en que los pesos resistivos no sean suficientes para compensar la acción dinámica del producto, es necesario llevar a cabo el anclaje mecánico del tanque por medio de bulones o correas.

## 2. APLICACIONES EN TANQUES CON ESTRUCTURAS INTERNAS, CASO DE LOS “SKIMMER”.

Para la extracción de crudo en los yacimientos que utilizan reinyección secundaria, que manejan grandes cantidades de agua y escaso contenido de gas, el tratamiento o la separación de ambas fases se realiza en los tanques denominados Lavadores y/o Cortadores.

Entre otros sistemas [3], la utilización de internos verticales (ver Figura 5), conocidos como tanques “Skimmer”, son un diseño aceptable para tanques de grandes tamaños, donde el proceso de separación se realiza en períodos cortos de tiempo y cuyo proceso de separación se muestra en dicha figura.

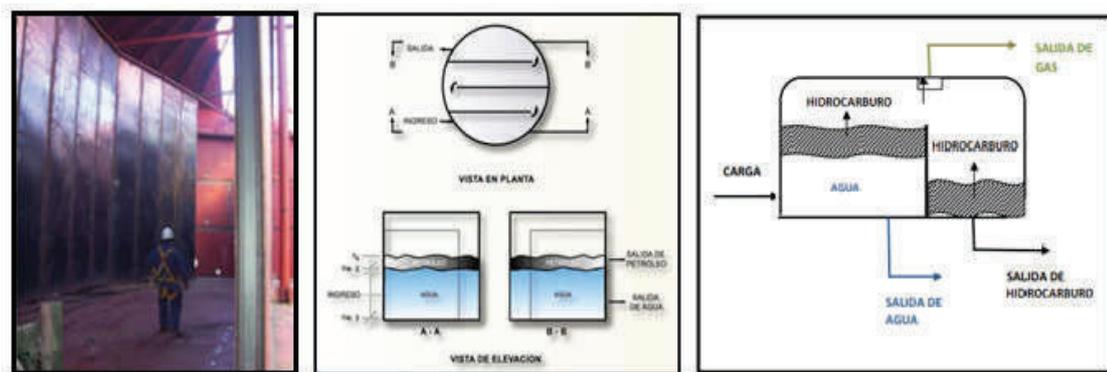


Figura 5: Internos Verticales de un Tanque “Skimmer” para Separación de Crudo

Considerando que, para tanques de almacenamiento de hidrocarburos solicitados a cargas sísmicas, el Apéndice E del código API 650 [2] incorpora la metodología de diseño y las bases para la fabricación de tanques circulares libres -es decir, sin ningún tipo de estructura interna- para los tanques con “Skimmers” se hace necesaria la utilización de un procedimiento alternativo de análisis, a partir de la Simulación Computacional, que permita llevar a cabo la verificación estructural y asegurar la integridad del conjunto ante el estado de carga sísmico.

## 3. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL PARA DETERMINAR LOS PERÍODOS CONVECTIVO E IMPULSIVO DE UN TANQUE CON SEPARADORES VERTICALES



A partir del trabajo publicado en referencia [3], se determinaron los períodos de vibración de un tanque de almacenamiento de hidrocarburos, considerando la influencia del producto en su interior ante cargas sísmicas, mediante un modelo de elementos finitos.

Mediante el uso del programa ANSYS [4] se modeló dicho tanque de grandes dimensiones utilizando elementos estructurales hexaédricos de 8 nodos (SOLID185) -dada su mejor respuesta al algoritmo de contacto empleado- y el líquido contenido con elementos del tipo FLUID30, donde se incluyó la estructura interna vertical del separador con distintos niveles de producto.

Estos tipos de elementos se utilizan para el modelado de fluidos contenidos en tanques o recipientes, donde no existe circulación neta de fluido. La contención del líquido dentro del tanque queda asegurada mediante el acoplamiento apropiado del movimiento radial entre los nodos del líquido, que descansan sobre el tanque, y los nodos pertenecientes a este último. En las Figuras 6a y b se presenta el modelo de cálculo empleado del tanque, sin y con internos verticales.

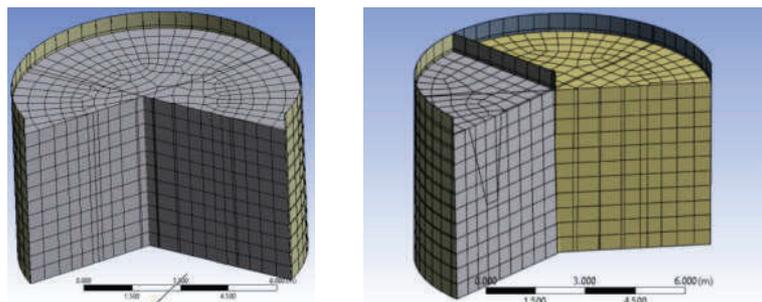


Figura 6 a y b: Modelo de cálculo de tanque sin (izquierda) y con (derecha) separadores verticales.

Las condiciones de contorno del modelo están dadas por una restricción del desplazamiento de los nodos de la base; siendo el análisis llevado a cabo uno del tipo “Modal Acoustics” que es el encargado de efectuar los análisis de vibraciones libres en el software antes citado cuando están involucrados los elementos acústicos FLUID30.

#### 4. ESTUDIO DE CASOS

Para el caso particular de un tanque para almacenamiento de hidrocarburos, con relación Diámetro ( $D=9\text{m}$ ) / Altura ( $H=6\text{m}$ ) de 1.5 y un espesor de virola ( $t_w$ ) de 4.76 mm, se determina, a partir de las expresiones (3) y (4) en acuerdo con API 650 [2], los Períodos Convectivo e Impulsivo.

#### 4.1. Análisis en acuerdo con API 650 [2]

Los períodos Convectivos e Impulsivos, para un tanque sin internos, son los siguientes:

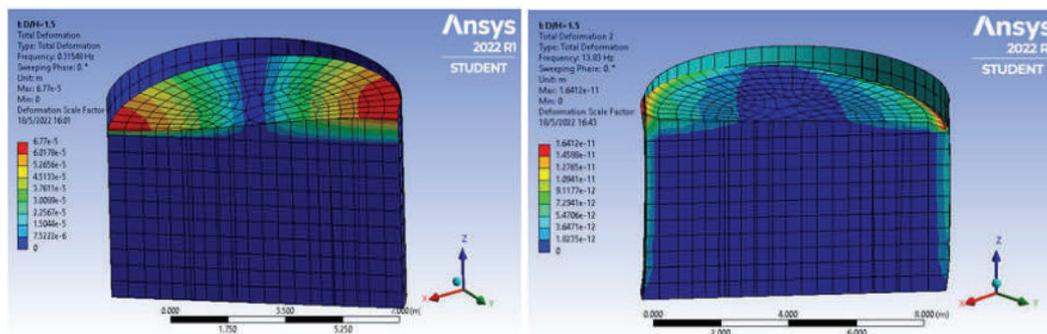
$$T_c = 3.16 \text{ seg. y } T_i = 0.072 \text{ seg.}$$

Conociendo los valores del período, ingresando en el gráfico del espectro presentado en Figura 4, se determinan las aceleraciones y, de allí, las fuerzas y momentos máximos alcanzados que permiten dimensionar el tanque ante el estado de carga sísmico.

#### 4.2. Análisis mediante Simulación Computacional

##### 4.2.1. Tanque sin internos

En la Figuras 7 a y b se presentan los resultados del modelo de elementos finitos utilizado para el tanque sin internos, correspondiente a la relación D/H antes indicada, donde se determinaron los períodos de vibración Impulsivo y Convectivo.

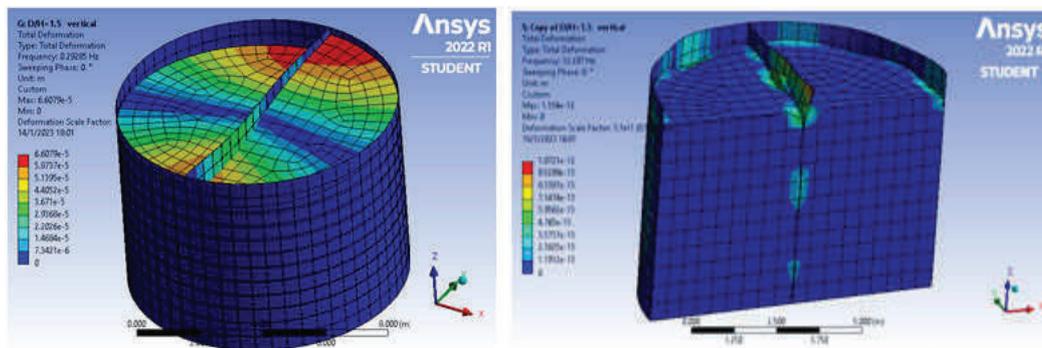


Figuras 7 a y b: Modo Convectivo (Período  $T_c = 3.17 \text{ seg.}$ )  
e Impulsivo (Período  $T_i = 0.0723 \text{ seg.}$ ).

De los resultados se desprende que la diferencia respecto del procedimiento incorporado en API 650 [2] se encuentra en el orden del 0.5% (0.17% para el período Impulsivo y -0.49% para el convectivo), lo cual hace admisible este procedimiento de análisis alternativo.

##### 4.2.2. Tanque con internos

En la Figuras 8 a y b se presenta el modelo de cálculo utilizado del tanque con internos verticales (D/H = 1.5), donde se determinaron los períodos de vibración Impulsivo y Convectivo.



Figuras 8 a y b: Modo Convectivo (Período  $T_c = 3.42$  seg)  
e Impulsivo (Período  $T_i = 0.081$ seg.).

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un procedimiento alternativo de evaluación estructural de un tanque de almacenamiento de hidrocarburos de gran capacidad donde se determinó, a través de la Simulación Computacional, la interacción entre el líquido en movimiento y la estructura de acero ante aceleraciones cuasi-estáticas originadas por movimientos sísmicos.

El Anexo E del código de diseño API 650 [2] ha demostrado su confiabilidad a lo largo de los años a la hora de determinar los períodos convectivos e impulsivos y, a partir de estos, los esfuerzos y tensiones alcanzadas en los tanques de almacenamiento de hidrocarburos, sin separadores, objeto de estudio.

Sin embargo, ante la falta de normativa aplicable a un tanque con “Skimmers”, se hace necesario desarrollar una metodología alternativa apoyada en modelos numéricos. Bajo esta premisa es que este trabajo permitió validar la determinación de los períodos -conforme API 650- haciendo uso de un modelo numérico de elementos finitos, con diferencias menores al 1% respecto a la solución dada en el citado código.

Por lo tanto, y con la validación anterior como punto de partida, el procedimiento alternativo que fue desarrollado en el presente trabajo, aplicando la simulación computacional, permitirá evaluar cualquier tipo de tanque con distintas configuraciones estructurales internas, como el caso de los “Tanques Skimmer”, ante el estado de carga por sismo.

## 6. REFERENCIAS

- [1] INPRES-CIRSOC 103. Parte I. Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes. Institución Nacional de Prevención Sísmica. Edición Agosto 1991.



- [2] API 650-Apéndice E. Welded Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute. Año 2016
- [3] H. Sanzi, M. Imperiale y G. Elvira. *Simulación Computacional para la determinación estructural de tanques de almacenamiento de hidrocarburos ante cargas sísmicas*. Congreso XI Corende, Registro ISBN-ISSN, 2017, Neuquén.
- [4] ANSYS: Software de elementos finitos. Versión 14. Año 2016.



## ANÁLISIS VIBRATORIO DE VIGAS FISURADAS: TEORÍA DE TIMOSHENKO CON TRUNCAMIENTO

Anna María De Rosa<sup>1</sup>, María Lippiello<sup>2</sup> Carla Ceraldi<sup>2</sup>, Héctor Martín<sup>3</sup>, Antonella Onorato<sup>1</sup>  
y Marcelo Piovan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> School of Engineering, University of Basilicata, Potenza Italy - [maria.derosa@unibas.it](mailto:maria.derosa@unibas.it)

<sup>2</sup> DiST, University of Naples "Federico II", Naples Italy

<sup>3</sup> Grupo de Diseño Mecánica, UTN FRRQ, Calle N° 44, 1000 Parque Industrial Reconquista, Reconquista, Argentina, [hmartin@comunidad.frrq.utn.edu.ar](mailto:hmartin@comunidad.frrq.utn.edu.ar)

<sup>4</sup> Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada – UTN FR. Bahía Blanca  
11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina [mpiovan@frbb.utn.edu.ar](mailto:mpiovan@frbb.utn.edu.ar)

### RESUMEN

En este artículo se propone una nueva teoría para el análisis dinámico en el contexto del modelo de viga Timoshenko bajo la hipótesis de condiciones de borde de apoyo simple y con una fisura. A su vez se supone que la viga tiene sus extremos restringidos con resortes elásticos tanto transversales como rotacionales. El principal objetivo de este artículo es investigar el comportamiento de las vibraciones libres según la teoría truncada de vigas Timoshenko.

A partir de la teoría truncada de viga Timoshenko, los autores del presente artículo han desarrollado la concepción para la teoría de vigas Timoshenko con fisuras, empleado métodos geométricos y variacionales.

La novedad del enfoque que se propone en el artículo reside en que se muestra la perfecta analogía entre métodos variacionales y métodos de directos en el caso del análisis dinámico para vigas. El objetivo de las formulaciones propuestas reside en hallar las ecuaciones del modelo truncado de Timoshenko con sus correspondientes condiciones de borde y establecer su similitud matemática con los otros dos enfoques.

Se muestra que las ecuaciones diferenciales con sus correspondientes condiciones de borde, usadas para resolver el problema dinámico de las vigas truncadas Timoshenko a través de formulaciones variacionales, tienen la misma forma que las obtenidas a través del método directo.

Finalmente, se efectúan algunos cálculos numéricos para evaluar los efectos de una fisura, de la deformación por corte e inercia rotacional. Los resultados obtenidos se validan por comparación con los disponibles en la literatura técnica internacional.

**Palabras Clave:** Fisuras; Teoría Truncada de Timoshenko; vibraciones.



## 1. INTRODUCCIÓN

La presencia de grietas o fisuras en las paredes de un componente estructural (de un puente metálico o de montajes de maquinaria) puede ser una señal de alerta temprana de su integridad estructural. Las fisuras pueden producirse como consecuencia del asentamiento de la construcción (e.g. en puentes) por los esfuerzos a los que están sometidos los materiales, o indicar problemas mucho más graves que no deben pasarse por alto, ya que pueden provocar fallos estructurales y en ocasiones incluso colapsos. Las causas que subyacen a este fenómeno pueden ser diversas, algunas directamente atribuibles a la acción humana, otras a factores externos como terremotos u otros eventos naturales.

Las grietas y fisuras pueden originarse por razones estructurales o no estructurales. Las primeras se deben a la mala calidad de los materiales de construcción o a la deformación estructural del terreno sobre el que se montó la estructura (e.g. recipientes de almacenaje de gases a la intemperie). Estos fenómenos son los potencialmente más peligrosos, pudiendo dar lugar a fisuras importantes sobre las que es necesario intervenir con prontitud. Las fisuras no estructurales como los fenómenos normales de dilatación o retracción de los materiales también se deben a la acción de los agentes atmosféricos como la lluvia, la humedad y la nieve.

La naturaleza de estas grietas no es motivo de especial preocupación, aunque sí su presencia, por lo tanto la detección de grietas es un tema muy importante a la luz de los posibles desarrollos en el control de la integridad estructural. En consecuencia, se han llevado a cabo numerosos estudios para comprender la respuesta dinámica y la estabilidad de las vigas fisuradas, como elemento básico de análisis. En las últimas dos décadas, en particular, varios investigadores han dado gran importancia al análisis de vibraciones, considerándolo uno de los procedimientos más eficientes en la detección de grietas. Se han propuesto numerosos métodos para el análisis modal, basados en la teoría clásica de Euler-Bernoulli [1-6], aunque posteriormente considerados inadecuados, por la ausencia en el tratamiento del problema de las contribuciones de las deformaciones debidas al cortante y la inercia rotacional. Los factores correctores de la teoría de Euler-Bernoulli han sido introducidos por Timoshenko [7] y las vibraciones libres de vigas fisuradas, basadas en la teoría de Timoshenko, han sido estudiadas por numerosos autores [8-13] y algunas soluciones particulares del problema de detección de grietas se obtuvieron usando métodos convencionales.

En este artículo se propone un modelo matemático nuevo para el análisis dinámico de estructuras fisuradas, dentro del marco de teorías tipo Timoshenko o con deformación por corte de primer orden. El modelo contempla la estructura como una viga flexible por corte e inercia rotatoria con sus extremos soportados en apoyos elásticos tanto a desplazamiento como a



rotación flexional y que posee una fisura en su dominio. El principal objetivo de este artículo es investigar el comportamiento de las vibraciones libres mediante la teoría truncada de Timoshenko. Recientemente, los autores también han propuesto este enfoque para el análisis dinámico de vigas, placas y nanotubos [14-16]. En efecto, a partir de la teoría truncada de Timoshenko, los autores del presente artículo han desarrollado la concepción para la teoría de vigas por corte con la presencia de fisuras, empleando métodos geométricos y variacionales.

La novedad del enfoque que se propone en este artículo reside en que se muestra la perfecta analogía entre los métodos variacionales y los métodos directos en el caso del análisis dinámico para vigas. Se propone una solución analítica para el estudio de la variabilidad de los patrones dinámicos asociados a la presencia de una fisura y finalmente se efectúan algunos cálculos numéricos para evaluar los efectos que los diversos parámetros del modelo tienen en los patrones de frecuencia de la estructura. Los resultados obtenidos se contrastan con los disponibles en la literatura técnica internacional.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considérese una viga tipo Timoshenko, en presencia de una fisura, como la que se muestra en la Figura 1, que tiene longitud  $L$ , sección de área  $A$ , momento de inercia  $I$ , módulo de Young  $E$ , módulo de cizallamiento  $G$ , factor de corte  $\chi$ , densidad de masa  $\rho$  y coeficiente de Poisson  $\nu$ . La viga se supone restringida en los extremos por resortes elásticos, con rigidez transversal y rigidez rotacional a flexión. Considérese el origen en el extremo izquierdo con abscisa  $z$  y ordenada  $y$ , además se  $t$  la variable temporal.

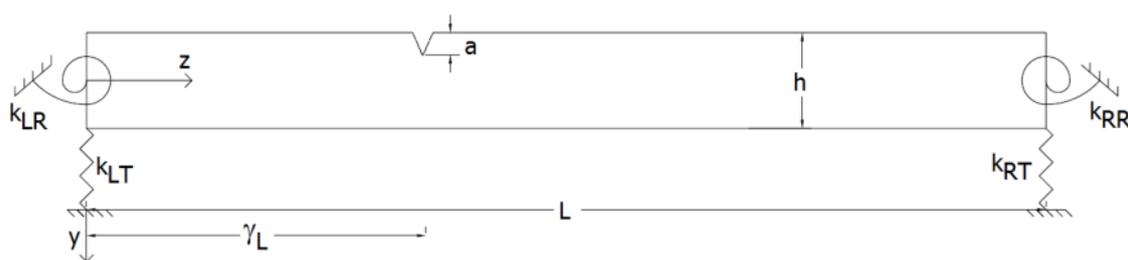


Figura 1: Esquema del nanotubo con la micro masa en el extremo derecho

Empleando el principio de Hamilton como en la referencia [14] se obtienen dos sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales para una viga Timoshenko, para el caso truncado, en presencia de una fisura a una distancia  $\gamma_L$  del origen y cuyas expresiones vienen dadas de la siguiente forma:



$$\begin{cases} -\rho A \frac{\partial^2 v_i(z,t)}{\partial t^2} + GA\chi \left( \frac{\partial^2 v_i(z,t)}{\partial z^2} + \frac{\partial \phi_i(z,t)}{\partial z} \right) = 0 \\ \rho I \frac{\partial^3 v_i(z,t)}{\partial t^2 \partial z} + EI \frac{\partial^2 \phi_i(z,t)}{\partial z^2} - GA\chi \left( \frac{\partial v_i(z,t)}{\partial z} + \phi_i(z,t) \right) = 0 \end{cases} \quad i = 1,2 \quad (1)$$

Correspondiendo  $i=1$  al subdominio  $z \in [0, \gamma_L]$ , mientras que  $i=2$  corresponde a  $z \in [\gamma_L, L]$ .

Además  $v_i(z, t)$  y  $\phi_i(z, t)$  son respectivamente, el desplazamiento transversal y la rotación total dada por:

$$\phi(z, t) = \phi_b(z, t) + \psi(z, t) = -\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} + \psi(z, t) \quad (2)$$

En tanto que  $\phi_b(z, t)$  es la rotación flexional (o pendiente de la curva de desplazamiento) y  $\psi(z, t)$  es la rotación por cortante.

La solución de cada sistema  $i$ -ésimo de la Ecuación (1) se propone con la siguiente forma de separación de variables:

$$v(z, t) = v(z)e^{i\omega t}, \phi(z, t) = \phi(z)e^{i\omega t} \quad (3)$$

con lo cual el sistema de ecuaciones queda como:

$$\rho A \omega^2 v_i + GA\kappa \left( \frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

$$EI \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial z^2} - \rho I \omega^2 \frac{\partial v_i}{\partial z} - GA\kappa \left( \frac{\partial v_i}{\partial z} + \phi_i \right) = 0 \quad (5)$$

Definiendo las siguientes entidades adimensionales:

$$\zeta = \frac{z}{L}, \quad \Omega^2 = \frac{\rho A L^4 \omega^2}{EI}, \quad e = \frac{E}{G\kappa}, \quad r = \frac{I}{AL^2}, \quad s = er, \quad \gamma = \frac{\gamma_L}{L} \quad (6)$$

Con los cuales el sistema de ecuaciones diferenciales descrito en las Ecuaciones (4-5) queda:

$$\Omega e r v_i + \left( \frac{\partial^2 v_i}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial \bar{\phi}_i}{\partial \zeta} \right) = 0, \quad i = 1,2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\phi}_i}{\partial \zeta^2} - \Omega r \frac{\partial v_i}{\partial \zeta} - \frac{1}{er} \left( \frac{\partial v_i}{\partial \zeta} + \bar{\phi}_i \right) = 0, \quad i = 1,2 \quad (8)$$

Siendo  $\bar{\phi}_i = \phi_i L$ . Despejando  $\frac{\partial \bar{\phi}_i}{\partial \zeta}$  de la Ecuación (7) y substituyendolo en la Ecuación (8) y luego derivando se tiene:

$$\frac{\partial^4 v_i}{\partial \zeta^4} + \Omega(s+r) \frac{\partial^2 v_i}{\partial \zeta^2} - \Omega v_i = 0, \quad i = 1,2 \quad (9)$$

Las soluciones de estas ecuaciones diferenciales para  $i=1$  e  $i=2$  son dadas por:

$$v_1(\zeta) = A_1 \cos(a\zeta) + A_2 \sin(a\zeta) + A_3 \cosh(b\zeta) + A_4 \sinh(b\zeta), \quad \forall 0 < \zeta < \gamma \quad (10)$$

$$v_2(\zeta) = A_5 \cos(a\zeta) + A_6 \sin(a\zeta) + A_7 \cosh(b\zeta) + A_8 \sinh(b\zeta), \quad \forall \gamma < \zeta < 1 \quad (11)$$

con:



$$a = \sqrt{\frac{1}{2p}(q + \sqrt{q^2 + 4pg})}; b = \sqrt{\frac{1}{2p}(-q + \sqrt{q^2 + 4pg})} \quad (12)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} p &= 1 \\ q &= \Omega(s + r) \\ g &= \Omega \end{aligned} \quad (13)$$

Además es posible obtener  $\bar{\phi}_i(\zeta)$  desde la Ecuación (8) sustituyendo  $\frac{\partial \bar{\phi}_i}{\partial \zeta}$  extraída de la Ecuación (7) y oportunamente derivada, de tal forma que se llega a:

$$\bar{\phi}_i = -s \frac{\partial^3 v_i}{\partial \zeta^3} - (1 + s\Omega r + \Omega s^2) \frac{\partial v_i}{\partial \zeta} \quad (14)$$

Las condiciones de borde presentes en una viga fisurada como la que se indica en la Figura 1 son 8 y definidas en las siguientes Ecuaciones:

$$EI \frac{\partial \phi_1(0)}{\partial z} - k_{LR} \phi_1(0) = 0 \quad (15)$$

$$GA\chi \left( \phi_1(0) + \frac{\partial v_1(0)}{\partial z} \right) - k_{LT} v_1(0) = 0 \quad (16)$$

$$v_2(\gamma L) = v_1(\gamma L) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \phi_1(\gamma L)}{\partial z} = \frac{\partial \phi_2(\gamma L)}{\partial z} \quad (18)$$

$$\left( \frac{\partial v_2(\gamma L)}{\partial z} - \frac{\partial v_1(\gamma L)}{\partial z} \right) = c_m EI \frac{\partial \phi_2(\gamma L)}{\partial z} \quad (19)$$

$$\phi_1(\gamma L) + \frac{\partial v_1(\gamma L)}{\partial z} = \phi_2(\gamma L) + \frac{\partial v_2(\gamma L)}{\partial z} \quad (20)$$

$$EI \frac{\partial \phi_2(L)}{\partial z} + k_{RR} \phi_2(L) = 0 \quad (21)$$

$$GA\chi \left( \phi_2(L) + \frac{\partial v_2(L)}{\partial z} \right) + k_{RT} v_2(L) = 0 \quad (22)$$

Las cuales al ser puestas en forma adimensional se transforman en:

$$\frac{\partial \bar{\phi}_1(0)}{\partial \zeta} - K_{LR} \bar{\phi}_1(0) = 0 \quad (23)$$

$$\left( \bar{\phi}_1(0) + \frac{\partial v_1(0)}{\partial \zeta} \right) - s K_{LT} v_1(0) \quad (24)$$

$$v_2(\gamma) = v_1(\gamma) \quad (25)$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}_1(\gamma)}{\partial \zeta} = \frac{\partial \bar{\phi}_2(\gamma)}{\partial \zeta} \quad (26)$$

$$\bar{\phi}_2(\gamma) - \bar{\phi}_1(\gamma) = -\theta \frac{\partial \bar{\phi}_2(\gamma)}{\partial \zeta} \quad (27)$$



$$\bar{\phi}_1(\gamma) + \frac{\partial v_1(\gamma)}{\partial \zeta} = \bar{\phi}_2(\gamma) + \frac{\partial v_2(\gamma)}{\partial \zeta} \quad (28)$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}_2(1)}{\partial \zeta} + K_{RR} \bar{\phi}_2(1) = 0 \quad (29)$$

$$\left( \bar{\phi}_2(1) + \frac{\partial v_2(1)}{\partial \zeta} \right) + s K_{RT} v_2(1) = 0 \quad (30)$$

Habiéndose definido las rigideces adimensionalizadas como:

$$K_{LR} = \frac{k_{LR}L}{EI}, K_{RR} = \frac{k_{RR}L}{EI}, K_{LT} = \frac{k_{LT}L^3}{EI}, K_{RT} = \frac{k_{RT}L^3}{EI}, \theta = \frac{c_m EI}{L} \quad (31)$$

En la Ecuación (27),  $\theta$  es la flexibilidad seccional de la fisura descrita en forma adimensional y depende de la extensión de la fisura según como se define y explica en la referencia [10].

Generalmente, los coeficientes de flexibilidad se expresan como un resorte a rotación o resortes de traslación y rotación, tal como en el caso del estudio de Loya et al. [9] y De Rosa y Lippiello [13]. En la literatura se han utilizado varios métodos para modelar una fisura en una viga. Entre los enfoques más comunes, el método basado en el resorte rotacional, con rigidez determinada a partir de la mecánica de fractura, parece ser muy atractivo para un componente tipo viga. Para los casos en los que la viga de Timoshenko, la grieta de borde abierto está representada por un solo resorte de rotación. La flexibilidad extensional fue despreciada por casi todos los autores ya que la misma es muy pequeña en comparación con la flexibilidad rotacional. En el presente análisis, se desprecia la influencia de la flexibilidad traslacional.

Si se considera una viga Timoshenko como en la Figura 1, con una fisura de profundidad  $a$  localizada en una abscisa adimensional  $\gamma$ , entonces la función de flexibilidad no dimensional para la sección donde se ubica la fisura se define como:

$$\theta = 6\pi\xi^2 f_j(\xi)(h/L) \quad (32)$$

En la cual  $\xi$  es la profundidad adimensional de la fisura definida como  $\xi=a/h$ , siendo  $h$  la altura de la sección transversal y la función:

$$f_j(\xi) = 0.6384 - 1.035\xi + 3.72\xi^2 - 5.1773\xi^3 + 7.553\xi^4 - 7.332\xi^5 + 2.4909\xi^6 \quad (33)$$

Es la función de flexibilidad para una grieta de borde abierto desde una superficie y expuesta a un momento de flexión. Vale la pena mencionar que se han propuesto ecuaciones similares para una grieta abierta de dos lados. Si se sustituyen las Ecuaciones (10-11) y (14) oportunamente derivadas en las condiciones de borde (23-30), se obtendrá un sistema de ocho ecuaciones en las incógnitas  $A_i$ . Para que el sistema admita una solución distinta a la trivial, el determinante de la matriz de coeficientes debe ser igualado a cero. Luego las infinitas soluciones de la ecuación característica hallada con el determinante anulado, permitirán obtener las frecuencias de vibración para la viga fisurada.



#### 4. EJEMPLOS NUMERICOS

En esta sección se muestra una validación del método analítico propuesto para investigar la influencia del parámetro de fisura. Se han realizado algunos ejemplos numéricos y los resultados obtenidos se han comparado con los de los trabajos disponibles en la literatura. Para todos los ejemplos se usan las propiedades físicas y geométricas de la Referencia [13].

##### 4.1. Viga con una fisura: comparación de resultados

En este ejemplo numérico se comparan las primeras tres frecuencias naturales de vibración flexional calculadas con el modelo de viga truncada de Timoshenko propuesto y los resultados de la Tabla 3 del artículo [13]. Así pues en la siguiente Tabla 1 se presentan comparaciones de frecuencias naturales para varias relaciones de  $L/h$  y varias condiciones de contorno. Se consideran las relaciones  $L/h$  de 3, 5, 7 y 9. A su vez para todos los casos, la relación de profundidad de fisura adimensional se supone  $\xi=0,35$  mientras que el parámetro adimensional de ubicación de la fisura se fija en  $\gamma=0.5$ . Como se puede ver en la Tabla 1, los valores calculados de las primeras tres frecuencias naturales de la viga fisurada utilizando el modelo propuesto de viga truncada de Timoshenko tienen pequeña variación con los obtenidos de la Referencia [13], alcanzando 4% de diferencia como máximo.

Tabla 1. Comparación de los resultados del presente enfoque truncado con los homónimos de la Referencia [13], para varias relaciones  $L/h$  y condiciones de borde.

Condición de borde	$L/h$	Timoshenko analítico [13]			Presente Modelo Truncado		
		$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
Simplemente Apoyada	3	6781.8	27316.2	42718.8	6751.6	26321.6	40125.5
	5	2877.3	12222.2	21006.4	2874.7	12079.3	20439.8
	7	1580.3	6803.3	12430.6	1580.0	6773.6	12278.2
	9	996.9	4293.3	8177.0	996.7	4285.1	8127.3
Apoyada Empotrada	3	10343.4	29333.0	43315.6	10265.6	28392.6	41219.1
	5	4544.2	13922.1	22439.0	4535.3	13743.7	21881.8
	7	2517.8	8010.8	13729.6	2516.14	7967.4	13621.1
	9	1590.8	5155.7	9217.4	1590.38	5142.63	9153.78
Empotrada Empotrada	3	13628.4	31009	43865.0	13482.0	30243.5	42172.0
	5	6205.3	15650.9	23599.0	6185.27	15451.0	23053.8
	7	3509.1	9335.6	14796.1	3504.9	9276.83	14601.8
	9	2243.2	6134.7	10098.1	2242.0	6114.9	10021.7
Empotrada Libre	3	3134.9	12664.4	33381.4	3131.7	12541.7	32301.4
	5	1222.9	5888.2	16504.4	1222.7	5870.16	16245.0
	7	642.9	3352.9	9683.4	642.9	3349.09	9612.9
	9	394.9	2153.2	6295.6	394.9	2151.2	6273.1



#### 4.2. Viga con una fisura: variación del parámetro de posición

En este ejemplo se analiza el caso de una viga simplemente apoyada (con  $L/h=0.3$ ) para diferentes ubicaciones de la fisura, o sea del parámetro adimensional  $\gamma$ . Así pues en la Tabla 2 se muestran las primeras tres frecuencias naturales con el parámetro  $\gamma$  variando de 0.1 a 0.5 lo cual significa que la fisura se encuentra a distancias del origen de un 10% a 50% de la longitud total de la viga, respectivamente. Como se puede apreciar en la Tabla 2, en la medida que la fisura se encuentra más cercana al centro de la viga la primera frecuencia disminuye sustancialmente en consonancia con la pérdida de rigidez estructural.

Tabla 2. Primeras tres primeras frecuencias naturales ( $f_i = \omega_i / (2\pi)$ ) para una viga Timoshenko con respecto al parámetro adimensional  $\gamma$  de posición de la fisura.

$\gamma$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
0.5	6751.60	26321.60	40125.50
0.4	6878.80	25001.90	42959.40
0.3	7266.16	23029.50	44312.70
0.2	7894.47	22268.80	41018.40
0.1	8575.90	24029.50	39869.30

#### 4.3. Viga empotrada-libre con restricciones flexibles en el extremo libre

En este ejemplo se analiza el caso de una viga con empotramiento en el extremo de origen y restricciones flexibles a translación y rotación en el extremo libre (a la derecha). Primeramente se pretende analizar como varía la respuesta de las tres primeras frecuencias adimensionales de la viga en la medida que varía la rigidez rotacional adimensional ( $K_{RR}$ ) en la extremidad derecha. Para este ejemplo se ubica la fisura en la mitad del dominio, es decir  $\gamma=0.5$ , mientras que la profundidad adimensional de la fisura tiene el siguiente valor  $\xi=0.35$ . En la Figura 2 se muestra la variación de las tres primeras frecuencias adimensionales con respecto al logaritmo base 10 (por comodidad representativa), de la rigidez del soporte elástico  $K_{RR}$ . Como se puede apreciar las tres frecuencias adimensionales aumentan su valor y convergiendo a valores estables luego de  $\text{Log}_{10}[K_{RR}] = 5$ , con lo cual se llega a una viga empotrada con un bipéndulo en el extremo libre. En particular para  $\text{Log}_{10}[K_{RR}] = 5$  se tiene que  $\Omega_1 = 22.3457$ ,  $\Omega_2 = 291.9448$  y  $\Omega_3 = 1122.5413$ .

Ahora bien, en este último ejemplo se analiza la variación de las primeras tres frecuencias adimensionales para el caso de una restricción flexible a translación en el extremo libre. Nuevamente como en el párrafo anterior  $\gamma=0.5$  y  $\xi=0.35$ . Claramente cuando  $K_{RT}=0$ , el problema se reduce al de una viga en voladizo.

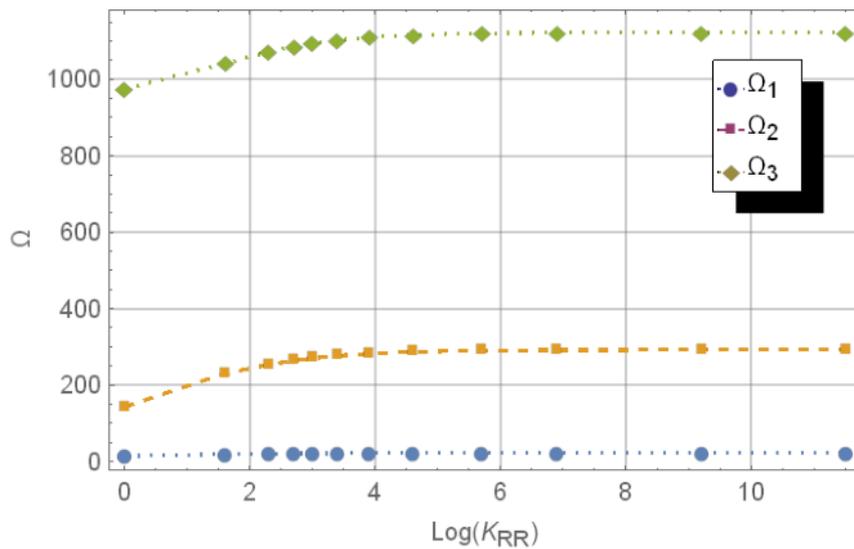


Figura 2: Primeras tres frecuencias adimensionales a medida que varía la rigidez rotacional.

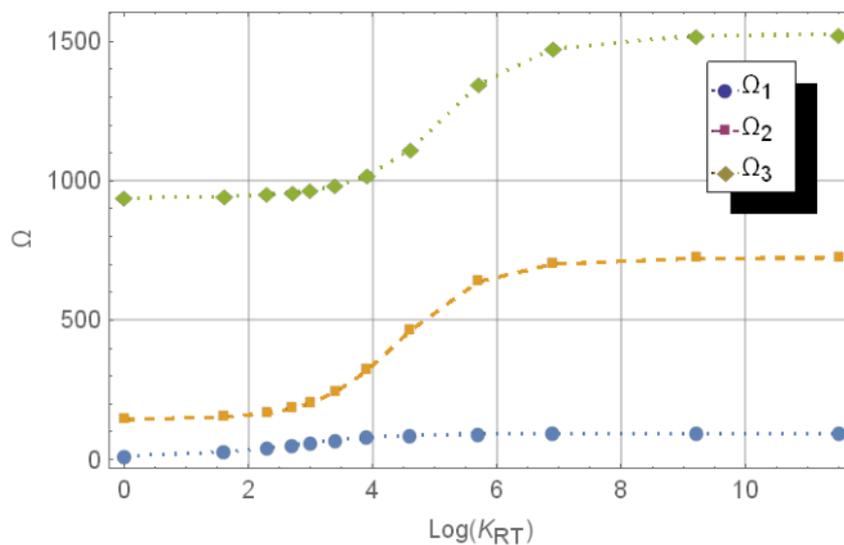


Figura 3: Primeras tres frecuencias adimensionales a medida que varía la rigidez translacional.

Así pues en la Figura 3 se muestra la variación de las tres primeras frecuencias adimensionales con respecto a la variación de la rigidez translacional, aunque nuevamente en escala logarítmica, por comodidad. Como puede apreciarse entre  $\text{Log}_{10}[K_{TR}]=4$  y  $\text{Log}_{10}[K_{TR}]=8$  se produce un cambio en la curvatura de la variación de la segunda y tercera frecuencias adimensionales, para luego estabilizarse y converger al caso de la viga empotrada apoyada cuando  $\text{Log}_{10}[K_{TR}] \rightarrow \infty$ .



## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado una viga fisurada por vibración transversal. La viga, que tiene restricciones elásticas traslacionales y rotacionales en los extremos y en condiciones de contorno de soporte simple, ha sido modelada por dos teorías de vigas diferentes, que son la teoría clásica de vigas de Timoshenko y la teoría de vigas truncadas. Se ha evaluado el efecto de la ubicación de la fisura, los coeficientes de rigidez a translación y a rotación sobre las frecuencias naturales de vibración transversal. Se muestra que la existencia de grietas reduce los valores de las frecuencias naturales y las frecuencias naturales también se ven afectadas por la ubicación de la grieta.

Se presentan resultados típicos para demostrar las cualidades del enfoque propuesto y se comparan con algunos resultados disponibles en la literatura. Se han obtenido buenos resultados. En particular, se extraen las siguientes conclusiones:

- el cambio en las frecuencias naturales depende en gran medida de las condiciones de contorno y de las relaciones longitud/profundidad de la viga;
- la grieta juega un papel clave para el comportamiento dinámico de la viga: los valores de las frecuencias naturales aumentan cuando aumentan los parámetros de rigidez transversal y rotacional adimensional en los soportes flexibles.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer el auspicio de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de la Basilicata, de la Universidad de Napoli "Federico II" y de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Tecnológica Nacional por el apoyo a través del proyecto PID 8454 TC.

## REFERENCIAS

- [1] Thatoi D., Jena P., Acharya A., Mohapatra S., Nanda J. *Analysis of the dynamic response of a cracked cantilever beam*. AICTE Sponsored National Conference on Emerging Trend & its Application in Engineering (NCETAE), 2011.
- [2] Narkis Y. *Identification of crack location in vibrating simply supported beams*. Journal of Sound and Vibration 172(4), 549-558, 1994.
- [3] Chondros T., Dimarogonas A., Yao J. *A continuous cracked beam vibration theory*. Journal of Sound and Vibration 215(1), 17-34, 1998.
- [4] Khiem N., Lien T. *A simplified method for natural frequency analysis of a multiple cracked beam*. Journal of Sound and Vibration 245 (4), 737-751, 2001.



- [5] Caddemi S, Calio I. *Exact closed-form solution for the vibration modes of the Euler- Bernoulli beam with multiple open cracks*. Journal of Sound and Vibration 327 (3), 473-489, 2009.
- [6] Khiem N., Hai T. *A closed-form solution for free vibration of beams with arbitrary number of cracks*. In Proc. of the Scientific Conference dedicated to 35th Anniversary of Vietnam Academy of Science and Technology, Vol. 1, Hanoi, Vietnam pp 30-42, 2010.
- [7] Timoshenko S. *On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars*. Philosophy Magazine 1921;41(245):744-746, 1924.
- [8] Li Q. *Vibratory characteristics of Timoshenko beams with arbitrary number of cracks*. Journal of Engineering Mechanics 129(11), 1355-1359, 2003.
- [9] Loya J., Rubio L, Fernandez-Saez J. *Natural frequencies for bending vibrations of Timoshenko cracked beams*. Journal of Sound and Vibration 290(3), 640-653, 2006.
- [10] Khaji N, Shafiei M, Jalalpour M. *Closed-form solutions for crack detection problem of Timoshenko beams with various boundary conditions*. Intl. Jou. Mech. Sci. 51, 667-681, 2009.
- [11] Elishakoff I, Hache F, Challamel N. *Critical contrasting of three versions of vibrating Bresse-Timoshenko beam with a crack*. Intl. Jou. Solids and Structures 109, 143-151, 2017.
- [12] Khiem N., Hung D. *A closed-form solution for free vibration of multiple cracked Timoshenko beam and application*. Vietnam Journal of Mechanics, 39(4), 315-328, 2017.
- [13] De Rosa M., Lippiello M. *Closed-form solutions for vibrations analysis of cracked Timoshenko beams on elastic medium: An analytical approach*. Eng. Struc. 236, 111946, 2021.
- [14] De Rosa M., Lippiello M., Elishakoff, I. *Variational Derivation of Truncated Timoshenko-Ehrenfest Beam Theory*. Journal Appl. Comput. Mech. 8(3), 996-1004, 2022.
- [15] De Rosa M., Lippiello M., Elishakoff, I. *Reduced Theories for Thick Shells*. ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Oct.30-Nov.3, 2022 Columbus, Ohio, USA, IMECE2022-96660, V005T07A003; <https://doi.org/10.1115/IMECE2022-96660>.
- [16] De Rosa, M.A., Lippiello, A. Onorato, M., Elishakoff, I. *A new theory for Timoshenko SWCNT analysis*. To appear Applied Mechanics.



## DINÁMICA DE VIGAS CURVAS CON INCLUSIÓN DE RESONADORES LOCALES EMBEBIDOS CONSIDERANDO LA INCERTIDUMBRE PARAMÉTRICA

Walter Horacio Fruccio<sup>1</sup>, Marcelo Tulio Piovan<sup>2</sup> y Rogelio Lorenzo Hecker<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Pampa. Calle 110 N°390, 6360, Gral. Pico, Pcia. de La Pampa. Argentina. [wfruccio@ing.unlpam.edu.ar](mailto:wfruccio@ing.unlpam.edu.ar)

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones de Mecánica Teórica y Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional FRBB. 11 de Abril 461, B8000LMI, Bahía Blanca, Pcia Buenos Aires. Argentina. [mpiovan@frbb.utn.edu.ar](mailto:mpiovan@frbb.utn.edu.ar)

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Pampa. Calle 110 N°390, 6360, Gral. Pico, Pcia. de La Pampa. Argentina. [hecker@ing.unlpam.edu.ar](mailto:hecker@ing.unlpam.edu.ar)

### RESUMEN

El estudio de la propagación de ondas elásticas en estructuras de materiales que poseen algún tipo de configuración periódica, ha recibido una atención significativa en los últimos años. Dichas estructuras, se conocen comúnmente como metamateriales o metaestructuras, y se caracterizan por poseer un llamativo comportamiento vibratorio, es decir, regiones de frecuencia donde se puede observar una fuerte reducción en la propagación de ondas elásticas, conocidas como bandgaps. Este fenómeno es de particular utilidad para la atenuación o reducción de fenómenos oscilatorios, o para la supresión de señales en un rango de frecuencias dado. En particular, las brechas de banda que se generan, pueden verse modificadas por la variabilidad asociada a la incertidumbre en los parámetros, o en la estructura periódica.

En este trabajo, se realiza el estudio de la incertidumbre de los parámetros, mediante el enfoque probabilístico paramétrico. Asimismo, se desarrolla un modelo de elementos finitos 1D para una viga curva periódica, con el cual se calcula la respuesta dinámica. Dicho modelo contiene resonadores locales embebidos, y al mismo tiempo contempla movimientos en el plano y permite deformaciones por cortante. Se adopta el modelo medio para los estudios probabilísticos relacionados con la propagación de la incertidumbre asociada con la variabilidad en las propiedades y la periodicidad de la estructura, así como las características de los resonadores embebidos. El modelo probabilístico se construye apelando al modelo computacional del enfoque determinista, adoptando variables aleatorias para los parámetros inciertos seleccionados. Las funciones de densidad de probabilidad de las variables aleatorias se derivan con el Principio de Máxima Entropía y el modelo estocástico se genera mediante el método de Monte Carlo, con el cual se ejecutan simulaciones con realizaciones independientes. Se evalúa la incertidumbre en los parámetros de los resonadores internos y sus consecuencias en el comportamiento dinámico estructural.

**Palabras clave:** Vigas Curvas, Metamateriales, Resonadores, Bandas de Atenuación.



## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la propagación de ondas elásticas en estructuras de materiales especiales que poseen algún tipo de periodicidad (tanto constitutiva como geométrica) han surgido como una prometedora área de investigación. Estos materiales suelen denominarse “Metamateriales” o metaestructuras, y se caracterizan por poseer propiedades materiales excepcionales [1]. Estas metaestructuras poseen un comportamiento vibratorio distintivo el cual permite la manipulación y control de las ondas elásticas de una manera muy particular, por ejemplo: la existencia de regiones de frecuencia específicas en las cuales se produce una reducción o atenuación significativa de la propagación de las ondas, conocidas como bandgaps. Estas regiones, se presentan en el dominio de las ondas mecánicas y permiten controlar y filtrar selectivamente las frecuencias de las ondas elásticas. Sin embargo, las bandgaps normalmente solo son efectivas en una región de frecuencia limitada [2].

El estudio de vibraciones de componentes estructurales o de cualquier sistema constituye un área importante para la ingeniería, debido a la amplia variedad de aplicaciones en las que se encuentran involucrados. En este contexto, las metaestructuras se pueden diseñar construyendo subunidades mecánicas en un material natural o ensamblando elementos resonantes nominalmente iguales, que están sintonizados en el rango de frecuencias deseado [2]. En particular, las vigas, sean posiblemente uno de los componentes más difundidos en la generalidad de las estructuras resistentes; especialmente, las vigas de pared delgada, por sus propiedades de rigidez y resistencia en relación con su peso.

En este trabajo se hará hincapié, en el efecto de la resonancia local como mecanismo para la generación de bandgaps. Las metaestructuras localmente resonantes, pueden ser estructuras finitas que explotan conceptos de metamateriales localmente resonantes para la atenuación de vibraciones de baja frecuencia como resultado de la formación de bandgaps [3]. Este efecto se debe a la vibración interna de las microestructuras que se comportan como absorbentes dinámicos de las ondas que se propagan por el medio. Por lo tanto, el fenómeno permite que el material sea eficaz para atenuar las vibraciones con longitudes de onda mucho más largas que el tamaño de la red y mucho mayores que el tamaño de una de las micro celdas que la componen [4].

El objetivo de este trabajo se centra en el análisis de las propiedades de atenuación de vibraciones y la propagación de la incertidumbre asociada con la variabilidad en las propiedades y la periodicidad de la estructura, para vigas curvas de paredes delgadas con sección transversal simétrica y resonadores locales embebidos. La razón de este análisis, se centra en la evaluación de la robustez y la eficacia del diseño de la viga frente a las variaciones de ciertos parámetros [5]. Para dicho análisis, se realizó un modelo computacional de elementos finitos 1D, para determinar la respuesta dinámica de una viga curva periódica. Luego, mediante un enfoque



paramétrico probabilístico [6] se crea el modelo estocástico, incorporando la incertidumbre en dos parámetros específicos y convirtiéndolos en variables aleatorias, cuyas funciones de densidad de probabilidades (PDF) se deducen del principio de máxima entropía [7]. El modelo estocástico se genera mediante el método de Monte Carlo, con el cual se ejecutan simulaciones con realizaciones independientes. A partir de estas realizaciones se presentan diferentes gráficos y se comparan los resultados a partir de la configuración de la viga con y sin resonadores locales embebidos.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Descripción de la metaestructura portante. Modelo determinístico.

Se considera una viga finita de paredes delgadas con eje curvo, de sección transversal simétrica y con resonadores embebidos masa-resorte ubicados a lo largo de la longitud de la viga en el Plano XY, como puede observarse en la Figura 1. En esta figura, se logra distinguir el sistema de referencia primario {C: X,Y,Z} el cual se encuentra ubicado en el centro geométrico de la sección transversal, donde el eje X es tangente al eje circular de la viga, mientras que los ejes {Y,Z} se tomaran como los ejes principales de inercia y pertenecen a la sección transversal de la viga. Suponemos que la viga tiene un eje curvado, con un radio constante R, que está contenido en un plano  $\pi$ . Como podemos observar el eje Y está alineado con la coordenada radial de la viga curva, y tiene un ángulo de apertura  $\beta$  y una longitud  $L=R\beta$ , como también puede observarse en la Figura 1.

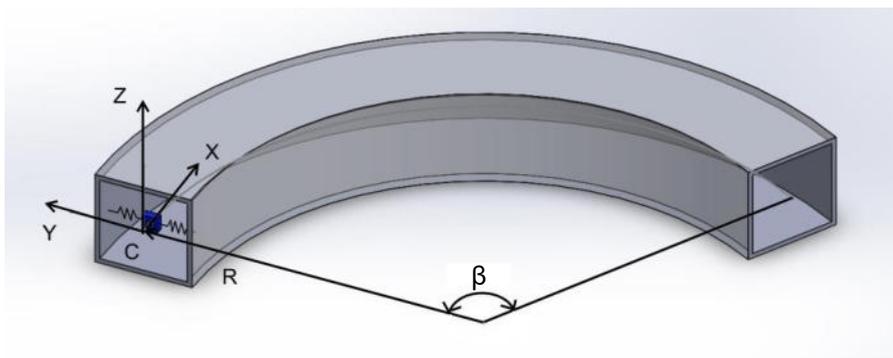


Figura 1. Viga curva de pared delgada con resonadores locales embebidos periódicamente distribuidos.

Las siguientes hipótesis se efectuaron con el propósito de desarrollar las ecuaciones de movimiento gobernantes de la metaestructura portante y de la cinemática de la misma. Bajo estas condiciones se aplicó el principio de trabajo virtual, y de esta manera se consiguió la formulación débil de las ecuaciones constitutivas que rigen la dinámica de la metaestructura. En consecuencia, se consideran las siguientes hipótesis:



A-La sección transversal de la viga curva tiene la configuración de paredes delgadas. Además, tiene simetría en los ejes (Y, Z).

B-Las propiedades del material se mantienen constantes a lo largo y ancho de la sección transversal.

C-El campo de desplazamientos tendrá los términos lineales de primer orden para su descripción.

De acuerdo al planteo realizado en este trabajo tendremos movimientos en el plano, que se interpretan contenidos en el plano de curvatura de la metaestructura. Teniendo en cuenta las hipótesis antes descritas, el campo de desplazamientos en el plano XY, tendrá las siguientes variables cinemáticas involucradas: Las variables  $u_x$  y  $u_y$  serán los desplazamientos del punto de referencia desde el centro del sistema de coordenadas principal y  $\theta_z$  es el parámetro de rotación flexional.

### 2.1.1 Ecuaciones constitutivas y campo de deformaciones.

Conforme al campo de desplazamientos y a las variables cinemáticas, se puede llegar a una expresión del principio de trabajo virtual en términos del vector desplazamiento  $U = \{u_x, \theta_z, u_y\}$  y al mismo tiempo involucrar al vector deformación y al vector de esfuerzos internos [8]. Para el análisis realizado en este trabajo, se tuvo en cuenta que el vector desplazamiento contiene los términos  $u_x$ ,  $\theta_z$  y  $u_y$ . Y para el caso del vector deformación, se tuvieron en cuenta los siguientes componentes:  $\varepsilon_{D1}$  el cual hace referencia a la deformación axial,  $\varepsilon_{D2}$  el cual hace referencia al término de flexión y  $\varepsilon_{D3}$  el cual hace referencia a la deformación por corte-flexión. Las componentes que se tuvieron en cuenta para los esfuerzos internos son las siguientes:  $Q_x$  que es la componente axial de la fuerza en la dirección X,  $M_z$  que es el momento flector en la dirección Z y  $Q_y$  que es la fuerza cortante en la dirección Y. El vector de esfuerzos internos queda determinado de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} Q_x \\ M_z \\ Q_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 \\ J_{21} & J_{22} & 0 \\ 0 & 0 & J_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{D1} \\ \varepsilon_{D2} \\ \varepsilon_{D3} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\Delta^T = \{\varepsilon_{D1}, \varepsilon_{D2}, \varepsilon_{D3}\} \quad \{Q\} = [J_E]\{\Delta\}$$

Donde  $J_E$  es la matriz constitutiva de los esfuerzos y los coeficientes  $J_{ik}$  se especifican de la siguiente manera.

$$J_{ik} = \int_A E_p D_j^T D_j F dydz \quad F = \frac{R}{R+y}$$

$$E_p = \begin{bmatrix} E & E & 0 \\ E & E & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad D_j = \begin{bmatrix} 1 & -y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$



Donde  $E$  es el módulo de elasticidad del material utilizado para la viga,  $G$  es el módulo de corte del material utilizado para la viga y  $R$  es el radio de curvatura de la viga. De la misma manera se definen las componentes del vector deformación, en función de las variables cinemáticas involucradas para el caso de análisis.

$$\varepsilon_{D1} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{u_y}{R} \quad , \quad \varepsilon_{D3} = \frac{\partial \theta_z}{\partial x} - \frac{1}{R} \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad , \quad \varepsilon_{D5} = \frac{\partial u_y}{\partial x} - \theta_z \quad (3)$$

Luego podemos realizar el planteo de la parte inercial, donde se obtiene la matriz de coeficientes de masa o inercia.

$$\tilde{\mu} = M_m \ddot{U} \quad \ddot{U}^T = \{\ddot{u}_x, \ddot{\theta}_z, \ddot{u}_y\} \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} \tilde{\mu}_1 \\ \tilde{\mu}_2 \\ \tilde{\mu}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & 0 \\ I_{21} & I_{22} & 0 \\ 0 & 0 & I_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{\theta}_z \\ \ddot{u}_y \end{Bmatrix}$$

Donde  $M_m$  es la matriz de coeficientes de inercia y los coeficientes  $I_{ik}$  se especifican de la siguiente manera.

$$I_{ik} = \int_A \rho G_m^T G_m \frac{dydz}{F} \quad G_m = \begin{bmatrix} 1 + \frac{y}{R} & -y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del material utilizado para la viga y los puntos sobre las variables cinemáticas indican la derivación temporal del desplazamiento.

Luego, se emplea el principio linealizado de trabajo virtual para obtener la formulación fuerte y en consecuencia las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento y las cuales serán utilizadas en el software de cálculo por elemento finito FlexPDE [9,10].

## 2.2. Formulación de elementos finitos.

Para resolver problemas de estática y dinámica con varias condiciones de contorno, se efectúa el estudio paramétrico del problema planteado y se emplea un elemento finito unidimensional, en base a la formulación débil de las ecuaciones que rigen la estática y dinámica de la metaestructura. Esta formulación se obtiene mediante el principio de trabajo virtual, a partir del siguiente indicador variacional.

$$\mathcal{W}_T = \delta U_d + \delta T + \delta W_P \quad (6)$$

Donde  $\delta U_d$  es el aporte energético de la energía de deformación,  $\delta T$  el aporte energético de las fuerzas inerciales y  $\delta W_P$  es el aporte energético de las fuerzas externas.



La expresión de la formulación débil de la dinámica de la metaestructura queda de la siguiente manera.

$$W_T = \int_L [Q_x \delta \epsilon_{D1} - M_z \delta \epsilon_{D2} + Q_y \delta \epsilon_{D3}] dx + \int_L \rho \ddot{U} \delta U dx + \int_L P \delta U dx = 0 \quad (7)$$

Donde P es una carga externa generalizada.

La formulación del elemento finito se obtiene mediante la discretización de la ecuación (7), donde se utilizan elementos de tres nodos y funciones de forma cuadráticas [11]. Además, cuenta con tres grados de libertad por cada nodo, ya que en el presente trabajo tenemos tres variables cinemáticas interviniendo sobre el modelo. El vector de las variables de desplazamiento se expresa de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} \bar{U}_e &= \{\bar{U}_e^{(1)}, \bar{U}_e^{(2)}, \bar{U}_e^{(3)}\} \\ \bar{U}_e^{(j)} &= \{u_{xj}, \theta_{zj}, u_{yj}\} \quad j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (8)$$

A partir de la formulación débil devenida del principio de trabajo virtual y aplicando los procedimientos variacionales convencionales [11], se obtiene la siguiente ecuación de elementos finitos.

$$KU + M\ddot{U} = F \quad (9)$$

donde K y M son las matrices globales de rigidez y masa, respectivamente; mientras que U,  $\ddot{U}$  y F son los vectores globales de desplazamientos nodales, aceleraciones nodales y fuerzas nodales, respectivamente.

Con lo cual el método de elementos finitos y la respuesta en el dominio de la frecuencia del sistema dinámico dada por la Ecuación (9), deriva en la siguiente ecuación matricial correspondiente a la dinámica del modelo.

$$\hat{U} = [K - \omega^2 M]^{-1} \hat{F} \quad (10)$$

Donde  $\hat{U}$  y  $\hat{F}$  son la transformada de Fourier del vector de desplazamiento y el vector de fuerza, respectivamente; mientras  $\omega$  es la frecuencia circular medida en [rad/seg].

Seguidamente, se involucró la dinámica de los resonadores masa-resorte, dentro del análisis del elemento finito. Teniendo en cuenta que los resonadores se ubican a lo largo del eje Y, se trabajó dentro de las ecuaciones donde tiene incidencia la variable cinemática  $u_y$ . Esto quiere decir que la parte inercial de la formulación débil antes descrita, se verá modificada por la dinámica de los N resonadores embebidos a lo largo de la viga. Para esto, se introduce un coeficiente  $\alpha$ , que es el cociente entre la masa total de los resonadores y la masa de la viga (masa distribuida). Y



de esta manera, se pueden simplificar y adecuar las ecuaciones, ya que específicamente, el tamaño del bandgap depende de la relación de masa total agregada, siempre que exista una cantidad suficiente de resonadores embebidos [3]. El coeficiente  $\alpha$ , se describe de la siguiente manera.

$$\alpha = \frac{M}{\rho A l_M} \quad (11)$$

Donde  $M$  es la masa de cada uno de los resonadores,  $l_M$  es la distancia entre los mismos a lo largo de la longitud de la viga,  $A$  es el área de la sección transversal de la estructura portante. De esta manera, al introducir la dinámica de los resonadores, y teniendo en cuenta la hipótesis que contempla un sistema viga-resonadores distribuidos continuamente e idénticamente iguales, para una cantidad de resonadores infinitos, desarrollada en [12], se obtiene una nueva matriz global de masa  $M$ , que nos deriva en una nueva ecuación matricial correspondiente a la dinámica del modelo con resonadores embebidos.

$$\hat{U} = \left[ K - \omega^2 \hat{M} \right]^{-1} \hat{F} \quad (12)$$

Por último, con el objetivo de validar el elemento finito 1D desarrollado, se efectúan una serie de estudios comparativos entre los resultados obtenidos con el modelo computacional desarrollado en el software MATLAB [13] y mediante el cálculo realizado en el software FlexPDE. En este sentido, se realizó una comparación de los valores de desplazamiento en condiciones estáticas para cuatro condiciones de contorno diferentes. Las cuales son: 1-Empotrado-Empotrado, 2-Empotrado-Apoyado, 3-Apoyado-Apoyado y por último 4-Empotrado-Libre. Esta comparación obtuvo resultados aceptables, con los cuales se obtuvo una primera comparación del elemento finito 1D desarrollado.

Luego, con el propósito de validar un número de elementos para el modelo 1D, y garantizar la obtención de resultados aceptables, se realizó una comparación de los valores de las frecuencias naturales obtenidas mediante el modelo computacional de MATLAB y con el cálculo mediante el software FlexPDE. Obteniendo de dicha comparación, que utilizando 30 elementos alcanza para demostrar que este número es suficiente para garantizar una precisión superior al 98% hasta la octava frecuencia natural. Con lo cual, las simulaciones en MATLAB se realizarán con 30 elementos.

### 2.3. Modelo estocástico.

El modelo estocástico se construye a partir de la formulación de elementos finitos del modelo determinístico, seleccionando dos parámetros inciertos y asociándoles variables aleatorias.

Para este trabajo, las variables aleatorias serán  $\alpha$  y  $E$ . La construcción de las PDF de las variables aleatorias es bastante sensible en el análisis estocástico y deben deducirse de acuerdo



con la información dada sobre los parámetros inciertos. Se utiliza el principio de máxima entropía para obtener las PDF, ya que ofrece una estrategia consistente y garantiza consistencia con la información disponible [6].

Las variables aleatorias  $V_i$  con  $i=1,2$ , se consideran acotadas, cuyos valores límites son conocidos. En este sentido, se asume que el valor medio o valor esperado de las mismas coincide con el valor nominal determinístico de cada uno de los parámetros seleccionados  $E\{V_i\} = \underline{V}_i$   $i=1,2$ , con el fin de chequear la convergencia. Además, podemos asumir que, al no existir dependencia entre las variables, se toman de forma independiente.

De lo anterior, las PDF de las variables pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$p_{V_i}(v_i) = S[\mathcal{L}_{V_i}, \mathcal{U}_{V_i}](v_i) \frac{1}{\mathcal{U}_{V_i} - \mathcal{L}_{V_i}} = S[\mathcal{L}_{V_i}, \mathcal{U}_{V_i}](v_i) \frac{1}{2\sqrt{3}\underline{V}_i\delta_{v_i}}, \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

Donde  $S_{[\mathcal{L}_{V_i}, \mathcal{U}_{V_i}]}(v_i)$  es el soporte,  $\mathcal{L}_{V_i}$  y  $\mathcal{U}_{V_i}$  son las cotas inferior y superior,  $\underline{V}_i$  es el valor esperado y  $\delta_{v_i}$  es el coeficiente de variación, todos pertenecientes a la variable  $V_i$ . Luego, es utilizada la distribución uniforme, ya que para el estudio de este trabajo se puede obtener el máximo de entropía. En consecuencia y mediante la función de Matlab *unifrnd*( $\underline{V}_i(1-\delta_{v_i}\sqrt{3})$ ,  $\underline{V}_i(1+\delta_{v_i}\sqrt{3})$ ), se generan las realizaciones correspondientes para las variables aleatorias  $V_i$ ,  $i = 1, 2$ .

Por ende, y mediante el modelo de elementos finitos de la Ecuación (10) y (12), a través del método de Monte Carlo, con las PDF definidas en la Ecuación (13) el modelo estocástico puede definirse mediante la siguiente expresión.

$$\hat{U}(\omega) = [K - \omega^2 M]^{-1} \hat{F} \quad (14)$$

donde la tipografía diferenciada indica que las entidades son estocásticas.

Para simular la dinámica estocástica se utiliza el método de Monte Carlo, lo que implica el cálculo de un sistema determinista para cada realización de variables aleatorias  $V_i$ ,  $i=1,2$ . La convergencia de la respuesta estocástica  $\hat{U}$  es analizada bajo un criterio de media cuadrática apelando a la siguiente función.

$$conv(N_{MS}) = \sqrt{\frac{1}{N_{MS}} \sum_{j=1}^{N_{MS}} \int_{\Omega} \|\hat{U}_j(\omega) - \hat{U}(\omega)\|^2 d\omega} \quad (15)$$

Donde  $N_{MS}$  es el número de muestreos de Monte Carlo y  $\Omega$  es la banda de frecuencia de análisis.  $\hat{U}$  es la respuesta del modelo estocástico y  $\hat{U}$  la respuesta del modelo medio o modelo determinista.

### 3. RESULTADOS

El uso práctico de vigas de metamaterial es la atenuación de amplitudes de vibración en comparación con la estructura original sin resonadores. En este sentido, se desarrolló un modelo computacional de elementos finitos 1D en el software MATLAB, para de esta manera obtener la solución de la respuesta dinámica de la viga curva con y sin resonadores embebidos distribuidos. Para los casos analizados se seleccionaron frecuencias de los primeros modos de vibración, que caen en el rango de bajas frecuencias. Teniendo en cuenta esta selección y para atenuar la respuesta a una frecuencia específica  $\omega_r$  del sistema original (usualmente coincidente con alguna de sus frecuencias naturales), la frecuencia local del resonador debe ser elegida ligeramente menor (por ejemplo,  $\omega_M=0.9\omega_r$ ) [4,14]. Esto es debido a la extracción de energía cinética por parte de la masa del resonador embebido. Ya que si la frecuencia del sistema original es cercana a la frecuencia de resonancia local la atenuación puede ser significativa [15].

### 3.1. Respuesta dinámica de la metaestructura.

Se ejecutó el análisis bajo una respuesta dinámica o vibración transversal, para una carga puntual ubicada en el centro de la viga, que excita a varios modos de vibración en la dirección del eje Y. Los datos más relevantes de la viga curva para la ejecución de los cálculos son los siguientes:  $R=2$  m,  $\beta=\pi/2$ ,  $E=2.11e11$  Pa,  $G=8.07e10$  Pa,  $\rho=7500$  kg/m<sup>3</sup>,  $\alpha=0,4$ . La viga curva de paredes delgadas, tiene una sección transversal cuadrada, con las siguientes dimensiones:  $b=h=0,1$  m y el espesor de la pared es  $t=0,006$  m. La amplitud de la carga puntual es  $F=1000$  N. A continuación, se mostrará la respuesta dinámica para dos condiciones de contorno seleccionadas y para el caso de la viga sin resonadores y con la inclusión de los resonadores embebidos y distribuidos a lo largo de la viga. Para el caso de viga Empotrada-Empotrada la frecuencia natural seleccionada es  $f=290,43$  Hz.

La Figura 2 muestra la respuesta dinámica de la solución del elemento finito 1D, para una viga curva con la condición de empotramiento en ambos extremos, con una carga puntual aplicada en el centro de la viga.

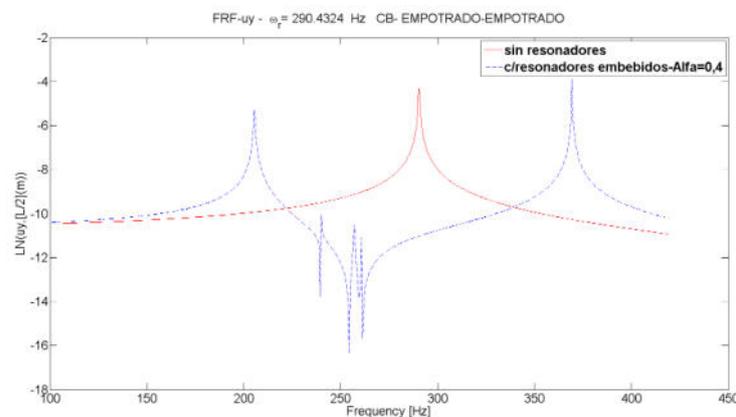


Figura 2. Respuesta dinámica de una viga curva empotrada en ambos extremos.

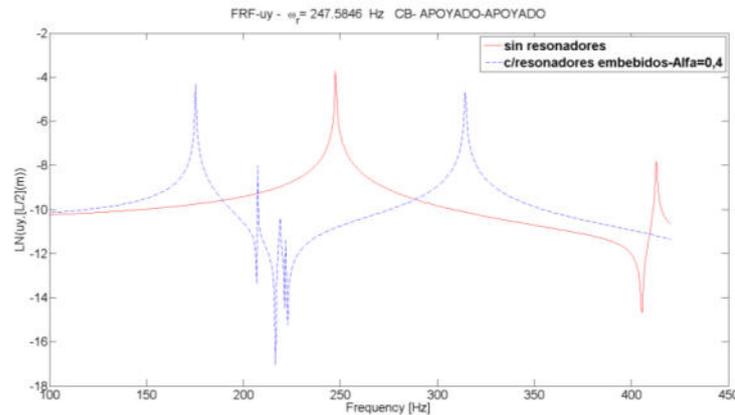


Figura 3. Respuesta dinámica de una viga curva apoyada en ambos extremos.

Se puede ver que se genera una banda de atenuación o bandgap, en el sector comprendido en la vecindad del valor de la frecuencia original seleccionada, anulando esta frecuencia específica. La Figura 3 muestra la respuesta dinámica de la solución del elemento finito 1D, para una viga curva con la condición apoyada en ambos extremos, con una carga puntual aplicada en el centro de la viga. La frecuencia natural seleccionada es  $f=247,58$  Hz.

### 3.2. Cuantificación de incertidumbre en la respuesta dinámica.

Se realizó el análisis de la propagación de la incertidumbre en el valor de las dos variables aleatorias seleccionadas hacia la respuesta dinámica del modelo. En este trabajo, se considera que las dos variables consideradas como inciertas tienen el mismo coeficiente de variación. El valor esperado para la variable  $\alpha$  será 0,4 y para E es  $2.11e11$ . Luego con estos datos y seleccionando 1000 como número de muestras a utilizar, se realizan las realizaciones de Monte Carlo y de esta manera se obtienen los gráficos de convergencia e incertidumbre. En la Figura 4 se puede observar como la realización converge de manera estable a partir de las 800 iteraciones, para un coeficiente de variación  $\delta v_i=0,01$ ,  $\delta v_i=0,02$  y  $\delta v_i=0,05$ .

En la Figura 5 se muestra la respuesta del modelo, para el caso de una viga empotrada en ambos extremos, donde puede apreciarse como la incertidumbre de los parámetros se propaga únicamente hacia la zona donde se genera la banda de atenuación, aumentando la dispersión con el aumento de incertidumbre paramétrica.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un modelo de viga curva de paredes delgadas en el plano XY, para el análisis de atenuación de vibraciones y la propagación de incertidumbre en ciertos parámetros. Asimismo, se han efectuado estudios sobre la evaluación de la eficacia del diseño de la viga frente a la variación de dos variables aleatorias en el modelo estocástico y mediante la incorporación de resonadores embebidos, a lo largo del eje Y, en vigas curvas de paredes delgadas con sección transversal simétrica, y sobre distintas configuraciones de las condiciones

de contorno, para el modelo computacional desarrollado. Para esto, se realizó la evaluación de la robustez del elemento finito 1D desarrollado, apelando a la comparación y

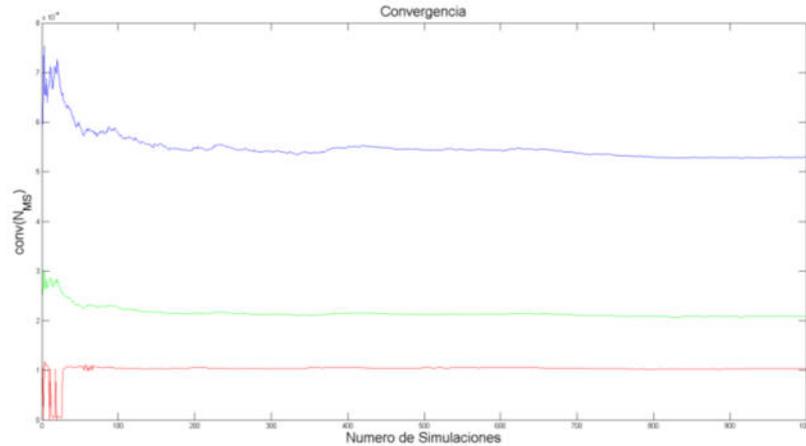


Figura 4. Convergencia para  $\delta v_i=0,01$  (Rojo),  $\delta v_i=0,02$  (Verde) y  $\delta v_i=0,05$  (Azul).

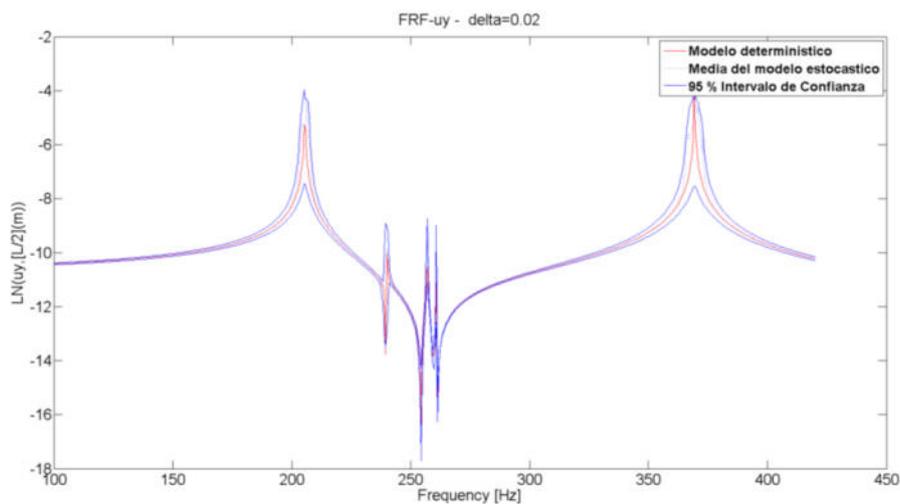


Figura 5. Respuesta del modelo estocástico para  $\delta v_i=0,02$ .

demostrando que, con el mismo, se obtienen resultados más que aceptables frente a la resolución del modelo en un software de elementos finitos. En consecuencia, y teniendo en cuenta los gráficos de la respuesta dinámica del apartado resultados, se puede indicar que, mediante la incorporación de los resonadores locales embebidos dentro de la viga curva, se consiguió una banda de atenuación en la cual desaparece la frecuencia del sistema original. Finalmente se realizó el estudio de la incertidumbre, cuyos resultados mostraron una gran sensibilidad de la respuesta a variaciones en los valores seleccionados como parámetros inciertos. A pesar de la incertidumbre en los dos parámetros seleccionados, se puede ver que el bandgap, más allá de la dispersión generada, se mantiene en un rango deseable y garantiza la atenuación de la amplitud para la frecuencia seleccionada.



## REFERENCIAS

- [1] Tan KT, Huang HH, Sun CT. Blast-wave impact mitigation using negative effective mass density concept of elastic metamaterials. *Int J Impact Eng* [Internet]. 2013;64:20–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.09.003>.
- [2] L. Sangiuliano, C. Claeys, E. Deckers, and W. Desmet, “Influence of boundary conditions on the stop band effect in finite locally resonant metamaterial beams,” *J. Sound Vib.*, vol. 473, p. 115225, 2020, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115225.
- [3] C. Sugino, M. Ruzzene, and A. Erturk, “Merging mechanical and electromechanical bandgaps in locally resonant metamaterials and metastructures,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 116, pp. 323–333, 2018, doi: 10.1016/j.jmps.2018.04.005.
- [4] Victor H. Cortinez, Patricia N. Dominguez, Bandas de atenuación de vibraciones flexo-torsionales en vigas localmente resonantes. ENIEF2019; Vol. XXXVII: Pages5–7.
- [5] M. T. Piovan, J. M. Ramirez, and R. Sampaio, “Dynamics of thin-walled composite beams: Analysis of parametric uncertainties,” *Compos. Struct.*, vol. 105, pp. 14–28, 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.04.039.
- [6] R. Sampaio and E. Cataldo, “Comparing two strategies to model uncertainties in structural dynamics,” *Shock Vib.*, vol. 17, no. 2, pp. 171–186, 2010, doi: 10.3233/SAV-2010-0505.
- [7] L. E. Di Giorgio and M. T. Piovan, “Análisis de la pérdida de sintonía en metaestructura piezoeléctrica curva mediante enfoque probabilístico paramétrico,” *Mecánica Comput.*, vol. XXXVIII, pp. 521–530, 2021.
- [8] Piovan MT, Domini S, Ramirez JM. In-plane and out-of-plane dynamics and buckling of functionally graded circular curved beams. *ComposStruct.*2012; 94(11):3194–206.
- [9] Manual FlexPDE®. Version 7.18. Copyright © PDE Solutions Inc., 2019.
- [10] Fruccio W, Hecker R, Piovan M.T. Dinámica en el plano de vigas curvas con inclusión de resonadores locales embebidos. XXVII JAIE; Memorias XXVII JAIE: Page 38.
- [11] M. T. Piovan and V. H. Cortínez, “Mechanics of shear deformable thin-walled beams made of composite materials,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, no. 1, pp. 37–62, 2007, doi: 10.1016/j.tws.2006.12.001.
- [12] Sugino, C., Leadenham, S., Ruzzene, M. y Erturk, A. On the mechanism of bandgap formation in locally resonant finite elastic metamaterials, *Journal of Applied Physics* 120, 134501, 2016.
- [13] MATLAB R2011. The MathWorks Inc., Natick Massachusetts, 2011.
- [14] Sugino C, Xia Y, Leadenham S, RuzzeneM, Erturk A. A general theory for bandgap estimation in locally resonant metastructures. *J SoundVib* [Internet]. 2017;406:104–23. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2017.06.004>.
- [15] Cveticanin, L. y Mester, G. Theory of Acoustic Metamaterials and Metamaterial beams: an overview, *Acta PolytechnicaHungarica* 13 (7),2016.



## PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN EN EL PROCESO DE DISEÑO DE PERFILES C DE PARED DELGADA.

Angel F. Queizan <sup>1</sup>, Edson Gaston Montaña Bautista <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional – Regional La Plata – Grupo Gih. Calle 60 y 124 s/n, La Plata, Buenos Aires, Argentina – [dalqueisa@gmail.com](mailto:dalqueisa@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidad Privada del Valle – Coordinador del Departamento Académico de Electromecánica. Calle Tiquipaya s/n, Tiquipaya, Cochabamba, Bolivia – [mbautistaedson@gmail.com](mailto:mbautistaedson@gmail.com)

### RESUMEN

Los perfiles en C cuando son sometidos a cargas aplicadas en el plano paralelo al alma no presentan únicamente esfuerzos de flexión simple, ello debido a que este plano de carga no pasa por el centro de corte, que se encuentra alejado tanto del baricentro como del otro lado de la boca del perfil. Este fenómeno provoca que en el mismo se genere un esfuerzo de torsión junto con un estado flexional teniendo como resultado giros de las secciones en torno al centro de corte.

El presente trabajo se enfoca en el estudio de perfiles de pared delgada, proponiendo diversas hipótesis de tensiones de corte uniformes en el espesor.

Con el objetivo de reducir este fenómeno adicional de torsión, se aplicaron técnicas de optimización numérica en cuatro análisis específicos que permitieron por un lado desplazar puntos del alma y por otro aproximar el centro de corte ambos procedimientos direccionados hacia el baricentro. Los resultados obtenidos fueron adecuados, de igual manera se establecieron restricciones en desigualdad que garanticen el cumplimiento de las normas, estándares y reglamentos zonales.

**Palabras clave:** Centro de corte; Baricentro; Perfil C de pared delgada; Optimización.



## 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de optimización matemática en diseño estructural permite obtener soluciones óptimas de acuerdo con criterios establecidos y verificando las restricciones planteadas [1].

El diseño de estructuras está relacionado a dos aspectos fundamentales: el modelo estructural por el que se obtiene la respuesta del sistema y las técnicas de optimización [2].

La teoría de optimización engloba un conjunto de resultados matemáticos y métodos numéricos, orientados a la búsqueda e identificación de las mejores variantes de innumerables alternativas, lo que permite realizar una búsqueda completa y evaluación de todas las variantes posibles. La efectividad de los métodos de optimización está relacionada con el uso de esquemas de cálculos iterativos en base a procesos lógicos y algoritmos, además del empleo de técnicas de cálculo computarizado [3].

Los perfiles de pared delgada tienen la característica de que su espesor es menor a las dimensiones generales de la sección. Como regla se puede considerar la pared delgada a un perfil cuyo espesor sea como máximo diez veces menor a la longitud del mayor elemento de placa que compone la sección, esta característica hace que generalmente al estar sometidos a esfuerzos de compresión o flexión excesivos presenten un modo de falla de pandeo [4].

Los perfiles de pared delgada tienen la ventaja de ser ligeros, resistentes y económicos, pero también presentan algunos desafíos para su análisis y diseño, como el cálculo de solicitaciones internas y las tensiones que se producen cuando son sometidos a cargas externas [5].

Cuando un perfil de pared delgada está sometido a una fuerza cortante, se genera un momento torsor que depende de la posición de la fuerza cortante respecto al centro de corte del perfil, que geométricamente es un punto situado en el plano de la sección transversal del perfil tal que cualquier fuerza cortante que pase por el mismo no producirá momento torsor en la sección. El centro de corte por lo general no coincide con el baricentro, especialmente en perfiles asimétricos o abiertos, tal como indica el análisis de cargas en perfiles bajo condiciones de simetría y asimetría de [6].

El baricentro o centro de gravedad de una sección transversal es el punto donde se puede considerar que está aplicada toda la fuerza resultante del peso propio del perfil y se puede determinar mediante el cálculo de momento estático o primer momento de área de la sección respecto a un eje arbitrario [7].

Si la sección tiene un eje de simetría, el centro de corte está situado sobre ese eje. Si la sección tiene dos ejes de simetría, el centro de corte coincide con el baricentro. En estos casos, la flexión y la torsión están desacoplados y no hay momento torsor debido a la fuerza cortante. Sin embargo, en secciones asimétricas o abiertas, el centro de corte puede estar desplazado

respecto al baricentro y la fuerza cortante puede generar un momento torsor adicional al momento flector.

El objetivo de este artículo es proponer una alternativa de diseño en estructuras de perfiles en C de pared delgada, mediante optimización numérica para lograr, por un lado, desplazar puntos del alma y por otro aproximar el centro de corte, ambos procesos direccionados hacia el baricentro.

## 2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ANÁLISIS ESTÁTICO DEL PERFIL C

El estudio se realiza tomando como referencia media sección del perfil tal como muestra la Figura 1a y el análisis de los parámetros geométricos de un tramo AB para el cálculo de los momentos de inercia de segundo orden respecto a ejes rotados, como muestra la Figura 1b. Este último se considera como el punto de partida del estudio.

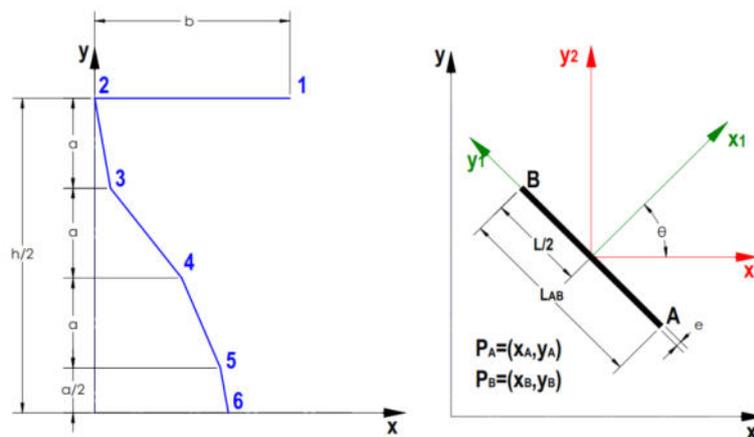


Figura 1: Media sección del perfil (a) y parámetros geométricos de un tramo AB (b)

### 2.1. Cálculo de la coordenada "x" del baricentro del perfil total.

Los puntos que definen media sección del perfil según la Figura 1a son:

$$P_1 = \left( b; \frac{h}{2} \right)$$

$$P_2 = \left( 0; \frac{h}{2} \right)$$

$$P_3 = \left( x_1; \frac{5}{14}h \right)$$

$$P_4 = \left( x_2; \frac{3}{14}h \right)$$

$$P_5 = \left( x_3; \frac{h}{14} \right)$$

$$P_6 = (x_4; 0)$$

#### Datos.

e = espesor de la chapa

h = altura del perfil

b = ancho del ala

n = cantidad de puntos que definen medio perfil = 6

$x_1$  = coordenada x del punto  $P_3$

$x_2$  = coordenada x del punto  $P_4$

$x_3$  = coordenada x del punto  $P_5$

$x_4$  = coordenada x del punto  $P_6$



Las variables de diseño fueron definidas como:

$$\begin{aligned} x_p(1) = b \rightarrow y_p(1) = \frac{h}{2} & \quad x_p(3) = x_1 \rightarrow y_p(3) = \frac{5}{14}h & \quad x_p(5) = x_3 \rightarrow y_p(5) = \frac{h}{14} \\ x_p(2) = 0 \rightarrow y_p(2) = \frac{h}{2} & \quad x_p(4) = x_2 \rightarrow y_p(4) = \frac{3}{14}h & \quad x_p(6) = x_4 \rightarrow y_p(6) = 0 \end{aligned}$$

## 2.2. Momento estático total del perfil respecto al eje "y"

$$M_{\text{TOTAL-y}} = \frac{e}{2} \sum_{i=1}^5 \frac{x_p(i+1) + x_p(i)}{2} \sqrt{[x_p(i+1) - x_p(i)]^2 + [y_p(i) - y_p(i+1)]^2} \quad (1)$$

$$\text{Area}_{\text{TOTAL}} = e \sum_{i=1}^5 \sqrt{[x_p(i+1) - x_p(i)]^2 + [y_p(i) - y_p(i+1)]^2} \quad (2)$$

Coordenada "x" del baricentro total.

$$x_{L-\text{TOTAL}} = \frac{M_{\text{TOTAL-y}}}{\text{Area}_{\text{TOTAL}}} \quad (3)$$

## 2.3. Momento de inercia total del perfil respecto al eje "x"

$$I_x = 2 \sum_{i=1}^5 \left[ \frac{e^3 [x_p(i+1) - x_p(i)]^2}{12 \sqrt{[x_p(i+1) - x_p(i)]^2 + [y_p(i) - y_p(i+1)]^2}} + \frac{e [y_p(i) - y_p(i+1)]^2 \sqrt{[x_p(i+1) - x_p(i)]^2 + [y_p(i) - y_p(i+1)]^2}}{3} \right] \quad (4)$$

## 2.4. Cálculo de las tensiones y fuerzas resultantes.

El cálculo de tensiones y fuerzas resultantes se determinan según el diagrama de las Figuras 2a y 2b y el sistema de referencia que se muestra.

Según el Teorema de Collignon-Jourawski que denota:

$$\tau_{xz} = \frac{Q}{eI_x} \int_0^u y \, dA \quad (5)$$

Las fuerzas resultantes para cada tramo vienen definidas por:

$$R_{AB} = \int_0^{A_0} \tau \, dA = \int_0^1 \tau(u) e \, du = e \int_0^1 \tau(u) \, du \quad (6)$$

Utilizando la regla de Simpson simple [8]:

$$\int_0^1 \tau(u) \, du \cong \frac{h}{3} \left[ \tau_{(u=0)} + 4\tau_{(u=\frac{1}{2})} + \tau_{(u=1)} \right] \quad (7)$$

Por tanto, reemplazando la Ecuación (7) en (6) la fuerza resultante será:

$$R_{AB} = \int_0^{A_0} \tau \, dA = \int_0^1 \tau(u) e \, du = e \int_0^1 \tau(u) \, du \cong \frac{e l}{6} \left[ \tau_{(\lambda=0)} + 4\tau_{(\lambda=\frac{1}{2})} + \tau_{(\lambda=1)} \right] \quad (8)$$

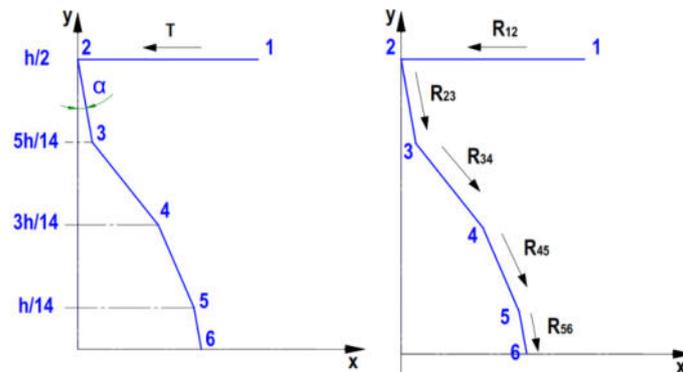


Figura 2: Tensiones (a) y fuerzas resultantes (b) de media sección del perfil.

De las Ecuaciones (5) y (8), se obtienen las siguientes relaciones de tensión y fuerzas resultantes en cada tramo.

#### Tramo 1–2

$$\tau_1 = 0 \quad (9)$$

$$\tau_2 = \frac{Q h b}{2I_z} \quad (10)$$

$$R_{12} = \frac{Q h e b^2}{4I_z} \quad (11)$$

#### Tramo 2–3

$$\tau_{2-3} = \frac{Q h}{I_z} \left[ \frac{13}{56} \sqrt{x_1^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{b}{2}} \right] \quad (12)$$

$$\tau_3 = \frac{Q h}{I_z} \left[ \frac{3}{7} \sqrt{x_1^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{b}{2}} \right] \quad (13)$$

$$R_{23} = \frac{e I_{23}}{6} [\tau_2 + 4\tau_{23} + \tau_3] \quad (14)$$

#### Tramo 3–4

$$\tau_{3-4} = \frac{Q h}{I_z} \left[ \frac{9}{56} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{3}{7} \sqrt{x_1^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{b}{2}} \right] \quad (15)$$

$$\tau_4 = \frac{Q h}{I_z} \left[ \frac{2}{7} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{3}{7} \sqrt{x_1^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{b}{2}} \right] \quad (16)$$

$$R_{34} = \frac{e I_{34}}{6} [\tau_3 + 4\tau_{34} + \tau_4] \quad (17)$$

#### Tramo 4–5

$$\tau_{4-5} = \frac{Q h}{I_z} \left[ \frac{5}{56} \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{2}{7} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{3}{7} \sqrt{x_1^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{b}{2}} \right] \quad (18)$$



$$\tau_5 = \frac{Qh}{I_z} \left[ \frac{1}{7} \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + \frac{h^2}{49}} + \frac{2}{7} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + \frac{h^2}{49}} + \frac{3}{7} \sqrt{x_1^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{b}{2}} \right] \quad (19)$$

$$R_{45} = \frac{e l_{45}}{6} [\tau_4 + 4\tau_{45} + \tau_5] \quad (20)$$

### Tramo 5-6

$$\tau_{5-6} = \frac{Qh}{I_z} \left[ \frac{3}{112} \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + \frac{h^2}{196}} + \frac{1}{7} \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + \frac{h^2}{49}} + \frac{2}{7} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + \frac{h^2}{49}} + \frac{3}{7} \sqrt{x_1^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{b}{2}} \right] \quad (21)$$

$$\tau_6 = \frac{Qh}{I_z} \left[ \frac{1}{28} \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + \frac{h^2}{196}} + \frac{1}{7} \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + \frac{h^2}{49}} + \frac{2}{7} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + \frac{h^2}{49}} + \frac{3}{7} \sqrt{x_1^2 + \frac{h^2}{49} + \frac{b}{2}} \right] \quad (22)$$

$$R_{56} = \frac{e l_{56}}{6} [\tau_5 + 4\tau_{56} + \tau_6] \quad (23)$$

Realizando el análisis de fuerzas y momentos considerando las expresiones de las Ecuaciones (9) a la (23) se tiene que el momento torsor estará dado por la siguiente expresión:

$$M_t = 2 \left[ R_{12} * \frac{h}{2} - R_{23-y} * x_{23.m} - R_{34-y} * x_{34.m} - R_{45-y} * x_{45.m} - R_{56-y} * x_{56.m} \right] \quad (24)$$

Por tanto, la distancia de corte será:

$$d_{\text{corte}} = \frac{M_t}{Q} \quad (25)$$

### 3. OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA Y SIMULACIÓN.

La optimización se realizó bajo cuatro escenarios, cada uno con parámetros definidos y establecidos tomando como referencia lo descrito en [9-11], obteniendo los siguientes resultados.

**3.1. Análisis 1.** Se requiere que el baricentro esté a la derecha del centro de corte a una distancia de 1 [cm] ( $d_1 = 1$  [cm]).

Se toma como función objetivo:

$$F(x) = 1000(x_g + x_c - d_1)^2 \quad (26)$$

Para el análisis se tomaron cuatro configuraciones iniciales del perfil distintas, lo que se espera es llegar a perfiles óptimos iguales. Los resultados de la simulación para cada caso se muestran en las Tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Coordenadas para cada caso del perfil inicial. Análisis 1.

CASO	PERFIL INICIAL			
	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
Caso (1)	0.00	0.00	0.00	0.00
Caso (2)	0.50	0.50	0.50	0.50
Caso (3)	0.75	1.00	1.50	2.00
Caso (4)	2.00	1.00	1.00	2.00



Tabla 2. Coordenadas para cada caso del perfil final. Análisis 1.

CASO	PERFIL FINAL			
	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
Caso (1)	2.681239587010033	3.526043525559004	4.048732617328146	4.538149906261376
Caso (2)	2.665346594701290	3.544568856231911	4.048717162548071	4.521341742571845
Caso (3)	2.685368966077222	3.519229920287637	4.050872100177124	4.538826504520218
Caso (4)	2.686617994057866	3.519338812488139	4.049459072968412	4.549213566628509

Tabla 3. Baricentro y centro de corte del perfil inicial y final. Análisis 1.

CASO	PERFIL INICIAL		PERFIL FINAL	
	Baricentro	Centro de corte	Baricentro	Centro de corte
Caso (1)	1.000000000000000	1.666563792358496	2.667368994620990	1.667368989985485
Caso (2)	1.252526402930656	1.213935728745815	2.666832410601701	1.666832402806192
Caso (3)	1.565806167118058	0.615706923780785	2.667078013868937	1.667078009245463
Caso (4)	1.677137489097850	0.303756715625868	2.668050084965312	1.668050082976703

Observando los resultados de las coordenadas "x" obtenidas en el perfil final y según las Figuras 3 y 4 se denota que:

- Los diseños finales son idénticos.
- Las coordenadas "x" de los perfiles finales son coincidentes hasta el primer decimal.
- Las coordenadas de los baricentros de los perfiles finales son coincidentes hasta el primer decimal.
- Las coordenadas de los centros de corte de los perfiles finales son coincidentes hasta el primer decimal.

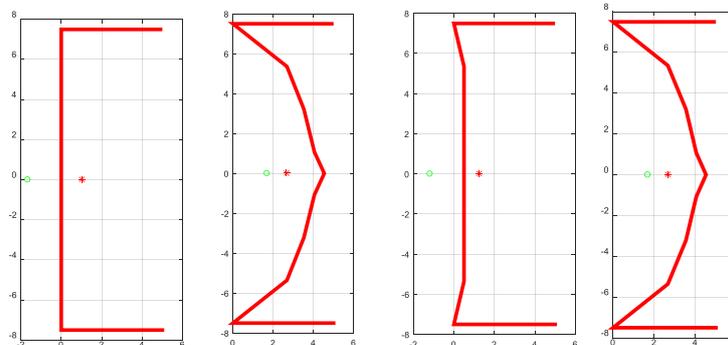


Figura 3: Perfil inicial (a) y final (b) caso 1. Perfil inicial (c) y final (d) caso 2. Análisis 1.

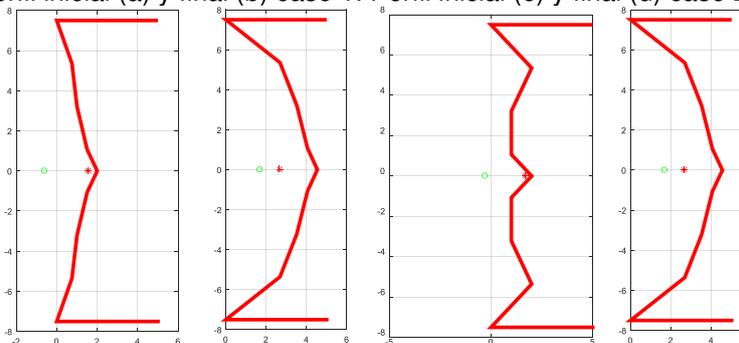


Figura 4: Perfil inicial (a) y final (b) caso 3. Perfil inicial (c) y final (d) caso 4. Análisis 1.



**3.2. Análisis 2.** Se requiere que el baricentro esté a la derecha del centro de corte a una distancia de 1 [cm] ( $d_1 = 1$  [cm]).

Se toma como función objetivo:

$$F(x) = 10000(x_g + x_c - d_1)^2 \quad (27)$$

Para el análisis se tomaron cuatro configuraciones iniciales del perfil distintas, lo que se espera es llegar a perfiles óptimos iguales. Los resultados de la simulación para cada caso se muestran en las Tablas 4, 5 y 6.

Tabla 4. Coordenadas para cada caso del perfil inicial. Análisis 2.

CASO	PERFIL INICIAL			
	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
Caso (1)	0.00	0.00	0.00	0.00
Caso (2)	0.50	0.50	0.50	0.50
Caso (3)	0.75	1.00	1.50	2.00
Caso (4)	2.00	1.00	1.00	2.00

Tabla 5. Coordenadas para cada caso del perfil final. Análisis 2.

CASO	PERFIL FINAL			
	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
Caso (1)	2.695213785887275	3.513252077683319	4.044371868432738	4.538468398988792
Caso (2)	2.697563191106314	3.509969662564636	4.045020703252756	4.541819558038209
Caso (3)	2.689222253876583	3.516273487148049	4.049268959867840	4.545617431619609
Caso (4)	2.688180078311604	3.516963797634853	4.049940910296921	4.546973749696591

Tabla 6. Baricentro y centro de corte del perfil inicial y final. Análisis 2.

CASO	PERFIL INICIAL		PERFIL FINAL	
	Baricentro	Centro de corte	Baricentro	Centro de corte
Caso (1)	1.000000000000000	1.666563792358496	2.666717902110442	1.666717898867090
Caso (2)	1.252526402930656	1.213935728745815	2.666861417634157	1.666861415459852
Caso (3)	1.565806167118058	0.615706923780785	2.667551714954067	1.667551712810598
Caso (4)	1.677137489097850	0.303756715625868	2.667715993887759	1.667715992530469

Observando los resultados de las coordenadas "x" obtenidas en el perfil final y según las Figuras 5 y 6 se denota que:

- Los diseños finales son idénticos.
- Las coordenadas "x" de los perfiles finales son coincidentes hasta el segundo decimal.
- Las coordenadas de los baricentros de los perfiles finales son coincidentes hasta el segundo decimal.
- Las coordenadas de los centros de corte de los perfiles finales son coincidentes hasta el segundo decimal.

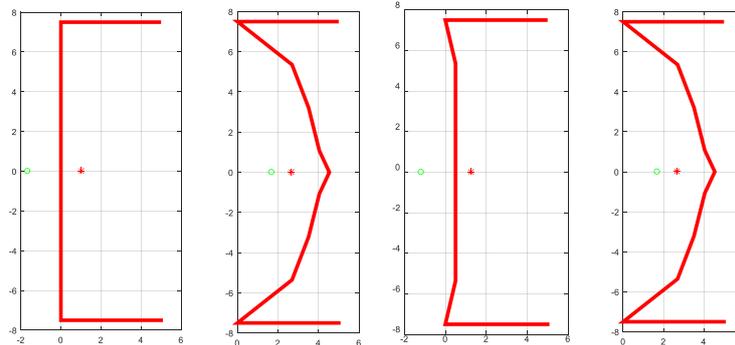


Figura 5: Perfil inicial (a) y final (b) caso 1. Perfil inicial (c) y final (d) caso 2. Análisis 2.

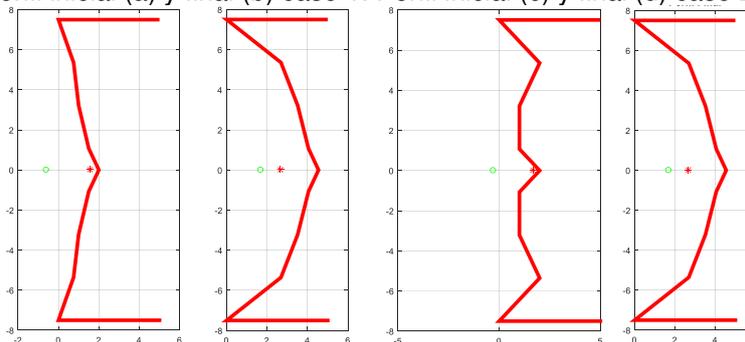


Figura 6: Perfil inicial (a) y final (b) caso 3. Perfil inicial (c) y final (d) caso 4. Análisis 2.

**3.3. Análisis 3.** Se requiere que el baricentro esté a la derecha del centro de corte a una distancia de:

$$1 \text{ [cm]} \quad (d_1 = 1 \text{ [cm]}), \quad 0.5 \text{ [cm]} \quad (d_1 = 0.5 \text{ [cm]}), \quad 0 \text{ [cm]} \quad (d_1 = 0 \text{ [cm]}).$$

Se toma como función objetivo:

$$F(x) = 10000(x_g + x_c - d_1)^2 \quad (28)$$

En este punto se iniciaron los procesos de diseño siempre con el mismo perfil. Los resultados de la simulación para cada caso se muestran en las Tablas 7, 8, 9 y 10.

Tabla 7. Coordenadas para cada caso del perfil inicial. Análisis 3.

CASO	PERFIL INICIAL			
	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
Caso (1)	0.00	0.00	0.00	0.00
Caso (2)	0.00	0.00	0.00	0.00
Caso (3)	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 8. Coordenadas para cada caso del perfil final. Análisis 3.

CASO	PERFIL FINAL			
	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
Caso (1)	2.695213785887275	3.513252077683319	4.044371868432738	4.538468398988792
Caso (2)	3.978467539371309	4.356227590317507	4.591336946733984	4.809286311057452
Caso (3)	4.999999999155623	4.999999999659028	4.999999999863519	4.99999999972414



Tabla 9. Baricentro y centro de corte del perfil inicial y final. Análisis 3.

CASO	PERFIL INICIAL		PERFIL FINAL	
	Baricentro	Centro de corte	Baricentro	Centro de corte
Caso (1)	1.0000000000000000	1.666563792358496	2.666717902110442	1.666717898867090
Caso (2)	1.0000000000000000	1.666563792358496	3.034037768485204	2.534037763862258
Caso (3)	1.0000000000000000	1.666563792358496	3.347811193637049	3.206879186714855

Tabla 10. Variación del baricentro y centro de corte. Análisis 3.

CASO	Baricentro – Centro de corte
Caso (1)	1.000000003243352
Caso (2)	0.500000004622946
Caso (3)	0.140932006922194

Analizando estos tres casos se puede indicar que al reducir la distancia entre el centro de corte y el baricentro las coordenadas "x" de los puntos de diseño se desplazan hacia la derecha, como muestra la Figura 7. En el caso tres, se encuentra en la situación particular de que las coordenadas de diseño llegan a tomar el valor de la cota superior, la cual es igual al ancho del ala ( $b = 5$  [cm]), este límite de desplazamiento hacia la derecha hace que no se logre alcanzar la superposición del centro de corte con el baricentro.

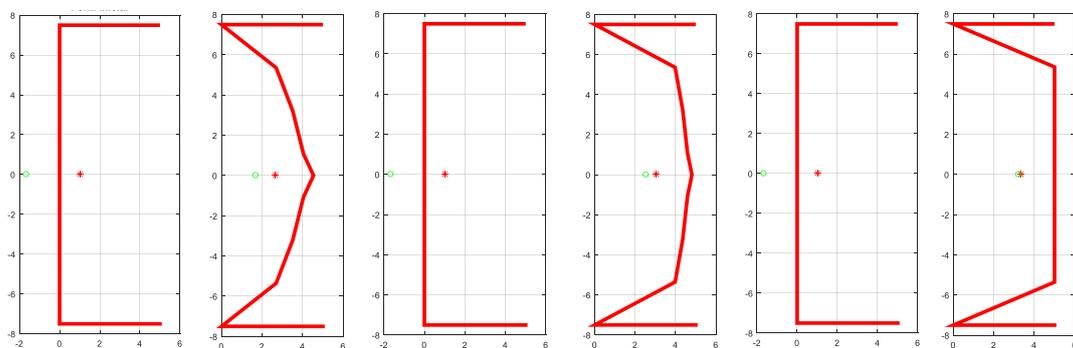


Figura 7: Perfil inicial (a) y final (b) caso 1. Perfil inicial (c) y final (d) caso 2. Perfil inicial (e) y final (f) caso 3. Análisis 3.

**3.4. Análisis 4.** En este análisis se modificaron las cotas superiores de las coordenadas  $x(3)$  y  $x(4)$  (anteriormente iguales al ancho del ala del perfil), tomando como cota un valor igual a  $1.25^*$  (ancho del ala) (cota superior =  $6.25$  [cm])

Se toma como función objetivo:

$$F(x) = 10000(x_g + x_c - d_1)^2 \quad (29)$$

En este caso los resultados del diseño obtenido se muestran en las Tablas 11, 12, 13 y 14.



Tabla 11. Coordenadas del perfil inicial. Análisis 4

CASO	PERFIL INICIAL			
	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
Caso (1)	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 12. Coordenadas del perfil final. Análisis 4

CASO	PERFIL FINAL			
	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
Caso (1)	4.853361201720167	4.963139000122443	6.002513972564081	6.147454117795296

Tabla 13. Baricentro y centro de corte del perfil inicial y final. Análisis 4

CASO	PERFIL INICIAL		PERFIL FINAL	
	Baricentro	Centro de corte	Baricentro	Centro de corte
Caso (1)	1.000000	1.666563	3.489548062310786	3.489548060377485

Tabla 14. Variación del baricentro y centro de corte. Análisis 4.

CASO	Baricentro – Centro de corte
Caso (1)	0.000000001933301

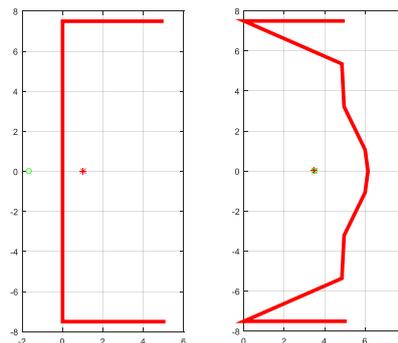


Figura 8: Perfil inicial (a) y final (b). Análisis 4.

Analizando el resultado, se observa según la Figura 8, que para el centro de corte sea coincidente con el baricentro, las coordenadas "x" de los puntos x(3) y x(4) superan la longitud del ancho del ala.

#### 4. CONCLUSIONES

Observando el análisis de los cuatro escenarios practicados con parámetros definidos y establecidos, se puede afirmar lo siguiente:

Para el análisis 1 y 2, las coordenadas del baricentro y centro de corte de los perfiles finales son coincidentes hasta el primer y segundo decimal respectivamente.

Para el análisis 3, se presenta un escenario particular, donde en uno de los casos las coordenadas de diseño llegan a tomar el valor de la cota superior que es igual al ancho del ala, provocando que no se logre alcanzar la superposición del centro de corte con el baricentro.



Por último, para el análisis 4, se denota que para que tanto el centro de corte como el baricentro sean coincidentes, las coordenadas de los puntos tres y cuatro superan la longitud del ancho del ala en un 20 y 23%, respectivamente.

En general, el estudio realizado proporciona un panorama más claro a considerar al momento de realizar el análisis de perfiles C de pared delgada, considerando un parámetro importante, que es el de la coincidencia del centro de corte y el baricentro y que el mismo pueda ser aplicado a la tecnología de laminación progresiva empleada en este tipo de perfiles.

## REFERENCIAS

- [1] Camacho López, C. J. *Optimización topológica estructural de ensambles* (Doctoral dissertation). 2011.
- [2] Reguera, F., & Cortínez, V. H. *Diseño óptimo de vigas de pared delgada PRF sometidas a cargas dinámicas*. *Mecánica computacional*, 32(42), 3575-3595. 2013.
- [3] Cingualbres, R. E., García, E. G., & Cingualbres, R. E. *Optimización de los perfiles rectangulares de paredes delgadas*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2004
- [4] Miserere, M. A. *Pandeo de perfiles de pared delgada*. (Bachelor's thesis, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales). 2017.
- [5] McCORMAC, J. *Diseño de estructuras de acero*. Alfaomega grupo editor. 2013
- [6] Brewer, A. T., Flores, F. G., Rocchia, B. A., & Preidikman, S. *Análisis de vigas de sección arbitraria sometidas a esfuerzos de torsión y corte: condiciones de simetría*. Repositorio Digital Universitario, Centro Regional Universitario Córdoba. UNDEF. 2016.
- [7] Berrocal, L. O. *Resistencia de materiales*. McGraw-Hill. 2007.
- [8] González-Santander, J. L., Isidro, J. M., García-March, M. A., de Córdoba, P. F., & Iglesias, D. A. *La regla de Simpson con mallados generales e integrales impropias*. *Boletín de la Sociedad Cubana de Matemática y Computación*, 8(1), 21-33. 2010.
- [9] Villa, F., Velásquez, J., & Jaramillo, P. *Conrprop: un algoritmo para la optimización de funciones no lineales con restricciones*. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (50), 188-194. 2009
- [10] Escobar, H. M. M. *Optimización no lineal y dinámica*. Universidad Nacional de Colombia. 2001.
- [11] Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., & Linares, P. *Modelos matemáticos de optimización*. *Publicación Técnica*, 1. 2010.



## APLICACIÓN DE SIMULACIÓN POR FEM PARA EL MANTENIMIENTO DE EQUIPOS MECÁNICOS

Jonatan Raspante <sup>1,2</sup>, Cristian Vatta <sup>1</sup>, Pablo Girón <sup>1,3</sup>, Juan F. Guieu <sup>1</sup> y Gonzalo Macchia <sup>1</sup>

<sup>1</sup> BAHÍA INTEVI SRL – Av. San Martín 3518, Ing. White, Argentina – [cvatta@intevi.com.ar](mailto:cvatta@intevi.com.ar)

<sup>2</sup> Unidad de desarrollo industrial y tecnológico (UDITEC) - Intendente Casanova e/ Gral. Mosconi y Brihuega, Parque Industrial de Bahía Blanca, Argentina - [jraspante@intevi.com.ar](mailto:jraspante@intevi.com.ar)

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica – UTN FRBB – 11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina – [pgiron@frbb.utn.edu.ar](mailto:pgiron@frbb.utn.edu.ar)

### RESUMEN

Los problemas de vibraciones en los equipos industriales son frecuentes y pueden estar ocasionados por fallas mecánicas provenientes de los procesos, resonancias estructurales, etc. Las causas no siempre son fáciles de identificar requiriendo la combinación de distintas técnicas.

Entre éstas, el análisis estructural por el método de elementos finitos (FEM), junto con el monitoreo de vibraciones, simplifica la búsqueda de soluciones mediante la creación de un activo virtual.

Normalmente, con la información disponible de los activos, sumada a un relevamiento de campo, se puede recrear un gemelo virtual aproximado, volcando en él las solicitaciones identificadas en las mediciones de vibraciones. Finalmente, se pueden proponer soluciones, optando por la más eficiente y económica.

Los paquetes de software FEM actuales cuentan con herramientas amigables que permiten correr modelos simplificados con rapidez, haciendo su uso compatible con los tiempos del mantenimiento. Esto es posible combinando el dominio de estas tecnologías entre los integrantes del mismo equipo de trabajo.

Para ilustrar esto se analizan 2 casos:

- Un soplante centrífugo de una planta petroquímica, en el que se producían roturas en los rodamientos del motor eléctrico acoplado. Mediante el análisis de vibraciones y de frecuencias naturales mediante FEM, se propuso la solución, fabricándola y validándola en corto tiempo con el proceso en marcha.
- El análisis de fallas recurrentes en bulones de una amasadora de polietileno, que se abordó con FEM para la determinación de tensiones resultantes de la precarga y de las vibraciones medidas, definiéndose una solución sencilla, ejecutada en una parada corta.

Este enfoque permite la realimentación permanente del modelo con resultados de mediciones, y la validación de la simulación, verificando las respuestas a las modificaciones con las de su análogo virtual, en sintonía con los tiempos del mantenimiento.

**Palabras clave:** *Mantenimiento industrial; Vibraciones; Análisis FEM, Resonancia.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Comúnmente sucede que, en la mayoría de las plantas de proceso continuo, las reparaciones se realizan de manera urgente debido a la pérdida económica que conlleva detener la producción. Pero estas soluciones urgentes, a veces con poco tiempo de análisis debido a la premura, pueden traer con ellas otras fallas más graves que pueden afectar aún más a los equipos, así como a la producción.

A través del mantenimiento predictivo realizado sobre los equipos se logran identificar muchas problemáticas a tiempo y así poder planificar una reparación del equipo. Pero otras veces ocurren sucesos donde las soluciones no son tan sencillas y requieren de un análisis extra, de carácter más profundo, para garantizar que la solución sea eficiente, sencilla y rápida de aplicar.

Para muchos de estos casos resulta útil aplicar el análisis por elementos finitos (FEM) [5], en este caso con SOLIDWORKS [1] como una herramienta más del mantenimiento predictivo, en la búsqueda de soluciones rápidas y sencillas, y que además permiten obtener información gráfica que ayuda a explicar las distintas propuestas de solución. Esto permite planificar antes de la implementación los pasos a seguir, para que el personal de mantenimiento pueda comprender con mayor facilidad lo que se debe hacer y ordenar las tareas de forma adecuada. Por otra parte, estos activos digitales permiten también la discusión sobre las soluciones posibles, enriqueciendo el trabajo con la mirada experimentada de quienes operan y mantienen los equipos a intervenir.

En este trabajo presentamos la problemática, evolución y desarrollo de dos de estas experiencias donde las soluciones propuestas requerían de un estudio extraordinario, ya que las fallas eran recurrentes. La primera tiene relación con un soplante extractor de vapor, y la segunda con una amasadora de polímero, ambos equipos críticos pertenecientes a una planta petroquímica, ya que la falla en ellos provoca una parada de planta o de línea no planificada con pérdidas de producción considerables.

## 2. PROBLEMA DE VIBRACIONES LIBRES Y FRECUENCIAS NATURALES

A los sistemas mecánicos podemos clasificarlos como discretos y continuos para su estudio dinámico. El primero de ellos constituye una idealización que permite estudiar sistemas reales (continuos) que serían sumamente complejos de analizar. Su utilización permite la simplificación de los modelos matemáticos aplicables. Hoy en día y a partir de la utilización de herramientas matemáticas tales como el Método de Elementos Finitos, los sistemas pueden estudiarse desde el punto de vista dinámico sin tener que recurrir a su discretización. Tal es el caso del presente estudio.

Existen sistemas discretos de uno, dos o más grados de libertad, los que estarán compuestos por tantos elementos de masas concentradas como grados de libertad tenga el sistema, con el



complemento de elementos elásticos y de amortiguamiento. Cada uno de esos grados de libertad significará que el sistema podrá moverse de distintas formas, tantas como grados de libertad tenga, y tendrá la misma cantidad de frecuencias naturales. Con cada una de estas, estará asociado un modo de vibración o forma modal distinta.

Las ecuaciones del desplazamiento del sistema surgirán de plantear tantas ecuaciones diferenciales, como masas concentradas (concordantes con los grados de libertad tenga el sistema). Para el caso de la figura 1, que representa un sistema de dos grados de libertad sin amortiguamiento, las ecuaciones del movimiento serán:

$$m \cdot \ddot{x}_1 = -k(x_1 - x_2) - k \cdot x_1 \quad \text{y} \quad m \cdot \ddot{x}_2 = k(x_1 - x_2) - k \cdot x_2 \quad (1)$$

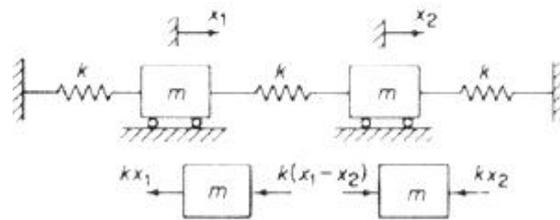


Figura 1: Sistema de dos grados de libertad sin amortiguamiento

Para cada movimiento de las masas podemos escribir:

$$x_1 = A_1 e^{i\omega t} \quad \text{y} \quad x_2 = A_2 e^{i\omega t} \quad (2)$$

Sustituyendo en las ecuaciones diferenciales tenemos:

$$(2k - \omega^2 \cdot m)A_1 - k \cdot A_2 = 0 \quad \text{y} \quad (2k - \omega^2 \cdot m)A_2 - k \cdot A_1 = 0 \quad (3)$$

Que se satisfacen para cualquier  $A_1$  y  $A_2$  si el siguiente determinante es 0:

$$\begin{vmatrix} (2k - \omega^2 \cdot m) & -k \\ -k & (2k - \omega^2 \cdot m) \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

Haciendo  $\omega^2 = \lambda$ , el determinante de arriba conduce a la ecuación característica:

$$\lambda^2 - 4 \frac{k}{m} \lambda + 3 \left(\frac{k}{m}\right)^2 = 0 \quad (5)$$

Las raíces de esta ecuación son:

$$\lambda_1 = \frac{k}{m} \quad \text{y} \quad \lambda_2 = 3 \frac{k}{m} \quad (6)$$

y las frecuencias naturales del sistema son:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{y} \quad \omega_2 = \sqrt{3 \frac{k}{m}} \quad (7)$$

Este tipo de problema, conocido como de problema de autovalores, puede plantearse de la misma manera para cualquier sistema discreto, independientemente del número de grados de



libertad que tenga y puede generalizarse para sistemas de múltiples grados de libertad o de un solo grado de libertad conduciendo a la ecuación:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

### 3. CASOS DE ESTUDIO

#### 3.1 Resonancia en soplante centrífugo

Este caso trata de un soplante centrífugo que extrae vapor del proceso de secado de pellets en una planta de polietileno de baja densidad. Este soplante está preparado para resistir ambientes químicos y abrasivos, y es adecuado para trabajar en el exterior por sus materiales.

El soplante se acopla por transmisión directa a un motor trifásico de 5 HP y 1500 RPM de montaje bridado, como se muestra en la figura 2. Esta configuración original de fábrica no resultaba adecuada para montar en planta, ya que los requerimientos de seguridad indican que los motores eléctricos que se deben instalar tienen que ser antiexplosivos. Por esto, previo al montaje, el equipo experimentó un cambio de motor por uno de características antiexplosivas de las mismas especificaciones que el proveniente de fábrica, aunque con un mayor peso que el original.



Figura 1: Configuración inicial del equipo.

Una vez puesto el equipo en proceso, se realiza un chequeo de vibraciones sobre el mismo durante su puesta en marcha y se observa que los valores de vibraciones son muy elevados, excediendo los límites normalizados para una operación segura.

Debido a esto y a sabiendas que el motor colocado era más pesado que el anterior, se optó por cambiar el motor por uno con montaje sobre patas y además fabricar una base para poder soportarlo, como se observa en el modelo digital en la figura 3.

Los valores de vibraciones registrados con esta nueva configuración resultaron más bajos, pero seguían siendo altos en comparación con otros equipos semejantes, adoptando de todas maneras esta configuración como la final para el montaje.



Figura 3: nueva configuración equipo.

Dada esta situación, se optó por realizar un modelo computacional del equipo, el cual se suponía a priori funcionando en una condición de resonancia, debido a sus valores dispares e inadmisibles de vibraciones. Con el modelo se pretendía recrear el comportamiento dinámico del activo cruzando al mismo con los datos que se registraban en campo, mediante mediciones de vibraciones y Bump Test, para posteriormente ensayar sobre el modelo posibles soluciones que aparten al equipo de la condición resonante.

En primera instancia, se recabó toda la información necesaria para el modelo, incluyendo inspecciones visuales del equipo en planta, relevamiento de dimensiones de las partes involucradas y búsqueda de datos del fabricante. Luego se volcó toda esta información en el software de diseño para llegar a un modelo virtual como el visto en la figura 3. Ya con el modelo finalizado, se realizó una medición de vibraciones y un análisis ODS (Operation Deflection Shape), a efectos de identificar la frecuencia principal de vibración del sistema y la forma modal para dicha frecuencia.

Los resultados obtenidos muestran que la componente de giro del motor de 1482 CPM es la que causa la vibración excesiva del sistema, dando las mayores amplitudes vibratorias en dirección vertical del motor como se observa en el espectro de la figura 4. Por otra parte, los resultados del ODS son utilizados posteriormente para comparar con los arrojados por el modelo.



Figura 4: Espectro en velocidad vibratoria del motor, dirección vertical lado acople.



Con toda la información recabada, se realizó un análisis dinámico en el modelo computacional, obteniendo resultados de frecuencias naturales muy próximos a los registrados sobre el activo físico, y observando modos de vibración con movimientos muy similares a los vistos en el análisis ODS (figura 5).

Para el análisis computacional, el material seleccionado fue acero inoxidable AISI 304, con módulo elástico de 190 [Gpa], coeficiente de Poisson 0,29 y densidad de masa 8000 [Kg/m<sup>3</sup>], para el resto de los materiales como la voluta de polímero y el motor, se utilizó su masa distribuida en el lugar donde mantienen contacto con la estructura analizada.

Como la estructura resonante esta compuesta de una chapa de espesor delgado, se optó por realizar un mallado del tipo Shell (cáscara), resultando en 45882 elementos y 93359 nodos de 10 [mm] con una tolerancia de 0,5 [mm]. A esta estructura se la rigidizó en la parte inferior simulando el anclaje al piso y se usaron los demás parámetros de simulación recomendados por la biblioteca del software [1].

Para el caso de vibraciones libres, el software utilizado no permite configurar el coeficiente de amortiguamiento, calculando las frecuencias naturales no amortiguadas del sistema.

Ya teniendo confirmado que el gemelo virtual del equipo responde de forma muy similar al comportamiento del activo físico, se probaron sobre el mismo soluciones para apartar al equipo de la condición de resonancia identificada, considerando la ecuación (8) para un sistema de un grado de libertad no amortiguado, que cualitativamente indica que existen dos opciones básicas de solución para un problema de resonancia, modificar la masa o la rigidez del sistema.

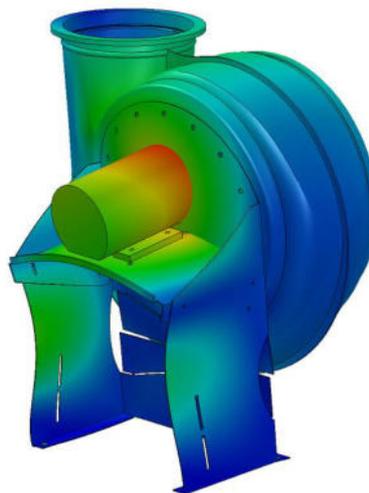


Figura 5: Modo de vibración a 26,20 [Hz] coincidente con el estudiado.

Se opta en este caso por rigidizar la estructura, lo que provocaría que la frecuencia natural considerada aumente, alejándola lo suficiente para que no vuelva a coincidir con la componente



de giro del motor, y evaluando además que no coincida con otras frecuencias propias del equipo como la de paso de álabes del soplante u otras frecuencias de equipos aledaños.

Como regla general, se toman recomendaciones mencionadas por la norma API 610 [2] para maquinas rotantes, también en estos casos de resonancias mecánicas en estructuras. Estas normas mencionan que la componente de giro debe estar con un margen de separación de al menos un 20% de la frecuencia resonante, siendo estos entonces los márgenes de separación necesarios de las frecuencias críticas del sistema.

Se plantearon distintas formas de rigidizar la estructura para apartarse de la condición resonante. La forma más eficaz que se encontró es la que se detalla en la figura 6 con color rojo, incorporando una chapa de refuerzo con pliegues para abulonar a la base del motor en la zona del lado libre del motor, y otra más pequeña también abulonada en la zona de acople.

La solución consideró los aportes del personal de mantenimiento respecto de la facilidad para realizar diversas operaciones sobre el equipo, incluyendo entonces modificaciones y testeando las mismas para obtener una solución óptima.

También se consideró la posibilidad de realizar el montaje con equipo en marcha, testeando de manera simultánea los resultados.

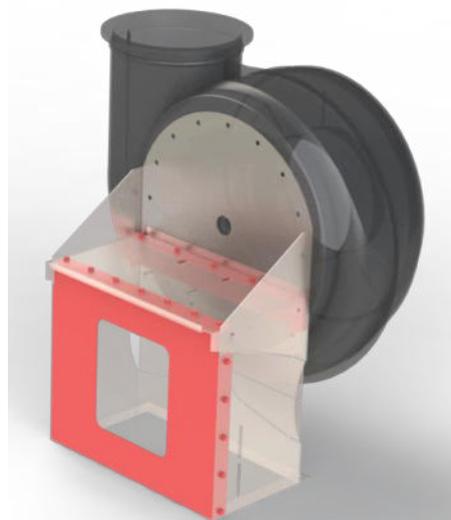


Figura 6: Refuerzos propuestos en rojo, en un render con transparencia.

Con la implementación de estos refuerzos, el modo observado en el análisis original desaparece obteniendo los resultados que se muestran en la figura 7, y dando como resultado de esta nueva configuración un primer modo a 32,50 [Hz], es decir un 23 % por encima de la componente de giro del motor. En la figura 8 se observa una superposición de espectros de vibración medidos antes y después de la intervención, mientras que en la figura 9 se puede ver una tendencia de vibraciones tomada en ambos lados del motor eléctrico, donde se aprecia la drástica disminución de los niveles vibratorios.

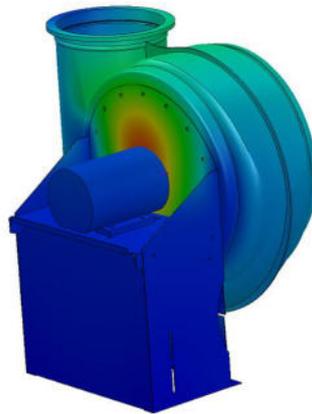


Figura 7: Modo de vibración a 32,50 [Hz], rigidizando la estructura.

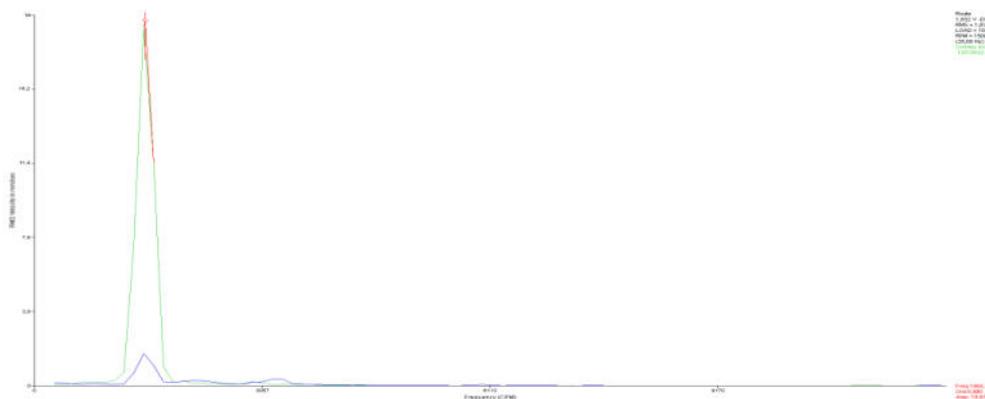


Figura 8: Superposición de espectros de velocidad vibratoria, antes de la intervención (en verde) y después de la misma (en azul).

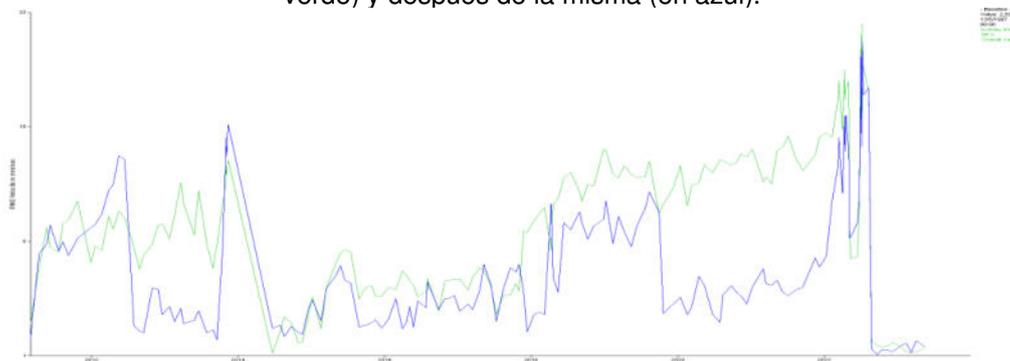


Figura 9: Tendencias de velocidad vibratoria motor lado acople (azul) y lado libre (verde).

De este estudio concluimos que el sistema se encontraba funcionando en una zona resonante, causante de las elevadas amplitudes vibratorias del motor. Los diferentes pesos del motor original (28 Kg) versus su reemplazo (55 Kg) con otro tipo de montaje, como ya se explicó, fueron los causantes del comportamiento nocivo mencionado. La implementación de los refuerzos propuestos generó una mejora significativa en el comportamiento dinámico del sistema, obteniendo un marcado descenso en los niveles de vibración producto que el equipo ya no está trabajando en una zona resonante.

### 3.2. Falla en bulones de amasador de polímero

El segundo caso trata de la falla reiterada en los bulones que unen ambas mitades de las tapas de una amasadora de polímero en una planta de polímero de alta densidad, la cual sufría desde hace años la falla en los mismos, como se observa en la figura 10. La falla de una determinada cantidad de estos bulones provocaba pérdida de material y la detención de la producción en la línea.

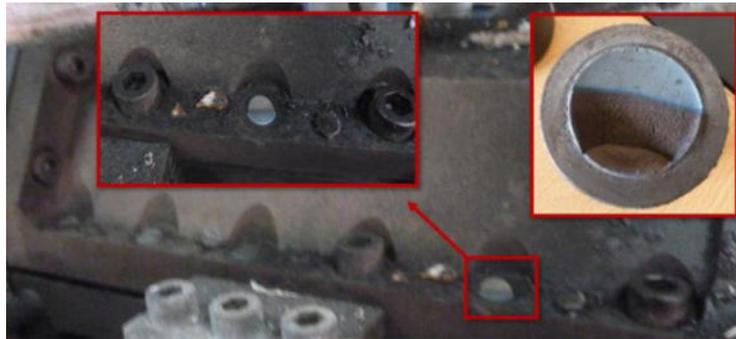


Figura 10: Falla en bulones de amasadora de polímero.

Se realizaron varios estudios sobre el material de los bulones y las causas de fallas de los mismos, donde se determinó que estos rompían por fatiga, por lo que se propusieron varias modificaciones como cambio de material de los bulones, cambios en los radios de acuerdo, sustituir los pernos por mordazas o incorporar sujeciones adicionales, etc. En ninguno de estos casos se obtuvieron buenos resultados y en algunos la implementación resultó engorrosa.

Se comenzó a realizar un estudio de los bulones en cuestión viendo datos históricos de los mismos y de todo el equipo. Al momento de comenzar el estudio, los bulones colocados en el equipo eran los de la mejor calidad encontrada en el mercado; estos eran forjados de calidad 12.9 según la norma ISO 898-1 [3], de material AISI 4340 de rosca M36-3,00. A estos se los torqueaba según procedimiento del fabricante en tres pasadas hasta alcanzar los 195 Kgm.

Realizando un análisis de vibraciones para conocer el comportamiento de las tapas del mixer, se descubrió que las tapas, debido a su forma, tenían un movimiento que hacían flexionar al bulón como se muestra en la figura 11.

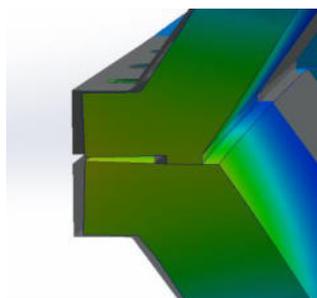


Figura 11: Movimiento en la tapa de la mezcladora superpuesto a tapa fija en color gris.

Con estos datos, se decide realizar un análisis sobre el modelo de bulón para verificar los esfuerzos que este está soportando. Para ello, se comienza realizando un análisis estático en base a los datos conocidos, que eran el valor de precarga suministrado en el torque y el corrimiento flexional medido en el análisis de vibraciones.

Para el análisis computacional, se utilizó como material acero AISI 4340, este fue determinado por el laboratorio de mecánica de la UTN BHI, que también brindó información sobre sus propiedades mecánicas las cuales fueron tensión de fluencia 1162 [Mpa], tensión de rotura 1232 [Mpa], dureza 38 [HRC], modulo elástico 205 [Gpa] y densidad de masa 7850 [Kg/m<sup>3</sup>].

Para el mallado del bulón se utilizaron elementos sólidos tetraédricos, de 2 [mm] de tamaño con tolerancia de 0,1 [mm], aplicando también un control de mallado en la zona del redondeo donde se produce la falla de 0,5 [mm]. Esto resultó en 209617 elementos y 310220 nodos, obteniendo un correcto cociente de aspecto.

Para la simulación se le aplicó la carga en la cara cilíndrica roscada de tal forma que traccione al bulón, y se creó una pared virtual en donde la cabeza de este apoya contra la amasadora.

Los resultados del análisis se observan en la figura 12, de los cuales se sacaron argumentos concluyentes respecto de que los esfuerzos a los que estaban sometidos los bulones se encontraban muy próximos al límite elástico del material, y además que aproximadamente el 97% de ese esfuerzo era provocado por la precarga, lo que generaba que en esa condición se fatigaran fácilmente.

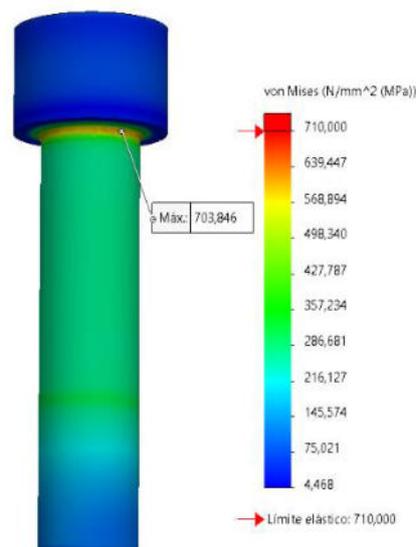


Figura 12: Tensiones de Von Mises en un bulón de la mescladora.

Considerando que los bulones están sometidos a altas temperaturas y cargas alternantes por el amasado del polímero, y teniendo en cuenta los datos verificados con el valor de precarga, sería

razonable que los mismos se fatiguen. De esta manera se decidió verificar el valor de precarga compatible con el adecuado funcionamiento del equipo.

A partir de la ecuación (9) que relaciona el torque con la precarga en base a lo propuesto por Shigley [4], y a un estudio de diseño perteneciente al paquete de simulación del software [1], se buscó identificar a qué precarga debería estar sometido el bulón para no sobrepasar el límite de fatiga del material, y así poder calcular cuál debiera ser el valor máximo de torque para que los bulones no sufran falla, dando como resultado 102 Kgm. Es decir, aproximadamente un 50% que el suministrado con la metodología de ajuste empleada hasta ese momento.

$$F_i = \frac{T}{d.k} \quad (9)$$

Se concluyó entonces que el torque suministrado en el bulón de 195 Kgm lo tensionaría a valores muy próximos a su límite elástico (tensión media =  $\sigma_m$  en la figura 13), que luego sumados a las fuerzas que ejerce el amasado sobre las tapas (tensión alternante =  $\sigma_a$ ) hacen alcanzar elevadas tensiones (tensión máxima =  $\sigma_{max}$ ) que provocan que el bulón falle por fatiga.

Además, las tensiones alternantes pueden haber crecido en el tiempo por las sucesivas repotenciaciones del equipo, en pos de aumentar su capacidad de producción. Como la carga del equipo no disminuiría para mantener los niveles de producción, el  $\sigma_a$  permanecerá constante, por lo que se propuso disminuir la precarga de los bulones ( $\sigma_m$ ) para que el  $\sigma_{max}$  no alcance valores críticos de falla como se muestra en la figura 13.

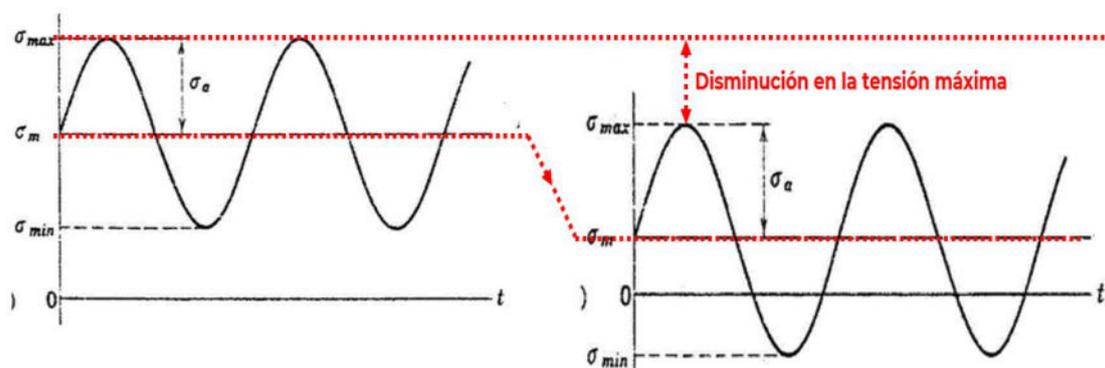


Figura 13: Variación de las tensiones en el bulón.

Considerando que frente a la rotura de varios bulones simultáneamente en varios eventos no se producía fuga de material, se concluyó que era posible disminuir la precarga de los mismos para lograr un ajuste adecuado sin someter a los bulones a tensiones que provocaran su rotura.

Se recomendó entonces disminuir la precarga, y hacer una prueba piloto de funcionamiento del equipo con los nuevos valores, para comprobar que el sellado fuera igualmente adecuado y no hubiera fugas. De esta manera se obtuvieron buenos resultados, sin roturas de bulones.



#### 4. CONCLUSIONES

La implementación del diseño y análisis computacional como una herramienta más del mantenimiento predictivo resulta en la incorporación de un arma muy poderosa que ayuda a identificar problemáticas en los equipos, que muchas veces, utilizando las tecnologías habituales como el análisis de vibraciones, termografías, ultrasonido, etc. de manera aislada no es posible detectar.

Esta herramienta no solo permite obtener resultados numéricos sobre las problemáticas, sino que permite realizar un análisis gráfico que ayuda a comunicar ideas técnicas facilitando la comprensión por parte del personal de las distintas áreas involucradas, mediante gráficos como los expuestos.

También, es una herramienta útil que ayuda a presentar distintas alternativas de manera clara, permitiendo un análisis conjunto que contemple visiones complementarias y considere las problemáticas de todos los sectores.

Con la ayuda de estos activos virtuales, resulta más sencillo explicar y comprender posibles soluciones, ya que se simula traer el activo físico a la mesa de discusión, planteando y proponiendo diferentes opciones de forma gráfica, y pudiendo optar por la más conveniente.

La aplicación de este tipo de modelaciones rápidas en un contexto de acción inmediata, como constituye el mantenimiento, permite el ahorro de tiempo y recursos económicos.

#### REFERENCIAS

- [1] SolidWorks - Dassault Systèmes SolidWorks Corporation – [www.solidworks.com](http://www.solidworks.com)
- [2] API Standard 610 - Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries, Eleventh Edition, standard by American Petroleum Institute, September 2010. ISO 13709:2009 (Identical), Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries.
- [3] ISO 898-1 - Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes - Coarse thread and fine pitch thread, 2013.
- [4] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Novena edición. McGraw-Hill Interamericana, México, 2019.
- [5] Carlos Gonzáles Ferrari, El método de elementos finitos para ingenieros - enfoque aplicado, edUTecNe, Buenos Aires, 2023.



## CARACTERIZACIÓN DE POOL FIRES DE LNG UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Sebastián E. Moreira<sup>1</sup> y Edgardo A. Serafín<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Compañía de Ingenieros QBN y de Apoyo a la Emergencia 601 – Ejército Argentino  
[smoreira@ejercito.mil.ar](mailto:smoreira@ejercito.mil.ar)

<sup>2</sup> Laboratorio de Simulación y Cálculo Numérico (SiCaNLab) – Facultad de Ingeniería del Ejército (FIE), Universidad de la Defensa Nacional (UNDEF) [serafinea@fie.undef.edu.ar](mailto:serafinea@fie.undef.edu.ar)

### RESUMEN

En establecimientos en los cuales se llevan a cabo procesos industriales es probable la ocurrencia de fuegos accidentales. Habitualmente, estos eventos se dan con materiales inflamables en la forma de **pool fires** (por su denominación común en idioma inglés), ya sea en situaciones de guarda o de transporte. Sus efectos (generación térmica, productos de combustión y plumas de hollín, entre otros) pueden resultar peligrosos para personas y afectar a objetos cercanos.

En la búsqueda de su caracterización, dimensionamiento y en el entendimiento del fenómeno para la búsqueda de métodos efectivos de protección y previsiones de distanciamientos seguros es que existen una importante cantidad de abordajes experimentales.

En este trabajo se utilizan las herramientas de dinámica de fluidos computacionales (CFD por sus siglas en inglés), particularmente con el software ANSYS Fluent® para la determinación y predicción de la temperatura de llama, así como también, de la potencia emisiva superficial (SEP por sus siglas en inglés). Estos parámetros son importantes para determinar distancias de seguridad en aparcamientos y transporte fundamentados en los estándares internacionales de pruebas y testeos de este tipo de fuegos.

**Palabras Clave:** *pool fires, flujo no premezclado, temperatura de llama, potencia emisiva superficial.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los denominados **pool fires** o reservorios de combustibles presumiblemente incendiarios ante una eventualidad se presentan de distintas dimensiones y utilidades.

Estos fuegos se conciben como turbulentos no premezclados que combustionan sobre un depósito horizontal. En relación a una estructura para este tipo de llama, la misma se puede dividir en tres zonas, a saber: “claro luminoso de combustión”, “zona de pulsación” y “pluma”. La primera no está cubierta de humo negro y tiene la mayor superficie de potencia emisiva. En la zona de pulsación, el frente de llama todavía está conectado a la base, pero presenta una combustión menos eficiente. Y finalmente, en la zona de pluma se presenta una llama segregada no continua.



**Figura 1:** Incendio de un depósito de combustible. Fuente: Sitio web Indian Fires Services.

A continuación, se presenta la simulación numérica de un **pool fires** de gas natural licuado (LNG por sus siglas en inglés). Se utilizan tres diámetros distintos del reservorio de combustible para intentar demostrar que la variación de estos modifica parámetros definitorios del fenómeno analizado tal cual sucede experimentalmente. Para el logro de lo mencionado, se emplean diferentes submodelos disponibles en ANSYS Fluent®. Se utiliza el modelo de dos ecuaciones  $k-\epsilon$  para la representación de la turbulencia, una reacción de un solo paso y el modelo *Eddy-dissipation* para la combustión. Para representar la radiación térmica se aplica el modelo de ordenadas discretas.

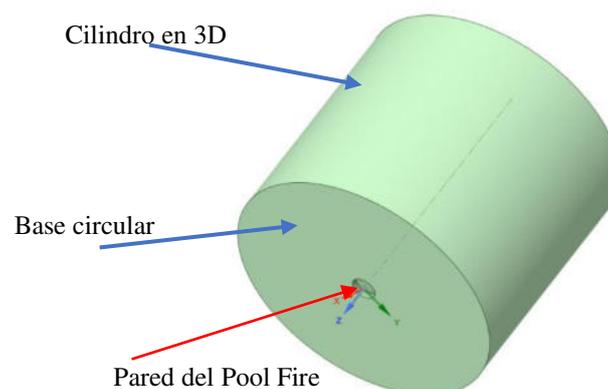


**Figura 2.** Detalle de las zonas dentro de la estructura de un pool fire. Modificada de Experimental Study and CFD Simulation of Pool Fires, Pag 9.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO CAD DEL VOLUMEN DE FLUIDO ENVOLVENTE AL RESERVORIO DE COMBUSTIBLE (*POOL FIRE*)

El dominio de estudio (3D) es representado por un cilindro con base circular emulando el modelo de llama sólida para el cálculo analítico de radiación térmica.

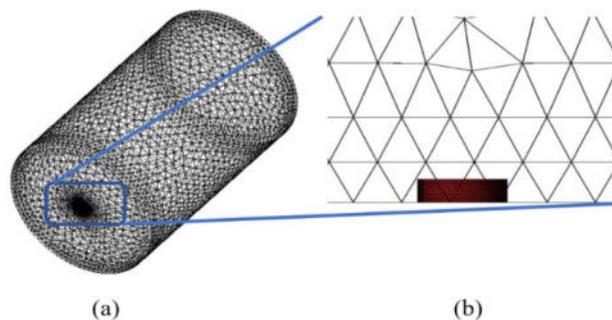
Se esquematiza el volumen fluido envolviendo el reservorio de combustible líquido. Se considera una pared de espesor "virtual" del *pool fire* que delimita el combustible líquido y el aire atmosférico preexistente. Se denomina de esta manera, debido a que la pared quedará representada solo por una superficie y virtualmente en el solver se le puede asignar espesor.



**Foto 3:** Dominio de estudio en 3D. En la base se observan las paredes del Pool Fire.



Para llevar adelante lo mencionado se utiliza el software “*SpaceClaim*”. Inicialmente se realiza un “sketch” 2D con la geometría planar, que luego es extrudada para lograr obtener el volumen fluido (3D) y la pared del pool fire.



**Figura 4.** Mallado tetraédrico generado. (a) Vista de la geometría mallada, (b) Detalle de refinado en paredes del Pool fire.

Se obtiene la malla tetraédrica no estructurada para lograr captar correctamente la evolución de la temperatura en el dominio y observar el comportamiento termodinámico de la llama.

Se aprecia necesario refinar el mallado en la superficie del reservorio y en el ingreso del flujo de fluido que luego representará el combustible evaporado. Se realizaron pruebas con una cantidad de 97000 a 230000 volúmenes de control con un tamaño medio de celda de 0,22 mm para la solución de las ecuaciones que dominan el fenómeno.

Para finalizar este proceso de mallado y utilizando las herramientas disponibles en Fluent® transformamos los volúmenes finitos creados por el “*meshing*” en poliedros, se mejora así, la calidad de malla con una menor cantidad de elementos.

Para analizar la sensibilidad de malla, se emplea una herramienta de parametrización para la realización automática de obtención de variables seleccionadas. Se aumenta progresivamente la cantidad de elementos y se estipulan puntos monitores que se registran para que trabajen con los parámetros de entrada. En base a esta información obtenida se elabora el gráfico presentado en la figura 5, donde se observa la cantidad de elementos para los cuales los valores de la variable seleccionada ya no modifican su valor.

Se estipula una variación del 2% máxima entre el valor anterior y posterior de la variable considerando el número de elementos. Variación que se estipula aceptable para determinar una

cantidad de elementos óptima a partir de los que no variarán los resultados obtenidos. Con esta definición de cantidad de elementos, es que se presentan los resultados del post procesamiento.

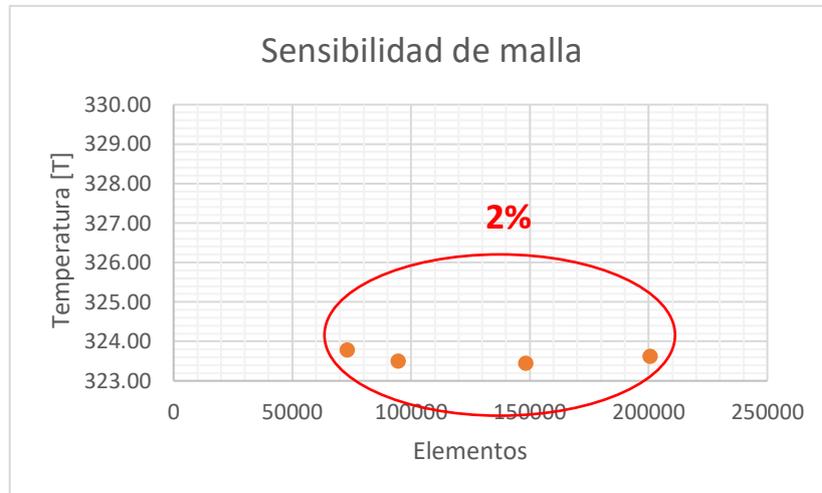


Figura 5. Independencia de malla.

### 3. SOLUCIÓN NUMÉRICA

Luego de la concepción de la geometría, el mallado y la comprobación de la calidad de este; comenzamos a definir la física del problema planteado. Inicialmente se lleva a cabo un estudio en estado estacionario en 3D empleando un resolutor basado en la presiones (A modo de progresión en este análisis, luego de presentado los resultados en estado permanente se harán las modificaciones para presentar un análisis transiente).

En cuanto a los modelos utilizados, intervendrán en la resolución del problema las ecuaciones de conservación de la masa, la cantidad de movimiento, la conservación de la energía y ecuaciones de especies producto de la reacción química de combustión.

Se trabaja, al presentarse el flujo como turbulento y dados los datos problemas con el modelo de dos ecuaciones “ $k-\epsilon$  realizable” con función estándar de pared.

La funcionalidad de la ecuación de la conservación de la energía resulta trivial, pero necesaria, ya que se lleva adelante el fenómeno de combustión para representar nuestro problema.

En nuestro caso, se utiliza el modelo “*Species Transport*” para resolver la combustión del gas natural, adoptándola como hipótesis probable y representativa de la combustión del LNG ya que se asume que el combustible está totalmente evaporado al ingreso del dominio de estudio. La composición del gas natural presenta la cromatografía según la Figura 6:



	Mole fraction	Mass fraction	Molecular weight (kg/kmol)	LHV (MJ/kg)
CH4	0.965	0.933	16	50
N2	0.013	0.022	28	0
C2H6	0.017	0.031	30	47.8
C3H8	0.001	0.003	44	46.35
C4H10	0.001	0.004	58	45.75
CO2	0.003	0.008	44	0

Figura 6. Cromatografía del Gas Natural.

Se observa una fracción másica de metano de 0.93 y para los fines de nuestro problema, se transforman los subíndices del metano de manera de representar la composición total del gas natural. De esta manera se obtiene:  $C_{1,022}H_{4,045}$ . Las propiedades de esta gas natural son, a saber:

- poder calorífico (LHV):  $49,9 \frac{MJ}{kg}$
- peso molecular (PM):  $16,31 \frac{kg}{kmol}$
- entalpía:  $-7.73 \times 10^7 \frac{J}{kmol}$

Se selecciona el submodelo de reacciones volumétricas debido a que se encuentran ambas en fase gaseosa. Se emplea la mezcla metano-aire (representativa de nuestra física del problema), atendiendo a una carga posterior que se corresponderá con lo plasmado en el análisis de transformación arriba descrito. Entiéndase, transformar el  $ch_4$  para que caracterice la cromatografía del gas natural de la Figura 6. Se emplea, además, el modelo “*Eddy-dissipation*”.

Para la definición de los materiales, atendiendo a la mezcla seleccionada, se edita el metano teniendo en cuenta la transformación descrita. Para lo cual se deben modificar las propiedades por defecto de este material, ya que el metano representa (en este caso) a todos los alcanos del gas natural.

De igual manera, se edita la mezcla metano-aire, modificando los subíndices para permitir la configuración dentro del sistema. Cuando se convierte el metano al gas natural, los coeficientes estequiométricos varían debido a que cambian el subíndice tanto del carbono como del hidrógeno. Y, para que se obtenga un coeficiente estequiométrico del combustible igual a 1 se cambia el coeficiente estequiométrico de los demás componentes presentes en la reacción. Se representa de esta manera la equivalencia entre el metano y el gas natural desarrollada.

Para variar las propiedades del sistema a fin de que, el metano, finalmente represente el gas en cuestión; se setea a través de una ecuación polinomial en términos de la temperatura de cinco coeficientes las propiedades termodinámicas del gas natural transformadas dentro del componente metano [1]. Se altera además la viscosidad de la mezcla a través de una función polinomial. Para la difusividad másica, se emplea el número de Lewis correspondiente a la unidad

y de esta manera, se entiende que tanto la difusividad térmica y la difusividad másica tienen el mismo orden de magnitud. Para el coeficiente de absorción se emplea el modelo “*wsggmm-gomaiin-based*”. Para la definición de modelos a emplear se selecciona el de ordenadas discretas (DO por sus siglas en inglés), con un una iteración de radiación por cada iteración de la ecuación de energía, logrando así, obtener en cada iteración los efectos de la radiación en el sistema.

### Condiciones de contorno

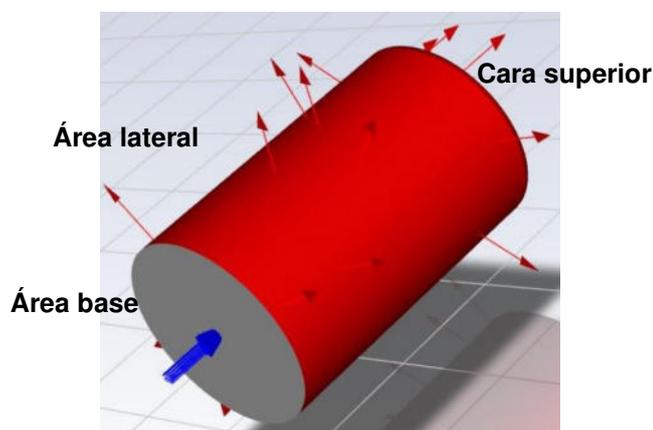
Continuando con la configuración del resolutor, se aborda la carga de las condiciones de contorno que responden a una representación de la física del problema. Se asume el combustible ya evaporado y el vapor de este, entrando al dominio desde el ingreso (“*inlet*”) presentando una temperatura constante y un flujo másico, también constante, obtenido experimentalmente [2].

**Tabla 1.** Dimensiones de los pool fire simulados.

Material	Diámetro del reservorio (m)	Altura del reservorio (m)
Aluminio	0.06	0.05
Aluminio	0.11	0.05
Aluminio	0.18	0.05

Particularmente, el tipo de condición de contorno para el ingreso es el “*mass flow inlet*”. Para la carga se debe tener en cuenta, como ya se estipuló, las consideraciones de temperatura del fluido que ingresa, el flujo másico previsto experimentalmente, el diámetro hidráulico en consonancia con el diámetro del reservorio y la fracción molar de las especies que componen el combustible según la Figura 6.

El ingreso está rodeado por un borde (“paredes virtuales del *pool fire*”) y una base adiabática. Las restantes condiciones de contorno se setean como salida (“*pressure outlet*”) a una distancia tal del reservorio de combustible que presente condiciones de fronteras abiertas.



**Figura 7.** Condiciones de contorno de entrada y salida.



A modo esquemático se presenta en esta tabla las condiciones de contorno [3]:

**Tabla 2.** Condiciones de contorno seteadas.

Condiciones de contorno	
Cara superior y área lateral del cilindro	$P_{total} = p_a$ $T = 298K$ "Pressure outlet"
Área base y paredes del reservorio ( <i>pool</i> )	Adiabático Flujo calórico al borde del reservorio, $\dot{q} = 0$
Flujo másico en el ingreso	$P = p_a$ $T = cte$

Por otro lado, se consideran, también, las condiciones iniciales del sistema:

**Tabla 3.** Condiciones iniciales del sistema.

Condiciones iniciales	
Fracción másica $N_2$	0.743
Fracción másica $O_2$	0.231
Fracción másica $CO_2$	0.013
Fracción másica $H_2O$	0.013
$p_a$	101325 Pa
$P = p_a$	0 (Presión relativa)
Velocidad del flujo	0
Temperatura	298 K
Aceleración de la gravedad	$9.81 \frac{m}{s^2}$
Fracción de mezcla	$f = 0$

Las condiciones presentadas en la tabla 3, son aquellas las cuales se consideran preexistentes en el dominio de estudio cilíndrico y que envuelven al reservorio de combustible (*pool fire*). Se asume como fluido, aire constituido de Nitrógeno, Oxígeno y Dióxido de Carbono. La existencia de especies de Dióxido de Carbono y Agua al inicio de la reacción son esenciales para empleo del modelo "Eddy-dissipation".

El esfuerzo que genera dar nombre y agrupar las distintas secciones en el diseñador de CAD, en este caso "SpaceClaim", retribuye en un orden e identificación (por compatibilidad) de parte de Fluent® que agiliza y facilita, inicialmente la carga de las condiciones de contorno.

Para la carga de las presiones de salida, es significativo, haber seteado inicialmente las condiciones de operación. En nuestro problema, se carga la presión de 101325 Pa. luego en la condiciones de contorno de salida se trabaja con presiones relativas.

Las pared del reservorio y la base del cilindro deberá tener una consideración de adiabaticidad (flujo cero) según lo ya estipulado.

En relación con el método de solución empleado se utiliza un esquema PISO para la resolución de los campos de velocidad y presión a través de este método predictor – corrector de dos



etapas. Con esquemas de discretización de segundo orden para las ecuaciones de cantidad de movimiento, energía y las presiones. Para las ecuaciones de los coeficientes de turbulencia se emplea, también, discretizaciones de segundo orden.

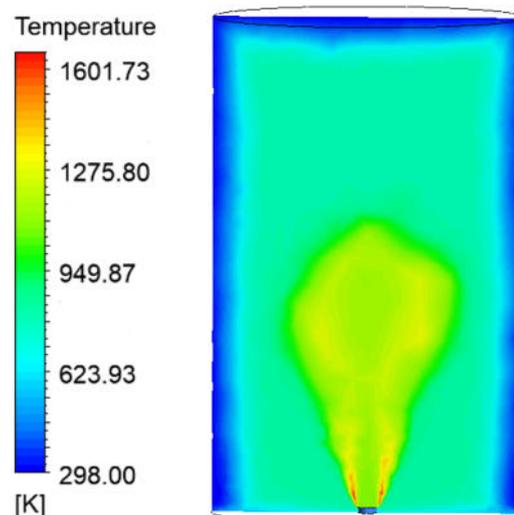
Se modifican los valores de relajación por defecto, para lograr que la solución sea más amortiguada lo cual ayuda a estabilizar el método que estamos empleando.

Para un tiempo  $t=0s$ , experimentalmente, se produciría la ignición de la llama, pero en el modelo computacional tal cual lo estamos representando, el mismo comenzaría a correr. A partir de esto, la llama crecerá hasta alcanzar su mayor tamaño posible.

Para la simulación se trabaja con un time step de  $0,01 < \Delta t < 0,001$ . En cuanto al número de iteraciones por paso de tiempo se variaron de 10 a 20.

#### 4. RESULTADOS

Para la visualización se emplean planos transversales a la geometría sobre los cuales se realiza la captación del campo seleccionado a modo de predicción del fenómeno.



**Figura 8.** Visualización de perfil de temperaturas 2D (Bandas de colores).

Bajo la consideración realizada, se analiza el desarrollo de los perfiles de temperatura en el espacio interior del volumen de estudio en distintos espacios temporales (Según Figura 8).

Se permite, por otro lado, a través de expresiones a definir por el usuario, lograr, por ejemplo, temperaturas máximas en planos auxiliares determinados.

A partir de la información obtenida se pueden establecer gráficos comparativos como el que se presenta. Se extraen temperaturas máximas instantáneas a distintas alturas del cilindro y se

comparan con información experimental de distintos ensayos realizados con otros combustibles [4] a igual diámetro del reservorio.

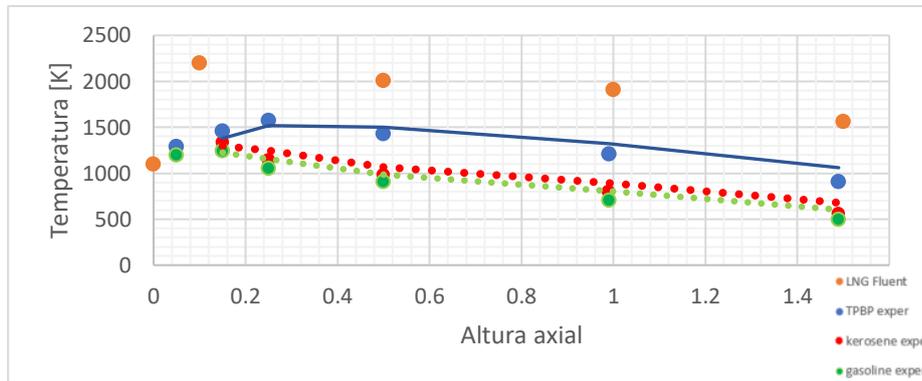


Figura 9. Temperaturas en diámetro de 0.18 m del reservorio.

Por otro lado, se pueden predecir temperaturas de llama promediadas por un área de secciones transversales del cilindro a igual altura para distintos tiempos. Las temperaturas en cuestión, presuntamente, tienden a disminuir con el crecimiento del diámetro del reservorio combustible. Este, además, es un criterio observado experimentalmente.

Tabla 4. Máximas temperaturas de llama promediadas por el área para un determinado tiempo.

Diámetro del reservorio combustible [m]	$\bar{T}_{max}$ [K]
0.06	2200
0.11	2200
0.18	2009.47

A través de la observación de los vórtices se puede determinar, además, variaciones de temperatura. Se percibe que las máximas se encuentran alrededor de las paredes del reservorio y luego a medida que se alejan del mismo disminuyen.

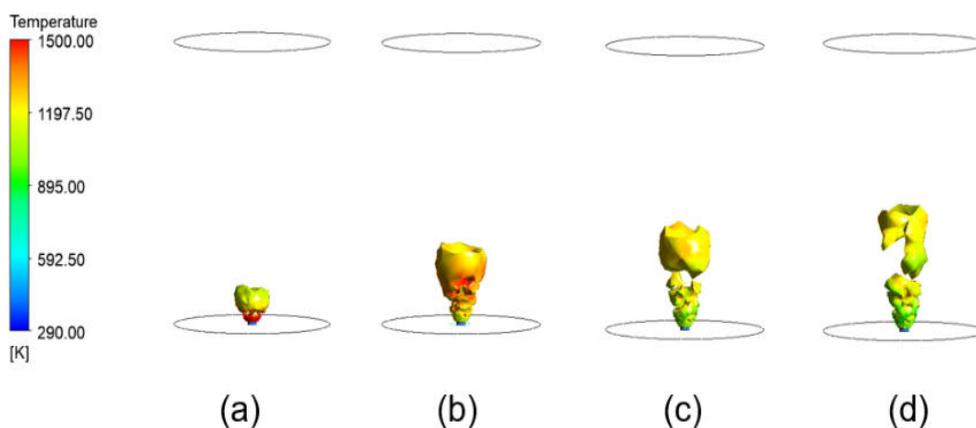
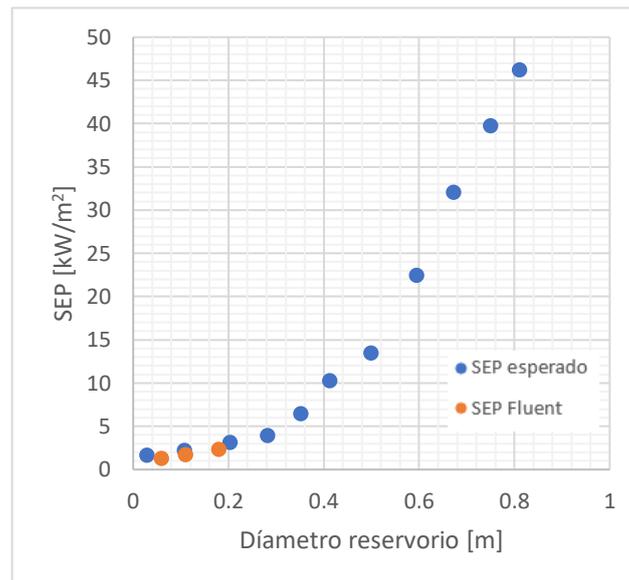


Figura 10. Visualización de remolinos y geometría aproximada 3D de la llama. (a) t=1s, (b) t=4s, t=7s, t=8s y t=10s.

La potencia emisiva superficial de un fuego depende la forma y superficie de llama. Especialmente de su altura, pero también de las condiciones de la atmósfera circundante. Serán importantes aspectos relacionados con la impedancia acústica, los vientos predominantes y el estado de la envolvente en general para definir correctamente este parámetro.

En este trabajo la  $\overline{SEP}$  se obtuvo por medio de la predicción de la variable “*radiative heat flux*”. Se considera una iso-superficie de una determinada temperatura de llama y a través del post proceso se puede definir el flujo calórico promedio sobre la iso-superficie para un instante determinado de tiempo. Se asume que un tiempo de 10s representa adecuadamente el



**Figura 11.** Comparativa sobre un SEP experimental y el obtenido en Fluent® según los diámetros de reservorio trabajados.

comportamiento de una combustión real, por lo que se toma este tiempo como parámetro.

Para el caso planteado se trabajó con una iso-superficie de una temperatura de 500 K de llama. El valor obtenido para el mayor diámetro de 0.18 m de reservorio es de un  $\overline{SEP} = 2.304 \frac{kW}{m^2}$ . En la Figura 11, se exponen datos obtenidos experimentalmente comparados con los de la simulación presentada.

## 5. CONCLUSIONES

En el trabajo presentado se utiliza el software ANSYS Fluent® para simular el comportamiento y caracterizar los llamados *pool fires*. Esta caracterización y dimensionamiento permitiría, inicialmente, determinar distancias seguras para proteger al personal y medios de incendios accidentales producto de la combustión de reservorios de combustible.

Se estudia un *pool fire* de gas licuado natural en reservorios de distintos diámetros.



Se presentan las técnicas para consolidar la geometría y detalles importantes para que la misma no presente inconvenientes al ser utilizada con el solver de CFD.

Respecto a la malla, se ha empleado una tetraédrica luego transformada en poliedros persiguiendo la intención de minimizar la cantidad de elementos y eficiencia del sistema, buscando obtener, de esta manera, una buena resolución.

Se ha hecho un uso intensivo de la herramienta de parametrización para optimizar tiempos de cálculo de manera automática, siendo ésta una ventaja superlativa de ANSYS Fluent® para el arribo de conclusiones.

Se presentan los contornos que se consideraron de interés para determinar y observar las estructuras del campo y perfiles de Temperaturas. Además, la presentación de vórtices ayuda a la identificación y observación de las diferentes zonas de la estructura de llama.

Por otro lado, se obtienen para las tres dimensiones de reservorios trabajados la  $\overline{SEP}$ , presentándose los valores obtenidos muy próximos a los datos experimentales existentes. Siendo este parámetro altamente representativo de la radiación térmica de un incendio.

## REFERENCIAS

- [1] A. Sayre, N. Lallement, J. Dugu, and R. Weber “Scalling Characteristics of Aerodynamics and Low-Nox Properties of Industrial Natural Gas Burners”, IFRF Doc No F40/y/11, International Flame Research Foundation, The Netherlands.
- [2] I.Vela, “CFD prediction of termal radiation of large, sooty, hydrocarbon pool fires”, Phd. Thesis, Universität Duisburg-Essen, 2009.
- [3] S.Schälike, K.D. Wehrstedt, A. Schönbacher “CFD simulation to predict the termal radiation of large LNG pool fires”, June 2011.
- [4] A. Attar, M. Pourmahdian, B. Anvaripour “Experimental Study and CFD Simulation of Pool Fires”, International Journal of Computer Applications (0975-8887), Volume 70 – No.11, May 2013.
- [5] ANSYS Fluent®, Customization Manual. ANSYS,Inc., release 2022-R1 edition 2021.



## SIMULACIÓN NUMÉRICA DE EXPLOSIONES CIRCULARES Y ESFÉRICAS

Alberto F. Lara<sup>1</sup>, Mariano Madeo<sup>2</sup>, Sebastián E. Moreira<sup>3</sup> y Edgardo A. Serafín<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Simulación y Cálculo Numérico (SiCaNLab) – Facultad de Ingeniería del Ejército (FIE), Universidad de la Defensa Nacional (UNDEF) [alara@fie.undef.edu.ar](mailto:alara@fie.undef.edu.ar)

<sup>2</sup> SiCaNLab·FIE – UNDEF [madeo@fie.undef.edu.ar](mailto:madeo@fie.undef.edu.ar)

<sup>3</sup> Compañía de Ingenieros QBN y de Apoyo a la Emergencia 601 – Ejército Argentino  
[smoreira@ejercito.mil.ar](mailto:smoreira@ejercito.mil.ar)

<sup>4</sup> SiCaNLab·FIE – UNDEF [serafinea@fie.undef.edu.ar](mailto:serafinea@fie.undef.edu.ar)

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad mostrar cómo se utilizan técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) en el dictado de las asignaturas Detónica y Materiales Elastoplásticos de las carreras de Ingeniería Química e Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería del Ejército (FIE-UNDEF). La comprensión de la fenomenología asociada a las ondas de choque y/o detonaciones mediante la observación de la variación espacial y temporal de la densidad, presión, temperatura y velocidad, permite interpretar el comportamiento de estos flujos de manera detallada. El objetivo de este trabajo es aplicar CFD para analizar la resolución y visualización de explosiones circulares y esféricas utilizando una programación en lenguaje Python. Este trabajo describe un esquema conceptual basado en las ecuaciones de Euler con una progresión natural para abordar problemas de dificultad creciente: ondas de choque planas, ondas de choque circulares y esféricas, detonaciones y detonaciones con proyección de material fragmentado. El sistema de ecuaciones planteado se resuelve utilizando el método de volúmenes finitos (FVM), con un esquema de Godunov y una aproximación lineal de Roe. Los resultados obtenidos para una explosión circular se comparan con la solución de una onda de choque plana.

**Palabras Clave:** *detónica, onda de choque, método de volúmenes finitos, ecuaciones de Euler*



## 1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles y materiales explosivos pueden sostener dos tipos de ondas: llamas y detonaciones. Las llamas son ondas de difusión [1] que avanzan lentamente y entregan calor a la vecindad. La velocidad de una llama está en el orden de metros por segundo [2] y la compresibilidad del material reactivo sin quemar no tiene influencia en la propagación de la llama [3]. Por otro lado, las detonaciones son ondas rápidas y violentas que se desplazan en el orden de miles de metros por segundo y están encabezadas por una onda de choque que, mediante una muy alta compresión, dispara la reacción química exotérmica en el material explosivo. A diferencia de las llamas, las detonaciones no dependen de mecanismos difusivos y por lo tanto, al analizarlas, el transporte por difusión puede despreciarse [4]. El conocimiento detallado del comportamiento de las detonaciones y su interacción es fundamental para garantizar la seguridad en el almacenamiento y transporte de materiales explosivos. Comprender las condiciones de una detonación, cómo se propagan las ondas de choque y cómo interactúan con el medio, es esencial para diseñar y/o mejorar la performance de dispositivos explosivos de uso en la minería, la construcción y en el ámbito militar. La detonación de un explosivo condensado o gaseoso se modela habitualmente como un proceso iniciado y sostenido por la acción de una onda de choque y las ondas de choque se analizan y estudian a través de la aplicación directa de las leyes de conservación, dado que se conserva la masa total, la cantidad de movimiento y la energía. La *detónica computacional*, pariente directo de la dinámica de fluidos computacional, utiliza y aplica muchas de las técnicas y esquemas utilizados por CFD (CFD, acrónimo adoptado del inglés "Computational Fluid Dynamics") para resolver problemas de esta naturaleza.

El Laboratorio de Simulación y Cálculo Numérico (SiCaNLab) se encuentra trabajando con un esquema conceptual sobre el cual abordar el estudio de los modelos matemáticos de las detonaciones para un tratamiento numérico sistémico. Este esquema permite lograr una mejor interpretación del enfoque analítico clásico de una detonación y de un choque. Con pequeñas modificaciones, también es posible obtener soluciones para detonaciones e interacciones de mayor complejidad. El esquema conceptual está diseñado para facilitar la transición desde la detónica analítica hacia la *detónica computacional*, con el fin de producir programas de computación básicos (scripts) que resuelvan los problemas planteados.

El esquema consta de cuatro etapas cómo se indica en la Figura 1 y se construye a partir de la resolución de un problema fundamental para la detónica computacional: la solución numérica del problema de Riemann para un tubo de choque. Las etapas conforman un proceso de evolución natural y definen una progresión sucesiva en la interpretación y complejidad de los fenómenos involucrados en una detonación. Las primera y cuarta etapa ya fueron abordadas en artículos anteriores [5, 6], y en este trabajo se presentan las características intrínsecas y los resultados de la segunda etapa: una explosión circular.



ETAPA y FENÓMENO FÍSICO		MODELO	GENERACIÓN		RESUELVE	
			Tipo de fuente	Forma	Problema	Ref
1	onda de choque normal	Euler inviscido	---	---	tubo de choque / onda normal plana 1D	Quinodoz [6]
2	onda de choque normal circular	Euler con generación	geométrica	$S_G$	explosión circular o esférica (axisimétrica)	Toro [14]
3	detonación lineal, circular o esférica	Euler reactivo	reacción química	$S_R$	detonación en fase gaseosa ideal/real o en dos fases	Fickett [3]
4	detonación con proyección de partículas	Euler reactivo + interacciones	transferencia a partículas	$S_P$	proyección de metralla, fragmentos de munición	Moreira [5]

Figura 1: Esquema conceptual de cuatro etapas sobre el cual abordar el estudio de los modelos matemáticos de las detonaciones y sus aplicaciones.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático de base a utilizar se corresponde con la ecuación general de transporte en su forma diferencial como postula Ferziger [7]. Si la variable dependiente se indica como una variable específica  $\phi$ , la forma de la ecuación general de transporte es

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (1)$$

La Ecuación (1) tiene cuatro términos, el de acumulación o transiente, el de transporte convectivo, el de transporte difusivo y el término fuente o de generación;  $\Gamma_\phi$  representa el coeficiente de difusión,  $\rho$  la densidad y  $\mathbf{u}$  el vector velocidad. Los valores y formas de  $\Gamma_\phi$  y  $S_\phi$  son específicas para cada significado particular de la variable  $\phi$ .

En el caso que nos convoca, ondas de choque y detonaciones, los fenómenos de difusión, la disipación viscosa y la difusión de calor, se consideran despreciables como mecanismos de transporte frente a la magnitud del mecanismo de convección. Consecuentemente, la Ecuación (1) se reduce a sólo tres términos: transiente, convección y fuentes. Si ahora consideramos las fuentes de generación particulares para cada variable  $\phi$  en una detonación y exponemos las tres fuentes de acuerdo al modelo conceptual presentado en la sección anterior, la conservación de la masa ( $\phi = 1$ ), la conservación de la cantidad de movimiento ( $\phi = \mathbf{u}$ ), la conservación de la energía ( $\phi = E$ ) y la conservación de especies ( $\phi = \lambda$ ), quedan como

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = \alpha S_G \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla(p\mathbf{I}) + \alpha S_G + S_P \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}E) = -\nabla(p\mathbf{u}) + \alpha S_G + S_P \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\lambda)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\lambda) = \alpha S_G + S_R \quad (5)$$



en las cuales la fuente  $S_\phi$  es nula para la conservación de la masa, el gradiente de presión para la cantidad de movimiento, el trabajo de expansión para la conservación de la energía y la generación/consumo de especies para la conservación de especies. En las Ecuaciones (2-5)  $E$  es la energía total específica y  $\lambda$  la fracción de masa de los productos de la reacción tal que  $0 \leq \lambda \leq 1$  (puede considerarse como el grado de avance de la reacción). El modelo matemático para una detonación unidimensional responde a las *ecuaciones de Euler para flujo reactivo* y puede asimismo representarse de manera compacta y en forma matricial [8-10] de la siguiente manera

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} = \alpha \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_R + \mathbf{S}_P \quad (6)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho E \\ \rho \lambda \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u u + p \\ (\rho E + p)u \\ \rho \lambda u \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_G = -\frac{1}{x} \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u u + p \\ (\rho E + p)u \\ \rho \lambda u \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_R = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_P = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{F} \\ \dot{Q} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Las fuentes particulares  $S_\phi$  de la cantidad de movimiento y de la energía pasan a explicitarse del lado izquierdo en el vector  $\mathbf{F}(\mathbf{U})$  denominado *vector de flujos*, mientras que la fuente de reacción química, la geométrica y la de transferencia de partículas quedan a la derecha. El vector  $\mathbf{U}$  contiene las variables conservativas y los vectores fuente corresponden a:

- fente geométrica  $\mathbf{S}_G$  : permite que el sistema se pueda configurar para flujo unidimensional plano, circular o esférico con  $\alpha = 0, 1$  o  $2$  respectivamente
- fente de reacción  $\mathbf{S}_R$  : contiene la fuente de velocidad de reacción química que gobierna el avance de la reacción o la fracción de masa de los productos  $r = r(\lambda)$
- fente de transferencia a partículas  $\mathbf{S}_P$  : representa el acople dinámico entre los productos de detonación y un campo de partículas de masa discreta;  $\dot{F}$  representa la transferencia de cantidad de movimiento y  $\dot{Q}$  representa una transferencia de energía térmica

Luego de este enfoque general, cabe indicar que para las dos primeras etapas de nuestro esquema conceptual se utilizarán las *ecuaciones de Euler para flujo inviscido* unidimensional con una única fuente, la geométrica. Nuestro modelo queda entonces reducido a

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} = \alpha \mathbf{S}_G \quad (8)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho E \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u u + p \\ (\rho E + p)u \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_G = -\frac{1}{x} \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u u + p \\ (\rho E + p)u \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 3. ESQUEMA NUMÉRICO

El cálculo numérico para resolver problemas que contienen discontinuidades, como ondas de choque o detonaciones, presenta requerimientos bastante exigentes en cuanto al esquema numérico a utilizar. Si bien en la mayoría de los casos las ecuaciones se presentan en derivadas parciales formuladas para una variada gama de funciones posibles, la elección más obvia es



trabajar con variables conservativas. Los métodos de captura de onda de choque (*shock-capturing*) presentan un esquema numérico que permiten que naturalmente se “capture” la discontinuidad al desarrollar la solución del campo de flujo en el dominio de estudio (i.e. aparece como resultado directo del algoritmo computacional sin necesidad de realizar un tratamiento especial sobre la ubicación de la discontinuidad en sí misma) [11]. Si se tiene en cuenta el carácter hiperbólico de las ecuaciones de Euler y los aspectos intrínsecos relacionados con su *autoespacio* parecería natural que un esquema numérico para resolver las ecuaciones de flujo apele a toda esta información contenida en el modelo matemático [12]. Esto no sería otra cosa que respetar la física del flujo.

Trabajando en un contexto de *shock-capturing*, los esquemas numéricos centrados no funcionan adecuadamente ya que no diferencian si el sistema responde a una dirección o sentido privilegiado. Como resultado, se producen oscilaciones severas cerca de una discontinuidad y es necesario recurrir a técnicas numéricas para evitarlas. Este inconveniente ha sido el que impulsó el desarrollo de esquemas *upwind* (aguas arriba o contracorriente). Estos esquemas están desarrollados para tener en cuenta la propagación de la información a lo largo de direcciones “privilegiadas” o de las características de manera tal que los valores involucrados en las derivadas espaciales involucren sólo al dominio que físicamente influencia el cálculo. Si el esquema se implementa adecuadamente, el cálculo y captura de una onda de choque o detonación se puede lograr sin tener oscilaciones. Sin embargo, la técnica es altamente difusiva y tiene una precisión de primer orden. Esto quiere decir que la onda, normalmente una discontinuidad bien definida, se “ensanchará” y producirá un gradiente que se irá extendiendo. Para reducir o eliminar estas propiedades, pero mantener las ventajas inherentes de un esquema *upwind*, la comunidad de CFD ha desarrollado, a lo largo de las últimas décadas, una serie de algoritmos para atacar estos inconvenientes. Es así como aparecen los esquemas TVD (Total Variation Diminishing), ENO (Essentially Non-Oscillatory), y técnicas FVS (flux-vector splitting), FDS (flux-difference splitting), y esquemas de Godunov con distintas aproximaciones para acelerar la solución del problema no-lineal. En este último grupo sobresale el método de aproximación lineal de Roe y el de Osher [11].

Para resolver nuestro problema de explosión circular y su onda de choque asociada, utilizaremos una técnica de *shock-capturing* mediante el método de volúmenes finitos (FVM), con un esquema *upwind* y una discretización temporal explícita con el esquema de Godunov y una aproximación lineal de Roe. La técnica elegida está contemplada como una técnica clásica de FDS .

En 1959, Sergei K. Godunov [13] propuso un método para resolver la dinámica de fluidos compresibles con discontinuidades que era, desde el punto de vista conceptual, completamente distinto al método de diferencias finitas que se estaba utilizando hasta ese momento. Godunov propuso una integración en tiempo y en espacio similar a lo que es hoy el método clásico FVM.

El concepto básico propuesto por Godunov consiste en *resolver de manera exacta y local* las ecuaciones de Euler aplicadas en la interfaz de distintas porciones, tramos o regiones en los cuales se divide el dominio de estudio y, pasando por todas y cada una de esas porciones, armar el “rompecabezas” del campo global del flujo, o sea, en todo el dominio en cuestión. Para interpretar el método de Godunov utilizaremos las ecuaciones de Euler en su forma matricial según las Ecuaciones (8-9). La discretización de la Ecuación (8) por el método FVM se inicia integrando las ecuaciones en el dominio espacial y en el dominio temporal de manera que

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial t} dV dt = \alpha \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial \mathbf{S}_G}{\partial t} dV dt \quad (10)$$

y si consideramos el Teorema del Valor Medio aplicado a las variables en cuestión

$$\bar{\mathbf{F}}_e^n = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{F}[\mathbf{U}(e, t)] dt, \quad \bar{\mathbf{U}}_p^n = \frac{1}{\Delta x} \int_w^e \mathbf{U}(x, t^n) dx, \quad \bar{\mathbf{S}}_p^n = \frac{1}{\Delta x} \int_w^e \mathbf{S}_G(x, t^n) dx$$

obtenemos,

$$\bar{\mathbf{U}}_p^{n+1} = \bar{\mathbf{U}}_p^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [\bar{\mathbf{F}}_e^n - \bar{\mathbf{F}}_w^n] + \alpha \bar{\mathbf{S}}_p^n \Delta t \quad (11)$$

Resolver de manera exacta y local las ecuaciones de Euler aplicadas en la interfaz de los volúmenes de control, implica encontrar la solución a un *problema de Riemann*, de manera local y sucesiva en cada interfaz. Naturalmente, esta solución coincide con la solución del campo del flujo en un tubo de choque como el analizado en nuestro trabajo previo [9]. Desde una perspectiva FVM, cada tramo/región es un volumen de control y, en este contexto, la variable que estemos analizando, e.g.  $\mathbf{U}$ , se considera que tiene un valor promedio constante en cada volumen considerado. En la Figura 2 se puede ver el mallado y arreglo utilizado en un sector con tres volúmenes de control para un esquema de Godunov.

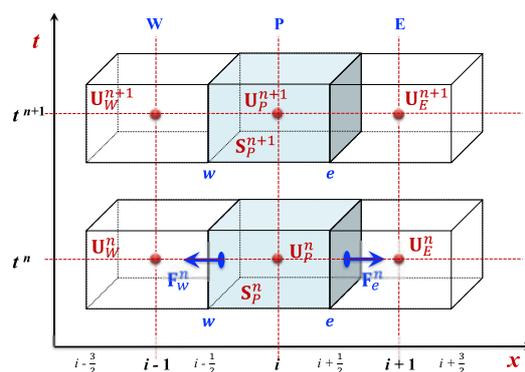


Figura 2: Discretización geométrica para un problema 1D; se muestran los dos vectores de flujo en las superficies.

Si examinamos en detalle la representación aproximada por el valor medio de la variable  $\mathbf{U}_i$  en la Figura 3.a, vemos que en cada superficie del volumen de control central, o sea en las posiciones oeste ( $w = i - 1/2$ ) y este ( $e = i + 1/2$ ), se presenta una discontinuidad respecto del valor  $\mathbf{U}_W$  y  $\mathbf{U}_E$  de los respectivos volúmenes contiguos. Esta situación indudablemente

indicaría que cuando el tiempo comience a transcurrir, se dispararían mini-problemas de tubo de choque, uno en cada superficie del volumen de control  $P$ , como se muestra en la Figura 3.b. En este caso tenemos una onda de choque que se mueve hacia la derecha (sentido  $+$ ) desde la posición  $i - 1/2$  y una onda de expansión que se mueve hacia la izquierda (sentido  $-$ ) desde  $i + 1/2$  y que afectan al volumen de control  $P$ . Por lo tanto, la evolución temporal de  $\mathbf{U}_i^n$  se verá afectada de manera tal que  $\mathbf{U}_i^n$  tendrá una contribución desde la cara oeste por medio del flujo  $\mathbf{F}(\mathbf{U})_w$  y desde la cara este por medio del flujo  $\mathbf{F}(\mathbf{U})_e$ . Transcurrido el tiempo  $\Delta t$  los nuevos valores de  $\mathbf{U}_i^n$  se promedian para obtener  $\mathbf{U}_i^{n+1}$ . Se requiere además que las ondas producidas por los dos problemas de Riemann en las caras del volumen de control no se intersecten, *i.e.* las ondas que salen de la cara oeste y de la cara este no deben interactuar entre si antes de transcurrido  $\Delta t$ . La solución del problema de Riemann como el caso que se muestra en la Figura 4.b requiere resolver un problema no-lineal, por lo que se infiere que se ganaría una importante eficiencia numérica si pudiésemos obtener una solución lineal que se aproxime al problema de Riemann original.

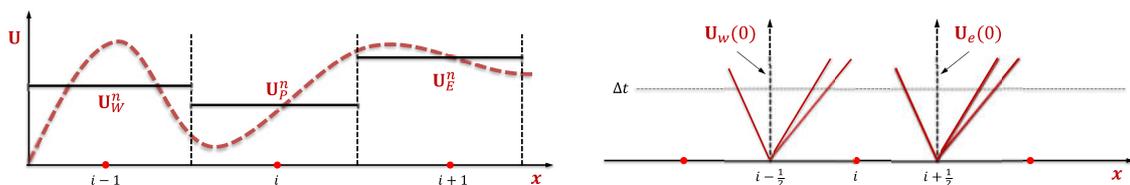


Figura 3: **a)** representación de una variable  $\mathbf{U}(x)$  (línea punteada) y su aproximación determinada por un valor medio calculado en cada volumen de control y **b)** representación del problema de Riemann que se dispara en cada superficie del volumen de control  $P$ .

Esta es la base conceptual del esquema de Roe. Si el problema de Riemann original, con las condiciones iniciales, es

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} = \alpha \mathbf{S}_G \quad \mathbf{U}(x, 0) = \begin{cases} \mathbf{U}_L & x < 0 \\ \mathbf{U}_R & x > 0 \end{cases} \quad (12)$$

La aproximación lineal de Roe para resolver el problema de Riemann es

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \hat{\mathbf{A}} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \alpha \mathbf{S}_G \quad (13)$$

en la cual las condiciones iniciales son las mismas que las del problema no-lineal y  $\hat{\mathbf{A}}$  es denominada la *matriz de Roe promediada*. La matriz  $\hat{\mathbf{A}}$  se asume constante y surge del Jacobiano de la Ecuación (12), definido por  $\mathbf{A}(\mathbf{U}) = \partial \mathbf{F}(\mathbf{U}) / \partial \mathbf{U}$ , pero con componentes que se obtienen utilizando valores promediados de  $\mathbf{U}$  (denominados valores promedios de Roe) en la interfaz que separa dos volúmenes de control, cada uno con un estado distinto de  $\mathbf{U}$ ; esto se indica con  $\hat{\mathbf{A}} = \hat{\mathbf{A}}(\mathbf{U}_L, \mathbf{U}_R)$ .  $\hat{\mathbf{A}}$  debe satisfacer ciertas condiciones para que la solución del problema lineal sea una solución aproximada del problema de Riemann no-lineal. Las condiciones son:

1. El campo vectorial  $\mathbf{U}$  se relaciona con el espacio vectorial  $\mathbf{F}(\mathbf{U})$  mediante una transformación lineal .....  $\mathbf{F}(\mathbf{U}_R + \mathbf{U}_L) = \mathbf{F}(\mathbf{U}_R) + \mathbf{F}(\mathbf{U}_L)$

2. A medida que  $\mathbf{U}_L$  se acerque a  $\mathbf{U}_R$ , i.e. cuando se alcance un estado no perturbado por la discontinuidad .....  $\hat{\mathbf{A}} = \hat{\mathbf{A}}(\mathbf{U}_L, \mathbf{U}_R) \Rightarrow \mathbf{A}(\mathbf{U})$  cuando  $\mathbf{U}_L \rightarrow \mathbf{U}_R \rightarrow \mathbf{U}$
3. Para cualquier valor de  $\mathbf{U}_L$  y  $\mathbf{U}_R$  la condición del "salto" a través de la interfaz o cara debe ser la correcta, i.e. ....  $\mathbf{F}(\mathbf{U}_R) - \mathbf{F}(\mathbf{U}_L) = \hat{\mathbf{A}}(\mathbf{U}_R - \mathbf{U}_L)$
4. Los autovalores de  $\hat{\mathbf{A}}$  deben ser reales y linealmente independientes.

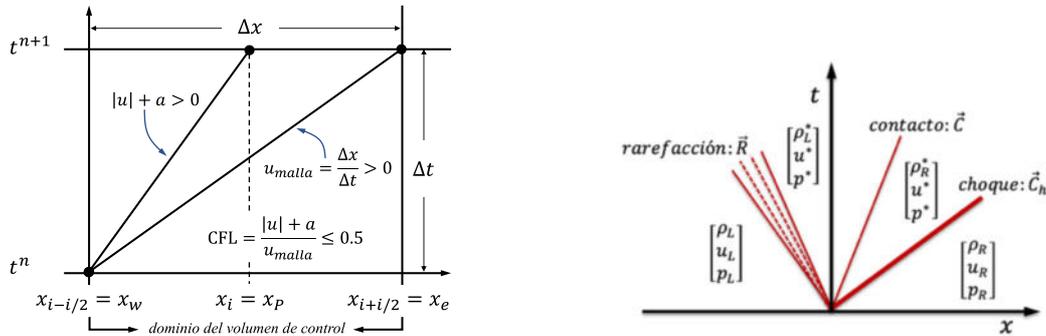


Figura 4: **a)** interpretación de la "velocidad de malla" y del parámetro CFL y **b)** solución del tubo de choque para tres variables primitivas; se muestran las tres ondas producidas

El carácter hiperbólico de la ecuación original debe ser conservado por el problema lineal, entonces  $\hat{\mathbf{A}}$  debe admitir la descomposición  $\hat{\mathbf{A}} = \hat{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{\Lambda}} \hat{\mathbf{L}}$ , en la cual  $\hat{\mathbf{R}}$  es la matriz de *autovectores por derecha*,  $\hat{\mathbf{L}} = \hat{\mathbf{R}}^{-1}$  es la matriz de *autovectores por izquierda*, siempre calculados con los valores promedios de Roe, y  $\hat{\mathbf{\Lambda}}$  la *matriz diagonal de autovalores*. La Ecuación (13) se escribe entonces como

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \hat{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{\Lambda}} \hat{\mathbf{L}} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \alpha \mathbf{S}_G \quad (14)$$

Resumiendo, la aproximación lineal de Roe implica resolver un problema de Riemann en cada superficie del volumen de control mediante una aproximación lineal del flujo  $\mathbf{F}(\mathbf{U})$  en las caras respectivas. Al analizar la Ecuación (11), vemos que el problema se centra en calcular los flujos  $\bar{\mathbf{F}}_e^n$  y  $\bar{\mathbf{F}}_w^n$  con una técnica *upwind* de manera que se facilite la captura de las ondas teniendo en cuenta que se pueden mover en un sentido o en el otro, según corresponda y de acuerdo al problema de Riemann que se plantee localmente en la superficie en cuestión. El cálculo de estos flujos, nos lleva a plantear un vector de "flujo numérico" que designaremos como  $\mathbf{f}$  y que se obtiene utilizando la matriz  $\hat{\mathbf{A}}$  partida en un componente negativo y otro positivo dependiendo del sentido de las ondas que actúan sobre la superficie que se analice. Consecuentemente, se puede "partir" el cálculo de los flujos en contribuciones positivas y negativas de las ondas a fin de obtener una fórmula de cálculo para el vector de flujo numérico  $\mathbf{f}$ . En la Figura 5 vemos cómo el cálculo del flujo a través de una superficie se puede iniciar, indistintamente, desde la zona izquierda  $\mathbf{L}$  o desde la derecha  $\mathbf{R}$ . Si comenzamos por la zona izquierda, obtenemos (se obvian los estados temporales, todos corresponden al nivel  $n$ )

$$\bar{\mathbf{F}}_{i+\frac{1}{2}} - \bar{\mathbf{F}}_L = \hat{\mathbf{A}}^-(\bar{\mathbf{U}}_R - \bar{\mathbf{U}}_L) \quad (15)$$



y si comenzamos por la zona derecha obtenemos

$$\bar{F}_R - \bar{F}_{i+\frac{1}{2}} = \hat{A}^+ ((\bar{U}_R - \bar{U}_L)) \quad (16)$$

$\hat{A}^-$  y  $\hat{A}^+$  corresponden a la partición negativa y positiva de la matriz de acuerdo a la incidencia de las ondas, respectivamente. Al combinar las Ecuaciones (15,16) y sacar el promedio, encontramos que la fórmula para el cálculo del flujo numérico a través de la superficie  $i + \frac{1}{2}$  es

$$F_{i+\frac{1}{2}} \equiv f = \frac{1}{2} [F_R + F_L - |\hat{A}| (U_R - U_L)] \quad (17)$$

En la Ecuación (17),  $|\hat{A}| = \hat{A}^- + \hat{A}^+$  y se calcula como  $\hat{R} |\hat{A}| \hat{L}$  siendo  $|\hat{A}|$  la matriz diagonal conformada por los valores absolutos de los autovalores.

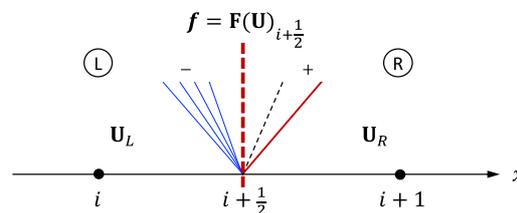


Figura 5: Esquema para determinar el flujo numérico  $f$  en una aproximación lineal de Roe en un esquema de Godunov.

#### 4. ESTRUCTURA DEL CÓDIGO COMPUTACIONAL

Para poder resolver nuestro sistema de ecuaciones simulamos el estado inicial de una explosión circular mediante una acumulación de presión en la parte interna de un “diafragma” circular cerrado. La explosión se inicia al producirse la ruptura del diafragma. En el extremo exterior de nuestro dominio definimos una condición de contorno de Neumann tal que  $\partial U / \partial r = 0$  y en el extremo interior  $r = 0$ , definimos condiciones de contorno “reflectivas” de manera que  $U_0 = U_1$  salvo para la variable velocidad, la cual de ser  $u_0 = -u_1$ . Se ha tenido cuidado de calcular el tamaño del dominio de estudio y del tiempo final de manera tal que no haya interacción con los contornos en cuestión. Seguidamente se presenta un pseudocódigo del programa núcleo utilizado en la simulación.

##### identificación, módulos y datos

**identificación, funciones y módulos:** scripts funciones (cinco) y módulos Python (dos)

**carga datos del problema:** datos iniciales:  $\rho, u, p \rightarrow U_R$  y  $U_L$ ; geometría L, xD; coeficientes:  $\gamma$

**calcula datos derivados:** tiempos: tlim, tf, parámetro: CFL,  $\alpha = 0,1,2 \rightarrow$  onda plana, cilíndrica o esférica

##### pre-proceso: mallado y adimensionalización)

**vectorización:** vectores espaciales y tamaños: xv, xR, nv, nx y vector temporal y tamaño: t, nt

**adimensionalización:** adimensionaliza sobre variables primitivas a derecha

##### solver

###### inicializa vectores

U ..... matriz  $3 \times nx$ :  $\rho, \rho u, E$ , (densidad, cantidad de movimiento y energía total)

S<sub>G</sub> ..... matriz  $3 \times nx$ : los componentes son flujos  $F(U)$

primitivas ..... matriz  $4 \times nx$ :  $\rho, u, p, T \rightarrow$  (densidad, velocidad, presión y temperatura)



**PASO 1:** calcula  $U$  inicial: calcula los datos iniciales  $U$  ( $d,d*u,E$ ) de primitivas ( $d,u,p,T$ )

```
U[0,:] = primitiva[0,:]
U[1,:] = primitiva[0,:]*primitiva[1,:]
U[2,:] = primitiva[2,:]/(gam-1) + 0.5*primitiva[0,:]*primitiva[1,:]**2
```

**PASO 2:** resuelve problema de Riemann (Godunov upwind c/linealización de Roe)

```
{ for k in range (1,nt+1): INICIA iteración en TIEMPO
    subPASO A: calcula primitivas desde U ( $d,d*u,E$ ) y fuentes geométrica  $S_G$ 
        primitiva[0,:] = U[0,:]
        primitiva[1,:] = (U[1,:]-Sg[1,:])/U[0,:]
        primitiva[2,:] = (gam-1)*(U[2,:]-0.5*U[1,:]*primitiva[1,:])
        primitiva[3,:] = primitiva[2,:]/primitiva[0,:]
    calcula  $S_G$  de primitivas ( $d,u,p,T$ )
        Sg[0,:] = 1/xR[:]*(primitiva[0,:]*primitiva[1,:])*dt
        Sg[1,:] = 1/xR[:]*(primitiva[0,:]*primitiva[1,:]*primitiva[1,:])*dt
        Sg[2,:] = 1/xR[:]*(primitiva[2,:]/(gam-1)+0.5*primitiva[0,:]*
            primitiva[1,:]**2+primitiva[2,:])*primitiva[1,:]*dt
    inicializa flujos de Roe  $\rightarrow 0.5*\{F(U_R) + F(U_L) - R|\Lambda|L*[U_R - U_L]\}$ 
        froe = np.zeros((3,nv))
    subPASO B: cálculo de variables de Roe promediadas y flujo parcial de Roe
        { for j in range (0,nv): INICIA iteración sobre CVs
            calcula promedios Roe
                dr = np.sqrt(primitiva[0,j+1]/primitiva[0,j]) # R_(i+1/2)
                droe = dr*primitiva[0,j]
                uroe = (dr*primitiva[1,j+1] + primitiva[1,j])/(dr+1)
                hroe = (dr*htot[j+1] + htot[j])/(dr+1)
                aroe = np.sqrt((gam-1.0)*(hroe - 0.5*uroe*uroe))
            define vector Udif =  $U_R - U_L$ 
            calcula matriz de autovectores por izquierda  $L$  y por derecha  $R$ 
            calcula matriz  $|\Lambda|$  y Jacobiano  $\rightarrow Ahat_{[i+1/2]} = R|\Lambda|L$ 
                Ahat = RR@LA@LL
            calcula el flujo parcial de Roe  $\rightarrow R|\Lambda|L*[U_R - U_L]$ 
                Udif = U[:,j+1] - U[:,j]
                froe[:,j] = Ahat@Udif
        }
    } end: FINALIZA iteración sobre CVs
    subPASO C: cálculo del  $F(U)$  desde  $U$  ( $d,d*u,E$ )
        FU[0,:] = U[1,:]
        u2 = (U[1,:]-Sg[1,:])/U[0,:]
        u22 = U[1,:]*u2
        p2 = (gam-1)*(U[2,:] - 0.5*u22)
        FU[1,:] = u22 + p2
        FU[2,:] = (U[2,:] + p2)*u2
    calcula el flujo final de ROE (flujo numérico)
        froe = 0.5*(FU[:,0:nv] + FU[:,1:nx] - froe)
    calcula solución de  $U$  ( $d,d*u,E$ ) en  $t_{[n+1]}$ 
        U[:,1:nv] = U[:,1:nv]-dt/dx*(phi[:,1:nv]-phi[:,0:nv-1])-alfa*Sg[:,1:nv]
    } end: FINALIZA iteración en TIEMPO
```

**PASO 3:** calcula las primitivas de ( $d,u,p,T$ ) de  $U$  ( $d,d*u,E$ )

**post-proceso:** archivos y visualización

ejecuta scripts para solución analítica, para la graficación, y para imprimir archivos de texto.

## 5. RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos para simular una explosión circular de acuerdo al problema planteado por Toro [14], Sección 17.1.1, *Explosion Test in Two-Space Dimensions*, pp 587-589. El problema corresponde a un dominio circular de un radio  $R = 1.0$ . En el instante inicial  $t = 0$ , la región interior ( $0 \leq R < 0.4$ ) tiene variables primitivas que se encuentran separadas de la región externa ( $0.4 \leq R \leq 1.0$ ) por una discontinuidad circular. Los dos estados iniciales se muestran en la Tabla 1 y los resultados para un tiempo de desarrollo  $t = 0.25$  se pueden observar en las Figuras (6-8).



Tabla 1. Condiciones iniciales para simular una explosión circular.

PARÁMETRO	INTERIOR	VALOR	EXTERIOR	VALOR
variables primitivas	densidad	1.0	densidad	0.125
	velocidad	0.0	velocidad	0.0
	presión	1.0	presión	0.1

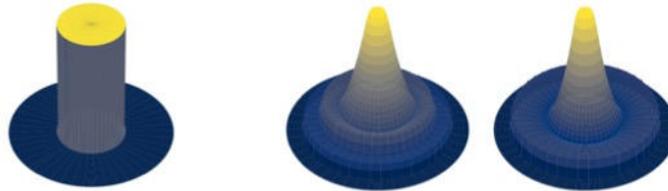


Figura 6: Resultados 3D; a la **izquierda** la situación inicial en  $t = 0$ , al **centro** y a la **derecha** las variables *densidad* y *presión* en  $t = 0.25$ , respectivamente.

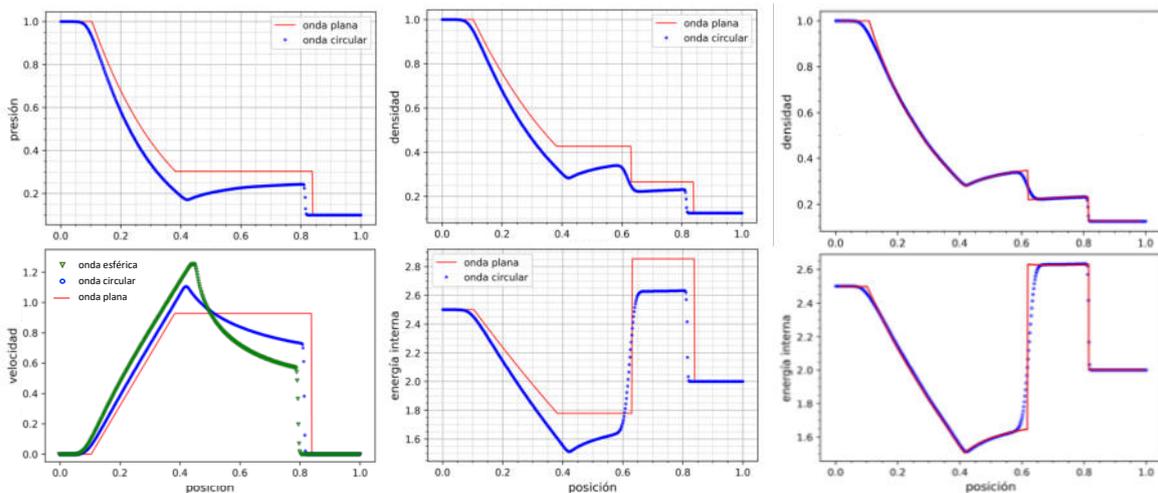


Figura 7: Resultados 1D; a la **izquierda** cuatro primitivas comparadas con el resultado de una onda plana, la *velocidad* muestra las tres ondas posibles, plana, circular y esférica, a la **derecha** se compara la *densidad* y la *energía interna* con los resultados de Toro [14].

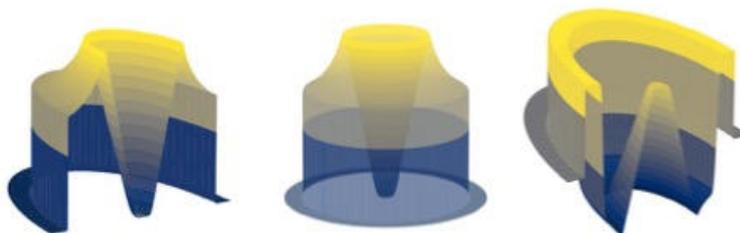


Figura 8: Resultados 3D; a la **izquierda** la velocidad en  $180^\circ$ , al **centro** la velocidad en  $360^\circ$  y a la **derecha** la energía interna en  $180^\circ$ .

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un esquema conceptual sobre el cual abordar el estudio de los modelos matemáticos de las detonaciones para un tratamiento numérico sistémico y, en particular, se presentaron las ecuaciones que gobiernan la segunda etapa propuesta: una explosión circular o esférica. Las ecuaciones fueron resueltas numéricamente a fin de simular el



comportamiento de distintas variables primitivas y los resultados obtenidos fueron analizados a la luz de dos escenarios: 1) comprobar que el algoritmo del programa elaborado funcione adecuadamente y que se obtengan soluciones físicamente correctas, escenario trabajado fundamentalmente sobre ondas planas y 2) corroborar resultados para la segunda etapa con resultados de archivo, en este caso sobre ondas circulares bidimensionales. Los resultados son satisfactorios y permiten avizorar que el esquema propuesto coadyuva a mejorar una interpretación y análisis convergentes sobre aspectos físicos, matemáticos y numéricos de los problemas que se pretenden resolver.

Más allá del lógico avance sobre la próxima etapa, simular una detonación, queda por delante adentrarse en una problemática aún no abordada: la transición natural de *explosivos densos* (sólidos y líquidos) hacia *productos de detonación* (gases), un problema de enfoque multifásico.

## REFERENCIAS

- [1] Glassman, I. *Combustion (3rd Ed)*. Elsevier Press. San Diego, California. 1996.
- [2] Liñan, A., & Williams, F. A. *Fundamental Aspects of Combustion*. Oxford University Press. New York. 1993.
- [3] Fickett, W., & Davis, W. *Detonation: Theory and Experiment*. Dover Publications, Inc. Mineola, N.Y. 1979.
- [4] Kapila, A. K. *An introduction to detonation theory*. En *Fluid Dynamical Aspects of Combustion Theory* (Onofri M. and Tesei A.). Longman Scientific & Technical. Harlow, Essex, UK. 1991.
- [5] Moreira, S. E., Quinodoz, F. D., Serra, N. U., Heindenreich, E., & Serafin, E. A. *Análisis de Propiedades Balísticas de los Explosivos Utilizando Métodos Numéricos*. *Mecánica Computacional*, 39(17), 603-612. 2022.
- [6] Quinodoz, F. D., Moreira, S. E., & Serafin, E. A. *Resolución de las Ecuaciones de Euler por el Método de Volúmenes Finitos Aplicado al Problema de una Onda de Choque en un Tubo (Shock Tube Problem)*. *Mecánica Computacional*, 37(21), 841-850. 2019.
- [7] Ferziger, J. H., & Peric, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics (2nd Ed Rev)*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 1999.
- [8] Hoffmann, K. A., & Chiang, S. T. *Computational Fluid Dynamics for Engineers, Vol 2 (1st Ed)*. Engineering Education System. Wichita, Kansas, USA. 1993.
- [9] Anderson, J. *Computational Fluid Dynamics: The basics with applications (1st Ed)*. McGraw-Hill Education. New York. 1995.
- [10] Nance, D. V. *Basic detonation physics algorithms* (Interim Report RW-EG-TR-2011-159). Air Force Research Laboratory - Munitions Directorate. Eglin AFB, Florida, USA. 2011.
- [11] Tannehill, J. C., Anderson, D. A., & Pletcher, R. H. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer (2nd Ed.)*. Taylor and Francis. Washington, USA. 1997.
- [12] Laney, C. B. *Computational Gasdynamics*. Cambridge University Press. Cambridge. 1998.
- [13] Toro, E. F. (Ed.). *Godunov Methods: Theory and Applications*. Springer Science+Business Mediapringer US. New York, USA. 2001.
- [14] Toro, E. F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction (3rd Ed)*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 2009.



## Estudio comparativo de la dinámica de un UGV, aplicando DINÁMICA DE CUERPO RÍGIDO, FLEXIBLE y comparando con los datos experimentales

Sebastian Tesoriero <sup>1</sup>, Sebastian Loscri <sup>2</sup>, Pablo Vilar<sup>3</sup>, Marcelo Acuña <sup>5</sup>

y Elvio Heidenreich <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Estudiante de la Facultad de Ingeniería del Ejercito – stesoriero@fie.undef.edu.ar

<sup>2</sup> Estudiante de la Facultad de Ingeniería del Ejercito – sloscri@fie.undef.edu.ar

<sup>3</sup> Docente de la Facultad de Ingeniería del Ejercito – pvilar@fie.undef.edu.ar

<sup>4</sup> Docente de la Facultad de Ingeniería del Ejercito – macuña@fie.undef.edu.ar

<sup>5</sup> Docente de la Facultad de Ingeniería del Ejercito – eheidenreich @fie.undef.edu.ar

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo comparar la dinámica vertical de un vehículo autónomo de exploración (VAE) utilizando dinámica de cuerpo rígido y dinámica de cuerpo flexible, con la medición de aceleraciones. Para lograr esto, se obtuvieron datos experimentales a través de un acelerómetro con 3 grados de libertad ubicado en la carrocería del vehículo. El modelo de dinámica vertical que se aplicará al vehículo corresponde al sistema de 7 grados de libertad ampliamente utilizado en el campo de estudio, pero se analizará cuidadosamente la cadena cinemática de la suspensión de cada eje (delantero y trasero) para producir un modelo matemático que sea equivalente al comportamiento del vehículo en la realidad. Para la realización de este modelado matemático se utilizarán distintos softwares como herramientas digitales, entre ellos Solid Works y MATLAB. Además, se calculará el modelo de dinámica de cuerpo flexible utilizando ANSYS Motion y respetando los grados de libertad de los cuerpos considerados como rígidos. Con el fin de comparar la dinámica vertical del VAE utilizando ambos modelos, se analizarán las aceleraciones medidas experimentalmente con las aceleraciones simuladas en los modelos de dinámica de cuerpo rígido y cuerpo flexible. Los resultados permitirán determinar la precisión de cada modelo y su capacidad para predecir el comportamiento vertical del vehículo autónomo de exploración. En conclusión, este trabajo contribuye al desarrollo de nuevos modelos de simulación para VAEs y brinda información valiosa para la mejora en el diseño y control de estos vehículos en futuras misiones de exploración.

**Palabras clave:** *Dinámica de Cuerpo Rígido; Dinámica de Cuerpo Flexible; Dinámica Vertical; Adquisición de Datos*



## 1. INTRODUCCIÓN

El vehículo denominado VAE (vehículo autónomo de exploración) es una clase de vehículo tipo UGV que nace a partir de la presentación de un grupo conformado entre alumnos y profesores de la universidad en el Proyecto para la Investigación y la Defensa (PIDDEF) (Figura 1).



Figura 1: Vehículo VAE

El VAE tiene las siguientes características:

- Es un vehículo no tripulado y autónomo.
- Su motorización es completamente eléctrica.
- Posee un malacate, útil para manejarse en terrenos irregulares.
- Compuesto con materiales ligeros para maximizar su capacidad de carga.
- Su sistema de navegación utiliza herramientas como radares, cámaras y ubicación GPS.
- Posee suspensión independiente en ambos ejes.
- Utiliza neumáticos tipo Off-Road para mejorar sus prestaciones en terrenos irregulares.
- Es de pequeñas dimensiones, lo que permitirá su transporte y su despliegue en tiempos cortos, con las menores dificultades posibles.
- Mecánica sencilla, con facilidad de mantenimiento y reparación.

Todas estas características permiten que el VAE sea un vehículo ideal para cumplir la función de ser enviado al campo de batalla, ante algún posible conflicto bélico, con el fin de retirar tropas heridas y suministrar armamento y provisiones, sin arriesgar la vida de ningún soldado.

Este vehículo tendrá lugar en este trabajo como el vehículo de prueba, al cual se le hará el estudio de dinámica vertical. Esto implica que cada parámetro dentro de nuestro modelado deberá tener relación con el vehículo en cuestión. Este problema ya fue solucionado ya que, en un trabajo previo a este, el vehículo fue caracterizado para el estudio dinámico a realizar [1].

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Modelado de dinámica vertical convencional

El estudio de dinámica vertical para un cuerpo rígido se basará en un modelado de vibraciones de 7 grados de libertad que se pueden encontrar en bibliografías referentes a este tema [2]. El modelado correspondiente al estudio completo del vehículo puede verse en la figura 2.

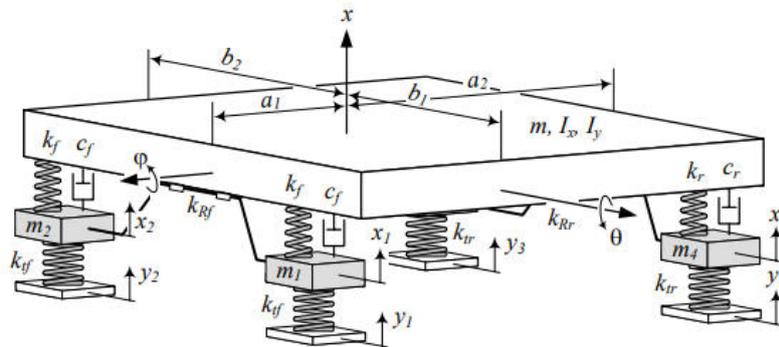


Figura 2: Modelo matemático

Para el modelado se usarán las ecuaciones de Newton con las linealizaciones correspondientes Ecuación 1 y 2.

$$\sum_{i=1}^n F = m * a \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^g T = I * \alpha \quad (2)$$

Con lo cual obtenemos 7 ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden que deberemos de resolver para encontrar los movimientos del vehículo.

## 2.2 Modelado de dinámica vertical equivalente

El modelado a utilizar expuesto en la figura 2 es concebido a partir de proponer las siguientes consideraciones:

- La masa suspendida (m) y las no suspendidas (m1/m4) presentan un desplazamiento lineal solamente en la dirección vertical (eje z).
- Todos los elementos que componen al sistema que representa el vehículo son considerados rígidos.
- Todas las uniones se consideran ideales.
- Los resortes y amortiguadores tienen comportamiento lineal.
- Los resortes y amortiguadores están ubicados verticalmente paralelos al eje Z.

Para cumplir con estas hipótesis, según [3-4] la cinemática de las suspensiones puede ser incluida a través de la razón de instalación modificando así las constantes elásticas y de amortiguamiento de los elementos de absorción y disipación de energía de la suspensión. Gracias a esto podemos modificar el modelo de la figura 2, dando así origen a un modelo nuevo se lo llamara modelado equivalente.

Este modelado equivalente se compone a partir de cambiar en el modelado convencional los valores de  $k_f, c_f, k_r, c_r$  por  $k_{eqd}, c_{eqd}, k_{eqt}, c_{eqt}$  donde estos 4 últimos parámetros representan las constantes de los amortiguadores y resortes, delanteros y traseros modificados a partir de la razón de instalación de cada suspensión.

### 2.3. Determinación de parámetros equivalentes tren delantero

En la figura 3 se ve esquematizado el modelo de la suspensión delantera (sistema McPherson) y la correspondiente parte del modelo equivalente. Para el modelo de la suspensión McPherson se considera que:

- Parte de la masa suspendida es puntual y está ubicada en el punto M.
- La masa no suspendida es puntual y está ubicada en el punto C.
- El punto Q es el anclaje del chasis y centro del sistema de referencia global.
- El punto P es la unión entre la parrilla de suspensión y el porta masa.
- Los puntos M y Q son estáticos, no cambian con respecto a su posición de equilibrio ( $Z_M = Z_{M0}$ ,  $Z_Q = Z_{Q0}$ ,  $Y_M = Y_{M0}$ ,  $Y_Q = Y_{Q0}$ )
- Los puntos C y P no son estáticos, ya que el segmento MP puede presentar un acortamiento o estiramiento ( $Z_P \neq Z_{P0}$ ,  $Z_C \neq Z_{C0}$ ,  $Y_P \neq Y_{P0}$ ,  $Y_C \neq Y_{C0}$ )

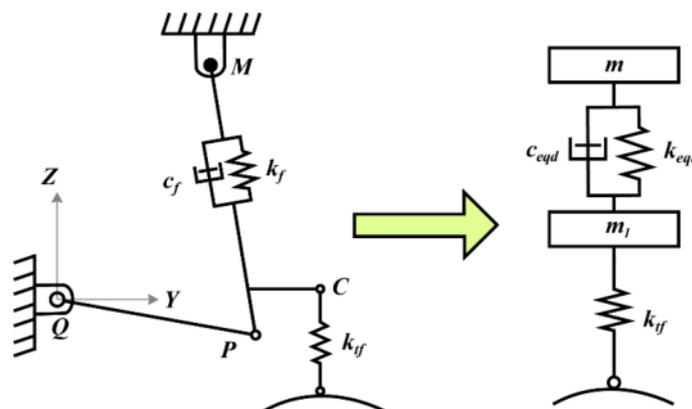


Figura 3: Modelado McPherson vs modelado equivalente

Analizando el mecanismo de la suspensión McPherson se puede ver que, durante la compresión y descompresión de la suspensión, el punto C posee una combinación de traslación en 2 sentidos y una rotación. Aunque el modelado lineal no tenga en cuenta esta rotación la incorporación de la cinemática de la suspensión mediante la razón de instalación es importante ya que da lugar a los parámetros de  $k_{eqd}$  y  $c_{eqd}$ . A partir de los desarrollos expuestos en [5], llegamos a:

$$k_{eqd} = \left( \frac{\beta l_d \cdot \cos \gamma_d}{s_1 \cdot \cos \delta_d} \right)^2 * k_f \quad (3)$$

$$c_{eqd} = \left( \frac{\beta l_d \cdot \cos \gamma_d}{s_1 \cdot \cos \delta_d} \right)^2 * c_f \quad (4)$$

### 2.4. Determinación de parámetros equivalentes tren trasero

En la figura 5 se ve esquematizado el modelo de la suspensión trasera (sistema brazo arrastrado) y la correspondiente parte del modelo equivalente. Para el modelo de la suspensión brazo arrastrado se tiene las mismas consideraciones que para el modelado McPherson con el agregado de:

- El punto P es la unión entre la parrilla de suspensión y la parte inferior del conjunto resorte - amortiguador.
- El análisis del modelo parte de ver la suspensión desde el lateral del vehículo.
- El punto C es colineal con el punto P

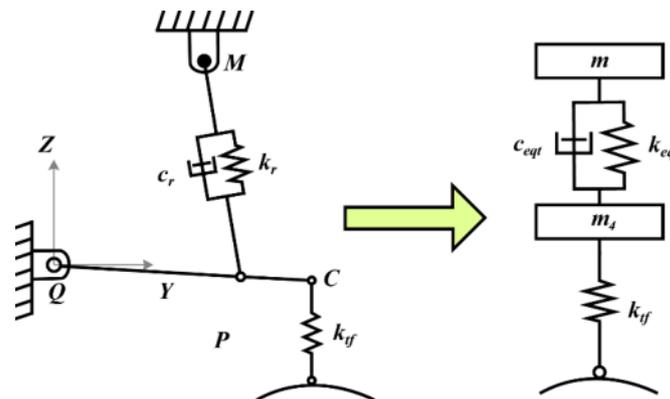


Figura 4: Modelado brazo arrastrado vs modelado equivalente

Al igual que en el modelado de la suspensión McPherson el punto C también presenta una rotación durante su movimiento vertical la cual no es incluida por el modelado lineal. Aun así, el uso de la razón de instalación para obtener los parámetros equivalentes  $k_{eqt}$  y  $c_{eqt}$  es importante porque incluye el cinematismo intrínseco de dicha suspensión en el modelado lineal.

Los parámetros mencionados anteriormente pueden encontrarse a partir de las ecuaciones 5 y 6, las cuales se obtuvieron de la misma manera que las (3) y (4).

$$k_{eqt} = \left( \frac{\beta_{lt} * \cos \gamma_t}{s_4 * \cos \delta_t} \right)^2 * k_r \quad (5)$$

$$c_{eqt} = \left( \frac{\beta_{lt} * \cos \gamma_t}{s_4 * \cos \delta_t} \right)^2 * c_r \quad (6)$$

La diferencia principal entre los modelos equivalentes de la suspensión McPherson y brazos arrastrados, no son las ecuaciones de las razones de instalación, sino como varían sus parámetros ( $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\beta$ ) con respecto a los desplazamientos y velocidades verticales aplicados en el punto C.

Los parámetros anteriormente mencionados corresponden a:

$\gamma$  – Angulo comprendido entre la proyección tangencial del segmento RP en el punto P con la vertical, con la letra d para la parte delantera (McPherson) y t para la trasera (Brazo arrastrado).

$\delta$  – Angulo comprendido entre la proyección tangencial del segmento RC en el punto C con la vertical, con la letra d para la parte delantera (McPherson) y t para la trasera (Brazo arrastrado).

$\beta$  – Representa el acortamiento u alargamiento del segmento MP, con la letra d para la parte delantera (McPherson) y t para la trasera (Brazo arrastrado).

El punto R comprendido en los segmentos RP y RC, es el centro instantáneo de rotación de cada sistema de suspensión. Todo lo anteriormente mencionado está presente más detalladamente en el trabajo [5].



## 2.5. Señal de entrada

Para evaluar el modelo matemático equivalente propuesto, es necesario definir una señal de entrada la cual servirá de excitación para el sistema. Esta señal se dará en las ruedas del vehículo, a través de un movimiento vertical.

Dado que el perfil del obstáculo ya está definido, se tienen los valores de desplazamientos, ahora solo falta determinar su variación con el tiempo. Esta dependerá de la distancia entre ruedas y la velocidad de circulación del vehículo.

A través de dichas consideraciones las ecuaciones (7) de movimiento rectilíneo uniforme y (8) de una recta que pasa por 2 puntos, se pueden reconstruir las señales de entrada según las condiciones de ensayo que se presentaran en el siguiente apartado.

$$X_f = X_o + V * (t_f - t_o) \quad (7)$$

$$y - y_1 = \left( \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) * (x - x_1) \quad (8)$$

## 2.6. Dinámica vertical mediante ANSYS MOTION

Se utilizó la aplicación Space Claim (Pertenece al software ANSYS) para trabajar sobre el archivo CAD del vehículo generado en Solid Edge.

En esta etapa, se modificó el archivo transformando los elementos sólidos (correspondientes a lo que forma el chasis y las estructuras tubulares) en elementos tipo chapa.

Como se puede observar en las figuras 5 y 6, se dejaron elementos como sólidos, estos son:

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| 1. Ruedas               | 2. Porta masas                           |
| 3. Rótula de suspensión | 4. Placa soporte de rótula de suspensión |
| 5. Baterías             | 6. Escaleras (rampas)                    |

Para estos materiales se debió incluir en el apartado de Engineering Data, su material correspondiente con sus características que los identifica.

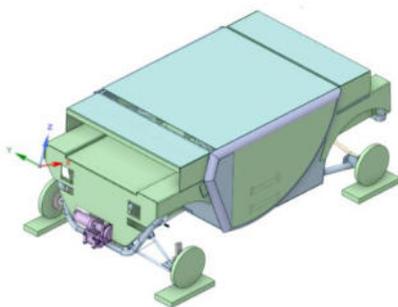


Figura 5: Archivo CAD original

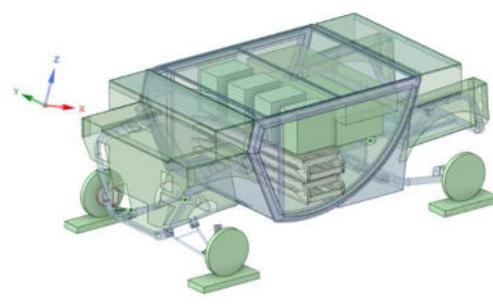
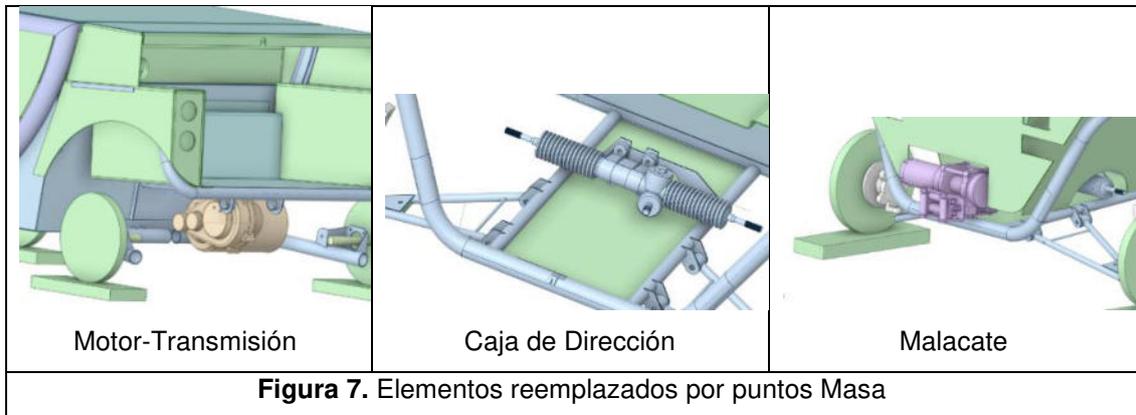


Figura 6: Archivo Space Claim

Es importante mencionar que 3 elementos (motor-transmisión, caja de dirección y malacate) se reemplazaron por los llamados "Puntos Masa" donde en ellos se especifica el peso de los mismos y sus momentos de inercia, por su puesto, orientados correctamente respecto al Centro de Coordenadas global del vehículo. Estos puntos se los vinculo al chasis del vehículo mediante uniones rígidas (figuras 7).



Una vez definida la geometría y asignados los materiales correspondientes a cada parte del vehículo, se procedió a identificar y seleccionar los tipos de uniones correspondientes. Estas pueden ser conexiones:

- Body to Body (vínculos entre piezas del vehículo)
- Body to Ground (vínculo entre ruedas y suelo)

En esta sección, mediante los tipos de conexiones antes mencionadas, se restringen los movimientos de cada pieza del vehículo.

Finalmente, definidas las conexiones, se procedió a configurar las señales de entrada. Es importante mencionar que para ello se debió crear una tabla de Tiempo vs. Posición que se obtuvo a partir de las señales de entrada mencionadas anteriormente.

Esta señal de entrada fue impuesta para los bloques que se encuentran en contacto con las ruedas (simulando ser el suelo donde transita el vehículo).

Esta señal de entrada genera un movimiento vertical en los bloques que, por ende, moverán las ruedas en un movimiento vertical ascendente, permitiendo el estudio de la suspensión (delantera y trasera) del vehículo, figuras 8 y 9.

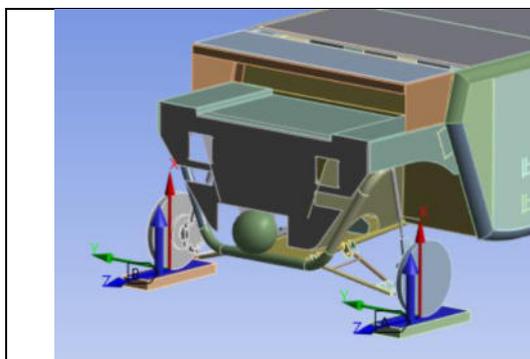


Figura 8: Señal en Susp. Delantera

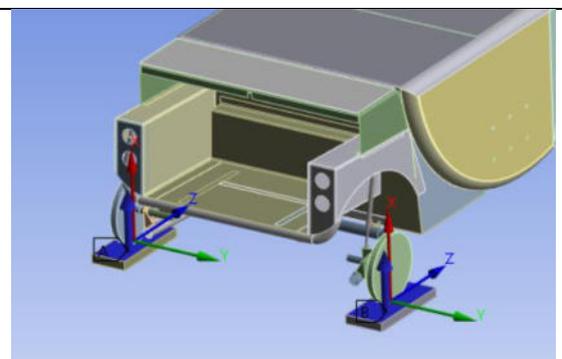


Figura 9: Señal en Susp. Trasera

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Experimentales

Se impulsó el vehículo en línea recta a una  $v$  de desplazamiento constante de 6 km/h y sobre el obstáculo que consiste en un perfil de acero en ángulo de 50mm x 50mm x 3mm.

Para medir las aceleraciones del vehículo se utilizó un acelerómetro triaxial TE4030-006-120, un adquirente de datos LabJack T7 PRO y una notebook ASUS TUF504GD.

La ubicación del acelerómetro fue lo más cercana posible al centro de masa del vehículo. Se hizo de esta manera para que tenga que hacerse el menor ajuste en el modelado a fin de comparar las aceleraciones.



Figura 10: Ubicación del acelerómetro en el vehículo

La figura 11 muestra los datos obtenidos directo desde el acelerómetro sin hacer ningún postprocesamiento de la señal.

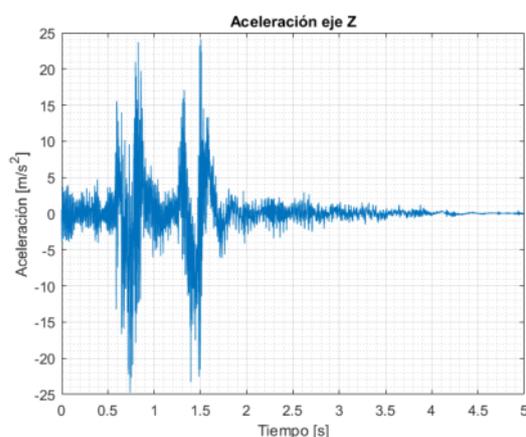


Figura 11: Señal original del acelerómetro

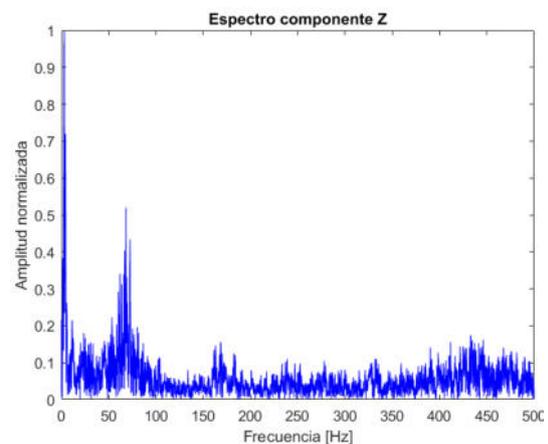


Figura 12: Frecuencias de la señal

A partir de la señal presente en la figura 11 se aplica una transformada rápida de Fourier (FFT) para poder ver el espectro de frecuencias dentro de la señal e identificar las que estén más presentes en la misma (figura 12).

Las frecuencias altas que están presentes en la señal corresponden generalmente a ruido eléctrico y a aceleraciones captadas por el acelerómetro que están vinculadas con la no flexibilidad del cuerpo. Debido a esto se procede a aplicar un filtro tipo Butterworth de orden 1,



siendo este elegido utilizando el mismo criterio mostrado en [5]. Este filtro eliminara las altas frecuencias a partir de 40 Hz, quedando la señal final (figura 13).

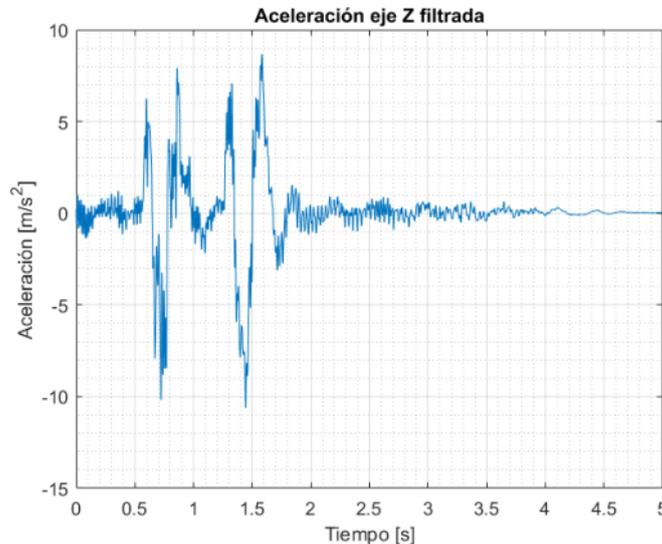


Figura 13: Señal final.

### 3.2. Analíticos

#### 3.2.1 Parámetros equivalentes

Para aplicar las ecuaciones (3), (4), (5) y (6) y dar con los valores equivalentes, es necesario anteriormente saber cómo es que varían las coordenadas de los puntos P y C de cada sistema de suspensión.

La primera tarea fue tomar mediciones en el vehículo en reposo (es decir apoyado en el suelo sin ninguna excitación externa) de los puntos M P y C de cada suspensión (tabla 6.1)

Tabla 1. Ubicación de coordenadas de puntos M, C y P.

	YP0	ZP0	YM0	ZM0	YC0	ZC0
McPherson	0.335	-0.065	0.234	0.516	0.466	0.058
Brazo arrastrado	0.300	0.046	0.217	0.225	0.353	0.055

Gracias a esto se pudo calcular como varían los puntos P y C, en las direcciones Z e Y, por lo que también se pudo llegar al acortamiento o estiramiento del segmento MP en cada sistema de suspensión. Esto sumado al previo conocimiento de las constantes  $k_f, c_f, k_r, c_r$  (tabla 2) por [1] nos permitió calcular a partir de curvas las constantes equivalentes correspondientes a la posición de reposo del vehículo (tabla 3).

Tabla 2. Constantes de amortiguamiento y elástica medida.

	$k_f [N/m]$	$c_f [Ns/m]$	$k_r [N/m]$	$c_r [Ns/m]$
VAE	11692	4911	43287	4721



Tabla 3. Constantes de amortiguamiento y elástica equivalente.

	$k_{eqd}$ [N/m]	$c_{eqd}$ [Ns/m]	$k_{eqt}$ [N/m]	$c_{eqt}$ [Ns/m]
VAE	8022	3370	27940	3047

### 3.2.2 Señal de entrada

En el apartado 3.1 se discutió la metodología del ensayo, en donde se definió la  $v$  de desplazamiento y el obstáculo a utilizar como perturbación. Gracias a esto podemos predecir con las ecuaciones (7) y (8).

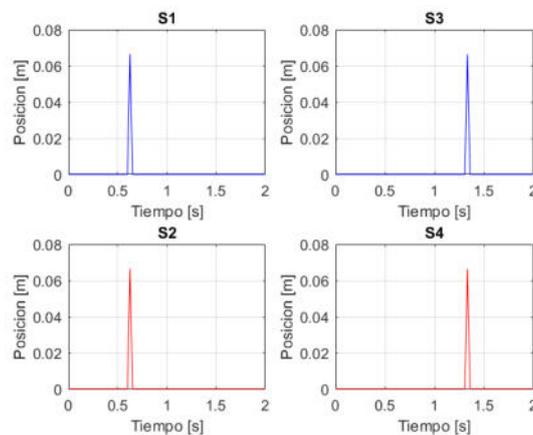


Figura 14: Señal de entrada

### 3.2.3 Resolución del modelado equivalente

A partir de la figura 2 se pueden plantear 7 ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden. Estas ecuaciones pueden ser resueltas a partir de los datos expuestos en la tabla 3 y los que se muestran a continuación en la tabla 4 procedentes de [1].

Tabla 4. Datos del VAE.

Parámetro	Magnitud
Masa suspendida, m	379.32 kg
Masa no suspendida delantera, m1/m2	15.55 kg
Masa no suspendida trasera, m3/m4	20.92 kg
Distancia a1	0.9748 m
Distancia a2	0.7982 m
Distancia b1	0.6249 m
Distancia b2	0.6037
Momento de Inercia de la masa m respecto al eje X, Ix	64.80 kg*m <sup>2</sup>
Momento de Inercia de la masa m respecto al eje Y, Iy	135.33 kg*m <sup>2</sup>
Constantes de rigidez torsional krr y krf	0

La resolución del conjunto de ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del sistema se hará por medio de una función de MATLAB llamada ODE45. Esta función soluciona las ecuaciones diferenciales en forma numérica usando un algoritmo de Runge-Kutta.

Utilizando esta función se llegan a los resultados de aceleraciones angulares de rolido y cabeceo, más la aceleración lineal vertical en el centro de masa de la masa suspendida. Luego a partir de la ecuación 9 se puede vincular las aceleraciones obtenidas en el modelado en el centro de masa con respecto a donde esta fue medida en el ensayo experimental.

$$Z_{acel}'' = \dot{Z}_m'' - 0.036\ddot{\theta} + 0.012\ddot{\phi} \quad (9)$$

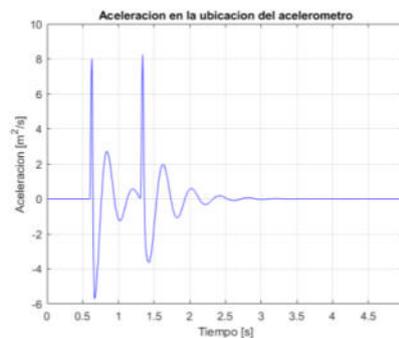


Figura 15: Aceleración del modelado equivalente.

### 3.2.4 Resultados simulación de Modelado en ANSYS

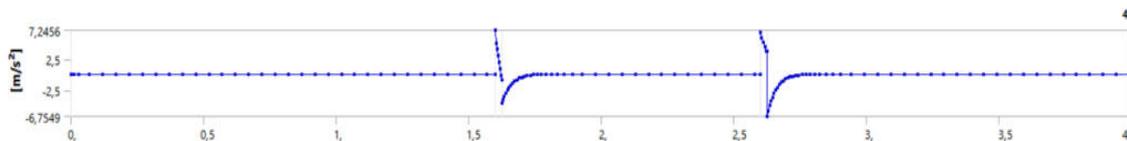


Figura 16: Gráfica de resultados (aceleración vs tiempo)

Como se puede observar en la figura 16, los resultados en la simulación por ANSYS, arrojan valores comparables de aceleración, ya que cuando se da la señal de entrada a la suspensión delantera el punto medido arroja un valor de 7.2 m/s<sup>2</sup> y cuando se da la señal de entrada a la suspensión trasera, el punto medido arroja un valor de 7,24 m/s<sup>2</sup>.

### 3. CONCLUSIONES

A partir de los resultados reflejados en la figura 17 podemos ver a priori una similitud cualitativa. Sin embargo, una de las diferencias principales entre las señales es el perfil irregular, debido a que el vehículo no es un cuerpo rígido. Sumado a esto, la ubicación del acelerómetro, decisión basada en requerimientos de espacio.

En las mediciones se tomarán como valores comparables entre el modelado y parte experimental los picos de las 2 primeras lomas señalados en la figura 17 correspondientes a la aceleración vertical del vehículo cuando el tren delantero y trasero pasan por el obstáculo en dirección vertical ascendente respectivamente. Los demás picos de las lomas siguientes no se toman en cuenta, ya que no son representativos con el modelo. Esto se debe a que, durante el ensayo, cuando la rueda de ambos trenes del vehículo impacta con el perfil, esta no copia perfectamente el perfil del piso, sino que a partir del punto más alto de este perfil procede a tomar una trayectoria curvilínea por el aire para luego impactar con el piso. Durante ese tiempo es que se produce una aceleración negativa durante la caída de la rueda y una positiva al impactar con el piso que son los dos picos siguientes que se ven luego de los señalados en la figura 17.

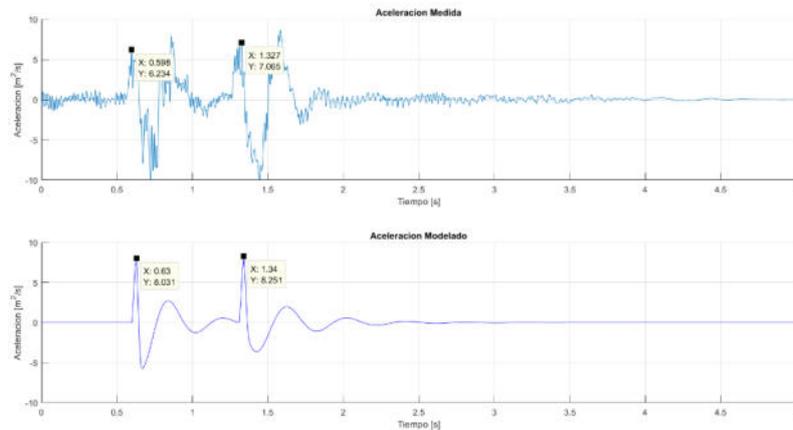


Figura 17: Comparación modelado equivalente vs ensayo experimental.

En los picos de interés resaltados en figura 17 la diferencia porcentual mayor es de 25.1% mientras que la menor de del 15% entre la parte experimental y matemática (tabla 5), esto indica que el modelado equivalente propuesto en la sección 5.2 es comparable con la realidad para estas condiciones de ensayo con un máximo de error del 25.1%.

Tabla 5. Constantes de amortiguamiento y elástica equivalente.

	<i>aceleracion medida [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>aceleracion del modelado [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>Diferencia porcentual</i>
Tren delantero	6.23	8.03	25
Tren trasero	7.06	8.25	15

El resultado del trabajo refleja que hay mayores aceleraciones presentes en el modelado matemático que en el sistema real, lo que implica que uno es más rígido que el otro. Esto presenta una correlación con la realidad ya que en el modelado solo se tiene en cuenta las rigideces de los resortes por considerar todo como un cuerpo rígido, mientras que en el sistema real actúan además de las anteriores las rigideces que componen las distintas partes del vehículo siendo en verdad un cuerpo flexible.

## REFERENCIAS

- [1] Pedro Sebastian Tesoriero. *Caracterización por ensayos y relevamiento CAD del proyecto PIDDEF INNOVA 16/2020 "VAE"*. Buenos Aires (2022).
- [2] Reza N Jazar. *Vehicle dynamics*. Vol. 1. Springer, 2008.
- [3] KP Balike, S Rakheja e I Stiharu. *Development of kineto-dynamic quarter-car model for synthesis of a double wishbone suspension*. En: *Vehicle System Dynamics* 49.1-2 (2011), pags. 107-128.
- [4] Jorge Hurel et al. *Determination of the equivalent parameters for modelling a McPherson suspension with a quarter-car model*. En: *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE. 2017, pags. 454-459.
- [5] Pedro Sebastian Tesoriero. *Dinamica vertical y validación por adquisición de datos del proyecto PIDDEF INNOVA 16/2020 "VAE"*. Buenos Aires (2022).



## PRUEBA HIDRÁULICA EN HOT-TAP EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL.

Leonardo Brisciese<sup>1</sup>, Héctor Sanzi<sup>1</sup> y Alejandro Turel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación de Ingeniería Estructural GIIE, UTN Facultad Regional Haedo,  
París 532 Haedo, Buenos Aires Argentina – [tecsaing@tecsaing.com.ar](mailto:tecsaing@tecsaing.com.ar)

### RESUMEN

En la industria del gas y del petróleo es una práctica constructiva habitual, la incorporación de conexiones en gasoductos u oleoductos, realizadas mientras la tubería se encuentra en operación, con el fin de no interrumpir la producción, evitando cortes del suministro y pérdida de producto, como emisiones al medio ambiente.

El procedimiento para tal fin es denominado *Hot Tap*, el cual consiste de una operación constructiva mecánica de soldadura y corte, conectando la nueva conexión o derivación a la tubería principal mediante soldadura, mientras esta se encuentra en servicio, es decir, con circulación de fluido y bajo presión. Posteriormente se procede al corte de la tubería principal en el sector interior de la derivación, para luego retirarlo a través de un dispositivo mecánico especial.

Antes de realizar la perforación de la tubería, y una vez soldada la conexión, es mandatorio efectuar la prueba de presión, con el objeto de verificar la integridad de unión y detectar posibles pérdidas.

Bajo esta situación constructiva, es imperativo realizar un estudio de integridad para determinar el comportamiento estructural del conjunto para la condición de prueba, incluyendo la determinación de las tensiones residuales debido al proceso de soldadura, teniendo en cuenta que la operación se realiza con el gasoducto en operación.

En este trabajo se presenta un procedimiento alternativo de análisis estructural, aplicando Simulación Computacional mediante el empleo de modelos tridimensionales de elementos finitos, para evaluar la integridad de los elementos que conforman la unión, previo al corte o perforado de la tubería, cuando se realiza la prueba de presión.

**Palabras clave:** *Hot Tap; Prueba de Presión; Simulación Computacional.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Las compañías dedicadas a la transmisión y distribución de gas, para expandir o modificar sus sistemas operativos, necesitan realizar conexiones o derivaciones a las tuberías.

En general ésta tarea se realiza retirando del servicio una parte del sistema, purgando el gas a la atmósfera para garantizar la seguridad al momento de llevar a cabo la modificación.

Este procedimiento produce entre otras, pérdida de producto, cortes del suministro, costos por la despresurización e inertización del ducto existente para la realización de la nueva conexión, incluyendo un impacto significativo en la atmósfera y en la salud.

Para minimizar los inconvenientes citados se realiza un proceso constructivo alternativo, denominado *Hot-Tap* [1,2,3], que consiste a partir de una operación mecánica de soldadura y corte, conectar la nueva derivación a la tubería, mientras esta se encuentra en servicio, es decir, la línea con circulación de fluido y bajo presión.

Por lo tanto, el procedimiento *Hot-Tap* consiste en soldar una conexión (o derivación) a la parte externa de la tubería en servicio [4,5], y posteriormente a partir de un dispositivo especial, proceder al corte del sector en el interior de la derivación, como se muestra en la Figura 1. El sector de pared cortado se remueve a través de la colocación de una válvula que posteriormente es cerrada para despresurizar y desacoplar la máquina perforadora con el cupón, donde luego se acometerá sobre la nueva derivación con la cañería de vinculación a la nueva instalación [6,7].

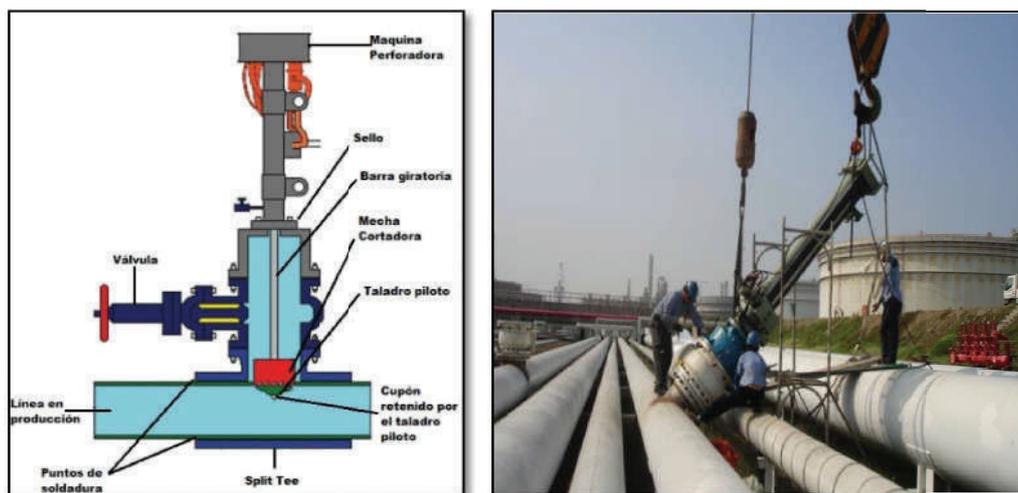


Figura 1. Presentación y disposición para la realización del Hot Tap [4,5,6,7].

Durante el proceso constructivo, una vez finalizada la soldadura de la derivación y antes de efectuar el corte, es necesario realizar ensayos no destructivos sobre las soldaduras de la



conexión, donde se incluye la prueba de presión [8], la cual asegura y certifica la efectividad de la unión soldada, revelando deficiencias internas que puedan provocar futuras fugas en operación.

Bajo esta condición parte del gasoducto se encuentra sometido a presión exterior, existiendo un riesgo estructural en el sector donde se realiza el *Hot Tap*, ya que la tubería podría colapsar por pandeo, considerando que la misma no fue diseñada para soportar dicha sollicitación [9,10], por lo tanto, la selección de la magnitud de la presión de prueba segura es fundamental y debe ser bien establecida. En estos casos, la práctica actual consiste en la utilización de curvas desarrolladas específicamente por las compañías operadoras [11] y que generalmente no están disponibles en el dominio público.

Dichas prácticas utilizan márgenes de seguridad altos, basados en modelos analíticos simplificados que no representan completamente la geometría de la conexión, que no tienen en cuenta la naturaleza del tipo de tensión presentes en la cercanía de la conexión con el gasoducto (en este caso las "Secundaria") y por último, no incluyen o evalúan la magnitud de las tensiones residuales que se generan durante el proceso de soldadura.

Según las Prácticas Recomendadas de API RP 2201 [6], para evitar un posible colapso interno de la pared de tubería, la presión debería ser al menos la misma que la de operación, pero no exceder un 10% más, y reducida aún, si hay riesgo de colapso de la tubería.

Cabe resaltar que para aquellos casos donde la presión deba reducirse por debajo de la operación, el uso de estos procedimientos involucraría un riesgo potencial adicional, siendo insuficientes para detectar fugas o deficiencias internas que puedan aparecer durante la operación. En este sentido, existe la necesidad real de estudiar el problema en detalle y desarrollar un método general para obtener presiones de prueba más altas y seguras.

Para cumplir con este requerimiento, en el presente trabajo se desarrolla un procedimiento alternativo de análisis utilizando la Simulación Computacional, con el fin de determinar la presión de prueba máxima, para diferentes relaciones de diámetros de la tubería de gasoducto y su derivación, que asegure la integridad estructural de la unión bajo esta condición, incluyendo la operativa, cuyos resultados se presentan en gráficos adimensionales de fácil interpretación y aplicación práctica.

## 2. PROCEDIMIENTO DE ANALISIS

Partiendo de la condición de diseño de la tubería y la derivación, en acuerdo con la norma ASME/ANSI B31.8 [9], el proceso constructivo se realiza a través del denominado *Hot-Tap*, el cual, a partir de una operación mecánica de soldadura y corte, se conecta la nueva derivación, mientras la tubería se encuentra en servicio, es decir, circulando fluido y bajo presión.



Para este proceso constructivo, un estudio completo de integridad estructural debería incluir las siguientes tres configuraciones de análisis, a saber:

- Diseño u operativa del gasoducto
- Inicial de Pre-Drilling (previo a la realización del corte)
- Final del Hot Tap

Durante la primera configuración se determinan los espesores del gasoducto, su derivación y posibilidad de refuerzos, en acuerdo con la norma de aplicación ASMEB31.8 [9], mientras que la inicial de Pre-Drilling, se realiza la soldadura de unión entre la derivación y la tubería, en acuerdo con el procedimiento calificado, según las pautas establecidas en el Apéndice B de API 1104 [12]. Finalizada la unión, se realiza la prueba de presión en el interior de la derivación para certificar el proceso constructivo y asegurar que no habrá fugas durante la operación.

En esta configuración y bajo la presión del gasoducto, se determina la presión de prueba máxima que no permita alcanzar los dos modos de fallas como la inestabilidad por pandeo y la sobre tensión en la zona más crítica de la pared de la tubería, ya que esta no está diseñada para soportar una presión externa, que podría colapsar bajo dicha sollicitación.

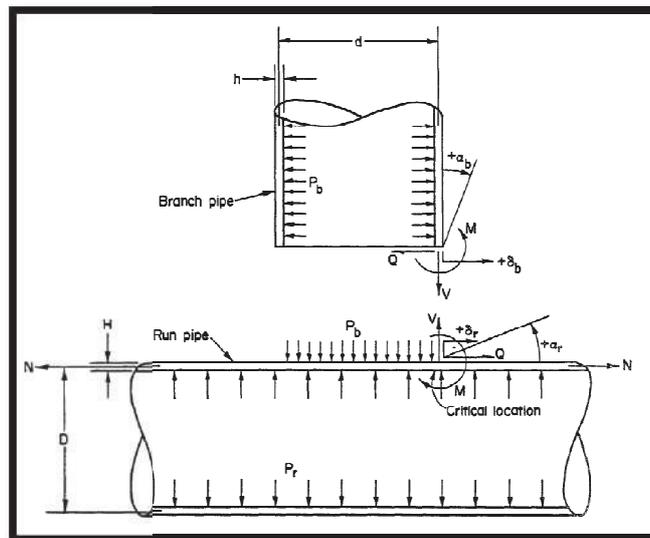


Figura 2. Sollicitación de presión sobre derivación y porción caño colector

Establecida dicha presión de prueba, se deberán determinar a partir de un estudio de inestabilidad del equilibrio la Presión Crítica de Pandeo sobre el gasoducto principal teniendo en cuenta que la carga está aplicada en forma externa, utilizando el procedimiento incorporado en la Parte 5 de ASME Sección VIII División 2 “Protección Contra Colapso por Pandeo” [15], y las tensiones residuales alcanzadas por el proceso de soldadura entre ambos elementos, de acuerdo al procedimiento incorporado en el Anexo 9D de la Norma API 579/ASME FFS-1 [13].



Por último, una vez finalizada y certificada la prueba de presión, se retira por corte mecánico el sector interno de la derivación y se somete al gasoducto a la presión de operación [6,7], cuya situación estructural deberá también ser verificada, incluyendo todos los estados de carga de la línea.

### **2.1. Determinación de la Presión de Prueba $P_b$ . Planteo de una Solución Analítica Simplificada**

Un procedimiento técnico llevado a cabo por AGA "Proof Testing of the Pre-Hot-Tap Branch Connection Catalog L51561e" [11], presenta un modelo analítico simplificado para evaluar las tensiones que se producen en la zona más crítica de la unión cuando se realiza la prueba de presión ( $P_b$ ), mientras la tubería se encuentra en funcionamiento a la presión de la línea ( $P_r$ ). La identificación de las presiones mencionadas y dimensiones generales, se muestran en la Figura 2.

El modelo analítico propuesto considera las siguientes hipótesis:

- (a) El análisis es de naturaleza elástico lineal, sin endurecimiento por deformación.
- (b) El esfuerzo dominante es el componente de la tensión longitudinal a lo largo de la línea central meridional de la sección circular cerrada del caño colector adyacente al interior de la pared de la derivación.
- (c) Se considera un modelo axilsimétrico alrededor del eje de derivación y se utiliza la teoría de placas cilíndricas delgadas.
- (c) La sección circular encerrada del caño colector no se libera de las tensiones longitudinales y de tensiones circulares hasta que no se haya completado el Hot-Tap.
- (d) La tubería portadora no está bajo flexión general o carga axial debido a la expansión térmica o asentamiento.
- (g) La tubería principal enterrada se excava cuando se realiza la operación de Hot-Tap, o la tubería está sobre el suelo.
- (h) No se pueden tener en cuenta las tensiones residuales debidas a la soldadura de la junta de derivación.
- (i) La geometría del conjunto tienen el mismo límite elástico y módulo de elasticidad.

Con las hipótesis planteadas, en acuerdo con la configuración dimensional mostrada en la Figura 2, utilizando las expresiones principales tomadas de Referencia [11], se obtienen los gráficos adimensionales mostrados en la Figura 3, que permiten determinar la Presión de Prueba  $P_b$ :

$$Pb = \frac{Pr * \left(1 + \frac{C}{\theta} + \frac{3B}{H\theta} - \frac{2}{F}\right)}{\left[\frac{\phi}{\theta} * \left(B + \frac{3A}{H}\right) + \frac{d}{D} * \frac{\omega}{\theta} * \left(C + \frac{3B}{H}\right) - \frac{d}{D} * \frac{3}{2H\beta_2}\right]} \quad (1)$$

Siendo:

$$A = 1 + \frac{6}{\beta_1^2 * h^2} ; B = \frac{6}{\beta_1^2 * h^2} ; C = \frac{12}{\beta_1 * h^2} + \frac{3}{\beta_2 * H^2} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{d}{h(1-v^2)} ; \phi = \frac{D\beta_2}{2H(1-v^2)} ; \theta = B^2 - AC$$

$$\beta_1 = \frac{1.818}{\sqrt{d * h}} ; \beta_2 = \frac{1.818}{\sqrt{D * H}} ; \bar{D}_1 = \frac{E * h^3}{12(1-v^2)} ; \bar{D}_2 = \frac{E * H^3}{12(1-v^2)} \quad (3)$$

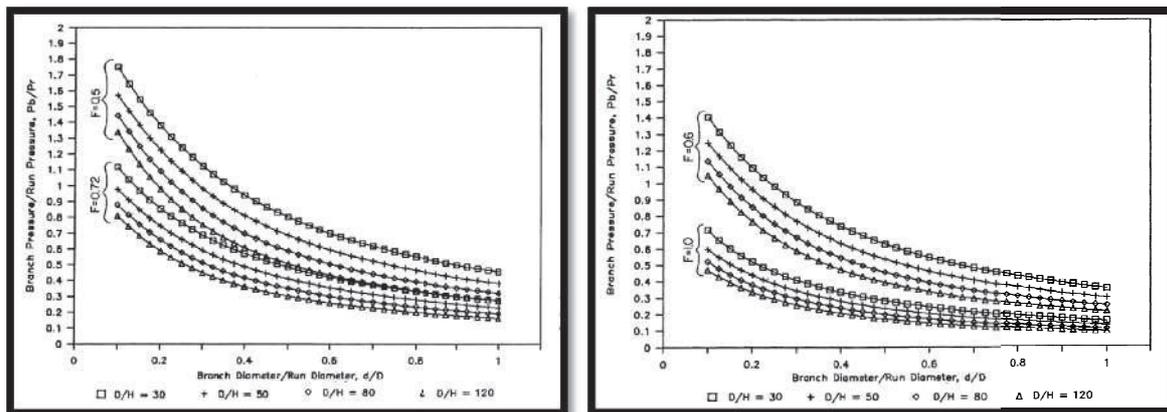


Figura 3. Relación presiones prueba Pb y gasoducto Pr, en función (d/D) y (D/H) y F

## 2.2. Planteo de un Modelo Computacional

Con el objeto de determinar la Presión de Prueba que garantice la integridad del conjunto, a continuación se presenta un análisis utilizando Técnicas Avanzadas de Cálculo, mediante el empleo de modelos tridimensionales de elementos finitos FEM.

Para tal fin, teniendo en cuenta las simetrías geométricas y de cargas del componente (según los planos XY e YZ con desplazamientos perpendiculares nulos, se propone un cuarto del modelo, altamente densificado y localizado del conjunto, utilizando elementos sólidos tridimensionales, del tipo SOLID 3D del Programa Ansys [14], Figura 4.

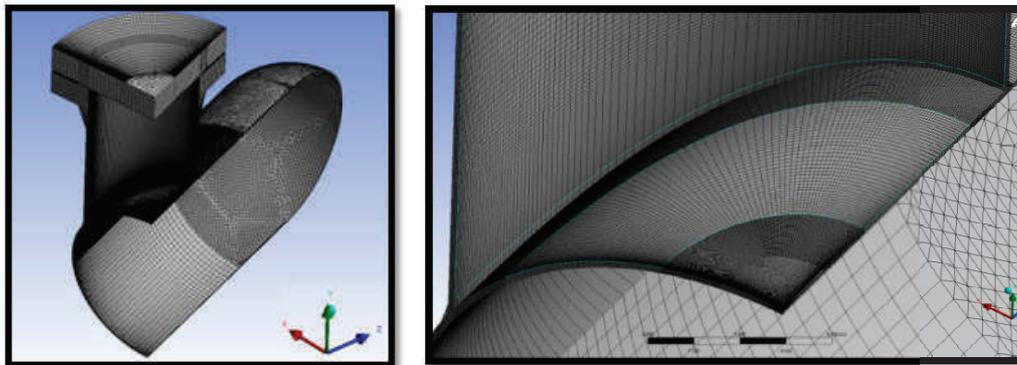


Figura 4: Modelo de Elementos Finitos

En ambos conductos se aplican las presiones del gasoducto y la de prueba en la derivación, incrementando paulatinamente esta última hasta alcanzar la máxima admisible, a partir de un análisis lineal elástico, en acuerdo con el Criterio de Clasificación de Tensiones de la Parte 5 del Código ASME Sección VIII División 2 [15].

Con el objeto de obtener resultados con un mayor grado de exactitud, se confeccionó un sub-modelado altamente densificado en la zona de interés, Figura 5.

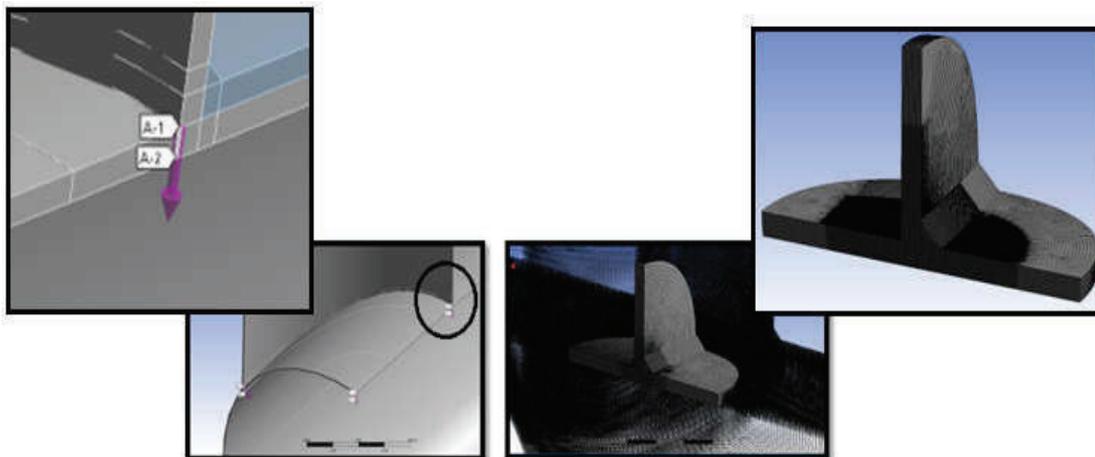


Figura 5: Zonas de análisis, Sub-modelado y Linealización de Tensiones A1/A2

### 3. ESTUDIO DE CASOS

Los casos estudiados se enfocan en buscar resultados de relación de presiones seguras en los mismos rangos de relación diámetro derivación y colector que los mostrados en la Figura 3 entre  $0.1 < d/D < 0.9$ , considerando para ello cuatro modelos según se presentan en la Tabla 1; para un mismo valor de  $D/H=120$  y distintos  $F$  (0.5, 0.6, 0.72 y 1) y presiones operativas del

colector. En todos los casos, el material para los ambos caños es de API 5L X60, cuyos datos de composición química y tensiones se presentan en la Tabla 2 [16].

Tabla 1. Dimensiones y presiones de colector de modelos analizados

N° de Modelo	NPS Colec.	Dext (mm)	Presión de colector				H (mm)	Material Colec.	NPS Deriv.	dext (mm)	B (mm)	Material Deriv.	d/D	D/H
			F:1 (PSI)	F:0.72 (PSI)	F:0.6 (PSI)	F:0.5 (PSI)								
1	30"	762	1000	720	600	500	6.35	X60	26"	660.4	6.35	X60	0.87	120
2									16"	406.4			0.53	120
3									6"	168.3			0.22	120
4									3"	88.9			0.12	120

Tabla 2. Propiedades del API 5L Gr X60

Steel Grade (Steel Name)	Mass Fraction, Based on Heat and Product Analyses				
	%				
	C	Mn	P	S	
	max	max	min	max	max
Seamless Pipe					
L415 or X60	0.28	1.40	—	0.030	0.030

Tension de Fluencia	415 Mpa
Tension de Rotura	565 Mpa
Tension admisible según B31.8	298
Módulo de Young	210.000 Mpa
Coefficiente de Poisson	0.3

### 3.1. Planteo del Modelo Computacional

Para las cuatro configuraciones dimensionales mencionadas, a partir del modelo computacional explicado en el Punto 2.2 y bajo las presiones del gasoducto  $P_r$  y de prueba  $P_b$ , se presentan las tensiones Equivalentes de Von Mises (MPa), en acuerdo con el Criterio de Clasificación de Tensiones Lineal Elástico de la Parte 5 del Código ASME Sección VIII División 2 [15].

Por lo tanto, para una relación  $d/D = 0.53$ ,  $D/H = 120$ ,  $F = 0.72$  y presión del gasoducto de 50 barg, se obtienen en las Figuras 6 y 7, las Tensiones de Von Mises Primarias de Membrana Local  $P_L$  y las Primarias más Secundarias, respectivamente.

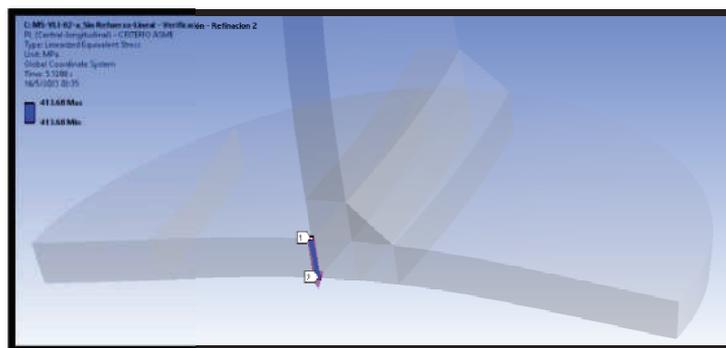


Figura 6. Tensiones de Von Mises Primarias de Membrana Local  $P_L$

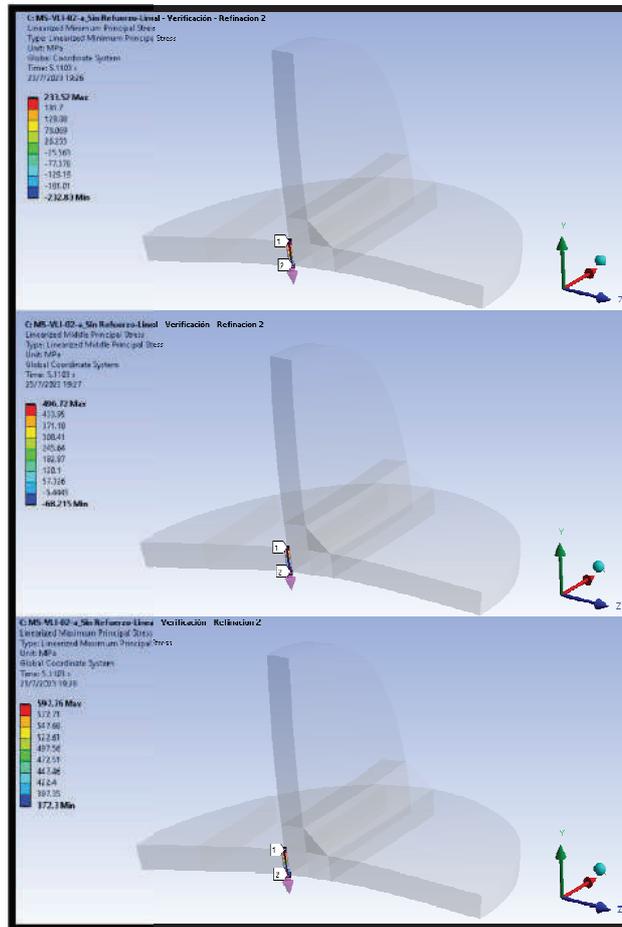


Figura 7. Tensiones de Von Mises Primarias más Secundarias

### 3.2. Comparación de Resultados

Para el esquema dimensional propuesto, en la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de ambos procedimientos de la relación entre la presión segura de prueba “Pb” en la derivación y la presente en la tubería “Pr”, según Referencia [11] y los de la Simulación Computacional, mientras que en los gráficos de la Figura 8, se comparan las curvas de cálculo analítico de AGA y los puntos calculados mediante FEM, de estos últimos se traza una curva de tendencia que puede ser utilizada para extrapolar valores Pb/Pr para cualquier valor de d/D entre 0.1/0.9

Tabla 3. Comparación de resultados

N° de Modelo	d/D	D/H	Relación de presiones seguras Pb/Pr							
			F = 0.5		F = 0.6		F = 0.72		F = 1	
			AGA	FEM	AGA	FEM	AGA	FEM	AGA	FEM
1	0.87	120	0.31	0.54	0.24	0.46	0.19	0.39	0.1	0.18
2	0.53	120	0.49	0.66	0.38	0.55	0.29	0.46	0.16	0.25
3	0.22	120	0.94	1.72	0.74	1.40	0.56	1.14	0.32	0.77
4	0.12	120	1.29	5.67	1.01	4.57	0.77	3.65	0.45	2.37

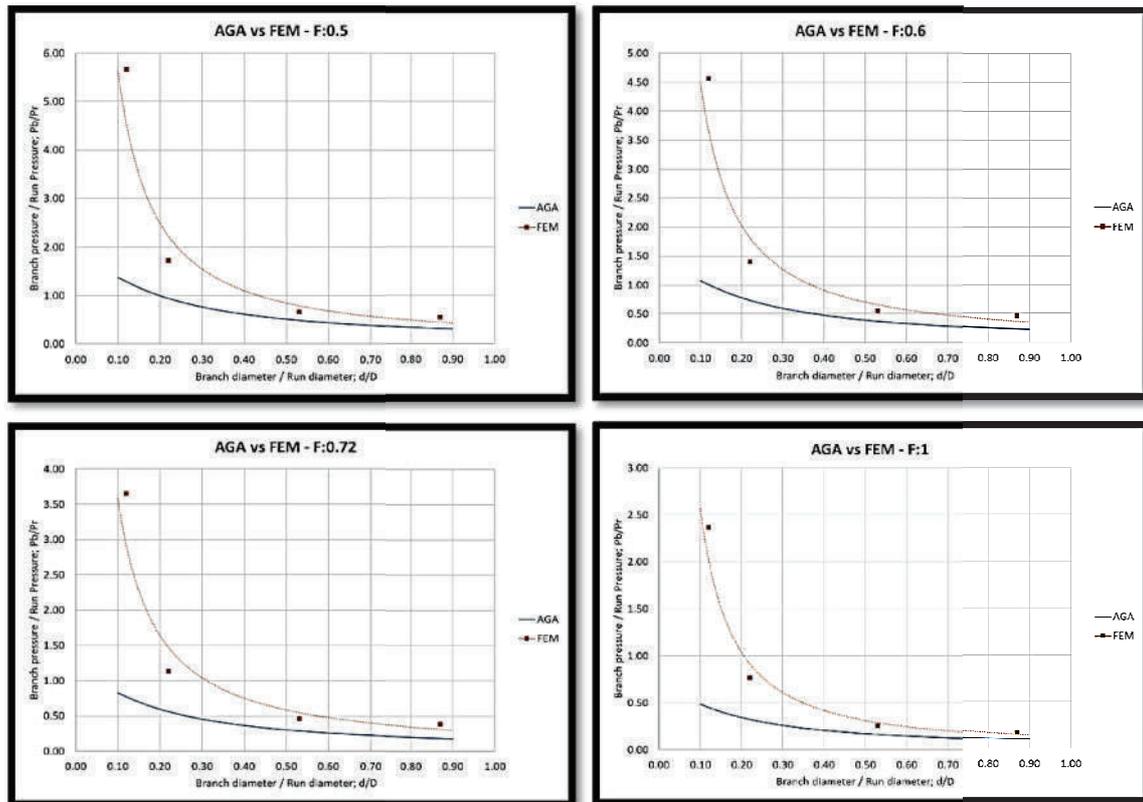


Figura 8. Gráfico comparativo y línea de tendencia FEM – F: 0.5, 0.6, 0.72 y F: 1

#### 4. CONCLUSIONES

La presión de la prueba hidráulica es de suma importancia para garantizar la integridad mecánica del conjunto del Hot-Tap. Sin embargo, existen limitaciones en la determinación de la misma por los efectos de sobretensiones locales y la estabilidad del conjunto debido a la presión externa aplicada a una porción exterior del gasoducto, como se muestra en la Figura 2.

Como se presentó, en la práctica habitual se utilizan curvas de diseño para determinar la presión de prueba [11], sin embargo, los valores obtenidos pueden ser muy bajos y que a su vez, están asociados con una gran cantidad de riesgo operacional.

Dicho procedimiento analítico [11], utiliza la tensión de fluencia como límite inicial al momento de evaluar las tensiones longitudinales, que dependiendo de su ubicación, no es necesariamente el mejor criterio para establecer una presión de prueba segura. Por otro lado, la tensión de flexión que se produce en las cercanías de una discontinuidad, es de naturaleza “Secundaria” [15], la cual genera cargas autolimitantes que no afectan la integridad estructural del conjunto.



Por último, la geometría de una configuración de cáscaras y las hipótesis planteadas, no conducen a modelos que represente adecuadamente el comportamiento estructural bajo las cargas aplicadas.

De los resultados obtenidos mediante el procedimiento citado con los de FEM, se observa que es posible aplicar presiones significativamente superiores a las recomendadas en el cálculo analítico sin provocar la rotura, con margen de seguridad que los códigos incorporan a partir de un estudio de integridad, en acuerdo con ASME Sección VIII División 2 Parte 5 [15].

Por último quedaría por verificar, no incluido en el presente trabajo e independiente de su magnitud, la condición de pandeo que produce la presión de prueba sobre parte del gasoducto, teniendo en cuenta que la carga está aplicada en forma externa en el interior de la derivación. En este sentido, el procedimiento incorporado en la Parte 5 de ASME Sección VIII División 2 "Protección Contra Colapso por Pandeo" [15], puede ser utilizado para determinar la Presión Crítica de Pandeo.

Finalizada la construcción y certificada la prueba de presión, se deberá verificar el gasoducto con su derivación para todos los estados de carga presentes de la línea, incluyendo las tensiones residuales alcanzadas durante el proceso de soldadura entre ambos elementos, utilizando entre otros, el procedimiento conservativo incorporado en el Anexo 9D de la Norma API 579/ASME FFS-1 [13] o a partir de un modelo computacional térmico que represente el proceso de soldadura [17].

En este trabajo se presentó un procedimiento alternativo de análisis estructural, aplicando Simulación Computacional, para evaluar la integridad de la unión entre un gasoducto u oleoducto con una derivación, previo al corte o perforado de la tubería, para cuando se realiza la prueba de presión.

La ventaja en el desarrollo del procedimiento propuesto, que tendrá en cuenta las variables mencionadas y la determinación de una presión de prueba segura, maximiza la confiabilidad del operario que realiza estas operaciones, sin la necesidad de hacer estudios complejos y donde se ahorrará tiempo y costos innecesarios.

## REFERENCIAS

1. Wade, J. B., "Hot Tapping of Pipelines," Australian Welding Research Association Symposium, Paper No. 14 (Melbourne, Australia, 1973).
2. Cassie, B. A., "The Welding of Hot Tap Connections to High Pressure Gas Pipelines," J. W. Jones, Memorial Lecture (Pipe Line Industries Guild), October 2010.



3. Kiefner, J. F. and Fischer, R. D., "Repair and Hot-Tap Welding on Pressurized Pipelines," Symposium during 11th Annual Energy Sources Technology Conference and Exhibition, January 10-13, 1988, New Orleans, LA.
4. Howden, D. G., "Welding on Pressurized Pipeline," Loss Prevention, Vol. 9 (New York, NY: American Institute of Chemical Engineers), pp. 8-10. 2.- 1975.
5. Bruce, W. A., "Qualification and Selection of Procedures for Welding onto In-Service Pipelines and Piping Systems," EWI Project No. J6176 to an international group of sponsors, Edison Welding Institute, Columbus, OH, January 1996.
6. API 2201 - Safe Hot Tapping Practices in the Petroleum Industries. Ed. 2018
7. PCC-2 – Repair of Pressure Equipment and Piping. Ed. 2018
8. Mike Kirkwood and Andrew Cosham, "Can the Pre-service Hydrotest be Eliminated", Pipes & Pipelines Int. Vol. 45, No. 4, August 2000
9. ASME B31.8 – Gas Transmission and Distribution Piping System. Ed. 2019
10. ASME Sec. VIII Div.1– Rules for construction of pressure vessel Ed. 2021
11. L51561e Contract NG-18 Report No. 175 – "Proof Testing of The Pre-Hot-Tap Branch Connection". Line Pipe Research Supervisory Committee Pipeline Research Committee, Battelle Columbus Division. August 1989.
12. API 1104. Welding of Pipelines and Related Facilities, 22nd Edition 2021
13. API 579 – Fitness for Service. Ed. 2019
14. Programa ANSYS – Versión Académica 2022.
15. ASME Sec. VIII Div 2 Ed. 2021 – Alternatives Rules for construction of pressure vessel
16. ASME II – Apéndice D – Edición 2022
17. A. Turel, H. Sanzi y C. Cangelosi, Welding of a Gas Pipeline by Computational Simulation from a Moving Heat Source of the Gaussian Type. 24<sup>a</sup> Conferencia del Acero IAS, Octubre 2022 - Rosario, Santa Fe, Argentina.



## ESTUDIO MECÁNICO COMPARATIVO DE OSTEOTOMÍA SUPRAMALEOLAR DE TIBIA DISTAL

Lucas Pedro Acosta <sup>1, 2</sup>, Ramiro Olleac <sup>3</sup>, Daniel Gustavo Goroso <sup>4, 5</sup>, Fernando Daniel Farfán <sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigaciones en Neurociencias y Tecnologías Aplicadas (LINTEC), Departamento de Bioingeniería, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET), Universidad Nacional de Tucumán (UNT), Tucumán, Argentina.

<sup>2</sup>Instituto Superior de Investigaciones Biológicas (INSIBIO), Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Tucumán, Argentina.

<sup>3</sup>Ortopedia Infantil, Hospital Nicolás Avellaneda, San Miguel de Tucumán.

<sup>4</sup>Núcleo de Pesquisas Tecnológicas, Universidade Mogi das Cruzes, São Paulo, Brasil.

<sup>5</sup>Facultad de Educación Física, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina.

### RESUMEN

En este trabajo se implementaron herramientas de software de diseño e ingeniería asistida por computadora CAD CAE para confeccionar y evaluar las respuestas mecánicas de un modelo óseo de tibia, el cual podría ser implementado en simulaciones virtuales de procedimientos quirúrgicos en traumatología y ortopedia. En particular, nuestro estudio ha sido enfocado al tratamiento del equino inveterado. En este contexto, nuestro objetivo fue comparar las variables mecánicas, particularmente tensiones y desplazamientos, resultantes en dos procedimientos quirúrgicos los cuales abordan esta deformidad: por un lado, la osteotomía transversal de tibia distal, y por otro, la osteotomía oblicua de tibia distal. En el extremo proximal del modelo de tibia (370 mm de longitud) se realizó un corte plano con el fin de facilitar la disposición de las cargas empleadas en el análisis estático (análisis FEM). En las regiones correspondientes a la mortaja (superficie articular) se obtuvieron tensiones de 10.36 MPa en el caso de la osteotomía oblicua y 14.029 MPa en la osteotomía transversal. Además, en la región del corte se obtuvieron tensiones de 19.37 MPa para la osteotomía oblicua y 7.36 MPa el caso de la transversal. Finalmente, un modelo geométrico permitió determinar cualitativamente un menor desplazamiento del eje de carga distal empleando la osteotomía oblicua para la corrección del equino inveterado.

**Palabras Clave:** Osteotomía Supramaleolar; Modelo 3D; Análisis Estático.



## 1. INTRODUCCIÓN

El modelado 3D obtenido por el procesamiento de imágenes digitales permite la posibilidad de acercarnos a la realidad particular de cada paciente. La aplicación de técnicas, métodos computacionales y simulaciones in silico permiten determinar con mayor precisión el protocolo quirúrgico sin poner en riesgo al paciente. [1]

La aplicación de estas técnicas en la optimización de procedimientos de baja incidencia como las cirugías de salvataje cobra redoblada importancia, donde el modelado 3D y las cirugías en maquetas permiten obtener experiencia y conocimiento in silico para luego poder aplicarlo en los pacientes complejos.

Un procedimiento de salvataje es la osteotomía supramaleolar dorsiflexora de tibia distal, utilizada para el tratamiento de una deformidad severa del pie y tobillo llamada equino inveterado, donde el pie no toma contacto con toda la planta, sino que lo hace solo con los metatarsianos o los dedos por falta de rango de movilidad de las estructuras del tobillo. [2, 3]

La configuración del corte horizontal, paralela a la articulación del tobillo o con punto de fulcro (PF) en la cortical posterior de la tibia es una opción clásica utilizada por algunos autores. [2, 3, 4]

Sabemos que esta configuración de osteotomía genera una traslación anterior del centro de rotación del tobillo y una alteración importante del eje mecánico/anatómico. Para mitigar este efecto indeseable existe un tipo de osteotomía oblicua con PF en la articulación que es utilizada en diferentes regiones de la anatomía, como humero, fémur, o tibia, para corrección de deseos cercanos a las articulaciones, dando buenos resultados con mínima traslación de ejes a distal. [5] Al ser una cirugía poco frecuente en una deformidad con baja incidencia los determinantes geométricos y el comportamiento mecánico de esta última no están claramente descriptos en la literatura.

### 1.1 Objetivos

Diseñar un modelo de tibia para establecer los determinantes geométricos que faciliten el análisis de variables que condicionan la ejecución del procedimiento quirúrgico.

Determinar la distribución de tensiones en la masa ósea en las inmediaciones de la intervención comparando la osteotomía transversal versus la osteotomía oblicua.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del estudio se construyó un modelo 3D idealizado de tibia al cual se le practicaron las técnicas de osteotomía transversal y oblicua respectivamente, además de disponer del modelo sin alteraciones para control, como puede verse en la Fig. 1.

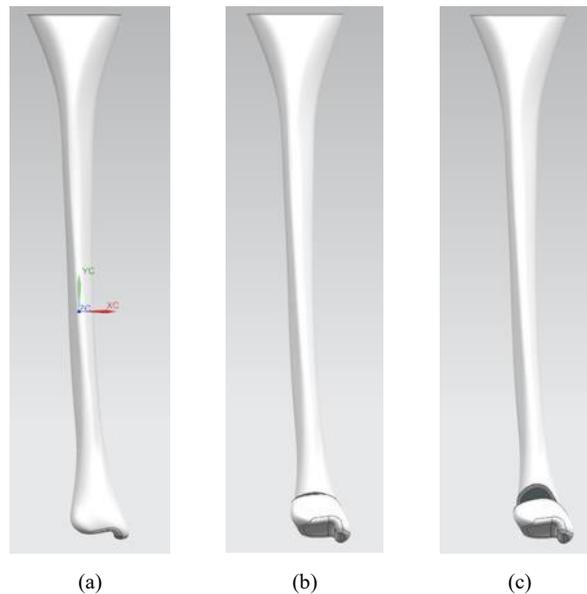


Figura 1: Vista de plano coronal de modelos virtuales (a) Sin intervención. (b) Osteotomía transversal. (c) Osteotomía oblicua.

Para el desarrollo del modelo se tuvo en cuenta la geometría idealizada de una tibia de una longitud de 370 mm. En cuyo extremo proximal se practicó un corte plano para facilitar la disposición de la carga en el momento del análisis estático en FEM.

## 2.1 Hipótesis para el análisis

El espesor de hueso cortical sobre toda la superficie del modelo, excepto el extremo proximal plano, es de 2.5 mm.

El extremo distal fue idealizado como una articulación cilíndrica horizontal. Fig. 2.



Figura 2: Modelado de articulación cilíndrica plana en extremo distal de tibia.

El hueso esponjoso se consideró uniforme en toda la región interna del cascarón definido por la capa de hueso cortical.

Hueso cortical, como trabecular fueron considerados como materiales isótropos con sus respectivos módulos de elasticidad longitudinal promedio en dirección longitudinal  $E_{Cort}=20.7$  GPa y  $E_{Esp}=769$  MPa [6].

## 2.2 Condiciones de modelado y restricciones

Para el planteo del mallado tetraédrico de 4 nodos, se tomó un tamaño de elemento de 5 mm. Fig. 3.

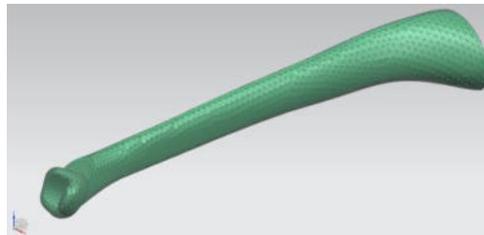


Figura 3: Mallado tetraédrico para el modelo de osteotomía oblicua.

En lo referente a las condiciones del análisis, se planteó una restricción fija en la articulación cilíndrica, simulando un empotramiento, para la fase de apoyo. Entre las superficies de los huesos se planteó una restricción de no deslizamiento, mientras que en las superficies libres luego de las respectivas intervenciones se planteó también una condición de no deslizamiento entre ambas superficies (hueso cortical y esponjoso).

La carga aplicada sobre la superficie plana proximal fue de 400 N en dirección longitudinal, un valor considerado para una persona de aproximadamente 95 Kg de masa. Como puede verse en la Fig. 4, dónde no sólo se aprecia la carga, sino también las restricciones de no deslizamiento.

La amplitud del corte de la osteotomía (ángulo de corrección alfa) fue de  $30^\circ$  y en el caso del corte oblicuo, el ángulo de ataque beta fue de  $20^\circ$  Fig. 5.



Figura 4: Disposición de cargas y restricciones para la tibia sin intervención.

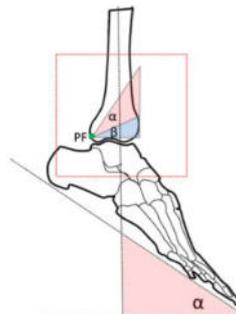


Figura 5: Disposición de los ángulos de corrección, de ataque y el punto de fulcro (PF) en la región supramaleolar.

### 3. RESULTADOS

El centro de rotación del tobillo para el caso de la osteotomía transversal se trasladó una distancia mayor que para el caso de la osteotomía oblicua del eje longitudinal de la tibia Fig. 6.

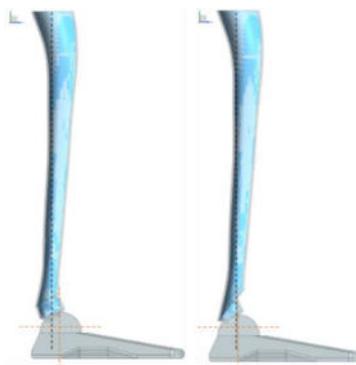


Figura 6: Disposición en plano sagital del centro de rotación de la articulación del tobillo, izquierda osteotomía transversal, derecha osteotomía oblicua.

En las regiones correspondientes a la mortaja se obtuvieron tensiones de 10.36 MPa (Fig. 9) en el caso de la osteotomía oblicua y 14.029 MPa (Fig. 8) en la osteotomía transversal. Además, en la región del corte se obtuvieron tensiones de 19.37 MPa para la osteotomía oblicua y 7.36 MPa el caso de la transversal.

De los análisis realizados se obtuvo que, para el caso de la tibia sin intervención quirúrgica, el valor máximo de tensión fue de 9.754 MPa concentrando mayores valores en el tercio distal externo Fig. 7.

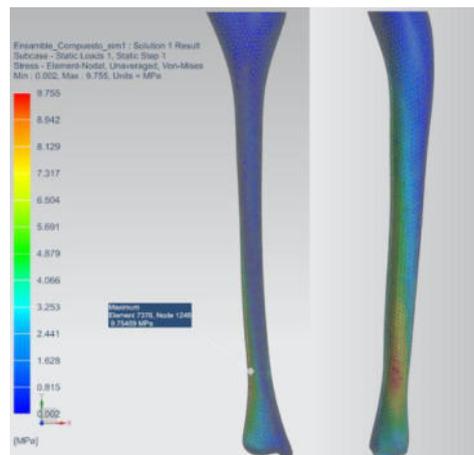


Figura 7: Distribución de tensiones en el modelo de tibia sin intervención para las condiciones de carga y restricciones mencionadas.

Del análisis, para la osteotomía transversal se obtuvo que el valor máximo de tensión fue de 14.029 MPa. Las tensiones se concentraron en el tercio distal y el valor máximo se ubica en el lateral externo de la mortaja Fig. 8.

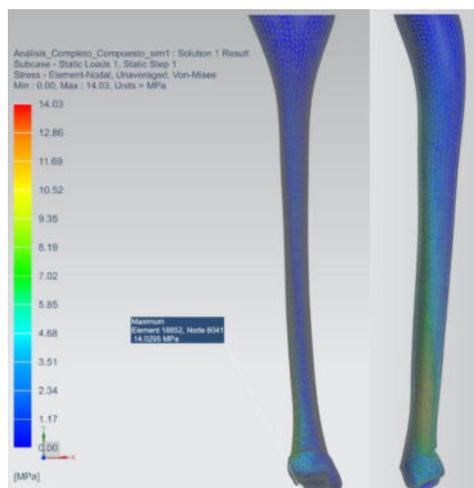


Figura 8: Distribución de tensiones en el modelo de tibia con osteotomía transversal.

Para la osteotomía oblicua se obtuvo una tensión máxima de 19.372 MPa. Las tensiones se concentran en las inmediaciones del tercio distal y el valor máximo se ubica sobre la región de contacto del corte oblicuo del lado externo Fig. 9.

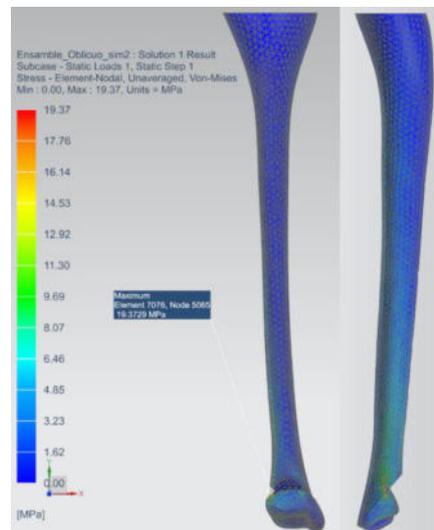


Figura 9: – Distribución de tensiones en el modelo de tibia con osteotomía oblicua.

#### 4. DISCUSIÓN

Mediante la herramienta CAD – CAE se logró diseñar un modelo que representa una estructura compleja como el hueso, donde existe material trabecular (hueso esponjoso) en el centro, y en la periferia un material compacto como es el hueso cortical.

La implementación del modelo virtual permitió una gran versatilidad a la hora de plantear una intervención de complejidad geométrica dentro de la fisionomía humana, lo cual representó una ventaja sustancial para el planteo de soluciones a la situación problemática presentada en el caso particular del pie de equino y la práctica de la osteotomía en las dos variantes planteadas.

No se halló literatura que plantee un modelo virtual al cual se le apliquen intervenciones y se analicen sus consecuencias mecánicas al someterlos a carga.

La mayor controversia en la utilización como rescate de la osteotomía transversal es la traslación anterior del eje de carga a distal. Algunos autores nombran esto, pero no lo consideran un inconveniente, aunque no son trabajos que describan los resultados biomecánicos, sino, que solo describen la técnica y reportan los resultados clínicos. [2,3,4].

Este estudio biomecánico permitió evidenciar, que la osteotomía oblicua genera menor traslación de ejes a distal y demostró que el comportamiento biomecánico en el modelo virtual presenta más beneficios que la osteotomía transversal.



La principal limitación en el estudio podría considerarse como la segmentación del modelo con referencia a las densidades del hueso en las diferentes configuraciones del mismo, además de la transición entre la condición de hueso cortical a hueso esponjoso. Otro factor limitante del planteo propuesto se configura en la hipótesis de material isótropo, principalmente en el caso del hueso cortical, siendo que en realidad se comporta como material ortótropo (subconjunto de materiales anisótropos), sumado esto a las variaciones de la constitución con la etnia.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo con las simulaciones de las Fig. 8 y 9, fue posible comparar el comportamiento mecánico de las dos técnicas evaluadas, encontrando que la osteotomía oblicua generó menor tensión en la superficie articular distal y mayor tensión en la región de la osteotomía.

Encontramos que, comparativamente en el modelo virtual, la osteotomía oblicua tiene beneficios por sobre la osteotomía transversal. Generó menor tensión, (26% menor), en la región de la articulación del tobillo respecto de la osteotomía transversal. Mayor tensión a nivel de la osteotomía (62% mayor) Esto denota diferencias en la compresión a nivel de la osteotomía tendiendo esto a una más rápida consolidación ósea y por ultimo cualitativamente pudo observarse que hubo un menor desplazamiento del eje de carga a distal de la corrección.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), proyecto PIUNT E614 de la Secretaría de Ciencia, Arte e Innovación Tecnológica de la Universidad Nacional de Tucumán (SCAIT) y por fondos institucionales del Instituto Superior de Investigaciones Biológicas (INSIBIO).

## REFERENCIAS

- [1] Bagaria, V., Bhansali, R., & Pawar, P. (2018). 3D printing-creating a blueprint for the future of orthopedics: Current concept review and the road ahead!. *Journal of clinical orthopaedics and trauma*, 9(3), 207-212.
- [2] Napiontek, M., & Nazar, J. (1994). Tibial osteotomy as a salvage procedure in the treatment of congenital talipes equinovarus. *Journal of pediatric orthopedics*, 14(6), 763-767.
- [3] Handelsman, J. E., & Weinberg, J. (2005). Supramalleolar wedge osteotomy: a method of correcting fixed equinus and associated deformities in children. *The Foot*, 15(1), 33-39.
- [4] Mosca, V. S. (1998). *The child's foot: principles of management*.



[5] Su, Y., & Nan, G. (2016). Lateral closing isosceles triangular osteotomy for the treatment of a post-traumatic cubitus varus deformity in children. *The bone & joint journal*, 98(11), 1521-1525.

[6] J Y Rho An ultrasonic method for measuring the elastic properties of human tibial cortical and cancellous bone. *Ultrasonics* 34(1996) 777-783



## ESTUDIO DE UNIFORMIDAD DE FLUJO EN CÁMARA DE ENSAYOS DE TÚNEL DE VIENTO

Maximiliano Lugones<sup>1</sup>, Federico Lecci<sup>1</sup>, Germán Soria<sup>1</sup>, Claudio Merelli<sup>1</sup> y Gustavo Vignolo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LMF - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco  
Ruta Provincial N°1 km 4, Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina- [mecanicalmf@gmail.com](mailto:mecanicalmf@gmail.com).

### RESUMEN

Los túneles de viento son instrumentos científico-tecnológicos destinados a la generación de un flujo de aire de propiedades conocidas y controladas para el estudio de su interacción con distintos obstáculos.

Existen diversos diseños en función del tipo de ensayo que se requiera y de la información que puede extraerse. De igual manera, los requerimientos respecto de las propiedades de la corriente fluida varían según los resultados que se espera obtener.

Para el caso de un túnel de viento abierto, de cámara cerrada, como el del Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la UNPSJB, existen regulaciones respecto de la turbulencia y la uniformidad de flujo en la cámara de ensayos si se lo desea destinar para contrastar anemómetros de la industria eólica.

Habiéndose realizado una exhaustiva campaña de mediciones en la cámara de ensayos y en distintos puntos del citado túnel, surge la necesidad de mejora de estos parámetros, para lo cual se propone, entre otras modificaciones, el rediseño de su sección de entrada.

Como parte de un estudio de investigación integral del túnel de viento, en este trabajo se presenta el análisis de simulación computacional para una contracción en la entrada del túnel y su impacto sobre las propiedades del flujo en la cámara de ensayos. Asimismo, se ensaya experimentalmente y simula computacionalmente la performance de una pantalla para la atenuación de las turbulencias de alta velocidad. La combinación de una contracción gradual y la adición de una o más pantallas junto a un panel en la sección de menor velocidad mejoran notablemente la uniformidad de flujo en la cámara de ensayos.

**Palabras Clave:** Túnel de Viento, Simulación Computacional, CFD.



## 1. INTRODUCCIÓN

La información experimental útil para resolver los problemas aerodinámicos puede ser obtenida de varias formas: a partir de pruebas de vuelo; pruebas de caída; trineos de cohetes; brazos giratorios; maquetas voladoras; y túneles de viento, entre otras. Cada dispositivo tiene su propia zona de superioridad y ningún dispositivo puede llamarse "mejor" que otro [1].

En este trabajo se hace hincapié en las características de los túneles de viento de baja velocidad donde la compresibilidad es insignificante, es decir, con velocidades menores a 480 km/h [1]. En particular, se aborda el estudio del túnel aerodinámico del Laboratorio de Mecánica de Fluidos (LMF) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB). El mismo (Figura 1) es de circuito abierto (tipo Eiffel) [1,2] con cámara de ensayos cerrada con un área de 0,8 m<sup>2</sup> y una velocidad máxima de 65 km/h (~18 m/s). Trabajos previos contienen información adicional sobre la creación de este equipo y su performance [3-5].



Figura 1: Túnel de Viento del LMF (UNPSJB).

### 1.1. Calidad del Flujo de la Cámara de Ensayos.

Para una sección de prueba ideal, el flujo fuera de la capa límite tendría las siguientes características: el perfil de velocidad sería uniforme; no habría flujo ascendente o cruzado; y no habría turbulencia. Dado que esto no puede obtenerse en condiciones reales, la pregunta es ¿Cuál es la mejor relación posible entre la calidad de flujo y el rendimiento del túnel? Típicamente, los valores para la variación de la velocidad a través de la sección de prueba están en el rango de 0,20-0,30%. Esto da una variación de presión dinámica de 0,4-0,6% [1]. Para la turbulencia, los valores aceptados serán una compensación entre los costos de instalación y la reducción en el rendimiento del túnel y los costos de energía. Para túneles destinados a usos de investigación en capa límite, los valores de la turbulencia lateral, deben mantenerse en valores tan pequeños como 0,05%. Por otra parte, los túneles que se utilizan para las pruebas de



desarrollo pueden tener valores de turbulencia mayores, de hasta 0,5 % en la dirección axial. Sin embargo, no existe un acuerdo general en cuanto al valor absoluto requerido.

En particular, la norma IEC 61400-12-1– Annex F [6] para la calibración de anemómetros requiere que la corriente de aire dentro del túnel cumpla con las siguientes condiciones:

Tabla 1 Requerimientos del túnel del viento para calibración de anemómetros de copa según IEC 61400-12-1.

Característica del Túnel de Viento	Descripción	Requerimiento Mínimo
<b>Relación de Bloqueo</b>	Relación del área del anemómetro y su montante / del área total del túnel en la sección de prueba	No exceder 0,05 para secciones cerradas
<b>Uniformidad de Flujo</b>	Diferencia porcentual de la velocidad dentro del volumen de la sección de pruebas	Menos que 0,2% en las direcciones longitudinal, transversal y vertical
<b>Gradiente de Viento Horizontal</b>	Presión dinámica diferencial en el área cubierta por el anemómetro de copas girando	Debe ser menor que 0,2%
<b>Intensidad de Turbulencia</b>	Relación entre el desvío estándar y la velocidad media	Debe ser menor que 2%

La caracterización experimental previa [4], indica que el perfil de velocidad presenta un valor uniforme en toda la sección y una capa límite delgada. Los resultados de turbulencia muestran que el flujo dentro del túnel se encuentra dentro de los parámetros establecidos en [6] y sintetizados en la Tabla 1, mientras que la uniformidad de flujo debe corregirse. Asimismo, la variación de presión entre la entrada del túnel y la cámara de ensayos tiene una pendiente en el entorno del plano de medición de 3,45 Pa/m. Si se considera que el diámetro tipo de un anemómetro de copas es de 200mm, el cambio porcentual de presión dinámica en el volumen de influencia es del orden de  $10^{-4}$  %, con lo cual se satisfacen los requerimientos de la norma [6].

De acuerdo con [1], la contracción es la principal fuente de inestabilidades en el flujo del túnel abierto donde, además de su adecuada geometría, debe ser seguida de una longitud de asentamiento para permitir que la velocidad se vuelva uniforme. Otro punto para considerar son las fugas de aire que, en caso de existir, generan un flujo secundario que puede causar una separación diferenciada de la capa límite y la pérdida de uniformidad.

En virtud de lo expuesto, se concentran los trabajos en mejorar las características de la zona de admisión de aire al túnel. Es decir, se analizan diferentes configuraciones posibles de contracción, enderezadores de corriente (panales) y rejillas (pantallas) para reducir las irregularidades detectadas.

## 2. DESARROLLO

El túnel en estudio cuenta con un único panel situado entre la entrada abocinada y la cámara de ensayos (Figura 1) y no presenta una contracción clara que acelere gradualmente el aire desde el estancamiento. Por ende, se entiende que el primer paso es diseñar una zona de contracción adecuada.

## 2.1. Contracción.

Hay dos problemas recurrentes en el diseño del cono de contracción [1]. El primero es la posible presencia de desprendimientos. Una contracción corta es ventajosa económicamente y en situaciones de espacio limitado. No obstante, debido a la fuerte curvatura que adquiere la pared al cambiarse la sección rápidamente, pueden presentarse regiones con gradientes de presión adversos cerca de la pared a la entrada y a la salida [7]. La Figura 1 (izq) muestra un perfil de  $C_p$  estimado en la pared de una contracción (tomado de [8]) donde se aprecian las zonas de gradientes adversos en las regiones de mayor curvatura. En la Figura 1 (der) se muestra un perfil de velocidad típico en cercanías de la pared de una contracción (tomado de [7]).

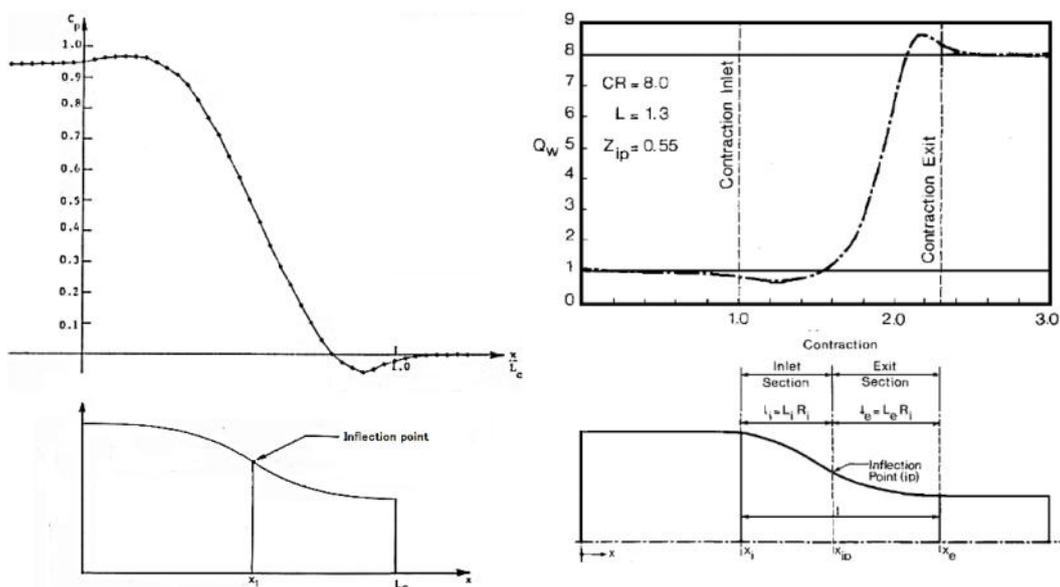


Figura 2: Izq.:  $C_p$  estimado para la pared de una contracción (tomado de [8]). Der.: Velocidad típica en cercanías de la pared de una contracción (tomado de [7]).

En segundo lugar, las líneas de corriente superficiales de una contracción rectangular se cruzan con las paredes laterales. Esto conduce a un flujo secundario en las esquinas con las correspondientes zonas muertas y la posibilidad de separación. Este último problema se alivia haciendo la contracción octogonal [1,8].

Si bien, no existe un diseño de contracción óptimo adecuado para todos los tipos de túneles, la tendencia es hacia perfiles polinómicos de alto grado (hasta 10) con el punto de inflexión desplazado hacia la salida [8, 9] y relaciones de contracción (área de entrada/área de salida) de entre 4 y 12 y con longitudes de la cámara de sedimentación (sección constante para panales y/o pantallas), del orden de 0,5 veces el diámetro de entrada.

Se realizó un análisis numérico para optimizar el desempeño de la sección de contracción enfocándose en la geometría del perfil y longitud de la misma. Se simuló una contracción de



sección octogonal de perfil polinómico de grado 4, con el punto de inflexión en 2/3 de la longitud de la misma, y relación de contracción de 6 (sin considerar los esquineros).

La Figura 3 muestra el modelo de contracción ensayado (plano vertical).

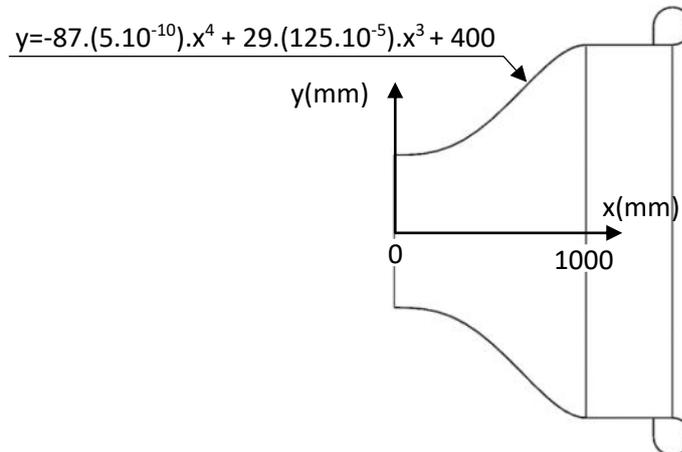


Figura 3: Perfil polinómico empleado para la contracción (plano vertical).

## 2.2. Reducción de Irregularidades: Paneles y Pantallas.

Las irregularidades del flujo en la sección de prueba pueden ser reducidas mediante la instalación de paneles y pantallas aguas arriba de la contracción. Las pantallas reducen más la turbulencia axial que la turbulencia lateral. Las pantallas tienen una caída de presión relativamente grande en la dirección del flujo, lo que reducen más las velocidades altas que las bajas y, por lo tanto, promueven una velocidad axial más uniforme. Los paneles tienen pequeñas caídas de presión y por lo tanto tienen menos efecto sobre velocidad axial, pero debido a su longitud, reducen las velocidades laterales. La longitud mínima de un panel debe ser de 6 a 8 veces el tamaño de la celda. Tanto las pantallas como los paneles reducen la turbulencia lateral y axial. A pesar de estar ubicadas en la porción de velocidad más baja del túnel, las pantallas aumentan la potencia requerida del mismo [1].

La proximidad del suelo respecto de la entrada al túnel produce una asimetría del flujo respecto del plano medio horizontal plausible de ser corregida con rejillas. Debido a ello, se simuló el efecto de la presencia de una pantalla con orificios circulares y una relación de bloqueo de 0,5. Para verificar la capacidad del programa para captar la naturaleza del flujo en presencia de una rejilla, se ensayó una pantalla como la descrita con la geometría de admisión actual y se compararon los perfiles de velocidad en la cámara de ensayos. En estas simulaciones en 3D se consideró inicialmente el volumen alrededor del túnel y la geometría real de las pantallas, para luego recurrir a la herramienta para incorporar rejillas que ofrece el software empleado que ofrece consumo de recursos muy inferior.

Los instrumentos utilizados para los ensayos son los descritos en la Tabla 2.

Tabla 2 Equipamiento empleado para las mediciones.

<b>Micromanovacuómetro.</b> Marca: Alnor. Modelo: 560. Número de serie: 56057034.
<b>Tubo Pitot Dwyer.</b> Tipo: 160-12. Modelo: A16R. Número de serie: 108001-00. Número de parte: 634634000.
<b>Instrumento Multifunción.</b> Modelo: TESTO 435. Número de serie: 02385358/208.
<b>Sonda de hilo caliente para TESTO 435.</b> Tipo de instrumento: Termómetro electrónico. Modelo: Testo 435-2. Sonda número: 0635 1025. - Tipo de instrumento: Anemómetro electrónico. Modelo: Testo 435-2. Sonda número: 0635 1025.

La Figura 4 muestra la pantalla ensayada. Se aprecia que la misma se situó delante del panel para evitar que se deforme por la acción de la diferencia de presiones que genera.



Figura 4: Pantalla ensayada. Diámetro agujeros: 5mm. Relación de Bloqueo: 0,5.

### 2.3. Modelado computacional

Para realizar el modelado computacional del flujo en el túnel aerodinámico, se recurrió al software SolidWorks Flow Simulation 2015. Este programa resuelve las ecuaciones gobernantes con el método de volúmenes finitos (FV) en una malla computacional rectangular en coordenadas cartesianas con los planos ortogonales a sus ejes y con refinamiento, principalmente, en las interfases. Los valores de todas las variables físicas se almacenan en los centros de las celdas de la malla. Las derivadas espaciales de las ecuaciones de conservación se aproximan con diferencias implícitas de segundo orden, mientras que las derivadas temporales se aproximan con un esquema implícito de Euler de primer orden. La turbulencia se aborda mediante el modelo  $\kappa$ - $\epsilon$ , que estima la viscosidad de remolino (Boussinesq's eddy viscosity) en función de la energía cinética asociada a las fluctuaciones turbulentas y a su tasa de disipación de energía [10]. De acuerdo con [11], la variación de los parámetros del modelo dentro de los rangos habituales de



uso no produce un impacto significativo en las variables macroscópicas del modelo, por lo que se emplean los parámetros por defecto del programa.

La Figura 5 muestra un esquema del dominio computacional empleado para las simulaciones de la contracción y su correspondiente mallado. Como condiciones de contorno para la simulación se fijó un caudal de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  en la sección aguas abajo de la cámara de ensayos, presión ambiente en las superficies libres del volumen de control (simulando el ambiente del laboratorio), y condición de no deslizamiento sobre las paredes sólidas.

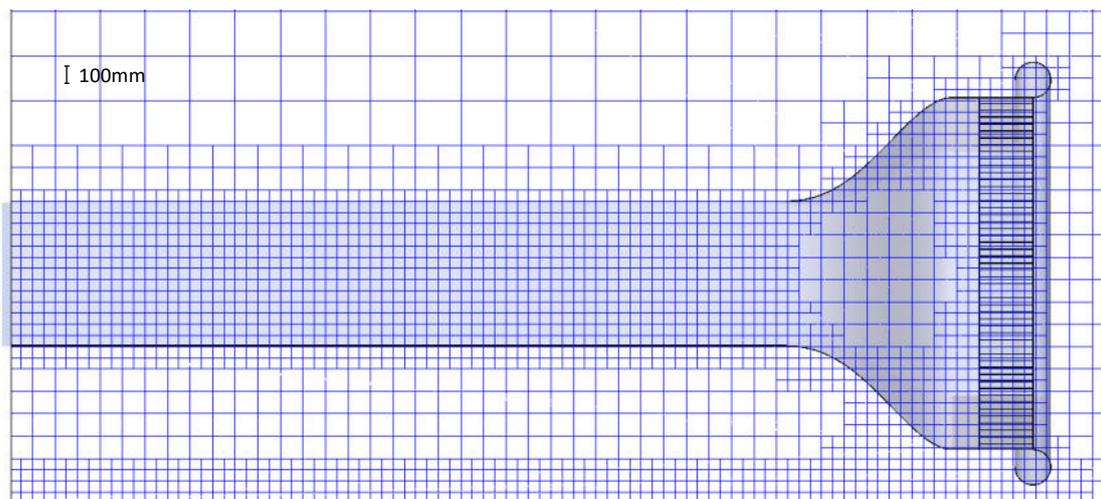


Figura 5: Grilla computacional empleada en las simulaciones de la contracción propuesta.

En la Figura 6 se muestra la grilla empleada para la simulación de la presencia de la pantalla en la entrada del túnel. Como condiciones de contorno para la simulación se fijó un caudal de  $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$  en la sección aguas abajo de la cámara de ensayos, presión ambiente en las superficies libres del volumen de control (simulando el ambiente del laboratorio), y condición de no deslizamiento sobre las paredes sólidas.

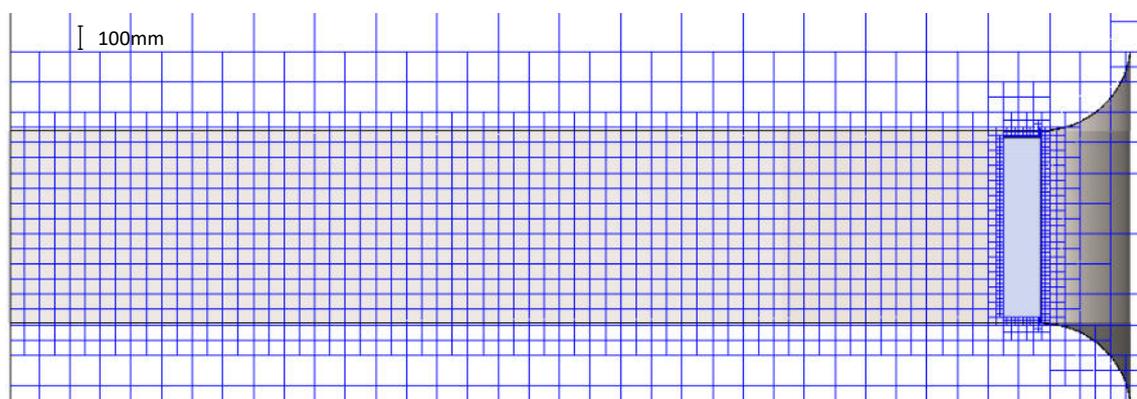


Figura 6: Grilla computacional empleada en las simulaciones de la geometría actual con panel y pantalla.

Las mallas mostradas se corresponden con las determinadas en sucesivas simulaciones, para las cuales un mayor refinamiento no tiene impacto significativo en la velocidad calculada. En la Figura 7 se muestra la evolución del perfil de velocidad en la cámara de ensayos para el túnel con la contracción propuesta en función del grado de refinamiento propio del citado software de simulación. Se considera una única pantalla en la contracción.

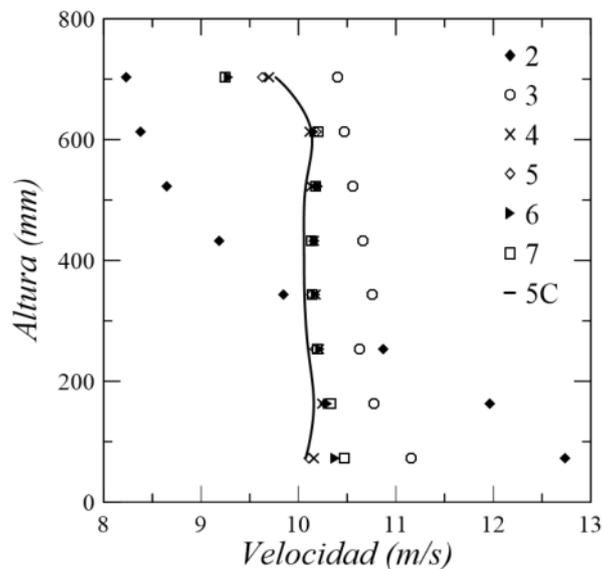


Figura 7: Variaciones del perfil de velocidad en la cámara de ensayos para diferentes grados de refinamiento (2 al 6). 5c representa grado 5, basado en curvatura. En el presente trabajo se opta por el grado 5 por el compromiso entre velocidad de ejecución y fiabilidad.

### 3. RESULTADOS

En las Figuras 8 y 9 se muestran las distribuciones de velocidad y presión en el plano medio del túnel con la geometría actual.

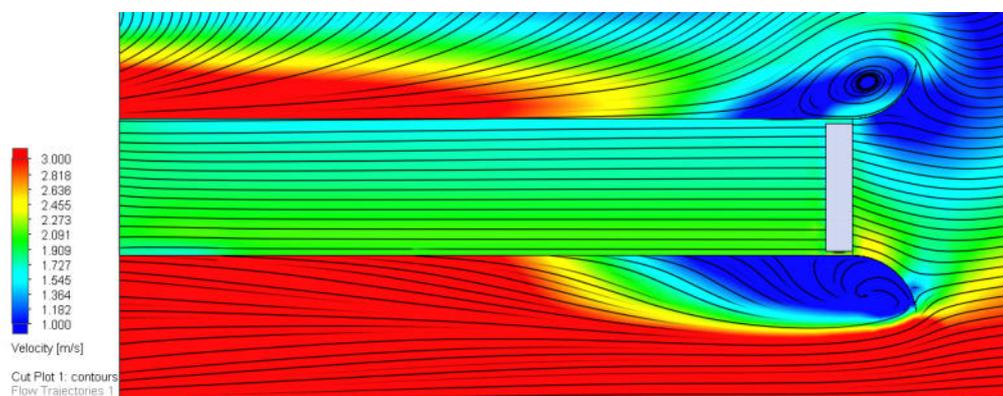


Figura 8: Distribución de velocidades en el plano medio del túnel resultante de las simulaciones.

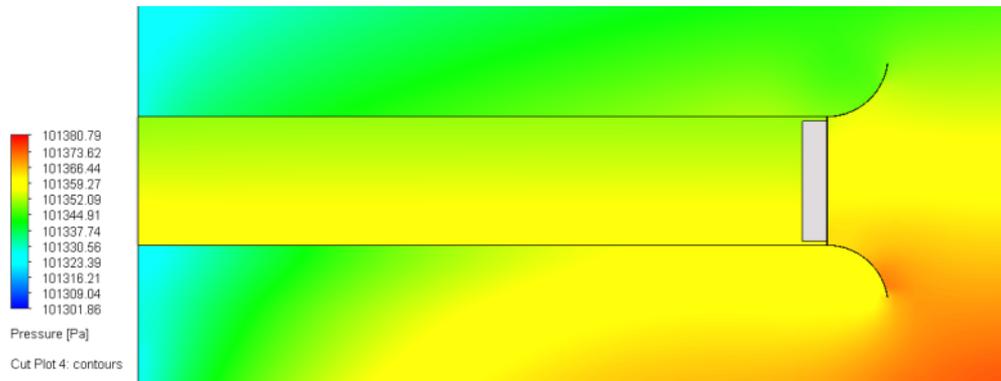


Figura 9: Distribución de presión en el plano medio del túnel resultante de las simulaciones.

Puede apreciarse que si bien la presión decrece monótonamente desde la succión hasta la cámara de ensayos, la velocidad presenta “franjas” variación de velocidad producto de una admisión no uniforme.

Las Figuras 10 y 11 muestran las distribuciones de velocidad y presión del fluido en el plano medio del túnel con la contracción diseñada.

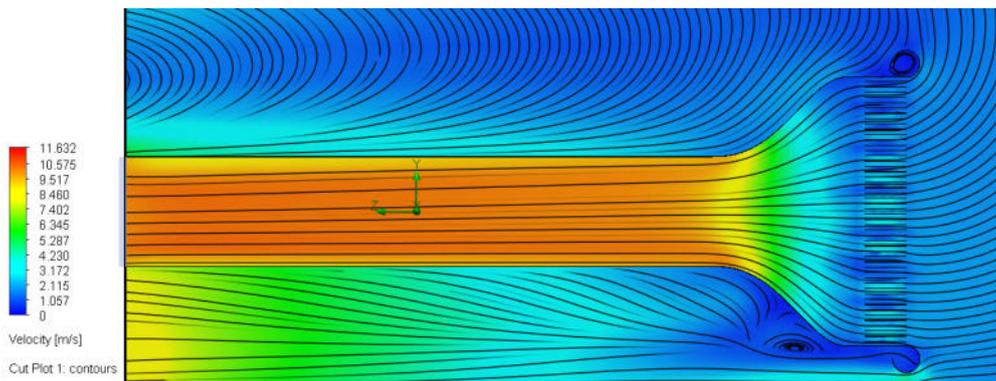


Figura 10: Distribución de velocidades en el plano medio del túnel resultante de las simulaciones con la contracción propuesta.

Puede apreciarse que, como producto de la asimetría producida por la cercanía del suelo a la zona inferior de la admisión, la aceleración gradual del flujo dentro de la contracción no es completamente uniforme, aún con un panel, por lo que requiere de la adición de una pantalla en la zona de baja velocidad.

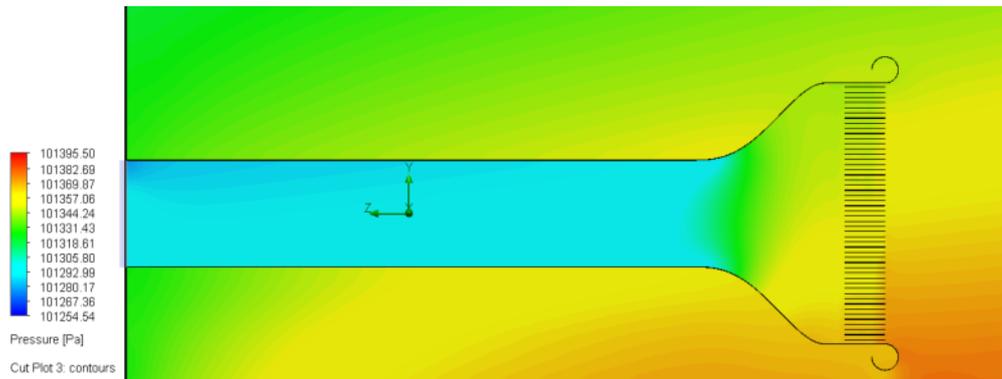


Figura 11: Distribución de presión en el plano medio del túnel resultante de las simulaciones. con la contracción propuesta.

En la Figura 12 se muestra la comparación entre los perfiles de velocidad en la cámara de ensayos simulados con el panel y rejilla, y los medidos en el túnel con la geometría actual. Los valores de incertidumbre expandida reportados en el presente trabajo son obtenidos de acuerdo al procedimiento LMF-PE-02 del Laboratorio de Mecánica de Fluidos, con un factor de cobertura de  $K=2$ , correspondiente a un nivel de confianza del 95%.

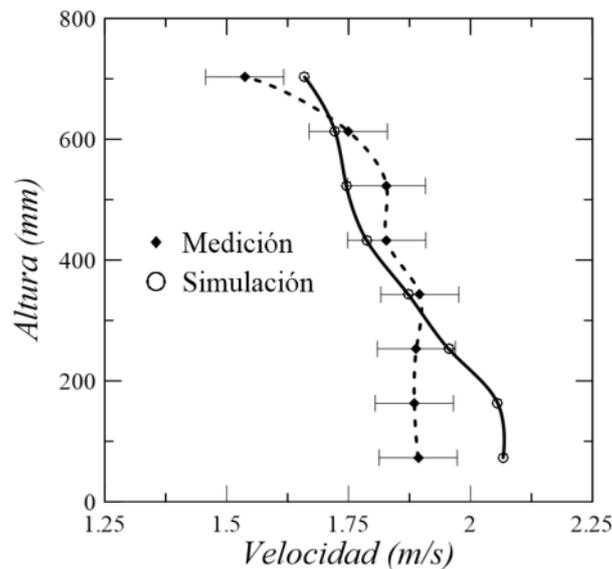


Figura 12: Comparación entre los perfiles de velocidad simulados y medidos en el túnel actual con pantalla y panel.

Puede apreciarse que el programa captura correctamente la influencia de la pantalla en las condiciones actuales, por lo que se entiende que las simulaciones con pantallas en una geometría de admisión diferente presentan resultados confiables.



La Figura 13 contiene la distribución de velocidad en el plano medio del túnel con las modificaciones sugeridas para lograr uniformar el perfil de velocidad en la cámara de ensayos. En la Figura 14 se aprecia el perfil de velocidad esperado para el túnel modificado.

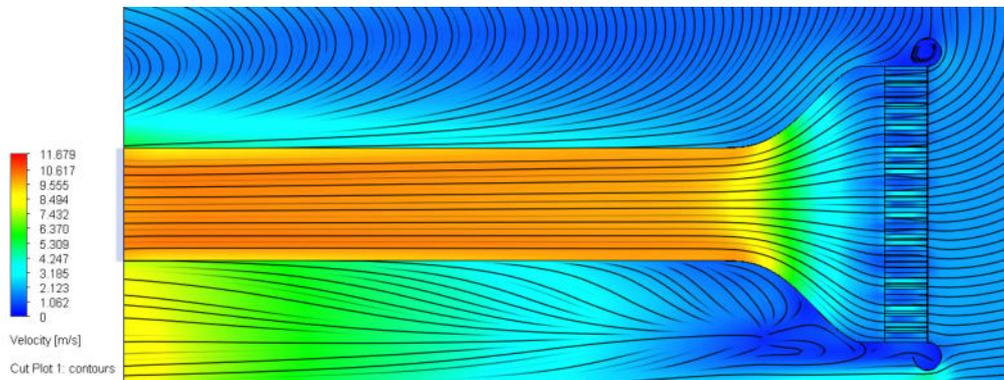


Figura 13: Distribución de velocidades en el plano medio resultante de las simulaciones con el túnel modificado (Contracción + panel + pantalla).

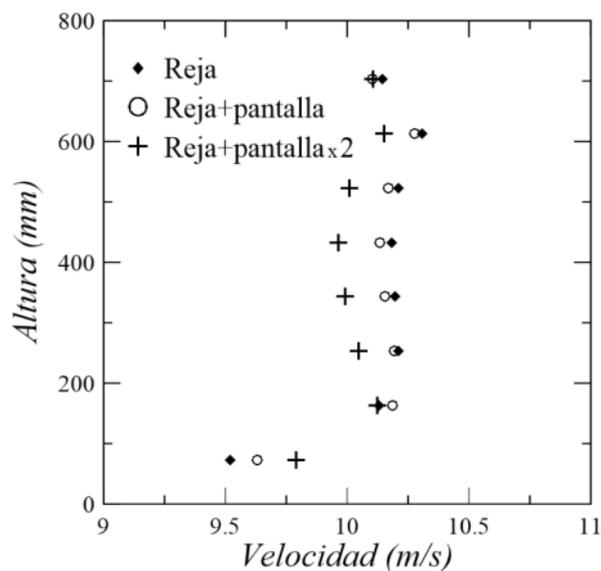


Figura 14: Perfil de velocidad en la cámara de ensayos resultante de las simulaciones con el túnel modificado. Se muestra el efecto de la presencia del panel solo y el de la adición de una y dos pantallas.

#### 4. CONCLUSIONES

Se analizaron las posibles causas de las irregularidades en el perfil de velocidad de la cámara de ensayos del túnel del Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la UNPSJB en base a trabajos previos. Se determinó que las principales variables a considerar son la deficiente contracción en la admisión y la asimetría respecto del plano medio horizontal por la cercanía del suelo.



Se realizó la simulación numérica del flujo en el túnel, se ensayó la performance de una pantalla en las condiciones actuales y se simuló la presencia de la misma, ajustando el modelo con los resultados experimentales.

Habiendo obtenido buena correlación entre los resultados del modelo computacional y de las mediciones, se diseñó y simuló una geometría de contracción que minimice la probabilidad de desprendimientos antes de la cámara de ensayos y se modeló el túnel con la nueva geometría de admisión propuesta, junto con un nuevo panel más una y dos pantallas para compensar las deficiencias de simetría.

Los resultados indican que la combinación entre la admisión diseñada, junto con la adición de un panel y pantallas en la sección de menor velocidad (en lugar del panel actual en la zona de alta velocidad) resulta en un perfil de velocidades en la cámara de ensayos con una uniformidad esperada del orden del 0,1% en la zona central. Este valor se ajusta a los requerimientos de la norma IEC 61400-12-1 – Annex F [6], objetivo a alcanzar en el presente trabajo.

## 5. REFERENCIAS

- [1] W.R. Rae y A. Pope, *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, John Wiley & Sons, EEUU, 1984.
- [2] J. Meseguer, A. Sanz, J.M. Perales y S. Pindado, *Aerodinámica Civil: Cargas de viento en las edificaciones*, McGraw-Hill, España, 2001.
- [3] S. Costa y D. Barilá, *Desarrollo y Construcción de un Túnel de Viento de 30Kw*, P.I. 106, Facultad de Ingeniería UNPSJB, Argentina, 1990.
- [4] M. Llansa, G. Franck y G. Vignolo, *Caracterización Experimental y Numérica de Túnel Aerodinámico*, IV CAIM, 2014.
- [5] F. Lecci, L. Rivera, C. Merelli y G. Vignolo, *Estudio Paramétrico de Ventilador Centrífugo Sirocco en Túnel de Viento: Simulación Cfd y Corroboración Experimental*, VI CAIM, 2021.
- [6] IEC 61400-12-1. *Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. 2005.
- [7] M. Mikhail, *Optimum Design of Wind Tunnel Contractions*, Art. No. 78-819, *AIAA JOURNAL*, 1979.
- [8] J. Watmuff, *Wind Tunnel Contraction Design*, 9<sup>th</sup> *Australian Fluid Mechanics Conference*, 1986.
- [9] A. Kareem, M. Abbas y F. Khammas, *Aerodynamic Study of Low-Speed Wind Tunnel Contraction Section: Design and Manufacturing*, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1094 012077, 2021.
- [10] *Flow Simulation 2013 Technical Reference*, Dassault Systemes, 2013.
- [11] *SolidWorks® Flow Simulation Technical Paper, Enhanced Turbulence Modeling in Solidworks Flow Simulation*, Hawk Ridge Systems, 2014.



## ANÁLISIS DE FRECUENCIA SEGÚN LA TEORÍA TRUNCADA DE TIMOSHENKO EN SENSORES BASADOS EN NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED SIMPLE.

María Anna De Rosa<sup>1</sup>, María Lippiello<sup>2</sup> Antonella Onorato<sup>1</sup> y Marcelo Piovan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Engineering, University of Basilicata, Potenza Italy - [maria.derosa@unibas.it](mailto:maria.derosa@unibas.it)

<sup>2</sup> DiST, University of Naples "Federico II", Naples Italy

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada – UTN Fac. Reg. Bahía Blanca  
11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina [mpiovan@frbb.utn.edu.ar](mailto:mpiovan@frbb.utn.edu.ar)

### RESUMEN

Los nano-sensores son herramientas tecnológicas empleadas para identificar y comunicar información sobre biomoléculas y nano-partículas. La sensibilidad de las frecuencias naturales del resonador y de masas asociadas, suministra los fundamentos para los sensores a escala nano-métrica. La frecuencia de resonancia se desvía de su valor original debido a la presencia de masas adosadas. La cuantificación de las variaciones en las frecuencias de resonancia provocadas por el aumento de masas es la principal dificultad en la detección de masas.

El objeto de estudio de este artículo es el análisis no-local de vibraciones en un nanotubo de carbono de una pared con una masa adosada y que se halla empotrado en un extremo y libre en el otro.

El logro principal de este trabajo es la investigación de las vibraciones libres del nanotubo empleando la teoría no-local truncada de viga Timoshenko. Para evaluar la influencia del coeficiente no-local, la masa adosada y la longitud del nanotubo, se realizan algunos estudios numéricos que luego se validan por contraste con datos disponibles de la literatura científica internacional.

**Palabras Clave:** *Nanotubos de carbono; Teoría Truncada de vigas Timoshenko; vibraciones libres*



## 1. INTRODUCCIÓN

Los nanotubos de carbono, con sus extraordinarias propiedades mecánicas, físicas y eléctricas, han estimulado un amplio espectro de actividades de investigación en el campo de la ciencia y la tecnología debido a su singularidad frente a los materiales convencionales. Como resultado, se han llevado a cabo muchos estudios para investigar sus propiedades mecánicas [1,3] y aplicando la teoría de vigas de Euler-Bernoulli y Timoshenko se han investigado diversos aspectos del comportamiento estático y dinámico de los nanotubos de carbono con una y varias paredes [4-6].

Un tópico importante del modelado de nanotubos es el efecto de escala. Los orígenes de la teoría de la elasticidad no local se remontan a los trabajos pioneros de Eringen [7] y posteriormente de Reddy [8]. Se han utilizado otras aplicaciones de la teoría de la elasticidad no local en el estudio del problema de pandeo y los problemas de vibración en los CNT mediante la aplicación de las teorías de vigas, placas y láminas de Euler-Bernoulli y la teoría de vigas de Timoshenko [9,11].

Recientemente, se ha propuesto un modelo variacional que conduce a una teoría simplificada del análisis dinámico de la teoría de vigas de Timoshenko, denominada teoría truncada de Timoshenko [12]. A partir de la teoría truncada de Timoshenko, los autores del presente artículo han desarrollado una teoría similar para los nanotubos de Timoshenko utilizando métodos geométricos y variacionales.

La finalidad de este artículo es evaluar la influencia de la no-localidad de los nanotubos mediante un estudio de vibraciones naturales en un nanotubo de carbono de una pared modelado con la teoría no-local truncada para viga Timoshenko. En particular se contempla que la estructura posee una masa adosada y sujeta a empotramiento en un extremo y libre en el otro extremo. El efecto de la masa adosada y de la variabilidad de algunas propiedades geométricas del nanotubo también se evalúa. Finalmente se realizan algunos estudios de contraste con los datos disponibles en la literatura científica internacional.

## 2. ECUACIONES DE MOVIMIENTO: TEORÍA TRUNCADA PARA LA VIGA TIMOSHENKO

Considérese el nanotubo de pared simple como el que se muestra en la Figura 1, que tiene longitud  $L$ , sección circular de diámetro  $d$ , espesor de pared  $t$ , módulo de Young  $E$ , módulo de cizallamiento  $G$ , factor de corte  $\kappa$ , densidad de masa  $\rho$  y coeficiente de Poisson  $\nu$ .

Partiendo del equilibrio que resulta en el cuerpo elemental, como se muestra en la Ref [10], se incorpora al cálculo de la fuerza cortante  $Q$  y el momento flector  $M_f$  en términos de las variables cinemáticas en presencia del efecto no local, de manera que se obtiene:



$$Q = GA\kappa \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \phi \right) + \mu^2 \rho A \frac{\partial^3 v}{\partial t^2 \partial z} \quad (1)$$

$$M_f = EI \frac{\partial \phi}{\partial z} + \mu^2 \left( -\rho I \frac{\partial^4 v}{\partial t^2 \partial z^2} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) \quad (2)$$

Siendo  $A$  e  $I$  el área y el momento de inercia de la sección transversal, mientras que  $\mu$  es el parámetro de no localidad [3-8]

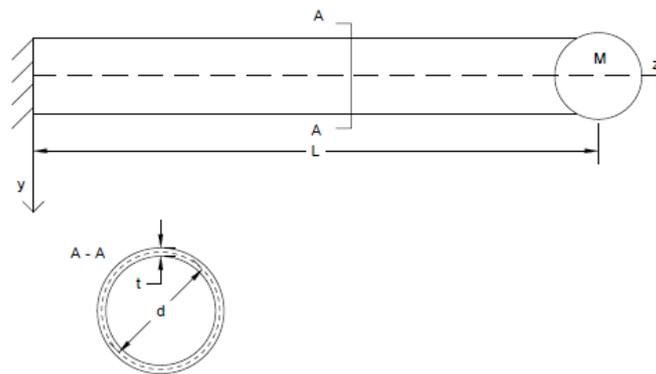


Figura 1: Esquema del nanotubo con la micro masa en el extremo derecho

Utilizando los valores de los esfuerzos internos definidos previamente en (1) y (2) es posible introducir la energía de deformación dada por:

$$\Pi = \frac{1}{2} \left( \int_0^L M_f \frac{\partial \phi}{\partial z} dz + \int_0^L Q \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \phi \right) dz \right) \quad (3)$$

Además la energía potencial  $P$  definida como el trabajo de las fuerzas de inercia por el desplazamiento correspondiente:

$$P_{nl} = \int_0^L \left[ \mu^2 \left( -\rho I \frac{\partial^4 v}{\partial t^2 \partial z^2} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) \frac{\partial \phi}{\partial z} + \mu^2 \rho A \frac{\partial^3 v}{\partial t^2 \partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \phi \right) \right] dz \quad (4)$$

Y la energía cinética  $T$ , es:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dz + \frac{1}{2} M \left( \frac{\partial v(L,t)}{\partial t} \right)^2 \quad (5)$$

Misma que está constituida por la contribución debida al nanotubo y a la masa concentrada a la derecha del modelo. La componente rotacional de las fuerzas de inercia [10], tal como se definió en la teoría truncada de la viga Timoshenko [12], viene incorporada como energía potencial:

$$P_m = - \int_0^L -\rho I \frac{\partial^2 \phi_b}{\partial t^2} \phi dz = - \int_0^L -\rho I \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( -\frac{\partial v}{\partial z} \right) \phi dz \quad (6)$$



Luego aplicando el principio de Hamilton escrito como:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(\Pi + P_{nl} + P_m - T) dt = 0 \quad (7)$$

Se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales:

$$\rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \mu^2 \rho A \frac{\partial^4 v}{\partial t^2 \partial z^2} - GA\kappa \left( \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (8)$$

$$EI \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \mu^2 \rho I \frac{\partial^5 v}{\partial t^2 \partial z^3} + \rho I \frac{\partial^3 v}{\partial t^2 \partial z} - GA\kappa \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \phi \right) = 0 \quad (9)$$

Con las siguientes condiciones en los extremos:

$$\left[ \left( \mu^2 \rho A \frac{\partial^3 v}{\partial t^2 \partial z} \right) + GA\kappa \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \phi \right) \right] \delta v \Big|_0^L + M \left( \frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial t^2} \right) \delta v(L,t) = 0 \quad (10)$$

$$\left[ \left( \mu^2 \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \mu^2 \rho I \frac{\partial^4 v}{\partial t^2 \partial z^2} + EI \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \delta \phi \right]_0^L = 0 \quad (11)$$

Que para la ménsula con la masa en el extremo se convierten en:

$$v(0, t) = 0 \quad (12)$$

$$\phi(0, t) = 0 \quad (13)$$

$$\left( \mu^2 \rho A \frac{\partial^3 v(L,t)}{\partial t^2 \partial z} \right) + GA\kappa \left( \frac{\partial v(L,t)}{\partial z} + \phi(L, t) \right) + M \left( \frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (14)$$

$$\left( \mu^2 \rho A \frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial t^2} - \mu^2 \rho I \frac{\partial^4 v(L,t)}{\partial t^2 \partial z^2} + EI \frac{\partial \phi(L,t)}{\partial z} \right) = 0 \quad (15)$$

### 3. RESOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES

Se propone la solución armónica a través de separación de variables siguiente:

$$v(z, t) = v(z)e^{i\omega t}, \phi(z, t) = \phi(z)e^{i\omega t} \quad (16)$$

que reemplazadas en las ecuaciones diferenciales (8)-(9), conduce a :

$$\rho A \omega^2 v - \mu^2 \rho A \omega^2 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + GA\kappa \left( \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (17)$$

$$EI \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \mu^2 \rho I \omega^2 \frac{\partial^3 v}{\partial z^3} - \rho I \omega^2 \frac{\partial v}{\partial z} - GA\kappa \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \phi \right) = 0 \quad (18)$$

Despejando  $\frac{\partial \phi}{\partial z}$  de la Ecuación (17) y substituyendo en la Ecuación (18), oportunamente derivada, se obtiene:

$$\left( -EI + \mu^2 \rho I \omega^2 + EI \frac{\mu^2 \rho A \omega^2}{GA\kappa} \right) \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} + \left( -EI \frac{\rho A \omega^2}{GA\kappa} - \mu^2 \rho A \omega^2 - \rho I \omega^2 \right) \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \rho A \omega^2 v = 0 \quad (19)$$



Esta es la ecuación diferencial de cuarto orden para el movimiento del nanotubo, deducida de la teoría truncada de vigas Timoshenko.

Definiendo las siguientes entidades adimensionales:

$$\zeta = \frac{z}{L}, \quad \Omega^2 = \frac{\rho A L^4 \omega^2}{EI}, \quad \eta^2 = \frac{\mu^2}{L^2}, \quad \beta^2 = \frac{EI}{G A \kappa L^2}, \quad \alpha^2 = \frac{I}{A L^2}, \quad \lambda_M = \frac{M}{\rho A L} \quad (20)$$

Y empleándolas en la Ecuación (19), se obtiene la siguiente expresión:

$$(1 - \Omega^2 \alpha^2 \eta^2 - \Omega^2 \beta^2 \eta^2) \frac{\partial^4 v}{\partial \zeta^4} + (\Omega^2 \beta^2 + \Omega^2 \eta^2 + \Omega^2 \alpha^2) \frac{\partial^2 v}{\partial \zeta^2} - \Omega^2 v = 0 \quad (21)$$

La solución de esta ecuación diferencial se propone como:

$$v(\zeta) = A_1 \cos(a\zeta) + A_2 \sin(a\zeta) + A_3 \cosh(b\zeta) + A_4 \sinh(b\zeta) \quad (22)$$

Con:

$$a = \sqrt{\frac{1}{2p}(q + \sqrt{q^2 + 4pr})}; \quad b = \sqrt{\frac{1}{2p}(-q + \sqrt{q^2 + 4pr})} \quad (23)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} p &= (1 - \Omega^2 \alpha^2 \eta^2 - \Omega^2 \beta^2 \eta^2) \\ q &= (\Omega^2 \beta^2 + \Omega^2 \eta^2 + \Omega^2 \alpha^2) \\ r &= \Omega^2 \end{aligned} \quad (24)$$

Luego adimensionalizando las Ecuaciones (8)-(9) se puede obtener  $\bar{\phi} = \phi L$  como sigue:

$$\bar{\phi} = (\Omega^2 \alpha^2 \eta^2 \beta^2 + \Omega^2 \beta^4 \eta^2 - \beta^2) \frac{\partial^3 v}{\partial \zeta^3} - (1 + \Omega^2 \alpha^2 \beta^2 + \Omega^2 \beta^4) \frac{\partial v}{\partial \zeta} \quad (25)$$

Por último las condiciones de borde, dadas por las Ecuaciones (12-15) después de haber efectuado la separación de variables y la adimensionalización, quedan como sigue:

$$\begin{aligned} v(0) &= 0 \\ \bar{\phi}(0) &= 0 \\ (1 - \beta^2 \Omega^2 \eta^2) \frac{\partial v(1)}{\partial \zeta} + \bar{\phi}(1) - \Omega^2 \beta^2 \lambda_M v(1) &= 0 \\ -\frac{\partial \bar{\phi}(1)}{\partial \zeta} - \Omega^2 \alpha^2 \eta^2 \frac{\partial^2 v(1)}{\partial \zeta^2} + \Omega^2 \eta^2 v(1) &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Si se substituyen las Ecuaciones (22-25) oportunamente derivadas en las condiciones de borde de la Ecuación (26) se obtendrá un sistema de cuatro ecuaciones en las incógnitas  $A_i$ . Con el fin de obtener un sistema de ecuaciones que admita una solución distinta de la banal, el determinante de la matriz de coeficientes debe ser cero. De la infinidad de soluciones que surgen de la ecuación trascendente resolviendo el determinante mencionado, se obtienen las frecuencias libres de vibración.



#### 4. EJEMPLOS NUMERICOS

En esta sección se pretende efectuar un parangón entre el modelo de nanotubo de una pared deducido mediante la teoría clásica de Timoshenko y el correspondiente a la teoría truncada de viga Timoshenko. También se reportan ejemplos para evaluar los efectos del parámetro no local y de la longitud del nanotubo sobre las frecuencias libres de vibraciones. En los diagramas y tablas que se reportan a continuación se utilizan los siguientes valores geométricos y físicos del nanotubo.

Tabla 1. Datos geométricos y físicos de un nanotubo [11]

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad	$\rho$	2240	Kg/m <sup>3</sup>
Diámetro	$d$	$1.1 \cdot 10^{-9}$	m
Espesor	$t$	$0.342 \cdot 10^{-9}$	m
Área Seccional	$A$	$1.18187 \cdot 10^{-18}$	m <sup>2</sup>
Momento de Inercia	$I$	$1.96037 \cdot 10^{-37}$	m <sup>4</sup>
Módulo de Young	$E$	1	TPa
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0.28	--
Factor de corte	$\kappa$	$\frac{5+5\nu}{6+5\nu}$	--
Módulo de Cizallamiento	$G$	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	TPa

Adicionalmente, la longitud del nanotubo se obtiene considerando la relación adimensional  $L/d$ , donde  $L$  es la longitud del nanotubo y  $d$  su diámetro.

##### 4.1. Comparación entre las dos teorías

Con el objeto de evaluar la validez del presente enfoque no local para el análisis dinámico de nanotubos, algunos ejemplos numéricos se efectúan para ser comparados con aquellos disponibles de la literatura científica, tales como los indicados en las referencias bibliográficas de este trabajo. En particular, para confirmar la fiabilidad de la presente formulación y sus resultados, las comparaciones que se realizan, conducen a mostrar la influencia del efecto de pequeña escala y la micromasa en los valores de las frecuencias naturales de un nanotubo empotrado-libre de una sola pared delgada.

En la Tabla 2 se efectúa una comparación numérica entre la teoría clásica y la teoría propuesta en este trabajo. Se han calculado las primeras tres frecuencias para cuatro valores del coeficiente  $\lambda_M$  habiendo fijado  $L/d = 10$  y  $\eta = 0$ , es decir sin los efectos no locales. Los resultados que se ven en la Tabla 2, indican que hay muy poco desvío entre ambas teorías y



con porcentuales de error bajísimos para las frecuencias medidas. Aun cuando los valores de frecuencia  $\Omega_i$  de la teoría truncada son siempre superiores a los de la teoría clásica, su variación porcentual no excede el 0.1%.

Tabla 2. Comparación numérica entre las dos teorías: Determinación de las tres primeras frecuencias naturales (GHz) para un nanotubo tipo Timoshenko

Enfoque	$\lambda_M$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
Shen et al. [11]	0,0	39,3044	229,9883	586,0977
Presente estudio		39,3056	230,1072	589,2354
Shen et al. [11]	0,5	22,6419	179,6453	503,0672
Presente estudio		22,6421	179,7566	505,1399
Shen et al. [11]	1,0	17,5013	172,9930	495,7200
Presente estudio		17,5014	173,0926	497,7061
Shen et al. [11]	1,5	8,5137	166,3264	488,9477
Presente estudio		8,5138	166,4152	490,8555

Tabla 3. Comparación numérica entre las dos teorías: Determinación de las tres primeras frecuencias naturales (GHz) para un nanotubo tipo Timoshenko

$L/d$	$\Omega_1$	$\Omega_2$
1	0,5025	3,9632
2	0,6596	7,2163
3	0,7088	9,5151
4	0,7288	11,0389
5	0,7386	12,0409
6	0,7441	12,7122
7	0,7475	13,1746
8	0,7497	13,5028
9	0,7513	13,7423
10	0,7524	13,9215
20	0,7559	14,5444

En la Tabla 3 se fijó  $\lambda_M=5$  y  $\eta=0,1$ . Se han calculado las primeras dos frecuencias adimensionales  $\Omega_i$  con  $i=1,2$ , mientras que se ha hecho variar la relación de esbeltez  $L/d$ . Los resultados ponen en evidencia que las frecuencias aumentan al aumentar la longitud del nanotubo  $L$  respecto del diámetro  $d$ , pasando así de la Teoría Timoshenko a la Teoría Euler-

Bernoulli. Como se puede notar los valores de las frecuencias obtenidas para  $L/d=10$  a  $L/d=20$  varían muy poco.

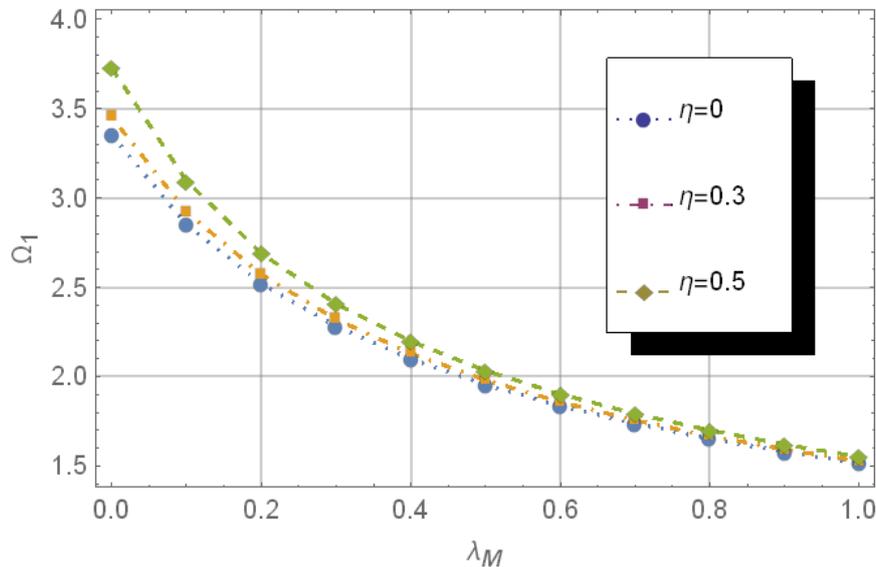


Figura 2: Valores de la primera frecuencia adimensional  $\Omega_1$  variando con respecto del coeficiente adimensional de la micromasa  $\lambda_M$  para tres valores de no-localidad.

En la Figura 2 se representan tres curvas correspondientes a tres factores adimensionalizados del efecto no local  $\eta$  (0,0; 0,3; 0,5), habiendo fijado  $L/d=5$  junto con los demás valores de la Tabla 1. Se ha calculado la primera frecuencia adimensional  $\Omega_1$  al variar el coeficiente adimensional  $\lambda_M$  de la micro-masa concentrada en el extremo libre. Como puede verse al aumentar la proporción de la micromasa respecto de la masa del nanotubo, la primera frecuencia libre disminuye casi llegando a la mitad. Además, la presencia del efecto no local aumenta la primera frecuencia, si bien a medida que aumenta  $\lambda_M$ , la influencia del efecto no local tiende a desaparecer.

## 5. CONCLUSIONES

En el presente artículo, se ha estudiado un nanotubo de pared simple mediante la teoría de Timoshenko truncado no local. De acuerdo con la teoría de vigas de Timoshenko no local y de Eringen, se ha presentado una nueva teoría para el análisis de vibración libre del nanotubo tipo Timoshenko, derivando las ecuaciones de movimiento y las condiciones de contorno generales correspondientes. A partir de la teoría truncada para vigas Timoshenko, los autores han desarrollado la misma teoría para los nanotubos de Timoshenko utilizando métodos geométricos y variacionales. Comparando la teoría clásica de Timoshenko con la teoría



truncada, se ha mostrado una simplificación considerable de la ecuación diferencial. Algunos ejemplos numéricos han puesto en evidencia la eficacia del enfoque propuesto, incluso a través de una comparación con los resultados de la literatura. En particular, los resultados han demostrado que la presente formulación es muy eficiente y capaz de describir el comportamiento de los nanovigas de manera satisfactoria.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer el auspicio de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de la Basilicata, de la Universidad de Napoli "Federico II" y de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Tecnológica Nacional por el apoyo a través del proyecto PID 8454 TC.

## REFERENCIAS

- [1] Krishnan A., Dujardin E., Ebbesen T., Yianilos P., Treacy M. *Young's modulus of single-walled nanotubes*. Phys. Rev. B 58, 14013-4019, 1998.
- [2] Demczyk B, Wang Y., Cumings J., Hetman M., Han W., Zettl A., Ritchie R. *Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multi-walled carbon nanotubes*. Mat. Sci. and Eng. A 334, 173-178, 2002.
- [3] Ruoff R., Qian D., Liu, W. *Mechanical properties of carbon nanotubes: Theoretical predictions and experimental measurements*. Comptes Rendues Phys. 4, 993-1008, 2003.
- [4] Elishakoff I., Pentaras D. *Fundamental natural frequencies of double-walled nanotubes*. Int. J. Sound Vib. 322, 652-664, 2009.
- [5] Ru C. *Column buckling of multiwalled carbon nanotubes with interlayer radial displacements*. Physics Reviews B 62, 16962-16967, 2000.
- [6] Wang Q., Hu T., Chen Q. *Bending instability characteristics of double walled nanotubes*. Physics Reviews B 71, 045403, 2005.
- [7] Eringen, A. *On differential equations of non local elasticity and solutions of screw dislocation and surface-waves*. Jou. Appl. Phys. 54, 4703-4710, 1983.
- [8] Reddy J. *Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams*. Int. J. Eng. Sci. 45, 288-307, 2007.
- [9] De Rosa M., Lippiello M. *Free vibration analysis of DWCNTs using CDM and Rayleigh-Schmidt based on nonlocal Euler-Bernoulli beam theory*. Sci. World J. 2014, 194529, 2014.



- [10] De Rosa M., Lippiello M. *Nonlocal Timoshenko frequency analysis of single-walled carbon nanotube with attached mass: an alternative Hamiltonian approach*. Comp. Part B 111, 409-418, 2017.
- [11] Shen Z., Li X., Sheng L., Tango G. *Transverse vibration of nanotube-based micro-mass sensor via nonlocal Timoshenko beam theory*. Comp. Mater. Scie. 53,340-346, 2012.
- [12] De Rosa M., Lippiello M., Elishakoff I. *Variational Derivation of Truncated Timoshenko-Ehrenfest Beam Theory*. Jou. Appl.Comput. Mech. 8(3), 996-1004, 2022.



## ESTUDIOS PRELIMINARES PARA LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN SISTEMA MOTO-CONDUCTOR

José E. Stuardi <sup>1</sup>, Guillermo D. Chiappero <sup>2</sup> y Alejandro J. Giudici <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba  
Vélez Sársfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina,  
[jose.stuardi@unc.edu.ar](mailto:jose.stuardi@unc.edu.ar),

<sup>2</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba,  
[guillermo.chiappero@unc.edu.ar](mailto:guillermo.chiappero@unc.edu.ar)

<sup>3</sup> Departamento de Estructuras – Universidad Nacional de Córdoba, [ajjudici@unc.edu.ar](mailto:ajjudici@unc.edu.ar)

### RESUMEN

Se describen los trabajos previos realizados para la definición de modelos computacionales aptos para el estudio del comportamiento dinámico de una motocicleta en condiciones de funcionamiento, esto es, incluyendo la presencia del conductor. El esfuerzo se enmarca dentro de un proyecto tendiente a definir condiciones y ensayos para la homologación de chasis de motocicletas CUB 110 fabricadas en el país. El chasis constituye una pieza clave para la seguridad, constatada por la ocurrencia de algunas fallas por fatiga, por lo que se propende a mejorar la confiabilidad de partes de fabricación nacional, para así sobrellevar la destacable ausencia de normas internacionales y especificaciones de los productos importados. En el presente trabajo se analizan los distintos subsistemas del conjunto, provistos de propiedades dinámicas bien diferenciadas tales como chasis, sistema de suspensión, conjunto de masas adicionales y subsistema conductor-asiento. Se reconocen necesidades de modelación y ajuste variados, estos últimos logrados mediante ensayos de laboratorio de las partes involucradas. Se realizan además ensayos estáticos y dinámicos para el ajuste de los parámetros inerciales de la moto y el conductor, además de ensayos cíclicos del sistema de suspensión para la definición de los parámetros apropiados. El resultado se materializa en un modelo de elementos finitos del sistema completo, que es utilizado en trabajos posteriores como base para estudios dinámicos y cálculo de esfuerzos en puntos de control del chasis para distintas condiciones de circulación. Para esto son necesarios algunos esfuerzos adicionales de reducción de orden y subestructuración para facilitar el desempeño computacional.

**Palabras clave:** *Simulación computacional, Respuesta dinámica, Moto Conductor*



## 1 INTRODUCCIÓN

El chasis de la motocicleta constituye una pieza clave en la seguridad, constatada además por la ocurrencia de algunas fallas por fatiga en puntos críticos de piezas de fabricación nacional. Los estudios de investigación del presente trabajo se enmarcan en un proyecto que persigue como objetivo obtener documentos técnicos específicos sobre la seguridad funcional de los chasis de motocicleta, los que deberán tenerse presente para su diseño y construcción. Se pretende establecer requisitos de homologación que afecten al control de producción y testeo de las piezas. Basándose en esta información, y mediante la simulación computacional, es posible el diseño y verificación de distintos componentes, incluyendo el chasis soldado. Una última etapa en este desarrollo, constituye la definición de ensayos dinámicos de laboratorio para control y homologación de los productos [1, 2]. La ausencia de normativas internacionales al respecto, hace necesaria una activa sinergia entre las empresas y los organismos técnicos y administrativos encargados de velar por la seguridad.

La metodología empleada en el presente trabajo se basa en la modelación computacional del sistema moto-conductor, para la simulación de su comportamiento y respuesta dinámica. El análisis muestra subsistemas de muy variadas características, que deben ser tenidas en cuenta mediante la adopción de modelos y parámetros provenientes de distintas fuentes, entre las que se destaca la evaluación experimental en laboratorio. Si bien en el chasis se hace necesaria una malla detallada de Elementos Finitos (EF) para cálculos tensionales [3], la respuesta dinámica puede ser calculada convenientemente mediante un modelo condensado a partir del original.

## 2 OBJETIVOS

El objetivo específico del trabajo es la definición de un modelo computacional de EF de un sistema compuesto por la motocicleta en condiciones de rodaje, esto es considerando la presencia del conductor. El modelo debe ser fiable para estudios del comportamiento dinámico y contribuir al diseño estructural del chasis. El modelo biomecánico resulta de la composición de partes de distinta naturaleza y propiedades bien diferenciadas. Por esta razón, resulta en este caso un especial desafío el objetivo de lograr la correspondencia entre su comportamiento y el del vehículo real. Se requiere una buena predicción de los parámetros para lo que se efectúan una serie de ensayos experimentales para determinar las propiedades dinámicas del sistema. Especialmente importante para la respuesta dinámica se muestra el estudio de los mecanismos de disipación en la suspensión, que resultan marcadamente no lineales y la definición de un modelo simplificado y lineal para acelerar el cálculo de la respuesta. Como objetivos más generales, el trabajo pretende contribuir al diseño de chasis de motocicletas basados en premisas de seguridad, viabilidad y costo, como así también a establecer las especificaciones que deben cumplir los chasis y los medios de control de su calidad.

### 3 CONCEPCIÓN ESTRUCTURAL DEL SISTEMA MOTO-CONDUCTOR

Desde el punto de vista estructural, la motocicleta en condiciones de marcha puede ser descompuesto en distintos subsistemas, a saber: a) El **Chasis** es una subestructura de relativamente poca masa (9.9 kg) y gran rigidez con una primera frecuencia propia libre-libre en 95,1 Hz con un modo flexional en el plano longitudinal (estimación basada en el modelo de E.F.); b) El **Sistema de suspensión** compuesto por resortes y amortiguadores junto con los sistemas de acople y sujeción y se caracteriza por una relativa baja rigidez y alto amortiguamiento; c) **Masas adicionales:** son masas vinculadas al chasis, que no aportan rigidez significativa, tal como motor, tanque, batería, asiento, etc. Con estos aportes, la primera frecuencia propia flexional libre-libre en el plano longitudinal del chasis con los componentes citados resulta cercana a 50 Hz (estimación basada en el modelo de E.F.); d) **Conductor-Asiento**, que provee una masa mayor que la masa suspendida propia de la moto. La hipótesis de sistema inerte utilizada es apropiada para casos donde la interacción vehículo-conductor es baja [4], y el modelo del conductor y del asiento resultan sistemas de baja frecuencia propia cercanas a las frecuencias del sistema de suspensión.

#### 3.1 Chasis metálico

El marco metálico está constituido por un tramo de caño apenas curvo (tramo 1), que une a la horquilla por delante con la zona central de pedales, ver Fig. 1. Desde la zona media de este tramo se abren dos caños curvos hacia los laterales y hacia arriba (tramo 2), los que llegan hasta la zona de anclaje de la suspensión trasera. Finalmente, una construcción en chapa estampada solidariza el punto bajo del tramo 1 con la zona media del tramo 2, generando de esta forma un marco cerrado y proveyendo rigidez estructural. Esta construcción tiene además la función de alojar adecuadamente al propulsor de la moto.

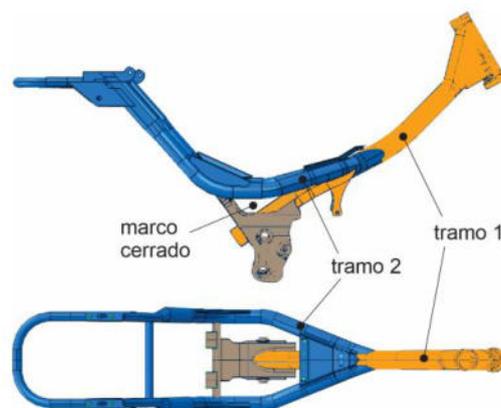


Fig. 1: Concepción del chasis de la motocicleta



Se relevaron las dimensiones del tubo, tales como diámetro externo  $D = 49,6$  mm y espesor  $e = 3,2$  mm. De acuerdo con ensayos realizados de espectrometría de emisión óptica según norma ASTM E 415-2014, el material del chasis de la moto ensayada era acero SAE 1118.

### 3.2 Sistema de suspensiones

El sistema de suspensión delantero está compuesto una horquilla telescópica que aloja dos conjuntos resorte-amortiguador de cada lado de la rueda delantera. El sistema de suspensión trasero es de brazo basculante y se compone de una parrilla horizontal que pivota en la zona de pedalines mediante un buje y sujeta por detrás a la rueda. Este punto sirve además de anclaje inferior para un conjunto resorte-amortiguador de cada lado de la rueda, el que por otro lado presenta un anclaje en el tramo 2. Los sistemas de suspensiones fueron modelados por conjuntos resorte-amortiguador respetando las condiciones de restricciones cinemáticas que el marco les impone. Se pretende utilizar hipótesis de comportamiento lineal y amortiguamiento viscoso para ganar simplicidad de los modelos.

### 3.3 Conductor

La interacción vehículo-conductor puede despreciarse siempre que la masa del conductor y las fuerzas que genera sean pequeñas en relación a las presentes en el vehículo. Como este no es el caso en una motocicleta, se implementó un modelo de cuerpo humano sentado erecto y sin respaldo según la norma ISO 5982:2001, constituido por un sistema de 3 grados de libertad, ver Fig. 2. El sistema provee una masa aparente en el nodo de la masa  $m_0$  que corresponde con la respuesta aproximada de un cuerpo humano sentado sobre una mesa vibratoria. En este modelo, si bien las masas y rigideces no se corresponden en forma directa con las estructuras fisiológicas del cuerpo humano, puede considerarse que la masa  $m_2$  se corresponde con la cabeza. En base a un peso total de 75 kg, y considerando que el 73% de la masa descansa sobre el asiento, las distribuciones de masas, rigideces y amortiguamientos resultan como se muestra en la figura. De las funciones de masa aparente que provee la norma puede apreciarse que el cuerpo humano en las condiciones de operación de una motocicleta (sentado) resulta básicamente un sistema con una frecuencia propia algo menor a 4 Hz provisto de un amortiguamiento considerable, por lo que sus efectos sobre las frecuencias pendulares de la motocicleta deben ser tenidos en cuenta.

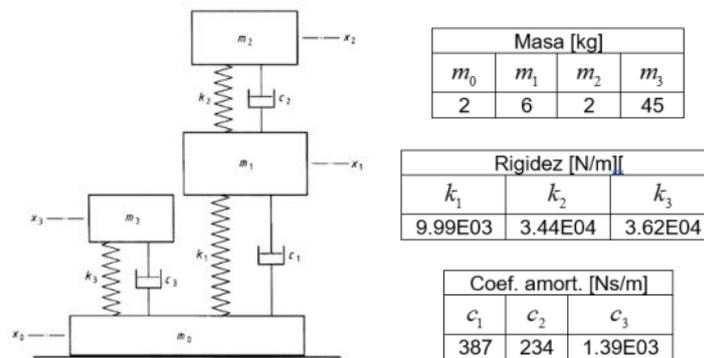


Fig. 2: Modelo vertical del conductor utilizado (extraído de norma ISO 5982)

### 3.4 Asiento

El asiento constituye el vínculo entre el modelo del conductor y el de la moto y se modela en forma simplificada como un sistema resorte-amortiguador, donde la masa propia se desprecia de acuerdo con Fairley et al. [5] y Griffin [6]. Un grupo de nodos en el asiento de la moto que se corresponden con la posición de la cadera del conductor y cuyos GL han sido previamente restringidos entre si se vinculan solidariamente con la masa  $m_0$ . De acuerdo con Patten [7], quien investigó las funciones de transferencia experimentales de asientos de conductor de automóviles compuestos por espuma de poliuretano y mediante el uso de una masa puntual, un modelo representativo fiel resulta no lineal en las aceleraciones debido a las características constitutivas del material expresadas por la rigidez y amortiguamiento. En general, se observa que los picos de las funciones de transferencia y la frecuencia de resonancia disminuyen con el aumento de las aceleraciones. A efectos del presente trabajo, es suficiente la consideración de un sistema lineal que genere con la masa del conductor supuesta puntual una frecuencia de aprox. 6 Hz con un amortiguamiento de un 35% respecto del crítico. Estos parámetros fueron estimados a partir de las funciones de transferencia disponibles, ver ejemplo en la Fig. 3, para asientos de diferente calidad y teniendo en cuenta el peso del conductor considerado.

### 3.5 Masas adicionales no estructurales

En una tabla se resumieron las masas del modelo del chasis y luego las masas adicionales que forman parte del sistema no estructural de la motocicleta. Estas masas han sido agregadas al modelo mediante la discretización de las partes o bien mediante la inclusión de masas puntuales. El posicionamiento de las partes fue realizado en el plano longitudinal de acuerdo con un relevamiento fotográfico. Las masas han sido clasificadas de acuerdo con su carácter en suspendidas y no suspendidas. En algunos casos es necesario una discriminación porcentual, ya que hay elementos que comparten la característica de ser masas suspendidas y no suspendidas. Esta tarea resultó dificultosa, por lo que se debieron realizar aproximaciones.

Téngase en cuenta que, el modelo de masas suspendidas de la motocicleta tuvo un peso total de 58.4 kg y el error de las aproximaciones en las asignaciones de masa puede ser significativo.

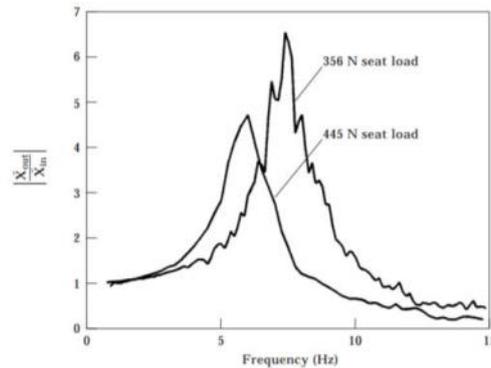


Fig. 3: Funciones de transferencia para un asiento de un automóvil para 356 N y 445 N de peso puntual sentado (extraído de [7]).

#### 4 ESTUDIOS Y ENSAYOS PRELIMINARES SOBRE EL CHASIS Y LA MOTOCICLETA

Se desarrollaron distintos ensayos sobre el marco desnudo y sobre la moto completa, con el fin de conocer el comportamiento de los distintos componentes, dentro de los que se destacan ensayos para la determinación de los parámetros inerciales de la moto, del conductor, ensayo de la motocicleta con cargas cíclicas en forma estática y progresiva y ensayos de componentes de suspensión. La masa, posición del centro de gravedad y masa rotacional de la moto fue medida mediante el pesado en la ruedas delantera y trasera en posición horizontal e inclinada [8], y midiendo la frecuencia pendular de la moto colgada. Mediante un modelo biomecánico se calculó el CG del conductor, basándose en la posición del cuerpo del conductor y la participación de las distintas partes en las que se divide el cuerpo humano en el peso total según Foale [9]. Para esto se consideró la posición de conducción como sentada erguida y con las manos en el manubrio.

La rigidez de las suspensiones fue calculada mediante relevamiento de las dimensiones de los resortes helicoidales y fueron posteriormente contrastados mediante el ensayo en laboratorio de la curva de carga de los resortes ensayados en forma individual. La rigidez resulta bilineal por bloqueo de las espiras en uno de los tramos que lo constituyen. En la Fig. 4 se muestran a modo de ejemplo las curvas de carga relevadas de los resortes que forman la suspensión delantera y trasera.

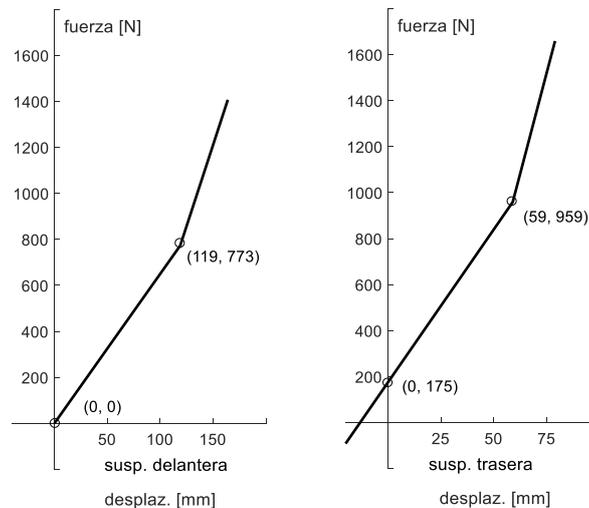


Fig. 4: Curvas de carga de los resortes de las suspensiones delantera (izq.) y trasera (der.).

#### 4.1 Determinación del amortiguamiento de los sistemas de suspensión

Se realizaron ensayos dinámicos cíclicos en una barra de horquilla delantera y en un amortiguador trasero para la determinación del modelo de amortiguamiento adecuado y los parámetros que la describen.

El amortiguador delantero se encuentra construido dentro de la horquilla, la cual está conformada por un conjunto de dos barras a ambos laterales de la moto y formada cada una por dos tubos cilíndricos que deslizan con fricción entre sí. Un barral fue ensayado fijado por un extremo a un punto fijo, mientras que el otro punto fue sometido a un movimiento armónico de amplitud y frecuencia controlada. Los ensayos se realizaron para amplitudes  $x_0$  de 1.905, 4.27, 8.875 mm y para frecuencias  $f$  de 1.04, 2.33, 3.12, 3.94, 5.84, 7.88 Hz con lo que se obtuvieron 18 mediciones de velocidades entre 12.47 y 439.4 mm/s. La instrumentación consistió en una celda de carga y un acelerómetro, con lo cual se obtuvieron histogramas de fuerza y velocidad en forma cíclica, no mostrados aquí por razones de espacio. Los ensayos muestran en resumen un comportamiento friccional para velocidades bajas, mientras que a velocidades más elevadas se hace presente el amortiguamiento viscoso, pero solo en extensión. Basándose en el concepto de amortiguamiento viscoso equivalente, se pueden calcular los coeficientes de amortiguamiento en función de la velocidad igualando las energías disipadas por ciclo  $E_d$  con la energía disipada por ciclo en un modelo viscoso, de acuerdo con  $c_{eq} = E_d / (\pi \omega x_0)$  obteniéndose los gráficos de la Fig. 5, que en este caso corresponden a los amortiguadores delanteros.

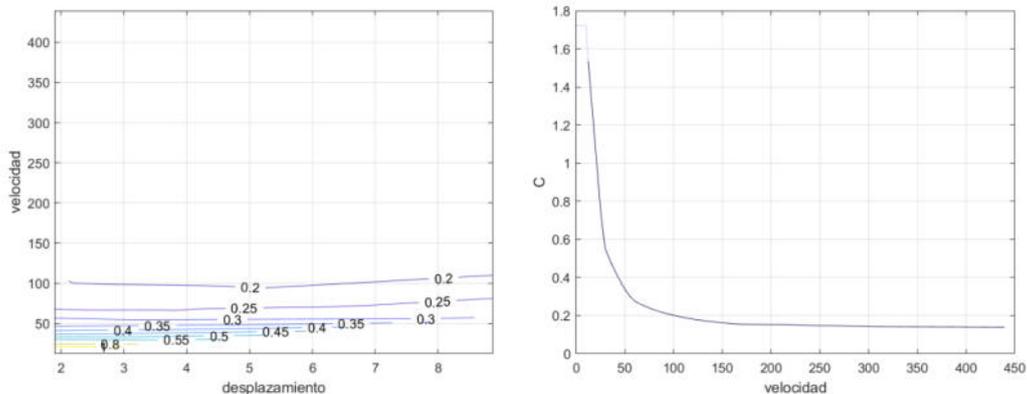


Fig. 5: Fuerza registrada en los ensayos de amortiguadores delanteros

El gráfico izquierdo, velocidad vs. desplazamiento, presenta las líneas de nivel que representan al amortiguamiento equivalente expresado en Ns/mm. Las líneas se presentan como aproximadamente rectas y casi horizontales, mostrando la escasa influencia del desplazamiento máximo  $x_0$  en la determinación del amortiguamiento equivalente. Por esta razón se puede obtener el gráfico derecho, donde se muestra el coeficiente de amortiguamiento  $c$  [Ns/m] equivalente en función de la velocidad  $v$  [mm/s].

El amortiguador trasero forma parte del conjunto resorte-amortiguador de la suspensión, alojando el resorte por fuera y proporcionando los ojales de sujeción. Es un amortiguador de doble efecto, que fue ensayado fijado por un extremo a un punto fijo, mientras que el otro punto fue sometido a un movimiento armónico de amplitud y frecuencia controlada. Los ensayos se realizaron para aproximadamente las mismas amplitudes y frecuencias de ensayo anteriores, con lo que se obtuvieron 18 mediciones de velocidades entre 12.47 y 439.4 mm/s. De los ensayos se obtuvieron los coeficientes de amortiguamiento viscosos equivalentes, obteniéndose los gráficos de la Fig. 6

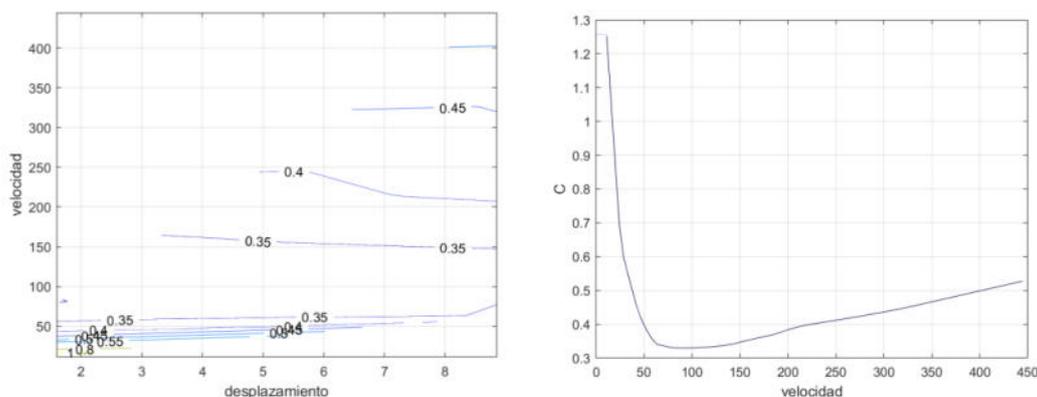


Fig. 6: Fuerza registrada en los ensayos de amortiguadores traseros



El gráfico izquierdo presenta las líneas de nivel que representan al amortiguamiento equivalente expresado en Ns/mm, donde se observa escasa influencia del desplazamiento en el amortiguamiento equivalente. Asumiendo una independencia del amortiguamiento con el desplazamiento, se obtiene el gráfico derecho, donde se muestra el coeficiente de amortiguamiento equivalente viscoso en función de la velocidad. Los valores de coeficiente de amortiguamiento para velocidades bajas son levemente superiores a de la suspensión delantera, mientras que el amortiguamiento crece linealmente con la velocidad y sus valores son más del doble del de la suspensión delantera.

## 5 PROCEDIMIENTO DE MODELACIÓN

El marco fue modelado mediante elementos cuadriláteros de cáscara con 4 nodos e integración reducida. Para la modelación del chasis tubular se utilizaron 43929 elementos cuadriláteros y 1076 elementos triangulares, ambos lineales. Las uniones soldadas no fueron modeladas y desde este punto de vista el modelo representa una construcción similar a una fundida, esto debido a que el análisis de la soldadura no constituye un objetivo del trabajo. En la Fig. 7 se muestra el modelo terminado del sistema moto-conductor, donde se distingue el chasis, motor, asiento, parrilla de suspensión, manubrio, etc. Se utilizaron una cantidad menor (en relación al chasis) de elementos tetrahédricos cuadráticos y hexahédricos lineales para modelar los elementos auxiliares con volumen, tales como motor y asiento. La parrilla trasera de suspensión se modeló con elementos de viga lineales con propiedad másica y fue vinculada mediante conectores para permitir su rotación en el chasis. En forma análoga se consideró el manubrio. Un conector del tipo deslizador fue utilizado para completar la modelación del resorte y amortiguador delanteros y lograr la restricción de los movimientos fuera de la línea de acción de los dispositivos. Otras restricciones fueron utilizadas en el asiento del conductor, para vincular el modelo humano al asiento, se utilizó un *constraint* para solidarizar un conjunto de puntos del asiento en concordancia con la zona de contacto del conductor con el nodo de la masa  $m_0$  (ver Fig. 2). El conjunto de masas adicionales fue considerado en la forma de masas puntuales agregadas, ya que las inercias rotacionales propias son en principio de valor poco significativo. Finalmente se observa en Fig. 7 el acoplamiento del sistema de masas y resortes del conductor.

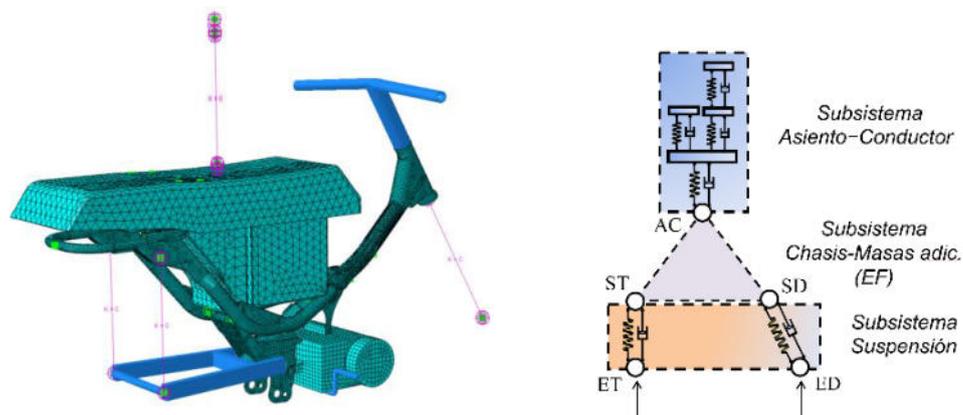


Fig. 7: Modelo de EF del sistema moto-conductor y esquema de modelo simplificado

### 5.1 Modelo simplificado

Se construyó un modelo simplificado que contiene un número de GLD reducido utilizando el método de síntesis de componentes modales (CMS method ó Craig Bampton method, [10] [11]).

El modelo original computacional de EF es particionado en una subestructura que comprende: i) *chasis y las masas adicionales* del modelo de masas suspendidas, ii) la subestructura *asiento-conductor* y iii) la subestructura del *sistema de suspensión*, ver Fig. 7 (der.). Las matrices de rigidez y masa de la subestructura chasis y masas adicionales son obtenidas como salida del programa de EF en formato de tabla en los grados de libertad retenidos. Contando con las matrices de la subestructura del chasis y masas adicionales, el sistema completo de la moto es regenerado en un código en ambiente Matlab programado a tal fin y adicionando las subestructuras del sistema de suspensión y del humano. Los grados de libertad *retenidos* en el proceso de subestructuración son 3 GLD de pórtico plano para cada uno de los 3 nodos que definen el marco: la suspensión delantera (SD), suspensión trasera (ST) y asiento del conductor (AC). Adicionalmente se retiene un GL adicional para conservar un modo flexional, que representa la flexibilidad del chasis y completa la cantidad de 10 GLD de las matrices del subsistema chasis y masas adicionales.

#### 5.1.1 Verificación del modelo simplificado MR vs. modelo de EF

Se comparan en la Tabla 1 las frecuencias propias del sistema obtenidas mediante el programa de EF y la solución al problema de valores propios utilizando las matrices de rigidez y masa ensambladas del modelo simplificado (MR). Los errores en las frecuencias entre ambos modelos son en todos los modos menores al 5%.



Tabla 1: Frecuencias propias de los modelos de EF y MR

Modo	EF (Hz)	MR (Hz)	Descripción
1	3.10	3.11	vertical
2	5.25	5.32	pendular polo cercano al eje trasero
3	5.57	6.02	pendular acoplado con conductor
4	9.61	9.99	pendular acoplado con conductor
5	24.31	24.33	pendular polo cercano al eje del. y acoplado c/ conductor

## 6 CONCLUSIONES

Se construyó un modelo computacional de una motocicleta CUB de 110 cm<sup>3</sup> en condiciones de marcha considerando la presencia de un conductor. El objetivo final de este modelo es realizar estudios asociados a la vida útil del chasis, para lo cual se pretende obtener una descripción abarcativa de las cargas y del estado tensional del chasis generadas por el rodaje en distintas condiciones de terreno y velocidad. Se describen y analizan los diferentes subsistemas con propiedades dinámicas bien diferenciadas en cuanto a proporciones de rigidez, masa y amortiguamiento. Se muestra la conveniencia en la adopción de diferentes modelos para las subestructuras, su origen y distinta necesidad de detalle en la modelación. La consecución de los propósitos generó un análisis en varios aspectos, de los que se concluye que:

- A pesar de la obtención de parámetros por medio de ensayos experimentales, surge la necesidad de ajustes en la determinación de la magnitud y distribución másica de variados componentes del motovehículo, junto con la necesidad de linealización de componentes. Específicamente, se trata de los resortes de suspensión por presencia de bi-linealidad y de los amortiguadores de doble efecto con magnitudes diferentes en tracción y compresión. Adicionalmente presencia de fricción seca en las suspensiones, *stick-slip* y *stiction* (pegado). El tratamiento de estos componentes, junto con la calibración del modelo es motivo de una continuación de este trabajo [12].
- El modelo asiento-conductor posee una importante influencia en la respuesta dinámica por poseer una masa similar al total del vehículo y frecuencias en el rango de frecuencias de la suspensión.
- El problema tensional se puede abordar mediante un proceso de dos etapas, utilizando cálculos previos de la respuesta dinámica en modelos más simples, y utilizando estos resultados para el cálculo de tensiones en modelos en detalle de EF.

## 7 REFERENCIAS

[1] Petrone N., Saraceni M., Cecchetto M., Pegoraro D., *Sviluppo di un banco prova per l'analisi strutturale ed a fatica di telai motociclistici*, XXX° Convegno Nazionale AIAS, Alghero, 407-416, 2001.



- [2] Petrone N., Susmel L., *Biaxial Testing and Analysis of Bicycle-Welded Components for the Definition of a Safety Standard*, Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures, 26, 491-505, 2003.
- [3] Cossalter V., Dorian A., Massaro M., Taraborrelli L., *Experimental and numerical investigation on the motorcycle front frame flexibility and its effect on stability*, Mechanical Systems and Signal Processing, 60-61, 452–471, 2015.
- [4] Kepler V., *Analysis of the Biomechanical Interaction between Rider and Motorcycle by Means of an Active Rider Model*, Bicycle and Motorcycle Dynamics Symposium on the Dynamics and Control of Single Track Vehicles, Delft, The Netherlands, 2010.
- [5] Griffin M. J., *Handbook of Human Vibration*, Academic Press, ISBN 0-12-303040-4, 1990.
- [6] Fairley, T., Griffin M., *A test method for the prediction of seat transmissibility*, Society of Automotive Engineers International Congress and Exposition, Detroit, 24-28, SAE Paper 860047, 1986.
- [7] Patten W., Sha S., Mo C., *A Vibrational Model of Open Celled Polyurethane Foam Automotive Seat Cushions*, Journal of Sound and Vibration, Volume 217, Issue 1, 145-161, ISSN 0022-460X, 1998.
- [8] Cossalter V., *Motorcycle Dynamics*, Second Edition, ISBN: 9781430308614, 2006.
- [9] Foale T., *Motorcycle Handling and Chassis Design, the art and science*, Second edition, ISBN 84-933286-3-4, 2012.
- [10] Craig R., Kurdila A., *Fundamentals of Structural Dynamics*, Second Edition, Wiley & Sons. Inc., ISBN 978-0-471-43044-5, 2006.
- [11] Wijker J., *Mechanical Vibrations in Spacecraft Design*, ISBN 978-3-642-07354-0, Springer Verlag, 2004.
- [12] Stuardi J., Chiappero G., Giudici A., *Estrategias de simulación computacional de motocicleta para análisis estructural*, VIII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica y III Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria, CAIM 2023, Santa Fe, setiembre 2023.



## SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE COJINETES HIDRODINÁMICOS

Jorge Palavecino<sup>1,2</sup>, Matias Borquez<sup>2</sup>, Claudio Merelli<sup>2</sup>, Gustavo Vignolo<sup>2</sup>,  
Federico Cavalieri<sup>1,3</sup> y Santiago Márquez Damián<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>CIMEC CONICET – UNL - Santa Fe, Argentina – [jpala@ing.unp.edu.ar](mailto:jpala@ing.unp.edu.ar).

<sup>2</sup>Laboratorio de Mecánica de Fluidos – Facultad de Ingeniería - UNPSJB  
Ruta Prov. N.º 1, Comodoro Rivadavia, Argentina

<sup>3</sup>Universidad Tecnológica Nacional, FRSF, Santa Fe, Argentina

### RESUMEN

Los cojinetes hidrodinámicos representan elementos de máquinas fundamentales a la hora de estimar la capacidad de carga y las pérdidas por fricción de un eje rotante. El estudio de la cavitación del lubricante en cojinetes debido a la región de bajas presiones que se produce es conocido en la literatura, pero generalmente se recurre a modelos analíticos simplificados con los cuales estimar las prestaciones. Estos modelos parten de la Ecuación de Reynolds, aplicando condiciones de borde que permiten caracterizar localmente la formación de burbujas en una región cavitada pero no así el efecto que esa cavitación produce aguas abajo. En este trabajo se propone un método de solución por volúmenes finitos donde se considera una ecuación de transporte para las burbujas formadas en la región de bajas presiones de forma que permite estudiar su efecto en el dominio del cojinete. Los resultados numéricos se comparan con resultados experimentales disponibles en la bibliografía y obtenidos en un banco de ensayo de cojinetes.

**Palabras clave:** *Cojinetes Hidrodinámicos; Cavitación; Lubricación; Flujo Viscoso*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los cojinetes hidrodinámicos son elementos de máquina con la doble función de permitir el deslizamiento con baja fricción de sus componentes y, simultáneamente, soportar las solicitaciones propias de su funcionamiento. Su campo de aplicación es inmenso. Los cojinetes utilizados en cigüeñales y bielas de un motor deben funcionar durante miles de kilómetros a altas temperaturas y bajo condiciones de carga variables. Se dice que un cojinete utilizado en los apoyos de un rotor en turbinas de vapor posee una confiabilidad cercana al 100% debido a la baja fricción que presenta, lo que evita tiempos de paro por mantenimiento innecesarios [1]. La capacidad portante derivada de la presión en la película fluida puede ser generada por el propio movimiento de los elementos, por presurización externa, por *squeezing*, o por una combinación de estos. En todos los casos, el comportamiento fluidodinámico está gobernado por las leyes del flujo viscoso [2] y se encuentra descripto por la ecuación de Reynolds [3].

La Figura 1 muestra un cojinete hidrodinámico típico con sus referencias geométricas. El cilindro interno (muñón) tiene radio  $r_b$  y rota con velocidad angular  $\omega_b$ . El cilindro externo (carcasa) está fijo y tiene radio  $r_a$ . El huelgo medio  $c$  se determina a partir de la diferencia de los radios. El desplazamiento del cilindro interno respecto a la posición concéntrica se denomina excentricidad  $e$ . La excentricidad relativa  $\varepsilon$  se define como el cociente entre la excentricidad y el huelgo medio, valiendo 0 cuando están perfectamente concéntricos y 1 cuando las superficies se encuentran en contacto. La superficie sólida del muñón y de la carcasa del cojinete conforman un volumen convergente-divergente el cual genera un incremento de la presión hasta alcanzar un pico máximo en inmediaciones del huelgo mínimo.

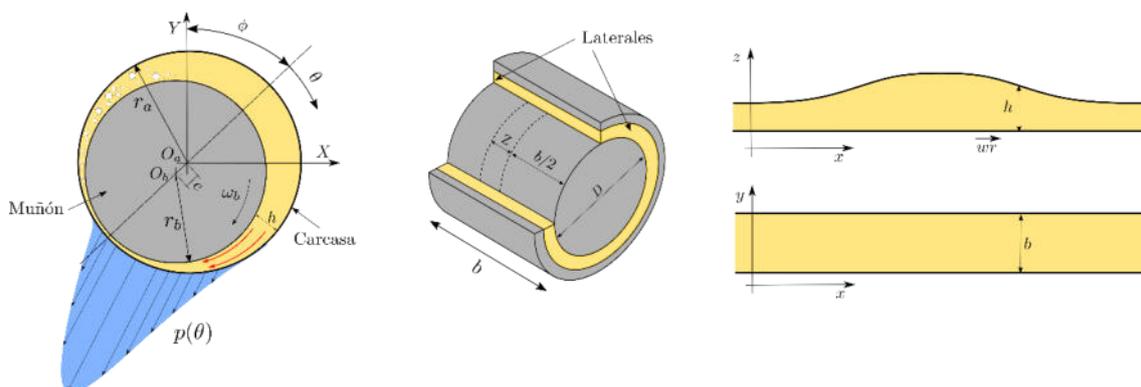


Figura 1: Geometría de un cojinete hidrodinámico.

En la región divergente entre las superficies, se alcanzan valores de presiones negativas muy por debajo de la presión de referencia. Cuando el valor de la presión en el fluido disminuye por debajo de una determinada presión de saturación se produce un fenómeno conocido como *cavitación*. La cavitación consiste en la formación de burbujas de vapor o de gas en el seno del



líquido generando una discontinuidad en la película lubricante. Los efectos de este fenómeno sobre el rendimiento y la estabilidad de los cojinetes a carga constante son bien comprendidos en la literatura e incluyen el desgaste acelerado, presencia de vibraciones o disgregación del material [4]. A pesar de que generalmente se relaciona a la cavitación con un fenómeno perjudicial para el funcionamiento de una máquina, en este caso resulta un factor fundamental para lograr estabilizar la dinámica del cojinete. La *cavitación vaporosa* considera únicamente la presencia de burbujas de vapor y la ausencia de gases disueltos en el lubricante [5] mientras que la *cavitación gaseosa* considera que las burbujas de aire disueltas en el lubricante se aglomeran formando cavidades mayores.

El tratamiento del fenómeno de cavitación puede abordarse a través de dos maneras: aplicando condiciones de borde que afecten a la distribución de presiones obteniendo una expresión analítica o aplicando un modelo de cavitación. Adicionalmente, los avances en cálculos numéricos han permitido aumentar el grado de detalle en el estudio de la cavitación evitando el uso de hipótesis simplificadoras.

Diversos autores han propuesto soluciones y algoritmos capaces de predecir el comportamiento físico de la región cavitada. El modelo más simplificado para considerar este fenómeno es conocido como solución Half-Sommerfeld el cual consiste en realizar directamente un recorte para las presiones por debajo de la presión de saturación (o de desgasado) del lubricante [6]. El modelo Swift-Stieber [7,8], similar al anterior, aplica condiciones de borde a la ecuación de Reynolds para mantener la conservación de materia que el modelo Half-Sommerfeld es incapaz de cumplir [9]. Zuber y Dougherty [10], y posteriormente Natsumeda y Someya [11] propusieron utilizar la ecuación de Rayleigh-Plesset para modelar la cavitación en casos donde exista un lubricante líquido coexistiendo con pequeñas burbujas a partir del estudio de la dinámica de la burbuja. El fenómeno de cambio de fase fue modelado por varios autores en los últimos años como, por ejemplo, los modelos desarrollados por Kunz [12], Merkle [13] y Schnerr-Sauer [14].

En este trabajo se aborda el estudio numérico de cojinetes hidrodinámicos a partir del método de volúmenes finitos aplicado a la ecuación de Reynolds para dos fases considerando cavitación vaporosa o gaseosa a partir del modelo Schnerr-Sauer y utilizando como valores de referencia los publicados en la bibliografía por Jakobsson [15] y por Etsion [16] para cojinetes sumergidos y el análisis de la distribución de presiones circunferenciales y axiales en un cojinete ensayado en el banco de pruebas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos en la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco [17, 18].



## 2. ECUACIONES GOBERNANTES

Dada la presencia de vapor y/o burbujas de aire dentro del lubricante debidas a la cavitación es necesario plantear ecuaciones para el flujo que consideren ambas fases y el intercambio de masa entre ellas. El modelo propuesto considera a la película de lubricante como un medio continuo haciendo uso de todas las hipótesis aplicadas a un flujo con bajo número de Reynolds. La cavitación es considerada como el crecimiento y decrecimiento de una cantidad constante  $n_b$  de burbujas de gas o vapor ya existentes en el lubricante distribuidas homogéneamente en el lubricante [14]. La cantidad de líquido y de vapor (o de gas) se considera a través de las fracciones volumétricas  $\alpha_L$  y  $\alpha_V$  respectivamente. La distribución de la fase líquida se calcula mediante una ecuación de transporte para  $\alpha_L$ . El modelo se plantea como isotérmico e incompresible con lo cual las propiedades de cada fluido son constantes y no es necesario resolver la ecuación de energía [10]. A su vez, se ignoran las deformaciones producidas en el sólido debido a que para los casos presentados resultan insignificantes respecto del huelgo [9].

### 2. 1. Ecuación de Reynolds para flujos bifásicos

Para la resolución del flujo en el cojinete es necesario plantear en primera instancia la conservación de la masa (Ecuación (1)). Para cada una de las fases,  $\rho$  y  $\vec{V}$  son la densidad y el vector velocidad del fluido respectivamente.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_L \rho_L}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\alpha_L \rho_L \vec{v}) = S_{\alpha_L} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha_V \rho_V}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\alpha_V \rho_V \vec{v}) = S_{\alpha_V} = -S_{\alpha_L} \quad (3)$$

El dominio de estudio se trata en coordenadas cartesianas, desenrollando el volumen de fluido tal como se muestra en la Fig. 1. De esta forma, se utiliza  $x$  para la dirección circunferencial,  $y$  para la dirección axial y  $z$  para la dirección radial. Sumando la Ecuación (2) y la Ecuación (3) e integrando las expresiones a lo largo del huelgo en dirección  $z$ , se obtiene la ecuación de Reynolds para flujo bifásico (Ecuación (4)) que se utiliza para describir el campo de presiones  $p$  en el dominio de estudio. En la Ecuación (4),  $U_s$  es la velocidad superficial del eje rotante,  $h(x)$  es la separación entre las superficies,  $\rho_L$  y  $\rho_V$  se corresponden con las densidades del líquido y del vapor respectivamente,  $w_s$  es la velocidad radial del muñón respecto de la carcasa y  $S_{\alpha_L}$  es el término de transferencia de masa entre ambas fases.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\frac{h(x)^3}{12\mu_m} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{U_s}{2} h \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\frac{h(x)^3}{12\mu_m} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{U_s}{2} h \right\} = S_{\alpha_L} \left( \frac{1}{\rho_L} - \frac{1}{\rho_V} \right) h - w_s \quad (4)$$



La viscosidad de la mezcla  $\mu_m$  se determina considerando:

$$\mu_m = \alpha_L \mu_L + (1 - \alpha_L) \mu_V \quad (5)$$

La ecuación obtenida en términos de derivadas parciales respecto de la dirección circunferencial ( $x$ ) y la dirección axial ( $y$ ), habiendo integrado en la dirección radial ( $z$ ) da lugar a un modelo bidimensional que considera la tercera dimensión a través del espesor del huelgo  $h(x)$ . De igual manera, al integrar la ecuación de transporte de la cantidad  $\alpha_L$  (Ecuación (2)) a lo largo del huelgo se obtiene:

$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + \vec{v}_{xy} \cdot (\alpha_L \vec{v}_{xy}) + \alpha_L w_s = S_{\alpha_L} \quad (6)$$

En la Ecuación (6) el segundo término corresponde con los flujos calculados en el lado izquierdo de la ecuación (4). El modelo bifásico presentado posee similitudes con el modelo propuesto anteriormente por Zuber y Dougherty [10] pero con la diferencia de considerar una ecuación de transporte para la fracción de lubricante y de que el modelo anterior estaba centrado en un flujo compresible con una pequeña cantidad de líquido.

## 2. 2. Término fuente

Como se indicó previamente la fase dispersa está compuesta por burbujas existentes para las cuales es necesario definir un modelo para su dinámica a partir del cual sea posible caracterizar el cambio de fase y su término fuente/sumidero asociado. Se plantea entonces el uso de la ecuación de Rayleigh-Plesset. (Ecuación (7)) donde se considera que las burbujas son esferas perfectas de radio  $R$  [19]. En esta expresión, los términos del lado izquierdo se corresponden con los términos inerciales. El primer término del lado derecho corresponde al comportamiento viscoso de la burbuja siendo  $\rho_L$  la densidad del líquido,  $\mu_L$  la viscosidad del líquido y  $\kappa_s$  la viscosidad superficial dilatacional [20]. El segundo término está referido a la tensión superficial de la burbuja  $\sigma_s$ , y finalmente, el último término se corresponde con la diferencia de presiones entre el interior de la burbuja  $p_b$  y el líquido en el que se encuentra  $p_\infty$ .

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = -\frac{4}{\rho_L R} \left( \mu_L + \frac{\kappa_s}{R} \right) \dot{R} - \frac{2\sigma_s}{\rho_L R} + \frac{p_b - p_\infty}{\rho_L} \quad (7)$$

El modelo de transferencia de masa entre las fases líquido y vapor  $S_{\alpha_L}$  queda determinado a partir del modelo Schnerr-Sauer [14] donde se considera el crecimiento y decrecimiento de las burbujas de vapor a partir de micronúcleos de cavitación ya formados.

Para este modelo, la presión en el interior de la burbuja se considera constante e igual a la presión de vapor del lubricante  $p_b = p_v$  y, se desprecia totalmente la presencia de gases no condensables.



El modelo Schnerr-Sauer queda definido entonces como:

$$\dot{R} = \sqrt{\frac{2 p_b - p_\infty}{3 \rho_L}} \quad (8)$$

$$S_{\alpha_L} = \frac{\rho_L \rho_V}{\rho_m} \alpha_L (1 - \alpha_L) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2 p_b - p_\infty}{3 \rho_L}} \quad (9)$$

### 2. 3. Método numérico

El modelo propuesto se resuelve utilizando una discretización por el método de volúmenes finitos [21], utilizando esquemas de alta resolución (MinMod) para resolución de la ecuación de transporte de la fracción de líquido [22] y el método de separación de Strang [23, 24] para el tratamiento de la discretización temporal. Este algoritmo presenta convergencia global de segundo orden.

### 3. RESULTADOS

La validación de los resultados numéricos se realiza sobre la base de resultados experimentales. En primer lugar, se utilizan los resultados publicados por Jakobson [15] para un cojinete sumergido con condiciones de cavitación vaporosa y cavitación gaseosa. Luego se utilizan los valores publicados por Etsion [16] para un cojinete igualmente sumergido en el cual se reportan los ángulos de inicio y fin de la región de cavitación. Finalmente se compara el modelo con la distribución de presiones obtenida en un cojinete ensayado en el banco de pruebas que dispone el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la UNPSJB.

Los dos casos experimentales publicados por Jakobsson se detallan en la Tabla 1. Para ambos casos el cojinete utilizado tiene un radio de muñón de  $r_b$  de 50 mm, un huelgo medio  $c$  de 0.1455 mm, una excentricidad relativa  $\varepsilon$  de 0.6. Dentro del sistema el flujo es laminar con un número de Reynolds de 23. El caso 1, se corresponde con un lubricante con una baja presión de saturación lo que correspondería con un caso de cavitación vaporosa, donde las presiones se corresponden con la de vaporización del líquido. En el caso 2, se produce la ruptura de la película de fluido con presiones más cercanas a la presión de referencia. Este caso está asociado a una presión de expulsión de los gases disueltos en el interior del fluido, lo que se corresponde con un caso de cavitación gaseosa.

El algoritmo propuesto se utiliza en todos los casos con una malla de 256 elementos en la dirección circunferencial y 64 en la dirección axial con un paso de tiempo  $\Delta t$  de  $1 \times 10^{-5}$ . Para el modelo Schnerr-Sauer se utilizan como parámetros una cantidad de burbujas inicial  $n_{b_i}$  de



$1 \times 10^8$ , un radio de microburbuja  $R_b$  de  $1 \times 10^{-6}$ . Las condiciones de borde utilizadas para el cojinete sumergido en un baño de aceite se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Condiciones de funcionamiento de los casos publicados por Jakobson.

	$L/D$	$L$ [mm]	$c$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\mu_L$ [Pa s]	$\omega_b$ [1/s]	$P_{sat}$ [kPa]
<b>Jakobson 1</b>	1.33	133	145.5	0.0127	48.1	20
<b>Jakobson 2</b>	1	100	145.5	0.0153	48.6	90

Tabla 2. Condiciones de borde utilizadas.

	Velocidad	Presión	$\alpha$
<b>Muñón</b>	$U_s = \omega_b r_b$	$\vec{\nabla} p \cdot \vec{n} = 0$	$\vec{\nabla} \alpha \cdot \vec{n} = 0$
<b>Carcasa</b>	0	$\vec{\nabla} p \cdot \vec{n} = 0$	$\vec{\nabla} \alpha \cdot \vec{n} = 0$
<b>Laterales</b>	$\vec{\nabla} u \cdot \vec{n} = 0$	100 kPa	$\vec{\nabla} \alpha \cdot \vec{n} = 0$

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2. Los resultados experimentales reportados por Jakobsson se miden a una distancia  $Z = 0.1 L$  y  $Z = 0.3 L$  desde la mitad de la longitud axial del cojinete. Puede observarse que el modelo de cavitación logra captar muy bien los puntos de ingreso y de salida de la región de cavitación para los dos casos propuestos y en las diferentes posiciones axiales. Respecto de las fracciones de vapor, no se encuentran datos experimentales contra los que validar el modelo.

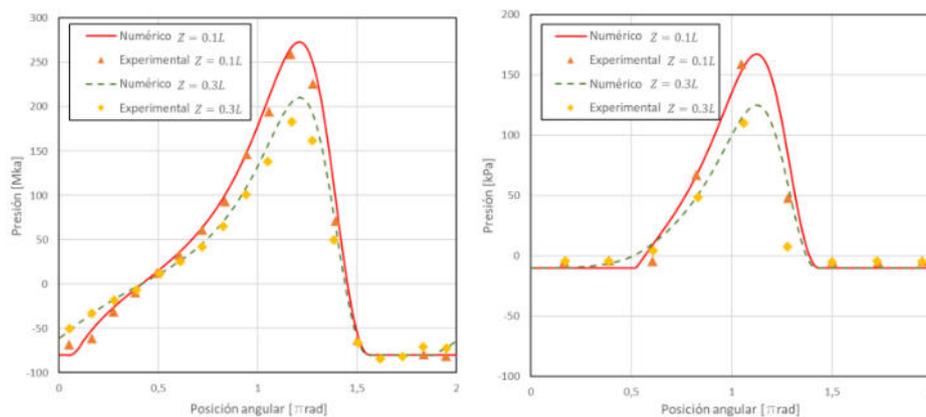


Figura 2: Resultados para el caso 1 (izq.) y caso 2 (der.).

Como segunda instancia para la validación de la región de cavitación se utilizan los resultados experimentales publicados por Etsion [16] donde estudia la influencia de la presión de referencia en el comportamiento de la región de cavitación. Los parámetros del cojinete que se estudia consisten en un radio  $R_b$  de 25.4 mm, una longitud axial de 38.1 mm y una viscosidad



de 0.026 Pa s. La excentricidad a la que se realizan los ensayos es de  $\varepsilon = 0.4$ . En la Tabla 3 se muestra la comparación de ángulos de inicio y fin de la región de cavitación reportados por Etsion y los resultados obtenidos por el modelo propuesto para tres de los casos de estudio con diferentes presiones de referencia  $p_s$  y velocidades de rotación. En la Figura 3 se muestran las regiones de cavitación obtenidas con el modelo propuesto en el dominio y una fotografía de la región de cavitación obtenida del cojinete durante el ensayo experimental. En la figura de la izquierda, se muestra en gama de colores los resultados obtenidos numéricamente de la fracción de lubricante líquido presente. En líneas de trazo se muestra la posición angular de inicio y fin de la región de cavitación y la posición de referencia ( $\theta = 0$ ). A la derecha se muestra la fotografía obtenida por Etsion de la región de cavitación. Los resultados de las posiciones de inicio y fin de la región de cavitación los 3 casos propuestos se encuentran en muy buen acuerdo con los reportados en la bibliografía.

Tabla 2. Condiciones de borde utilizadas.

	$P_s$ [kPa]	RPM	$\theta_i$ [°] (Etsion [24])	$\theta_f$ [°] (Etsion [24])	$\theta_i$ [°] (Modelo SS)	$\theta_f$ [°] (Modelo SS)
<b>Caso A</b>	113.6	1840	200	75	207	55
<b>Caso B</b>	140.8	1840	210	15	216	10
<b>Caso C</b>	113.6	3000	200	75	198	72

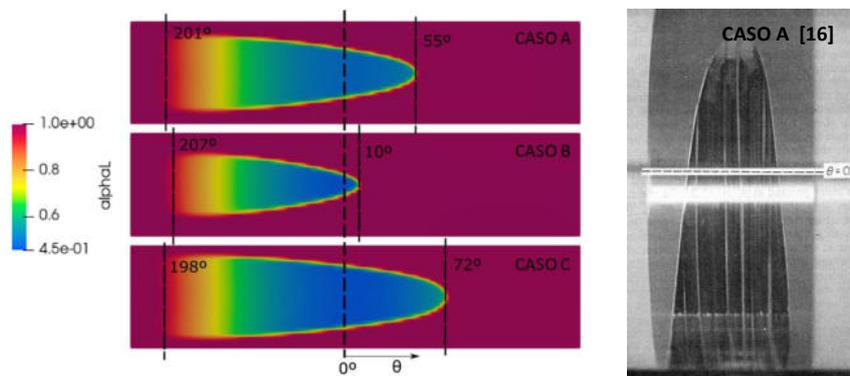


Figura 3: Distribución de la fracción de líquido para los casos A, B y C (izq.). Fotografía tomada de la región de cavitación (der.).

Como último caso, en la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos de forma numérica y experimental en dirección circunferencial y axial para un cojinete con diámetro de 50 mm, un huelgo medio de 68.9  $\mu\text{m}$ , un largo de 12.5 mm, una viscosidad de 0.082 Pa s. El estudio se realiza con una carga externa aplicada de 632 N y una velocidad de rotación de 2000 RPM. Se comparan los resultados obtenidos con la distribución de presiones teórica de Ocvirk. Se

muestra un excelente acuerdo del modelo propuesto con el comportamiento del cojinete corto en ambas direcciones. Debido a la falta de instrumental del banco de pruebas, no se realizan mediciones de presiones por debajo de la presión atmosférica. La excentricidad relativa de equilibrio obtenida por el modelo numérico corresponde a 0.758.

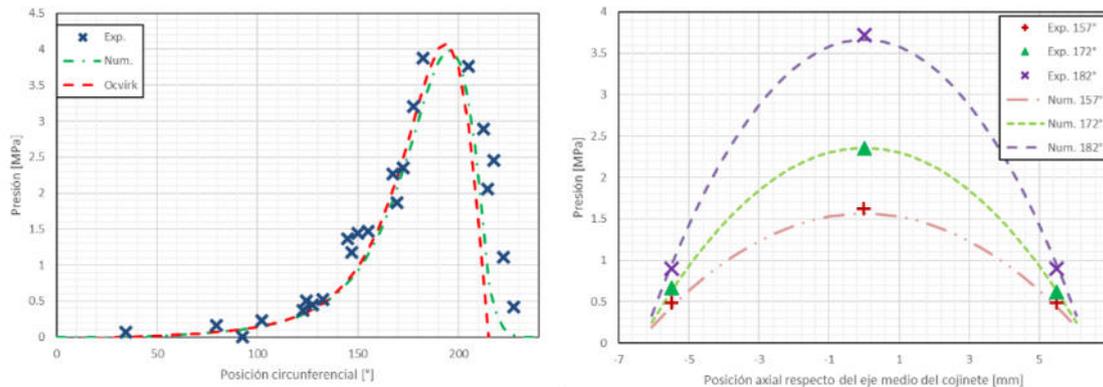


Figura 4: Distribución de presiones en dirección circunferencial (izq.) y axial (der.).

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la viabilidad de utilizar el modelo a dos fases integrado de la Ecuación de Reynolds para analizar el fenómeno de cavitación en cojinetes hidrodinámicos y se compararon los resultados con datos experimentales disponibles en la bibliografía. El modelo de cavitación utilizado en este caso corresponde con el modelo Schnerr-Sauer con el objetivo de evaluar la respuesta de este método ante cambios de parámetros físicos y de la geometría de los problemas a resolver. Los buenos resultados obtenidos en cuanto a la determinación del punto de inicio y fin de la cavitación nos permiten afrontar problemas de mayor complejidad y proponernos como trabajo futuro la posibilidad de obtener nuestras propias mediciones de cavitación en el banco de pruebas de cojinete que tenemos a disposición.

#### REFERENCIAS

- [1] R.G. Budynas and J.K. Nisbett. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. McGraw-Hill, 2012
- [2] G.G. Vignolo. Estudio teórico-experimental de cojinetes hidrodinámicos en condiciones reales de uso. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, 2016



- [3] O. Reynolds. On the theory of lubrication and its application to mr. beachuamp tower's experiments including an experimental determination of the viscosity of olive oil. Philos. Trans. R. Soc. A., 177:157,1886.
- [4] L. San Andrés. Liquid cavitation in fluid film bearings. Class notes on Modern Lubrication. College Station (TX): Texas A&M University, 2009.
- [5] B. O. Jacobson and B. J. Hamrock. High-speed motion picture camera experiments of cavitation in dynamically loaded journal bearings. Journal of Lubrication Technology, 105(3):446–452, 07 1983.
- [6] B.J. Hamrock. Fundamentals of fluid film lubrication. McGraw-Hill, 1994.
- [7] H.W. Swift. The stability of lubricating films in journal bearings. Proc. Inst. Civil. Engrns, 233:267–288, 1932.
- [8] W. Stieber. Das Schwimmmlager: Hydrodynamische Theorie des Gleitlagers. VDI-Verlag, 1933.
- [9] A. Szeri. Fluid film lubrication, 2nd edition. Cambridge University Press, 2011.
- [10] N. Zuber and D. E. Dougherty. The field equations for two-phase reynolds film flow with a change of phase. A S L E Transactions, 25(1):108–116, 1982
- [11] S. Natsumeda and T. Someya. Paper iii(ii) negative pressures in statically and dynamically loaded journal bearings. 11:65–72, 1987.
- [12] R.F. Kunz, D.A. Boger, D.R. Stinebring, Chyczewski T.S., J.W. Lindau, H.J. Gibeling, S. Venkateswaran, and T.R. Govindan. A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction. Computers & Fluids, 29:849–875, 2000.
- [13] C. Merkle, J. Feng, and P. Buelow. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation. Third International Symposium on Cavitation, 1998.
- [14] J. Sauer and G. Schnerr. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics. 4th International Conference on Multiphase Flow, 2001
- [15] B. Jakobsson. A survey of swedish lubrication research 1957–69 at chalmers and lund technical universities. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings, 183(16):164–171, 1968.
- [16] I. Etsion and L.P. Ludwig. Observation of pressure variation in the cavitation region of submerged journal bearings. Journal of Lubrication Technology - ASME, 104:157–163, 1982.



- [17] G. Vignolo, Estudio teórico-experimental de cojinetes hidrodinámicos en condiciones reales de uso, Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, 2016
- [18] C. Merelli, Cojinetes hidrodinámicos en condiciones reales de uso: estudio teórico y validación experimental, Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, 2020
- [19] C.E. Brennen. Cavitation and Bubble Dynamics. Cambridge University Press, 2013
- [20] T. Snyder, M. Braun, and K. Pierson. Two-way coupled reynolds, rayleigh-plesset-scruen and energy equations for fully transient cavitation and heat transfer modeling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 174:012030, 02 2017
- [21] H. Jasak. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows. Direct, M, 01 1996.
- [22] F. Moukalled, Luca Mangani, Marwan Darwish, F Moukalled, L Mangani, and M Darwish. The finite volume method. Springer, 2016.
- [23] G. Strang. On the construction and comparison of difference schemes. SIAM journal on numerical analysis, 5(3):506–517, 1968.
- [24] R. J. LeVeque. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press, 2002



## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ARQUITECTURA DE COMPUTACIÓN EN LA NUBE PARA LA EVALUACIÓN PARALELA DE MODELOS DINÁMICOS NO LINEALES

Andrés E. Ajras<sup>1</sup>, Damián F. Campos<sup>1</sup> y Marcelo T. Piovan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dpto. Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue  
Buenos Aires 1400 Neuquén – Prov. del Neuquén - Argentina  
correo-e: andres.ajras@fain.uncoma.edu.ar  
damian.campos@fain.uncoma.edu.ar

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones de Mecánica Teórica y Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional  
FRBB y CONICET. 11 de Abril 461, Bahía Blanca. Argentina.  
correo-e: mpiovan@frbb.utn.edu.ar

### RESUMEN

Este trabajo se centra en resolver el problema de la evaluación de modelos computacionales complejos, como los utilizados para modelar sistemas dinámicos no lineales, donde se requiere llevar a cabo un gran número de evaluaciones con diferentes condiciones de entrada. La evaluación secuencial o en paralelo mediante clústeres de computación o supercomputadoras puede llevar a retrasos significativos y altos costos iniciales, lo que dificulta la aplicación de procesos iterativos y la realización de eventuales ajustes sobre el modelo.

Para superar estas barreras, se propone una solución basada en la nube, utilizando un proveedor de computación bajo demanda. Además, se detalla el uso del *software* libre Code Aster y el empleo de contenedores tipo Docker en casos de estudio relacionados con el comportamiento dinámico de cables conductores eléctricos. Al ejecutar varios contenedores en paralelo en la nube, es posible reducir sensiblemente el tiempo de espera requerido para obtener resultados.

Complementariamente, se realiza un estudio comparativo de los costos de la computación bajo demanda con otras opciones, como la adquisición de servidores físicos propios, y se evalúa el tiempo de ejecución en estas configuraciones. Esta arquitectura de cómputo en la nube ofrece una solución más eficiente y rentable para la evaluación de modelos de alto costo computacional si se complementa con diversas técnicas de optimización.

**Palabras clave:** *Computación en la Nube*; Calibración Bayesiana; Problema Inverso; Propagación de Incertidumbre.



## 1. INTRODUCCIÓN

El rápido avance de la tecnología ha provocado un aumento de la demanda de potencia y recursos computacionales en diversos campos, en particular en los campos de investigación en ingeniería. Los enfoques tradicionales que implican soluciones de *hardware* dedicadas se han utilizado ampliamente para realizar tareas computacionalmente intensivas. Sin embargo, estas soluciones presentan varios retos, como largos tiempos de espera para cálculos paralelizables, grandes inversiones iniciales y una capacidad de cálculo limitada que sólo aumenta de forma escalonada con la adquisición de nuevos equipos. Estas limitaciones pueden obstaculizar el progreso de la investigación y el desarrollo en muchos ámbitos, especialmente cuando se trata de modelos de alto costo computacional, como procesos de cuantificación y propagación de incertidumbre.

Para hacer frente a estos desafíos, en particular cuando no se dispone de una infraestructura de computación de alto rendimiento (HPC), se requiere contar con una infraestructura escalable que pueda proporcionar recursos informáticos bajo demanda sin comprometer importantes costos de inversión inicial. Una infraestructura de este tipo debe ser capaz de obtener resultados rápidamente, con el objetivo de poder iterar fácilmente distintos modelos o solucionar inconvenientes, permitiendo a los investigadores e ingenieros afrontar las eventuales limitaciones con respecto a la capacidad computacional requerida en el proceso de investigación y desarrollo. La computación en la nube ha surgido como una solución prometedora para satisfacer estos requisitos, ya que ofrece recursos informáticos flexibles y escalables que pueden ser aprovisionados y retirados según sea necesario.

Este trabajo se centra en el uso de la infraestructura informática escalable basada en la nube para modelos de alto costo computacional, con aplicación en un caso de inversión Bayesiana de un Modelo de Elementos Finitos (MEF) no lineal. En primer término, se presentará una plataforma de contenedores que permite la creación de entornos informáticos escalables y robustos. A continuación, se presenta la implementación de esta tecnología con un servicio de computación en la nube, que proporciona recursos informáticos escalables para cargas de trabajo paralelas a gran escala. Finalmente se presenta la aplicación y la evaluación de la arquitectura propuesta en un caso de estudio referido a la evaluación del comportamiento dinámico de un amortiguador tipo Stockbridge, que se instala comúnmente en líneas aéreas de transmisión eléctrica.

## 2. INFRAESTRUCUTURA COMPUTACIONAL

Los contenedores Docker sirven como unidades estandarizadas para empaquetar *software*, agilizando los procesos de desarrollo, envío y despliegue [1]. Cada contenedor encapsula el código y todas sus dependencias, garantizando que las aplicaciones puedan ejecutarse de forma



rápida y fiable en diversos entornos informáticos. Una imagen de contenedor Docker es un paquete de *software* ligero, autocontenido y ejecutable (denominado DockerFile) que comprende todo lo necesario para ejecutar una aplicación, incluido el código, el tiempo de ejecución, las herramientas y bibliotecas del sistema, y su configuración. Compatible con aplicaciones basadas tanto en Linux como en Windows, el *software* en contenedores se ejecuta sistemáticamente según lo previsto, independientemente de la infraestructura subyacente. Al aislar el *software* de su entorno, los contenedores garantizan una funcionalidad robusta.

La tecnología Docker ofrece numerosas ventajas para la investigación, Resolviendo problemáticas a las que se enfrentan los investigadores y desarrolladores que trabajan con sistemas de *software* complejos, con diversas dependencias y requerimientos. Al garantizar que las dependencias y bibliotecas se instalan y aíslan correctamente, Docker reduce el riesgo de conflictos y desajustes de versiones, que a menudo pueden obstaculizar el progreso de los proyectos de investigación y desarrollo, en particular cuando se trabaja con *software legacy*. Este aislamiento también permite almacenar *software* heredado con bibliotecas obsoletas y sistemas operativos antiguos, preservando la funcionalidad crítica y los datos históricos. Además, Docker proporciona una solución robusta y escalable que permite la integración y colaboración sin errores entre los diferentes componentes de una aplicación o arquitectura de microservicios, promoviendo la modularidad y la flexibilidad en el diseño y despliegue de aplicaciones. La eficiencia de recursos de los contenedores Docker, que comparten los servicios de un único núcleo de sistema operativo, maximiza el potencial de los recursos informáticos disponibles, lo que se traduce en un menor consumo de recursos y un mayor rendimiento. En general, las capacidades únicas de Docker contribuyen a un entorno informático de ingeniería e investigación más racionalizado y eficiente.

Con el fin de ejecutar el *software* en los contenedores Docker es necesario seleccionar un proveedor de servicios bajo demanda en la nube, en este trabajo se optó por los servicios de Amazon Web Services (AWS) [2]. Este proveedor ofrece una solución de computación en la nube diseñada para gestionar cargas de trabajo paralelas a gran escala (AWS Batch). Este servicio agiliza el proceso de ejecución de trabajos de informática por lotes mediante el aprovisionamiento y la administración dinámica de los recursos informáticos adecuados en función de los requisitos del trabajo. Al integrar Docker con AWS Batch, es posible ejecutar los contenedores en un entorno escalable en la nube. Las imágenes de los contenedores, encargadas de encapsular el código y las dependencias de la aplicación, se utilizan como estructura base para ejecutar trabajos en los servidores en la nube. La Figura 1 ilustra un esquema de infraestructura de aplicaciones en la nube en el que un servidor (EC2 *server*) envía instrucciones a través del SDK de Amazon para iniciar instancias de AWS Batch. Cada instancia tiene variables de entorno diferentes con parámetros específicos para cada simulación, Los resultados se recopilan en el

almacenamiento de S3 (Servicio de AWS) y luego son postprocesados por un equipo cliente, el cuál descarga los resultados y mediante rutinas desarrolladas *ad hoc* procesa los mismos.

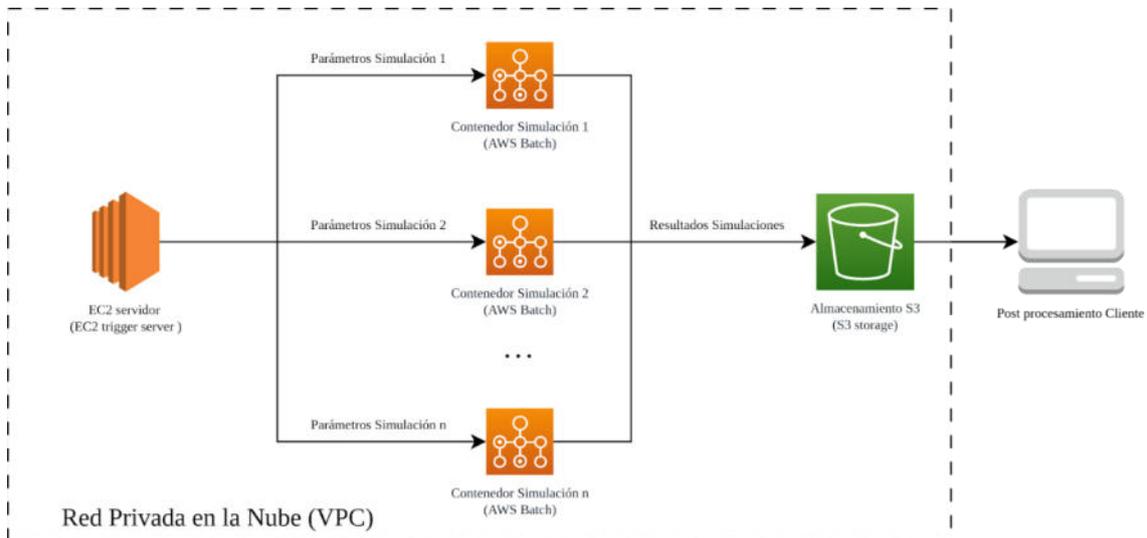


Figura 1: Arquitectura Computacional en la Nube AWS.

### 3. CASO DE ESTUDIO

Los amortiguadores tipo Stockbridge, introducidos en la década de 1920, son los más utilizados en el control de vibraciones eólicas en líneas aéreas de transmisión eléctrica. Este absorbedor dinámico comprende un cable portador con una masa en cada extremo y una grapa atornillada que puede fijarse a un conductor o un hilo de guardia, con el propósito de complementar la energía disipada por el cable relacionada con su autoamortiguamiento (ver Figura 2).



Figura 2: Detalle de una instalación típica de amortiguadores tipo Stockbridge.



La máxima respuesta de este tipo de absorbedores está asociada con las frecuencias de sus distintos modos de oscilación. Las masas se diseñan de tal forma de obtener momentos de inercia y ubicación de su centro de gravedad tales que, con la vibración de la grapa, se exciten sus diversos modos característicos de flexión y torsión. En la bibliografía específica se pueden encontrar formulaciones basadas en el modelo de viga de Euler-Bernoulli que tienen como objetivo alcanzar modelaciones más realistas de las propiedades modales del amortiguador [3].

La rigidez flexional ( $EI$ ) de los cables mensajeros es un parámetro importante en el estudio de la respuesta dinámica. Se han desarrollado diversos modelos que contemplan la variación no lineal de este parámetro con respecto a la curvatura ( $\kappa$ ), los cuales se basan en un modelo del tipo *stick-slip* [4]. La rigidez flexional varía entre dos valores: uno conocido como  $EI_{min}$  donde se produce un deslizamiento total entre los hilos y se contempla únicamente la resistencia a la flexión de los hilos respecto a su propio eje neutro, y el  $EI_{max}$  donde todos los hilos se adhieren como un cuerpo sólido. El momento a la flexión puede aproximarse mediante la ecuación (1), donde la rigidez a la flexión depende de la zona del régimen *stick-slip*, según se indica en las ecuaciones (2) y (3). Como se mencionó precedentemente, la rigidez a la flexión de cada elemento en un tiempo dado depende de la curvatura.

$$M_f \approx EI\kappa \quad (1)$$

$$EI_{max} = EI_{min} + EI_{stick} \quad (2)$$

$$EI = EI_{min} + EI_{slip} = fnc(\kappa) \quad (3)$$

Bajo una carga cíclica, como la que experimentan las líneas de transmisión eléctrica por la acción del viento, se observa un comportamiento histerético responsable de la disipación de energía del sistema. En un trabajo anterior se desarrolló un MEF bidimensional, que contempla la no linealidad intrínseca del cable mensajero, con el objetivo de evaluar el comportamiento dinámico del amortiguador para todas las frecuencias de excitación y amplitudes de desplazamiento [5]. Para modelar el cable mensajero del amortiguador, en este caso de estudio, se superponen diversos niveles de vigas en cada subdivisión de la malla. La primera viga tiene un comportamiento elástico, mientras que las siguientes tienen un comportamiento elastoplástico ideal. Los parámetros (rigidez a la flexión y momentos límites) de cada viga, producen el comportamiento no lineal que proporciona la rigidez y amortiguamiento adecuados al sistema.

La implementación del modelo propuesto se realizó en el *software* libre Code Aster [6]. El modelo emplea como método de resolución el esquema Newmark-beta para la integración directa en el tiempo [7]. La instalación del *software* se realiza mediante el uso de un contenedor Docker, dado que se identificaron problemas de compatibilidad entre las versiones estables 11 y 13.6, relacionados principalmente con cambios en la sintaxis que hacen que las rutinas escritas en versiones anteriores no puedan correr en las versiones actuales. Asimismo, la imagen es creada



a partir de la compilación del repositorio de control de versiones mercurial de EDF (Électricité de France) en la versión requerida, utilizando como sistema operativo base Ubuntu 10.04 LTS 64 bit. Además, el *software* requiere una serie de dependencias que necesitan sistemas operativos específicos. En particular, la versión 11 de Code Aster, en la cual fue desarrollado el código, no puede ser instalada en sistemas operativos más recientes y exige una versión específica de Python (Python  $\geq 2.6$  y  $< 3.0$ ).

Con el fin de estudiar la naturaleza estocástica de los parámetros del fenómeno que explican la no linealidad del modelo, se justifica la aplicación de técnicas de inversión Bayesiana para estimar los parámetros no medibles directamente, como la rigidez y los momentos a flexión de cada uno de los hilos que conforman el cable. A tal fin, se planteó un problema de calibración del modelo en el que las distribuciones de probabilidad de los parámetros de interés se obtienen a partir de la propagación de incertidumbre hacia atrás de las mediciones experimentales realizadas en ensayos de laboratorio normalizados [8].

La técnica de los problemas inversos se aplica cuando existen parámetros desconocidos en un modelo computacional, los cuales no se pueden medir directamente [9]. Estos problemas se componen de un modelo de cálculo hacia adelante  $M$ , un conjunto de parámetros de entrada a inferir ( $x \in D_x$ ) y un conjunto de datos experimentales ( $y \in \mathbb{R}^N$ ), donde  $N$  es el número de mediciones independientes [15].

$$y = M(x) + \epsilon \quad (1)$$

En efecto, el modelo ( $M \rightarrow x$ ) es la representación matemática del sistema. El término  $\epsilon$ , escribe la discrepancia entre una observación experimental y la predicción del modelo. En la calibración bayesiana se actualiza iterativamente una distribución a priori de un parámetro del modelo con una función de probabilidad y los datos experimentales. En este caso, las variables estocásticas del modelo son la rigidez a la flexión de las capas externas ( $\mu$ ) y el núcleo del cable mensajero ( $\delta$ ) y los momentos límites de las capas superiores del mismo ( $\lambda$ ). Asimismo, la excentricidad de la masa ( $\epsilon$ ) es también considerada de naturaleza estocástica.

En base a lo explicitado anteriormente, se usa el Principio de Máxima Entropía, debido a que el mismo permite la construcción de las funciones de densidad de probabilidad (PDF) de las variables aleatorias garantizando la consistencia, con la información disponible, y la física del problema. Todas las variables se consideraron a priori uniformes [10].

En este trabajo, se implementó el procedimiento detallado en el esquema de la Figura 3. Los datos experimentales se utilizan para propagar la información hacia atrás con el objetivo de estimar las entradas del modelo. Para la calibración de este, se propuso un problema de inversión



bayesiano, utilizando una simulación de Markov Chain Monte Carlo (MCMC), donde se aplicó el algoritmo Metropolis-Hastings a través de su implementación en el software UQLab [11].

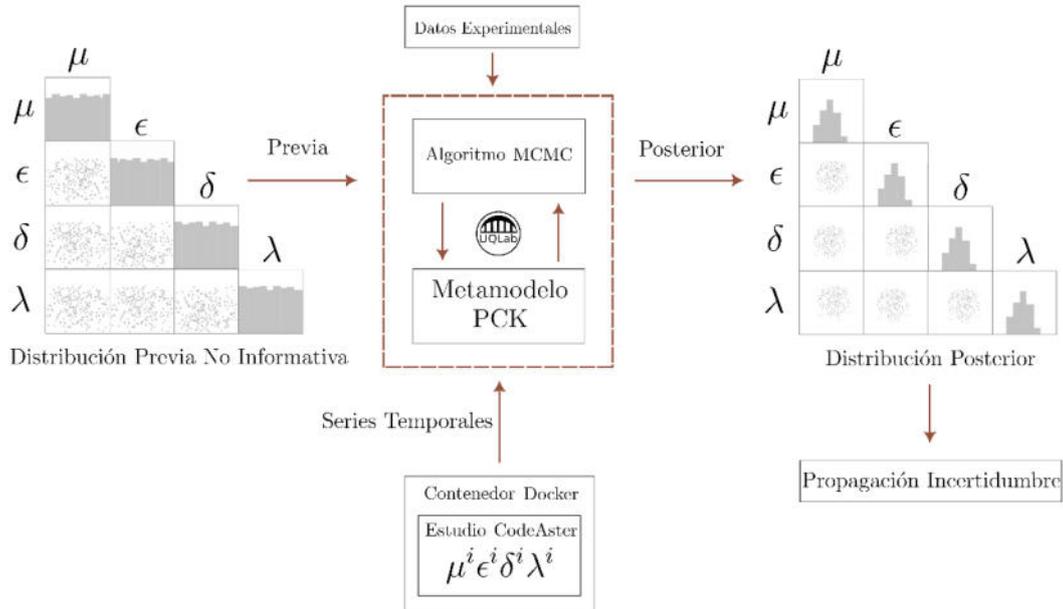


Figura 3: Procedimiento computacional propuesto basado en Code Aster y UQLab.

El proceso descrito requiere un gran número de iteraciones del modelo determinístico para diferentes valores de los parámetros de entrada. Con el objetivo de disminuir el costo computacional asociado a este proceso se consideró necesaria la implementación de un metamodelo para evaluar el comportamiento dinámico del amortiguador. En la literatura de referencia, existe una gran variedad de metamodelos, tales como las superficies de respuesta, los modelos Kriging, las funciones de base radial o las redes neuronales [12]. En particular, los modelos Kriging han alcanzado una gran popularidad en los últimos años gracias a su gran flexibilidad para aproximar respuestas con alto grado de no linealidad proporcionando información estadística del error cometido en la predicción. La característica de Kriging es interpolar las variaciones locales de la salida del modelo computacional en función de los puntos de diseño experimentales vecinos. En cambio, las expansiones polinómicas del caos (PCE) se utilizan para aproximar el comportamiento global de  $M$  utilizando un conjunto de polinomios ortogonales. Combinando las dos técnicas se pretende capturar el comportamiento global del modelo computacional con el conjunto de polinomios ortogonales en la tendencia de un modelo universal de Kriging y la variabilidad local con el proceso gaussiano ( $\sigma^2$ ). Este enfoque denominado Polynomial-Chaos-Kriging (PCK) [13], fue adoptado en este trabajo. Al momento de su implementación con el fin de conectar el software UQLab con las rutinas de CodeAster, se utilizó para el post-procesamiento una serie de archivos de resultados en formato .csv (*comma-separated values/Valores separados por coma*) con el fin de poder generar de forma "offline" el

metamodelo, realizando anteriormente las corridas del modelo de elementos finitos sin necesidad de ejecutarlas secuencialmente.

En la Figura 4 se presentan las distribuciones posteriores de los parámetros del modelo obtenidas a través del proceso de inversión Bayesiana. A partir de estos puntos se realiza la propagación de incertidumbre en el modelo numérico en cada una de las frecuencias de interés.

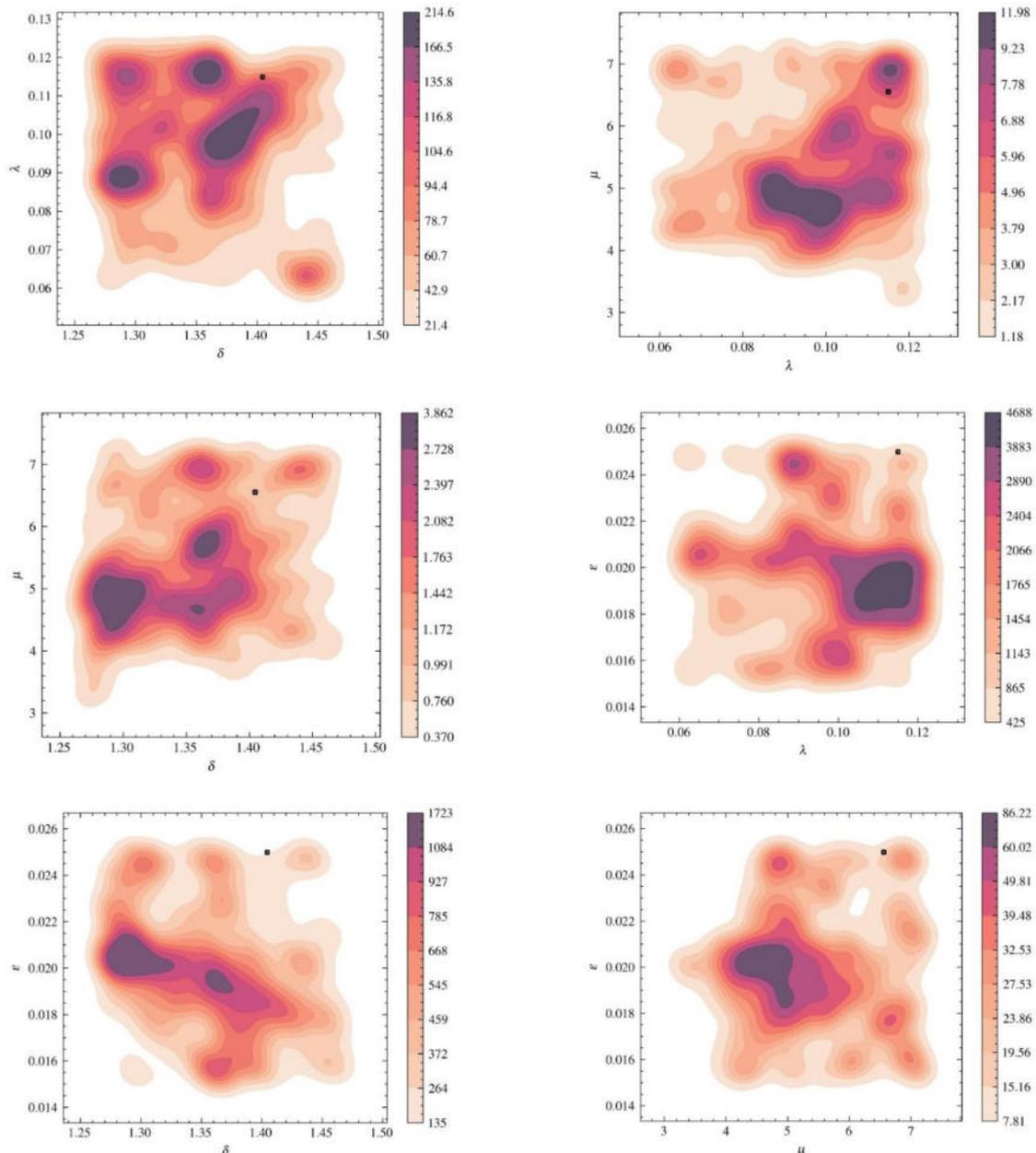


Figura 4: Distribuciones posteriores de los parámetros de interés.



### 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En primer término, se debe mencionar que la implementación del metamodelo PCK fue realizado a partir de 81 evaluaciones del modelo de elementos finitos determinístico en 32 frecuencias de interés (5 a 37 Hz). Dado que la respuesta del modelo numérico proporciona un gran número de variables de salida que varían en el tiempo, el metamodelo intenta reproducir el comportamiento dinámico del amortiguador a partir de un número reducido de parámetros de salida como ser los valores de impedancia mecánica en correspondencia con las frecuencias de resonancia del modelo, el valor de estas, y el gradiente de impedancia en torno a estas frecuencias de interés.

Para evaluar las diferentes soluciones disponibles, se realizó una comparación entre AWS Batch, una computadora Workstation (CPU: Intel Core i5-8600K 3.6 GHz 6-Core, RAM: 32 GB DDR4) y un servidor ThinkPad SR630 (CPU: 2x Intel Xeon Gold 5218 2.3GHz, RAM: 64 GB RDIMM). Cabe destacar que el número de simulaciones paralelas es una estimación basada en los requerimientos de cálculo específicos.

En la Tabla 1, se contrastan las distintas opciones con la solución seleccionada en la nube. Por otro lado, al evaluar los costos de los servidores físicos, es importante tener en cuenta que no se incluyen gastos asociados al almacenamiento, montaje, mantenimiento, suministro eléctrico y conectividad, estos costos adicionales ya se encuentran contemplados en el precio de AWS Batch.

Tabla 1. Comparación entre servidores físicos y la solución en la nube.

Parámetro	AWS Batch	Workstation	Server SR630
CPU (núcleos)	2	6	32
RAM (GB)	4	32	64
Simulaciones paralelas	5.184	3	16
Tiempo de ejecución total	3 h	216 d	40,5 d
Costo (USD)	460 (~0,088 por simulación)	750	11.200

### 4. CONCLUSIONES

Los estudios realizados mediante la aplicación de la arquitectura en la nube permitieron obtener los resultados en un tiempo de cómputo órdenes de magnitud mas pequeños que los estimados para soluciones tradicionales. En este marco, los contenedores Docker posibilitaron la creación de un entorno de cómputo de mayor estabilidad y previsibilidad al congelar en una imagen el sistema operativo, el código a ejecutar y sus respectivas dependencias.



La metodología propuesta se constituye en una buena alternativa para mejorar la eficiencia computacional y tomar mejores decisiones para la evaluación de funciones cuando se tiene que afrontar problemas de optimización de diseño basados en metamodelos.

Finalmente, se debe destacar que el acceso a este tipo de tecnología de cómputo contribuye de manera significativa al desarrollo del campo de estudio asociado a la cuantificación y propagación de incertidumbre en problemas de ingeniería. De esta manera, líneas de investigación multidisciplinarias que antes se encontraban restringidas por los altos tiempos de cómputo se vuelven accesibles.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la FaIn-UNCo por su apoyo en el Proyecto 04/I270-PIN1 y a la UTN por su apoyo en Proyecto PID 8454TC.

### REFERENCIAS

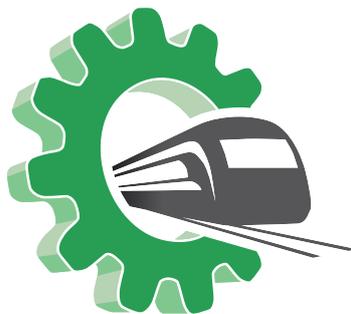
- [1] Merkel, D. *Docker: lightweight Linux containers for consistent development and deployment*. Linux Journal, 2, 239, 2014.
- [2] Menga, J. *Docker on Amazon Web Services: Build, deploy, and manage your container applications at scale*. Packt Publishing Ltd, 2018.
- [3] Sauter, D. and Hagedorn, P. *On the hysteresis of wire cables in Stockbridge dampers*. International Journal of Non-Linear Mechanics. International Journal of Non-Linear Mechanics, vol. 37, pp. 1453–1459, 2002.
- [4] Papailiou, K.O. *On the bending stiffness of transmission line conductors*. International Journal of Non-Linear Mechanics. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 4, pp. 1576–1583, 1997.
- [5] Campos, D., Ajas, A., Goytiño, L., Piovan, M. *Inversión bayesiana de un modelo dinámico no lineal para amortiguadores tipo Stockbridge*. XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. In: Universidad Politécnica de Madrid, 2022.
- [6] Électricité de France. *Finite element code\_aster, Analysis of Structures and Thermomechanics for Studies and Research*. Open source on [www.code-aster.org](http://www.code-aster.org), 2022.
- [7] N. M. Newmark, N. M. *A Method of Computation for Structural Dynamics*. Journal of the Engineering Mechanics Division, vol. 85, no. 3, pp. 67–94, 1959.
- [8] International Electrotechnical Commission. *IEC 61897: Overhead lines - Requirements and tests for Aeolian vibration*. IEC, 2020.



- [9] Aster, R., Borchers, B. and Thurber, C. *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Elsevier, 2019.
- [10] Jaynes, E. T. Information theory and statistical mechanics. *The Physical Review*, vol. 106, No. 4, pp 620-630, 1957.
- [11] S. Marelli and B. Sudret. *Uqlab: a framework for uncertainty quantification in matlab*. in Proc. 2nd Int. Conf. on Vulnerability, Risk Analysis and Management (ICVRAM2014), Liverpool, United Kingdom, 2014.
- [12] Kianifar, M. R. and Campean, F. *Performance evaluation of metamodelling methods for engineering problems: towards a practitioner guide*. *Struct Multidisc Optim* 61, 159–186, 2020.
- [13] Schöbi, R., Sudret, B. and Wiart, J. *Polynomial-Chaos-based Kriging*. *International Journal for Uncertainty Quantification*, Begell House Publishers, vol 5, pp.171, 2015.

Área Temática

# Ingeniería de Fabricación y Mantenimiento





## DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, QUE PRODUCE EL VUELCO EN UNA VIVIENDA TRAILER

Juan J. Valle Sosa<sup>1</sup>, Ubaldo N. Jara<sup>1</sup>, Mariano M. Lastra<sup>1</sup> y Jorge L. Lassig<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería –  
Universidad Nacional del Comahue (UNCo)  
Buenos Aires 1400. Neuquén Capital. Argentina  
[juan.valle@fain.uncoma.edu.ar](mailto:juan.valle@fain.uncoma.edu.ar)  
[jaraubaldo80@yahoo.com](mailto:jaraubaldo80@yahoo.com)  
[marianomlastra@hotmail.com](mailto:marianomlastra@hotmail.com)  
[jorge.lassig@fain.uncoma.edu.ar](mailto:jorge.lassig@fain.uncoma.edu.ar)

### RESUMEN

En el presente trabajo, se realizó un estudio experimental en túnel de viento, para determinar la velocidad de vuelco que el viento produciría sobre un tráiler de 6 m de largo, 3 m de ancho y alto, con un peso total de 3 toneladas.

Para ello se planificó el ensayo cumpliendo con una semejanza de longitudes de  $\alpha = 40$ , una semejanza de cinemática de  $\beta = 4,47$ , y una semejanza dinámica de  $\gamma = 8.000$ .

Además, se reprodujo dentro del túnel de viento un perfil de velocidades para un suelo llano con exponente  $P = 0,21$ , y una intensidad de turbulencia de 0,15.

El modelo debió construirse teniendo en cuenta la distribución de pesos en paredes, techos, piso, rieles, y elementos puntuales como camas, mesas, heladeras, etc. dentro del tráiler.

En función de ello, los resultados arrojaron que el tráiler se volcaría a 109 km/hs, muy alejado de los 170 km/hs de ráfaga extrema que indica la norma CIRSOC 102 (2005).

Para lograr que no vuelque a la velocidad extrema, se procedió a aumentar el peso en distintas partes de la estructura, principalmente en piso y rieles, esto se obtiene agregando 1,5 toneladas adicionales. Caso contrario, el tráiler debe ser sujetado con tensores por seguridad.

**Palabras Clave:** Túnel de Viento, Rugosidad Aerodinámica, Capa Límite Atmosférica, Número de Jensen, Número de Froude



## 1. INTRODUCCIÓN

Los trabajos de campo en las bases petroleras, necesitan de viviendas temporarias para alojar a sus trabajadores, y una vez cumplidas las tareas se las debe reubicar en un nuevo sitio, como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1. Típica utilización de tráiler como viviendas en los yacimientos de petróleo.

En Patagonia los vientos son muy intensos y con ráfagas que pueden alcanzar los 170 km/hs según el reglamento CIRSOC 102 [1]. Por precaución se suelen reforzar los tráileres con riendas de acero anclados al suelo, pero esto dificulta la circulación y agrega un costo adicional a la vivienda.

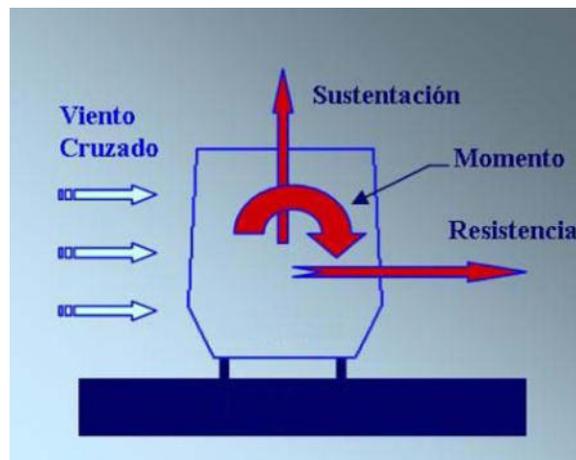


Figura 2. Esquema de las cargas actuantes sobre un vehículo estacionado.

La Figura 2 esquematiza las fuerzas y momentos derivados de la acción del viento, sobre un vehículo estacionado (en nuestro caso un tráiler), que motivarían el vuelco. Este se producirá cuando la fuerza sobre el apoyo a barlovento del tráiler se haga cero.

Previamente a utilizar el túnel de viento, se procedió a “cualificar” el fenómeno a través de un software comercial de CFD, determinando el patrón de flujo posible y las cargas actuantes sobre el mismo. Las Figuras 3 y 4 ejemplifican lo realizado. En particular la Figura 4 nos ayuda a determinar la posible ubicación del centro de presiones del tráiler, y con el dato de la fuerza de arrastre que calcula el software, podemos aproximarnos a la condición de vuelco, ayudándonos a planificar mejor el ensayo físico.

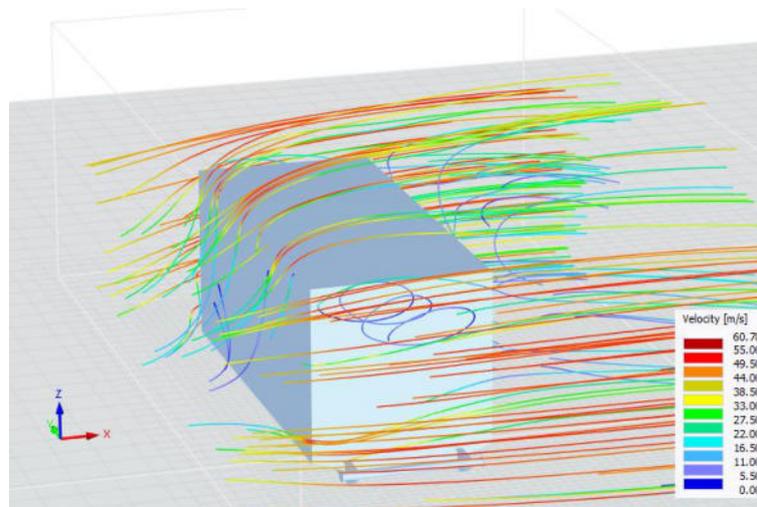


Figura 3. Líneas de corriente que ejemplifican el patrón de flujo que se generaría sobre el tráiler al ser investido por el viento en su peor condición.

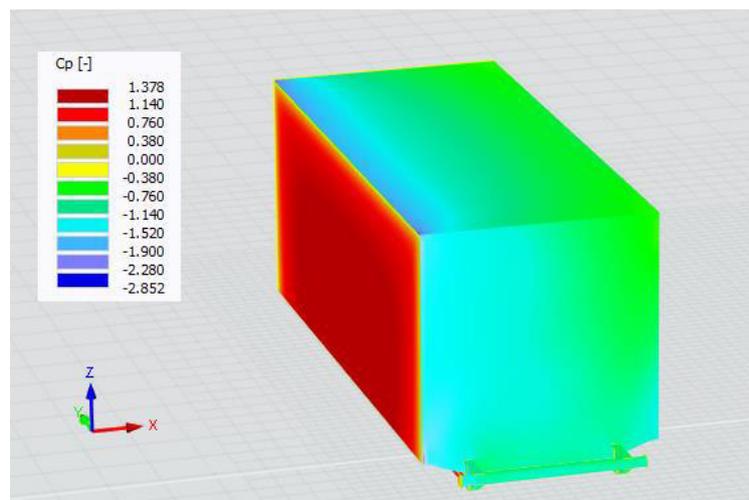


Figura 4. Distribución del coeficiente de presión  $C_p$  sobre las superficies del tráiler, cuando el viento extremo viene de la dirección x.



Para calcular si un determinado tráiler puede ser instalado sin los tensores de acero en un yacimiento de petróleo en la región Patagonia Norte, se procedió a plantear el problema a través de ensayos en túnel de viento. La forma geométrica del mismo es un paralelepípedo de 6m de largo y 3m de ancho y alto, con un peso de 3 toneladas.

## 2. PLANTEO DE LAS SEMEJANZAS ENTRE PROTOTIPO Y MODELO

La simulación física que realizaremos en el túnel de viento nos lleva a plantear las tres semejanzas básicas de la Mecánica de los Fluidos: geométrica, cinemática y dinámica, por lo que deberemos definir una escala de longitudes, una escala de velocidades y una escala de fuerzas.

En Ingeniería del Viento, se debe mantener la escala de longitud de turbulencia del viento incidente entre el prototipo y el modelo. Ello se logra manteniendo el mismo número de Jensen ( $J_e$ ) [2], el cual se define como:

$$J_e = L / Z_0 \quad (1)$$

Donde  $L$  es la altura del objeto, y  $Z_0$  es el coeficiente de rugosidad aerodinámica del suelo.

Los subíndices  $P$  y  $M$  representan al prototipo y al modelo respectivamente.

Por lo tanto  $J_{eP} = J_{eM}$  lo que nos da:  $L_P / Z_{0P} = L_M / Z_{0M}$

Luego 
$$L_P / L_M = Z_{0P} / Z_{0M} \quad (2)$$

Lo que significa que la escala de longitudes  $\alpha = L_P / L_M = Z_{0P} / Z_{0M}$  debe ser igual a la relación de rugosidad aerodinámica entre prototipo (viento real) y modelo (dentro del túnel de viento). Para lograr esto se colocan en el piso del túnel, tacos de madera para obtener la adecuada rugosidad aerodinámica ( $Z_0$ ) dentro del túnel, como se refleja en la Figura 5.



Figura 5. Ubicación de tacos para lograr el  $Z_0$  necesario dentro del túnel de viento.

Por otra parte, el túnel de viento tiene límites de tamaño, por lo que primero se debe definir la escala de longitudes en virtud de la sección de prueba del túnel de viento, teniendo en cuenta los efectos de bloqueo, donde según el reglamento CIRSOC 102 se recomienda que el área del objeto no supere el 8% del área de la sección de prueba [1]. Teniendo en cuenta esto se define una escala de longitudes de  $\alpha = 40$ .

Los yacimientos de petróleo se ubican en suelos llanos, cuyo valor típico de  $Z_0$  es del orden de de 0,01m, por lo que el  $Z_0$  del modelo debe ser:  $Z_{0M} = 0,01/40 = 0,00025$ .

Esto se logró colocándole tacos de sección cuadrada de 7,5 cm espaciados cada 50 cm sobre el piso del túnel de viento, aguas arriba de la sección de prueba (como se ilustra en la Figura 5).

El resultado de la calibración del túnel de viento, derivó en un perfil de velocidades para un suelo llano con exponente  $P = 0,21$ , y una intensidad de turbulencia de 0,15. La Figura 6 representa dicho perfil de velocidades.

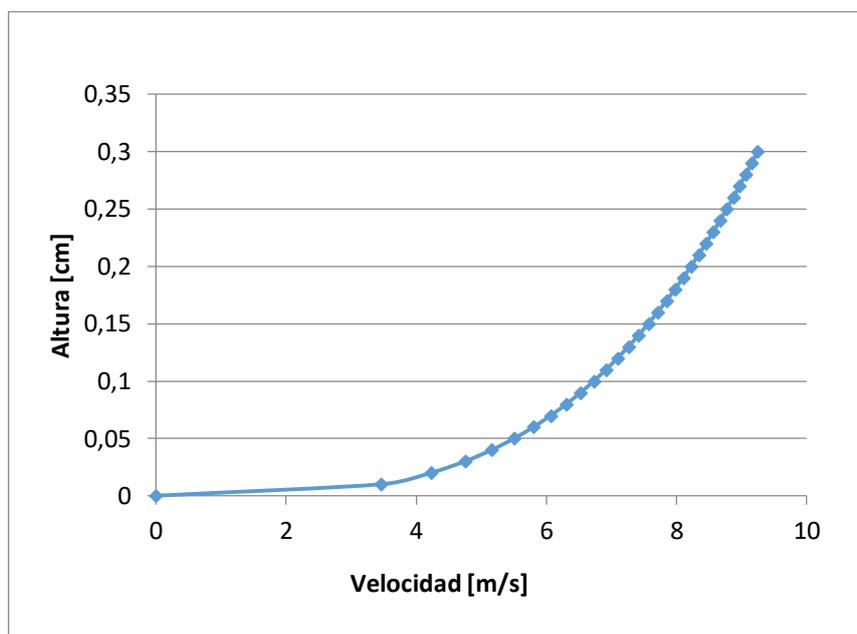


Figura 6. Perfil de velocidades generado dentro del túnel de viento.

El paso siguiente es definir la escala de velocidades, para ello se debe elegir un número adimensional que represente el fenómeno físico [3].

El número de Froude es uno de los números adimensionales utilizado en Mecánica de los Fluidos. Este número expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad actuantes en un flujo.

Es aplicado en particular para el caso en que existe una superficie libre de fluido (como puede ocurrir en un río), en la que, al formarse ondas, éstas se amortiguarán por acción de la gravedad.

A pesar de ello, cabe decir que esto responde a un fenómeno más general, que es la aparición de una onda de gravedad externa luego de que el flujo se encuentra con un obstáculo.

La partícula de aire es desplazada (en dirección vertical) desde su posición inicial, debido a un obstáculo mecánico como una montaña o un edificio (en nuestro caso el tráiler), luego la gravedad hace de fuerza restauradora logrando que vuelva a su posición inicial, como se ilustra en la Figura 7.



Figura 7. Similitud del viento pasando sobre una montaña y un vehículo en reposo.

El número de Froude se expresa como:

$$Fr = V / (g \cdot H)^{1/2} \quad (3)$$

Donde V es la velocidad del viento, g la gravedad y H la altura del objeto.

La condición es igualdad del número de Froude en el prototipo y el modelo,

$$Fr_p = Fr_m$$

$$V_p / (g \cdot H_p)^{1/2} = V_m / (g \cdot H_m)^{1/2}$$

Despejando:

$$V_p / V_m = (H_p / H_m)^{1/2} \quad (4)$$

Luego queda definida la escala de velocidades  $\beta$  como:

$$\beta = (\alpha)^{-1/2} \quad (5)$$

Entonces  $\beta = 6,32$

Falta definir la escala de fuerzas

$$\gamma = F_p / F_m \quad (6)$$

Debemos definir una propiedad que describa el efecto físico del flujo, para ello utilizaremos la fuerza de arrastre que el viento ejerce sobre el tráiler y como este tiene la forma de un paralelepípedo de base cuadrada, el coeficiente de arrastre  $C_d$  se mantiene constante para varios órdenes de magnitud del número de Reynolds [3], así:

$$\gamma = F_{pt} / F_m = (\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_p^2 \cdot C_D \cdot A_p) / (\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2 \cdot C_D \cdot A_m)$$

Simplificando queda:

$$\gamma = (V_p / V_m)^2 \cdot (A_p / A_m) = \beta^2 \cdot \alpha^2 \quad (7)$$

Luego la escala de fuerzas es:  $\gamma = 63.907,84$

### 3. TÚNEL DE VIENTO

Se utilizó el túnel de viento (mostrado en la Figura 9) perteneciente al Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales (LaDiFA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue.

El mismo tiene 7,40 m de largo con una sección de prueba de 0,90 x 0,90 m, es abierto de tipo capa límite atmosférica [3], con un motor eléctrico de 6 CV de potencia, con regulador/estabilizador de velocidad. La Figura 8 ilustra este tipo de túneles de viento.

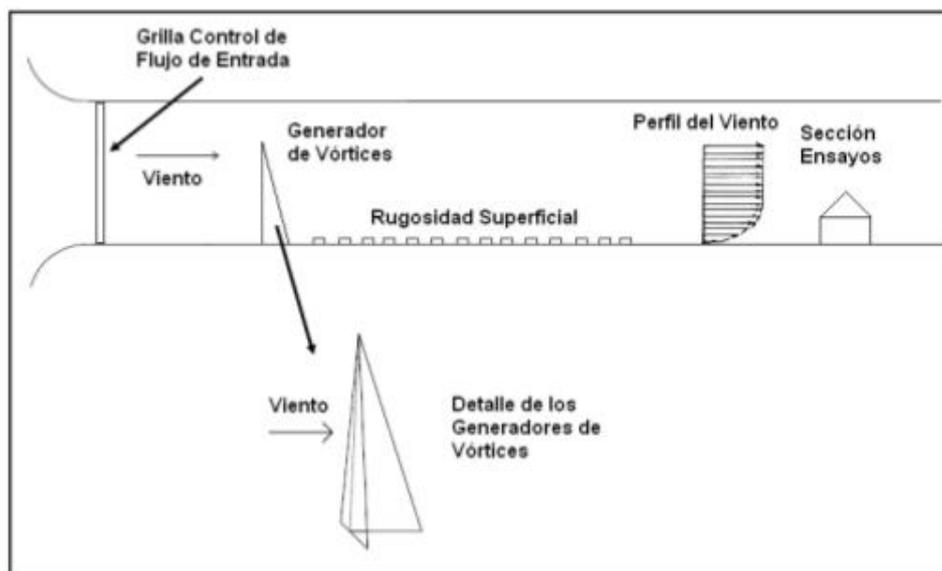


Figura 8. Esquema de un túnel de viento de capa límites donde los generadores de vórtices y la rugosidad se ajustan para reproducir la capa límite atmosférica.

El perfil de capa límite simulado fue para un exponente de la ley de Sutton de  $P = 0,21$  que corresponde a una exposición Clase C de la Norma CIRSOC 102; el cual se muestra en la Figura 6, y la intensidad de turbulencia desarrollada fue de 0,15.



Figura 9. Túnel de viento del LaDiFA utilizado en este trabajo.

#### 4. ENSAYOS

La maqueta entregada por el fabricante definía bien el aspecto geométrico del tráiler (Figura 10 izquierda), pero no respetaba la distribución de pesos según la escala de fuerzas calculada, por lo que se realizó otro modelo teniendo en cuenta la distribución de pesos según la escala de fuerza  $\gamma$ , indicado en la Figura 10 derecha.



Figura 10. Izquierda modelo original, derecha modelo de ensayo con distribución de pesos según la escala de fuerzas calculada.



Figura 11. La velocidad crítica para el vuelco del tráiler se determina cuando este comienza a girar, como en la ilustración.

El ensayo consistió en ubicar al modelo en el centro de la sección de pruebas del túnel de viento y aumentarle la velocidad del viento gradualmente hasta que vuelque el tráiler. La Figura 11 muestra la posición del tráiler antes y después del vuelco.

Para este tráiler la velocidad crítica fue de 4,8 m/s en el modelo ensayado, lo que representa para el prototipo unos 109 Km/hs, muy alejado de los 170 km/hs de ráfaga extrema que indica la norma CIRSOC 102.

Para lograr que no vuelque a la velocidad extrema, se procedió a aumentar el peso en distintas partes de la estructura, principalmente en piso y rieles, esto se obtiene agregando 1,5 toneladas adicionales. Caso contrario, el tráiler debe ser sujetado con tensores por seguridad.

## 5. CONCLUSIONES

Se realizó un procedimiento para determinar la velocidad del viento en la cual se produce el vuelco de un tráiler estacionado, a través del uso del túnel de viento.

Para ello se determinaron las escalas de longitudes, velocidades y fuerzas a emplear en el ensayo, como también mantener la escala de longitudes de turbulencia entre prototipo y modelo.

Los resultados para el caso estudiado, arrojaron una velocidad crítica de 109 km/hs muy por debajo de la velocidad extrema en la región Patagonia Norte que es de unos 170 km/hs.

## AGRADECIMIENTOS



Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Investigación de la Universidad Nacional del Comahue a través del proyecto de investigación PI 04-I 264.

## REFERENCIAS

- [1] Centro de Investigación de los Reglamentos de Seguridad de las Obras Civiles. *CIRSOC 102: Acción del viento en las construcciones*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial. 2005
- [2] Jorge Lassig; *Determinación de la escala de longitudes, para túneles de viento atmosférico*; Nota Técnica N° 1 LaDiFA, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Comahue. Octubre 2019.
- [3] Davenport, Alan G; *Wind Tunnel Testing: A General Outline*; The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Science London, Ontario, Canada, May 2007.



## INFLUENCIA DEL AFILADO DE LA BROCA SOBRE LOS ESFUERZOS DE MECANIZADO EN DISTINTOS METALES

Alejandro Simoncelli <sup>1,3</sup>, Daniela Perez <sup>1,3</sup>, Germán Abate <sup>1,3</sup>, Alberto Pereyra Osenda <sup>2</sup>,  
Pablo Gayol <sup>3</sup> y Daniel Martínez Krahmer <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Procesos de Mecanizado y Conformado, INTI-Mecánica -  
[asimoncelli@inti.gob.ar](mailto:asimoncelli@inti.gob.ar) ; [djperez@inti.gob.ar](mailto:djperez@inti.gob.ar) ; [gabate@inti.gob.ar](mailto:gabate@inti.gob.ar) ; [dmartinez@inti.gob.ar](mailto:dmartinez@inti.gob.ar)

<sup>2</sup> Instituto de Tecnología e Ingeniería, Universidad Nacional de Hurlingham  
[pereyraosenda@unahur.edu.ar](mailto:pereyraosenda@unahur.edu.ar)

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora  
[pgayol@ingenieria.unlz.edu.ar](mailto:pgayol@ingenieria.unlz.edu.ar)

### RESUMEN

Entre los procesos de mecanizado de metales el agujereado es el más utilizado seguido por el fresado y el torneado respectivamente.

Sobre el diseño original de las brocas helicoidales realizado por Stephen Morse en 1861, estas herramientas han evolucionado principalmente en tres aspectos: 1) el material con que se fabrica la herramienta; 2) el uso de recubrimientos y 3) el afilado de la punta.

En el caso específico de las brocas de acero rápido usadas en este trabajo es la Norma DIN 1414-1 aquella que establece los valores nominales así como las tolerancias para cada una de las variables geométricas que estas herramientas poseen.

Si bien la citada Norma define tres ángulos de hélice posibles: W para materiales blandos (hélice rápida), H para materiales duros (hélice lenta) y N para uso universal, trabajos previos indican un mejor comportamiento global de las brocas con hélice N.

Haciendo foco en el afilado de la punta, interesa analizar la influencia del ángulo de incidencia, el ángulo de punta y el espesor de núcleo considerando un amplio rango de valores normalizados para cada una de ellas, sobre los esfuerzos de corte en tres metales distintos (acero, latón y aluminio).

Para ello se realizaron ensayos de agujereado utilizando treinta y seis brocas, combinando las distintas geometrías de afilado, los metales a agujerear y las condiciones de corte, obteniendo como respuesta las señales dinamométricas correspondientes a las fuerzas de avance y los momentos torsores para cada combinación.

La importancia de este estudio radica en que mayores esfuerzos de corte son un indicativo de una broca sometida a condiciones más exigentes que impactan negativamente sobre la duración del filo de la herramienta y es así que el resultado del trabajo mostrará aquella combinación de geometría óptima para minimizar estos esfuerzos.

**Palabras clave:** Brocas helicoidales; Afilado; Esfuerzos de corte; Mecanizado



## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de mecanizado por arranque de viruta son una de las técnicas más utilizadas para la fabricación de piezas en el sector metalmecánico [1].

Con relación específica al agujereado con brocas helicoidales tal es su importancia entre las operaciones de corte de metales a nivel mundial que comprende aproximadamente el 30 % de todas ellas. Estas herramientas, desde su creación en 1861 han evolucionado principalmente en tres aspectos: a) el material con que se fabrica la broca; b) el uso de recubrimientos duros y c) el afilado de la punta [2].

Para su fabricación y control de calidad existe una Norma específica [3] que entre otros aspectos define la posibilidad de construirlas con tres ángulos de hélice según sea el material a agujerear. Así, la hélice W es la indicada para materiales blandos (hélice rápida), la H para materiales duros (hélice lenta) y la N para uso universal. Sin embargo, trabajos realizados previamente indican un mejor comportamiento general de las brocas con hélice N [4].

Los esfuerzos de corte durante el proceso de agujereado, es decir, la fuerza de avance y el momento torsor, son determinantes sobre la duración del filo y la probabilidad de falla de la broca [5]. Esta situación es descrita de manera más precisa por V. Astakhov [6] quien afirma que, toda la potencia de corte en el mecanizado, que a su vez depende de los esfuerzos de corte, se transforma en calor y es la cantidad de calor que reduce la duración de los filos al activar los mecanismos de desgaste. La ecuación que surge es mayores esfuerzos, mayor consumo de potencia y en consecuencia mayor generación de calor, lo que se traduce directamente en una reducción de la vida útil de la herramienta.

A su vez, estos esfuerzos, para un mismo material a mecanizar y utilizando herramientas sin recubrimiento, dependen principalmente de la geometría de la punta de la herramienta, y en menor medida de la lubricación y las condiciones de corte [7, 8].

Con relación a la geometría de la punta las investigaciones se orientaron principalmente a la influencia del espesor del núcleo [9,10].

Asimismo, la mayoría de los trabajos publicados sobre ensayos de agujereado en los cuales se midieron y modelaron los esfuerzos de corte correspondieron a aleaciones de aluminio, probablemente por las dificultades inherentes que estas aleaciones presentan en la extracción de viruta y que ante los eventuales atascamientos conducen a la rotura súbita de la herramienta, provocando no sólo su pérdida sino también la de la pieza en proceso [11-14].

Específicamente M. Aamir et al [11] trabajando en ensayos de agujereado sobre una aleación de aluminio AA2024 midieron la fuerza de avance en función del número de revoluciones, el avance



y el diámetro determinando que la contribución sobre esta fuerza correspondió en un 67% al avance, un 30% al diámetro y un 0.8% a la velocidad de corte.

En tanto que, S. Tamura y T. Matsumura [12] utilizaron brocas con un ángulo de punta de  $180^\circ$  sobre una aleación de aluminio AA7075 y evaluaron el comportamiento de la fuerza de avance y el momento torsor según el radio de esquina, observando una disminución promedio del 35% para la fuerza de avance en el caso de la broca con radio cero, mientras que con relación al momento torsor no hubo diferencias apreciables.

En el caso de P. Kyratsis y otros [13] también sobre una aleación AA 7075 emplearon una estrategia de diseño factorial  $3^3$  considerando como factores el diámetro de la broca, el avance y la velocidad de corte, siendo las respuestas la fuerza de avance y el momento torsor. Obtenidos los valores experimentales ajustaron una superficie de respuesta a ambas variables que permitieron predecirlas con errores comprendidos entre 3.4 a 4.7%.

Por último, A. Akhavan et al [14] usando una aleación de aluminio y silicio A383 se plantearon como objetivo determinar la fuerza de avance mínima considerando como variables solo las condiciones de corte velocidad y avance encontrando que el valor mínimo ocurrió para la combinación de la mayor velocidad de corte y el menor avance.

En consecuencia, siendo que la mayoría de los trabajos se centran en establecer las fuerzas de corte en agujereado en función de las condiciones de corte y el diámetro de la broca.

Que la geometría de la punta de la broca se conforma principalmente por el ángulo de punta  $\varepsilon$ , el ángulo de incidencia o destalonado  $\alpha$  y el espesor de núcleo  $s$  [2], y que para estas variables geométricas hay una Norma específica [3] que indica un rango mínimo-máximo para cada una de ellas, se fabricaron treinta y seis brocas, con el objeto de hacer ensayos dinamométricos tendientes a relacionar los esfuerzos de agujereado (fuerza de avance y momento torsor), con la geometría de la punta de la broca.

Entonces, la finalidad de este trabajo consiste en determinar la combinación óptima de variables geométricas de la punta de la broca ( $\varepsilon$ ,  $\alpha$  y  $s$ ), utilizando valores normalizados para cada una de ellas, que permitan minimizar los esfuerzos de corte.

Asimismo, y para darle mayor robustez a los resultados, se emplearon tres materiales con maquinabilidades diferentes como son un acero (viruta larga y mayor tensión unitaria de corte), un latón (viruta corta) y un aluminio (material adhesivo, con viruta larga y menor tensión unitaria de corte) y dos condiciones de corte (Velocidad de corte mínima y Velocidad Máxima).

## 2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

#### 2.1.1 Brocas Helicoidales

Para realizar las pruebas de agujereado, se emplearon treinta y seis brocas helicoidales DIN 338 de 7.5 mm de diámetro, construidas en acero rápido AISI M2, cuya composición química nominal es la siguiente (% peso): 0.9% C; 6% W; 5% Mo; 4% Cr; 2% V; Fe balance.

Con el fin de analizar la influencia de la geometría de la punta de la broca sobre los esfuerzos de agujereado, estas brocas fueron fabricadas fuera del programa de producción estándar con el objeto de disponer de cuatro valores para el ángulo de incidencia o destalonado  $\alpha$  (12°; 14°; 16° y 18°), tres valores para el espesor de núcleo  $s$  (0.88 mm; 1.18 mm y 1.38 mm) y cuatro valores para el ángulo de punta  $\varepsilon$  (110°; 118°; 130° y 140°), todos ellos comprendidos en el rango de la Norma específica [3] para las tres variables citadas.

En la tabla 1 se presentan los nueve grupos de brocas ensayadas y su geometría asociada.

Tabla 1. Parámetros de geometría por grupo de broca

Broca	Núcleo	Destalonado	Afilado	Broca	Núcleo	Destalonado	Afilado	Broca	Núcleo	Destalonado	Afilado
G1	1.38 mm	14°	130°	G4	1.18 mm	14°	140°	G7	1.18 mm	12°	118°
G2	1.38 mm	14°	118°	G5	0.88 mm	14°	118°	G8	1.18 mm	18°	118°
G3	1.18 mm	16°	118°	G6	1.18 mm	14°	118°	G9	1.38 mm	14°	110°

Se decidió que todas las brocas fueran de hélice tipo N (25°), por cuanto trabajos realizados previamente mostraron un mejor comportamiento general de las brocas con esta hélice [5].

En la Figura 1 se muestran las variables geométricas del afilado de la punta de la broca consideradas en el trabajo.

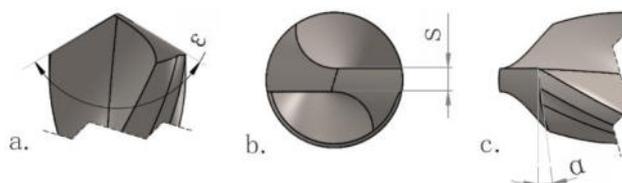


Figura 1: Variables geométricas: a. Ángulo de punta b. Núcleo c. Destalonado

#### 2.1.2 Materiales a mecanizar

Para las pruebas de agujereado, se utilizaron barras trefiladas de sección cuadrada de 19 mm de lado de tres materiales diferentes: acero SAE 1060, aluminio y latón amarillo.

La composición nominal del acero SAE 1060 es la siguiente (% peso): 0.6% C; 0.6 a 0.9% Mn; 0.03% P (máx.); 0.035% S (máx.); 0.35% Si (máx.); Fe balance.



En el caso del latón amarillo fue 60% Cu; 39% Zn y aproximadamente 1% Pb, mientras que el aluminio presentó un porcentaje mayor al 95% de Al.

Se prepararon probetas para su análisis metalográfico. En el caso del acero SAE 1060 la microestructura fue revelada usando nital 2%, mientras que en el caso del latón amarillo y del aluminio se emplearon como reactivos de ataque los N° 1 y N° 36 de la Norma ASTM E 407 – 07 respectivamente.

El examen visual fue efectuado con un microscopio óptico Zeiss AxioTech, mientras que la microdureza fue determinada con un microdurómetro Vickers, marca Shimadzu HMV 2000, usando en todos los casos una carga de 10 N.

## 2.2 Condiciones de corte y lubricación

Previamente a definir las condiciones de corte a emplear en los ensayos, es decir, la velocidad de corte ( $V_c$ ), el número de revoluciones del husillo ( $n$ ), y la velocidad de avance ( $V_a$ ), a partir de la dureza y el tipo de material de las barras, se procedió a efectuar la búsqueda de condiciones de corte de referencia, utilizando documentación de un instituto de investigación dedicado al mecanizado (ver Tabla 2), para operaciones de agujereado con brocas helicoidales de acero rápido, aplicadas sobre materiales similares a los usados en los ensayos de agujereado.

Estos ensayos de fueron realizados para cada material a dos velocidades de corte recomendadas, una velocidad de corte mínima y una velocidad de corte máxima.

Tabla 2. Condiciones de corte utilizadas durante los ensayos

Fuente	Material	$V_c$ mínima y máxima (m/min)	$n$ (rpm)	$V_a$ (mm/min)
Metcut [15]	Acero SAE 1055 HB 275 a 325	10 - 15	424 – 637	43 – 65
	Latón amarillo	37 - 47	1570 – 1995	157 – 200
	Aluminio puro	40 - 60	1698 - 2546	212 – 318

La totalidad de los ensayos de agujereado fueron realizados en seco.

## 2.3 Equipamiento

Los orificios se efectuaron en una fresadora de control numérico marca PROMECOR la cual posee un husillo de 8000 rpm y 10 kW de potencia.

Los esfuerzos de mecanizado se midieron empleando un dinamómetro piezoeléctrico Kistler modelo 9271A de dos canales, con sus respectivos amplificadores de carga, en tanto que el registro de datos de ensayos se realizó con un adquirente Labjack T7-Pro.

El procesamiento de datos, filtrado y análisis de las señales se ejecutó mediante scripts en lenguaje de programación Python.

## 2.4 Procedimiento de ensayo

Se utilizaron tres trozos de barra de 400 mm de longitud aproximada, una por cada tipo de material empleado durante las pruebas experimentales.

Para la realización de las pruebas de agujereado, para cada configuración de afilado de broca ( $\epsilon$ ,  $\alpha$  y  $s$ ), basados en trabajos previos [9], se utilizaron cuatro brocas por cada combinación.

Se efectuaron un total de 216 ensayos de agujereado que surgen de combinar 9 grupos de brocas x 4 repeticiones por grupo x 3 materiales x 2 condiciones de corte.

Las condiciones de corte fueron en cada caso las indicadas en el apartado 2.2, mientras que todos los orificios fueron efectuados ciegos en una sola profundización de herramienta de 10 mm (sin retroceso para extracción de viruta).

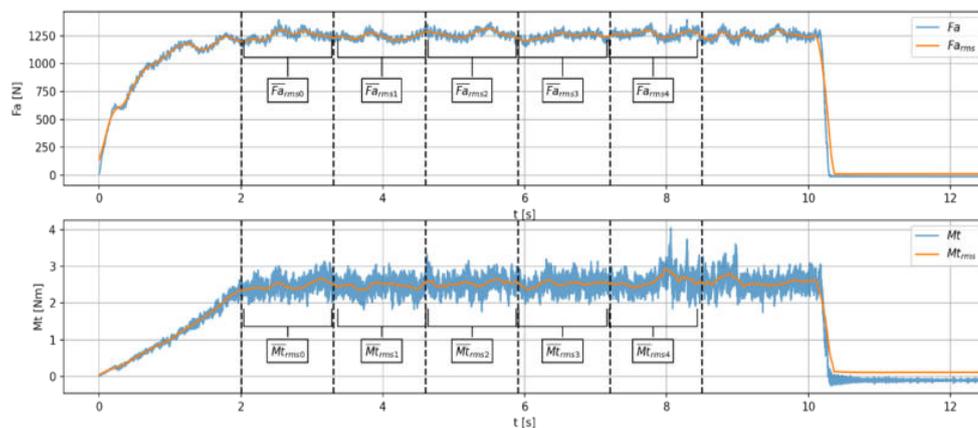


Figura 2: Ejemplo de señales adquiridas

Mediante el adquisidor de datos se registraron las señales de momento torsor  $M_t$  y de fuerza de avance  $F_a$ , para cada broca en cada condición de ensayo a una tasa de muestreo de 2 kHz para Acero y 4 kHz para el resto de los materiales. Se calcularon los valores  $F_{aRMS}$  y  $M_{tRMS}$  por ensayo con una ventana de 0.1 segundos. Cada señal fue segmentada en cinco partes iguales correspondiente a los registros obtenidos a profundidades desde los 2.5 y 8.5 mm evitando transitorios y suavizados del filtro. Con cada uno de estos segmentos se calcularon los valores promedios de  $F_{aRMS}$  y  $M_{tRMS}$  aumentado en un factor de 5 el número de observaciones.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSION

### 3.1 Brocas Helicoidales

Analizada una muestra de broca por técnicas metalográficas, estas brocas de acero AISI M2, presentaron una microestructura típica para estos aceros, es decir, una matriz de martensita



revenida, con una fina distribución de carburos complejos (Figura 3, izquierda). La dureza promedio resultó ser de HV10 900  $\pm$  20.

### 3.2 Materiales a mecanizar

El acero SAE 1060 presentó una microestructura laminada en caliente, constituida por granos de perlita levemente orientados y ferrita proeutectoide en red. El tamaño de grano perlítico, determinado en la sección transversal fue de tipo dual, variando entre el número 8 al 9.

Las inclusiones correspondieron al tipo "A" (sulfuros), serie fina N° 1½ y tipo "D" (óxidos), también de serie fina N° 1.

La dureza promedio de la barra de acero SAE 1060 resultó ser HV10 282  $\pm$  5.

Una imagen metalográfica de la sección transversal de las barras se observa en el Figura 3, derecha.

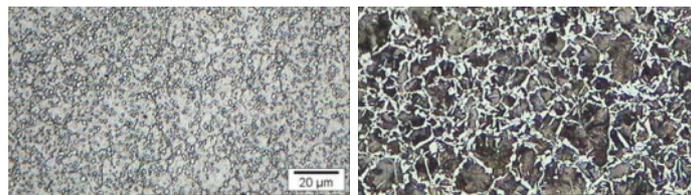


Figura 3: Microestructura del acero AISI M2 (500X) izquierda y del acero SAE 1060 (100X)

En el caso de la barra de aluminio mostró una microestructura de extrusión, constituida por granos alargados de solución sólida de Al y finos compuestos intermetálicos, algunos precipitados al azar, y otros alineados por el proceso de fabricación. Respecto del tratamiento térmico, podemos afirmar que probablemente haya sido un envejecido artificial.

La dureza promedio de la barra de aluminio resultó ser HV10 106  $\pm$  2.

Una imagen metalográfica de la sección transversal de la barra se observa en el Figura 4 izquierda.

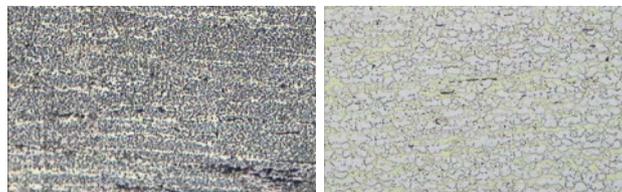


Figura 4: Microestructura del aluminio (500X) izquierda y del latón amarillo (100X)

Por último, el latón amarillo presentó una microestructura laminada en caliente constituida por una matriz de solución sólida Cu ( $\alpha$ ), solución sólida Cu ( $\beta$ ) alineada, con partículas de plomo alargadas distribuidas al azar. Este material no poseía tratamiento térmico.

La dureza promedio de la barra de latón resultó ser HV10  $126 \pm 3$  y una imagen metalográfica de la sección transversal se observa en la Figura 4 derecha.

### 3.3 Ensayos de agujereado

En Figura 5 y Figura 6 se muestran los diagramas de caja correspondientes a las fuerzas de avance y momento torsor segmentadas por condición de corte y material.

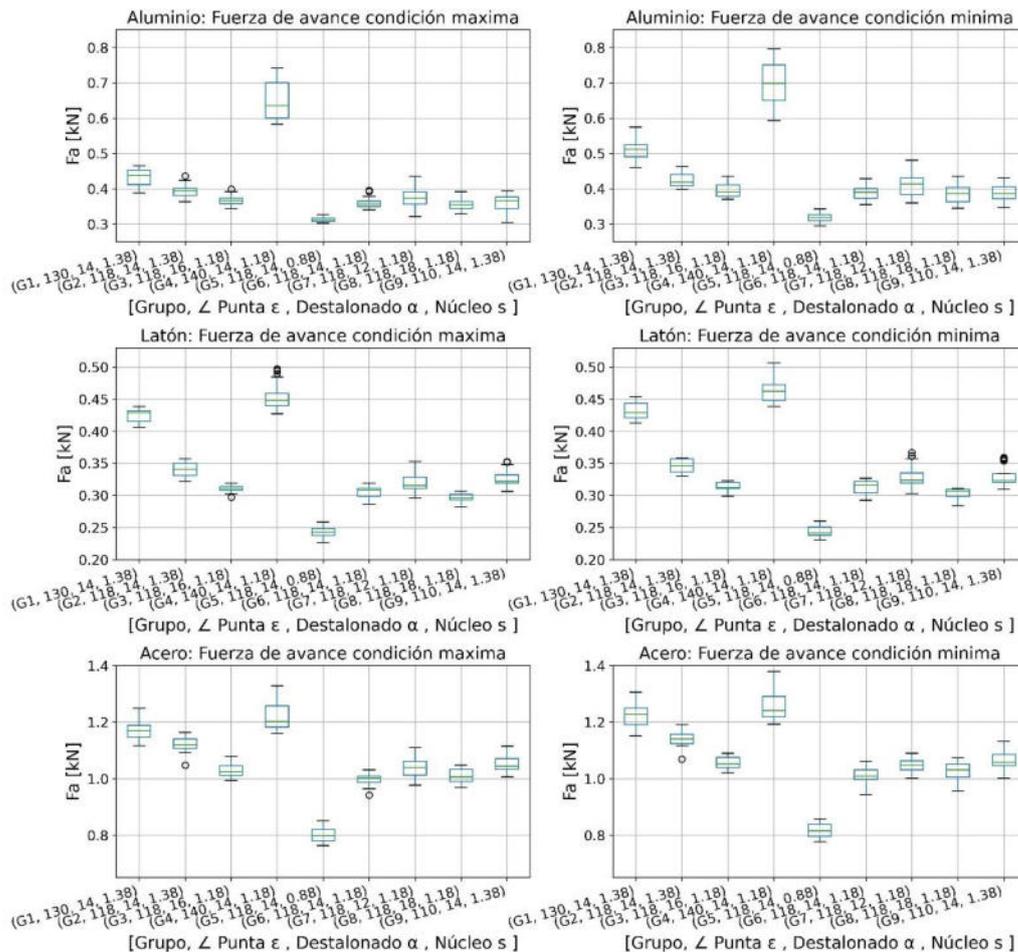


Figura 5: Boxplot para la fuerza de avance en condición de corte máxima y mínima

En principio, cuando se comparan los diagramas de cajas de la fuerza de avance o del momento torsor para los distintos materiales agujereados y en ambas condiciones de corte, fue el acero SAE 1060 aquel que produjo mayores valores de resistencia en tanto que fue el latón quien demandó menores esfuerzos para ser agujereado.

El análisis de los gráficos de cajas pone en evidencia que el aumento de la velocidad de corte produce un leve descenso de la mediana de la fuerza de avance. Esta situación respondería a una reducción de la tensión unitaria de corte con la temperatura [14]. Un comportamiento similar se observa para el momento torsor. Sin embargo, existe una gran dispersión de los datos.

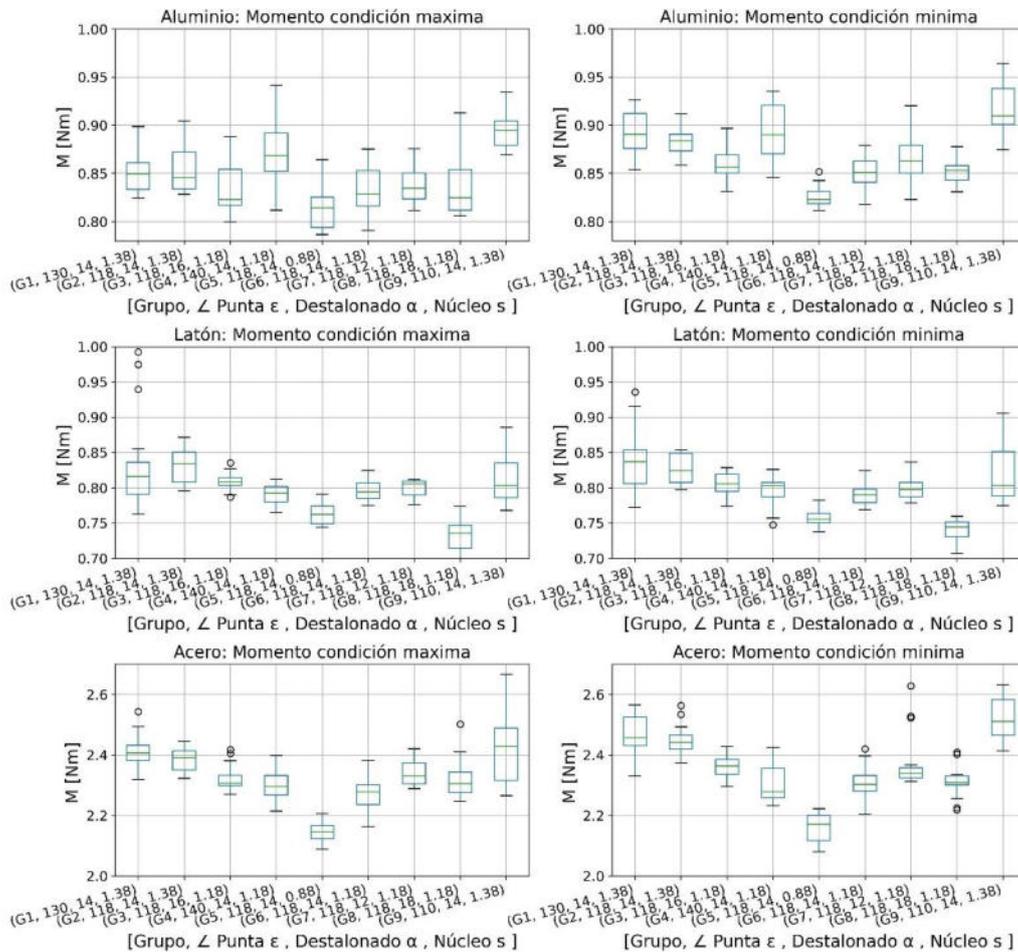


Figura 6: Boxplot para el momento torsor en condición de corte máxima y mínima

En Figura 7 se presenta un resumen de las mediciones experimentales ( $F_a$  vs  $M$ ) para cada grupo de brocas y condición de corte, identificadas respectivamente por color y tipo de marcador. Por proximidad al origen de coordenadas pueden identificarse aquellos Destalonos que evidenciaron menores esfuerzos de corte.

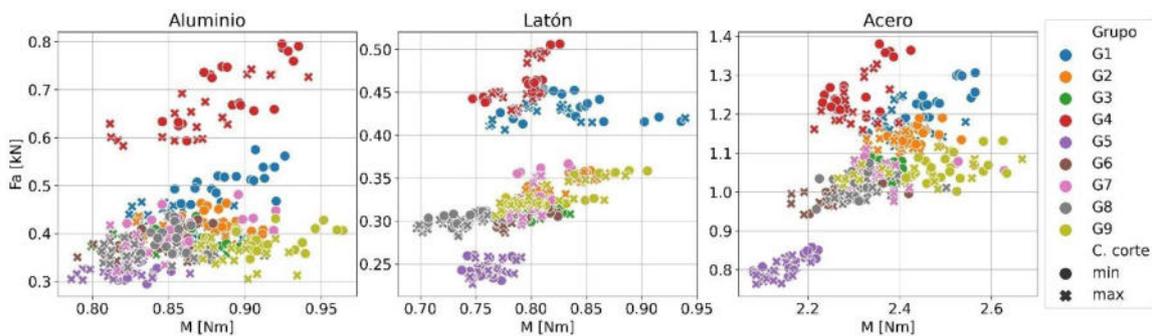


Figura 7: Resumen de resultados

En la Figura 8 se presentan las regresiones para la condición de corte mínima y máxima (línea de trazos y línea de puntos respectivamente) obtenidas para la respuesta fuerza de avance,

evaluada para cada variable geométrica (dispuestas en columnas), con cada fila de gráficos refiriendo al material ensayado. Siguiendo este mismo estilo, la Figura 9 presenta las regresiones para la respuesta Momento torsor.

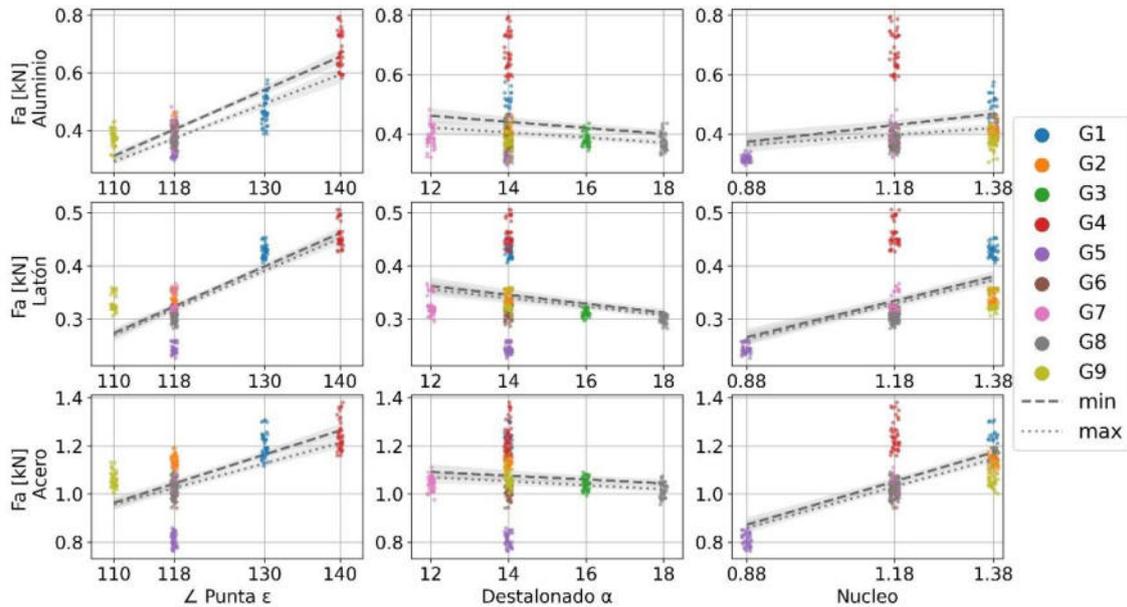


Figura 8: Regresiones para la fuerza de avance en aluminio, latón y acero

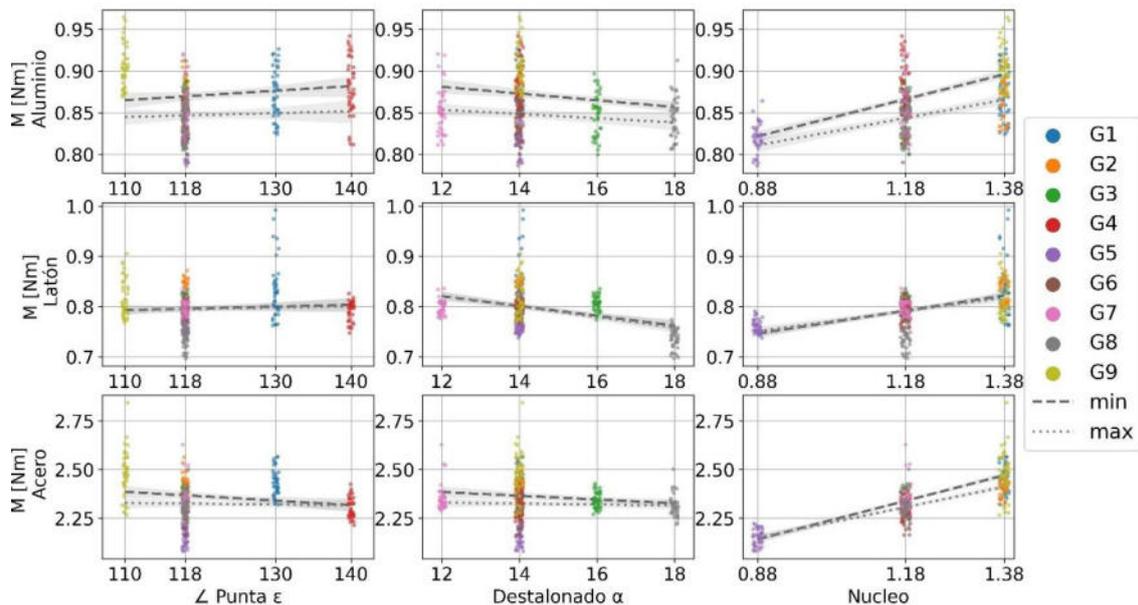


Figura 9: Regresiones para el momento torsor en aluminio, latón y acero

Puede identificarse que solo el aluminio presentó diferencias significativas en los esfuerzos registrados al comparar condiciones de corte mínima y máxima. Esto último es observable en la marcada separación de sus rectas de regresión.



#### 4. CONCLUSIONES

Las principales contribuciones de este trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La combinación geométrica del afilado de la punta que minimiza la fuerza de avance en todos los casos correspondió a un ángulo de punta de  $118^\circ$ , un espesor de núcleo de 0.88 mm y un ángulo de destalonado de  $14^\circ$  (Grupo 5). Particularmente para el caso del acero y el aluminio esta combinación también minimizó el momento torsor.
- Sobre la fuerza de avance en el conjunto de brocas ensayadas, el factor que produjo la mayor contribución fue el ángulo de punta seguido por espesor del núcleo, en tanto que con relación al momento torsor fue el espesor de núcleo.
- Para el caso del aluminio a las velocidades de corte ensayadas se observa una diferenciación significativa de los esfuerzos tanto para la fuerza de avance como para el momento. Esta situación queda pendiente de ser analizada con mayor profundidad.

En trabajos futuros se intentará ahondar la discusión de los resultados alcanzados utilizando simulación por elementos finitos.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la empresa argentina Ezeta especializada en herramientas de corte, por la fabricación de las herramientas especiales empleadas en el presente trabajo.

#### REFERENCIAS

- [1] Pervaiz S. *An Extensive Review of The Water Consumption and Cutting Fluid Based Sustainability Concerns in The Metal Cutting Sector*. J Clean Produc, 197:1, 134-153, 2018
- [2] Martínez Krahmer D. *Sobre algunos procesos de agujereado*. Editorial Nueva Librería, Buenos Aires, Argentina, 2010.
- [3] DIN 1414-1. *Technische Lieferbedingungen für Spiralbohrer aus Schnellarbeitsstahl, Teil 1: Anforderungen*. DIN. 1998.
- [4] Martínez Krahmer D, Brunetto P, Maceira G, Szombach J, Papczuk G. *Influencia de las distintas clases de hélices empleadas en brocas helicoidales de acero AISI M2 y del tipo de lubricación sobre los esfuerzos y la calidad de los orificios en procesos de agujereado*. Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, ISBN: 978-950-605-633-9, 16 al 19 de noviembre de 2010, San Juan, Argentina.
- [5] Diniz A, Marcondes F, Coppini N. *Tecnologia da usinagem dos metais*. Artliber Editora, quinta edición, Sao Paulo, Brasil, 2006



- [6] Astakhov V. *Cutting Force Modeling: Genesis, State of the Art, and Development*. Springer Nature, Switzerland, 2022
- [7] Shaw M. *Metal cutting principles*. Oxford University Press, Second Edition, United States of America, 2005
- [8] Abate G, Martynenko V, Martinez Kraemer D, Bruno A. *Reducción de la variabilidad atribuible a las brocas en la medición de esfuerzos en operaciones de agujereado*. Congreso SAM / CONAMET 2011, ISBN: 987-27308-0-2, 18 al 21 de octubre de 2011, Rosario, Argentina.
- [9] Stemmer C, *Ferramentas de corte II*. Imprensa Univesitaria Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1995.
- [10] M. Guzmán, *Estimación de las fuerzas de corte en un proceso de taladrado con brocas de geometría mejorada en el filo transversal*. Congreso CAIM 2008.
- [11] Aamir M, Giasin K, Tolouei-Rad M, Ud Din I, Hanif M, Kuklu U, Pimenov D, Ikhlaq M. *Effect of Cutting Parameters and Tool Geometry on the Performance Analysis of One-Shot Drilling Process of AA2024-T3*. Metals, 11, 854, 2021.
- [12] Tamura S, Matsumura T. *Cutting Force in Drilling with Flat Bottom Drill*. Key Engineering Materials, Vol. 926, pp 1636-1642, 2022
- [13] Kyratsis P, Markopoulos A, Efklidis N, Maliagkas V. *Prediction of Thrust Force and Cutting Torque in Drilling Based on the Response Surface Methodology*. Machines, 6, 24, 2018
- [14] Akhavan A, Sharif S, Alizadeh S. *Statistical analysis, modeling, and optimization of thrust force and surface roughness in high-speed drilling of Al-Si alloy*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227(6), 808–820, 2013
- [15] Machinability Data Center. *Machining Data Handbook*. Metcut Research Associates Inc., Third edition, Cincinnati, United States of America, 1980.



## MODOS DE FALLAS EN BOMBAS CENTRIFUGAS Y SU INCIDENCIA EN EL MANTENIMIENTO

Orlando Aníbal AUDISIO<sup>1</sup> Carlos Alberto KATCOFF<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional del Comahue (UNCo) - Fac. de Ingeniería  
Dpto. de Mecánica Aplicada – Lab. de Maquinas Hidráulicas (LA.M.HI.)  
Calle Buenos Aires 1400 – C.P. Q8300BSX Neuquén Capital, Patagonia Argentina  
correo-e: orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Río Negro (UNRN)  
Escuela de Producción, Tecnología y Medio Ambiente  
Sede Alto Valle Ciudad de Allen  
Calle Einstein y Salk – C.P. 8328 Allen-Río Negro-Patagonia Argentina  
correo-e: ckatcoff@hotmail.com

### RESUMEN

Las bombas de tipo centrífugas (BC) son los equipos más utilizados en el mundo y tienen una amplia gama de aplicaciones, desde las industrias de procesos hasta el transporte de agua de todo tipo. Los problemas que surgen dentro de estas máquinas rotativas inciden de manera directa en la disminución del flujo del fluido dentro de las tuberías, interrumpiendo así la producción y el transporte del mismo a su destino, provocando que otras partes del sistema de proceso se ralenticen o se comporten de forma indeseable. Como resultado, es imperativo que estas bombas sean monitoreadas, diagnosticadas, mantenidas o reemplazadas correctamente y enmarcado dentro de normativas vigentes como ser API 697, antes de que la bomba falle de manera funcional (catastróficamente) para reducir el tiempo de inactividad, el costo de materiales y los costos de mano de obra. Este trabajo hace una revisión de los principales modos de falla que se encuentran en las BC, especialmente en la industria del transporte de fluidos. Se hace hincapié en la naturaleza de las fallas, sus síntomas los cuales podrían ser utilizados para la detección y el diagnóstico de fallas específicas, y cualquier procedimiento correctivo mecánico que exista para ayudar a aliviar el problema. Además, el trabajo presenta comparaciones y referencias de trabajos publicados que han intentado diagnosticar los modos de falla en las BC.

Este trabajo se ha basado, principalmente, en los trabajos publicado por K. McKee, Empresa SKF, y Efficient Plant (<https://www.efficientplantmag.com>), acoplados a bibliografía básica del tema y a experiencia personal laboral privada en practicas predictivas.

**Palabras Claves:** Bombas Centrifugas; Modos de fallas; Mantenimiento Predictivo; Monitoreo;



## 1 INTRODUCCION

Las bombas y sus sistemas son esenciales en distintos tipos de industrias en el transporte de cualquier tipo de fluido. Las BC fallan como resultado de problemas que surgen en el fluido mismo o por cuestiones operativas y/o mecánicas. Los sensores de monitoreo de condición son adecuados para aplicaciones en las que la bomba está operando en entornos inaccesibles. En este contexto, los fabricantes de BC proporcionan a ciertos equipos sensores integrados a los mismos; sin embargo, la interpretación y el análisis de estos datos por parte del usuario final, no se están utilizando en todo su potencial.

Las fallas en que incurre una BC resultan en cambios en la etapa de explotación que reducen la eficiencia y/o van a un fallo funcional de la misma. Los problemas que en su mayoría se abordarán en el presente trabajo, son los que se enumeran en la Figura 1, los cuales están estrechamente vinculados al mantenimiento de estos equipos. Cada tipo de fallo, se lo abordará en sus causas y efectos, síntomas y procedimientos correctivos pertinentes.



Figura 1: Distintos tipos de fallas en BC

## 2 FALLAS HIDRAULICAS

Estas fallas tienen incidencia directa en fluctuaciones de “presión”, en voluta y/o en tuberías, debido a cambios en temperatura, velocidad del flujo de fluido y caudal volumétrico.

### 2.1 Cavitación

La cavitación es el resultado de una reducción en la presión de succión. Una BC generalmente opera dentro del rango del 85% al 110% de su punto de mejor eficiencia (BEP), sin embargo, muchas bombas se ven forzadas a operar fuera de este rango [1, 2, 3]. Como resultado, los diseñadores hacen todo lo posible para garantizar que las burbujas de cavitación no colapsen en la bomba, sino en el sistema de tuberías principal, lejos de los alabes del impulsor. Como causales de cavitación podemos mencionar: alto y bajo caudal; disminución de presión en succión; aumento de temperatura en succión y voluta; inestabilidad del flujo en la BC; mala distribución de caudales en sistemas en paralelo; bombas sobredimensionadas, etc..



También se forman cavidades entre el fluido y las partes vibrantes de la bomba que están en contacto con el fluido. Alto porcentaje del flujo de fuga conduce a aumentos de la temperatura en el ojo del impulsor, lo que ocasiona puntos de cavitación localizado [1, 2].

El *daño* por cavitación en la BC está vinculado a cuatro síntomas: Erosión, Ruidos, Vibraciones y Disminución de Rendimientos [2].

- a) *Erosión*: La tasa de erosión aumentan en un factor de 4 cuando la capacidad se eleva del 100% al 120% del flujo sin choque. [4, 5].
- b) *Ruido*: Similar al ruido que hace el fluido cuando arrastra gravas y se originan ruidos de banda ancha, con baja amplitud, en rango de 2 kHz a 40 kHz. La cavitación aguas abajo del alabe es más ruidosa; aparece en frecuencias de 20 kHz a 40 kHz.-
- c) *Vibración* - Las vibraciones de la BC debidas a cavitación son característicamente de alta amplitud y baja frecuencia, generalmente dentro del rango de 0 a 10 Hz [4].
- d) *Reducción de eficiencia de bombeo* - Las burbujas originadas en canales del impulsor impiden el flujo de fluido, reduciendo el mismo. La caída del rendimiento es evidencia de cavitación, ya que el ruido no es prominente hasta que la cavitación plena y el punto de rendimiento de la BC es muy baja. [3, 6].

Procedimientos correctivos: Reemplazar impulsor por otro de material más resistente a la cavitación (acero inoxidable); reducir el caudal hasta que NPSH requerido ( $NPSH_R$ ) sea menor que el disponible ( $NPSH_A$ ); rediseñar la geometría del impulsor, mejorar características del flujo o aumentar sección de paso para disminuir la velocidad a la entrada al impulsor; estrangular la descarga de la BC; colocar inductor; inyectar aire en succión de la BC, etc. [1,3, 7].

## 2.2 Pulsaciones de Presiones

Son de consideración en BC multi-etapas (mayores a 300 mca). Las pulsaciones de presión en succión y descarga causan inestabilidad de los controles de la bomba, vibración en tuberías y altos niveles de ruidos, y potencian la aparición de fallas por fatiga [1,2,3]. La magnitud y frecuencia de estas pulsaciones dependen de factores tales como: diseño de la BC, altura total de la BC, respuesta de las tuberías de succión y descarga, y punto de operación en la curva H vs. Q de la BC. Las frecuencias características en succión son del orden de 5 a 25 ciclos/s, y no tienen una relación directa con la velocidad de rotación o frecuencia de paso de los alabes [3].

## 2.3 Esfuerzos Radiales (ER)

Un alto ER, provoca flexiones en el árbol, y conlleva problemas en el sistema de sellos de la BC, y fallas en tramos medios del mismo. Los ER también producen altas temperaturas en

cojinetes. La mayoría de las fallas que resultan de un alto ER se manifiestan cuando la BC está operando a bajos caudales [1,3,5,8].

Transmisiones por correa y acoplamientos flexibles también ejercen fuerza sobre el eje de la BC. Las fuerzas resultantes de los acoplamientos flexibles se minimizan con una mejor alineación del eje de la BC con el motor de accionamiento.

SKF realizó ensayos para determinar la influencia de los orificios de equilibrio en la magnitud de los ER y los axiales (EA) de la BC [Ver Figura 2]. La magnitud y dirección de la carga axial pueden cambiar respecto al valor de diseño si la holgura del alabe de la BC varía por el desgaste o no se ajusta dentro de la tolerancia y si los orificios de equilibrio se tapan con desechos. La carga axial en BC con impulsor de doble succión está equilibrada, excepto por un posible desequilibrio en el flujo de fluido a través de las dos mitades del impulsor.

En las bombas de etapas múltiples, los impulsores se colocan en tándem y espalda con espalda para equilibrar la carga axial.

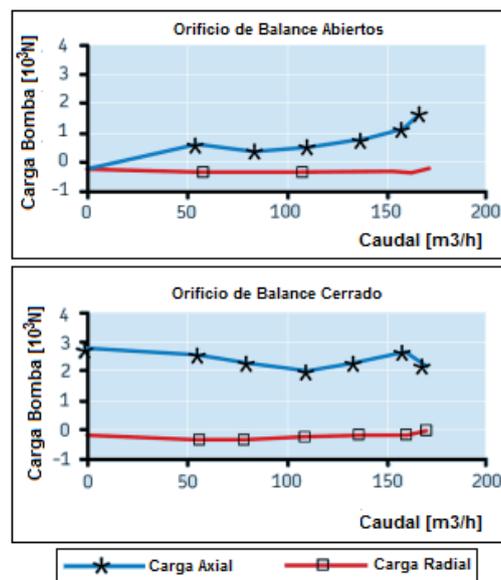


Figura 2: Variación Esfuerzo radial y Axial en la BC [8]

## 2.4 Esfuerzos Axiales (EA)

El EA se presenta a lo largo del árbol, y es el resultado de una componente cíclica dinámica, superpuesta a una carga estática. Las cargas dinámicas dan origen a elevadas tensiones y fatiga en el metal. La carga estática provoca altas cargas en cojinetes y sellos, aumentando temperatura y reduciendo vida útil de los mismos. La mayoría de las fallas de los rodamientos son fatiga provocadas por EA cíclicos dinámicos [7,8].



La falla del árbol se debe principalmente a la alta carga cíclica inducida en el mismo cuando la bomba recircula parcialmente su caudal. En este caso, las tensiones cíclicas axiales se pueden reducir aumentando la descarga de la bomba o instalando una línea de recirculación para desviar el flujo y así alejar el caudal total de la bomba del punto crítico. Si esto no es posible, las fallas en el árbol se pueden reducir seleccionando un material de mayor resistencia [1,8].

Dependiendo de la ubicación del EA, se utiliza diferente instrumentación para determinar su magnitud, tales como sensores de proximidad para inferir el movimiento axial del árbol. Finalmente, el EA del tipo de cojinete de empuje de zapata basculante puede ser monitoreada por una celda de carga instalada permanentemente en la placa balanceadora [9,10].

## 2.5 Recirculación de succión y descarga

La recirculación, generalmente, aparece a caudales bajos, y *es inevitable en todos los diseños de impulsores*. La recirculación de descarga se puede reducir con el diseño, pero esto daría como resultado una disminución en el rendimiento nominal de la BC. La recirculación de succión también se puede reducir, lo que trae aparejado a un aumento de  $NPSH_R$ . La recirculación se mitiga no excediendo ciertas velocidades específicas de succión [9]. La recirculación en línea de succión, produce fuertes crujidos y/o ruidos los cuales tienen una intensidad mayor al de cavitación, y se caracteriza por golpes aleatorios [1,2].

Para corregir la recirculación en el sistema, se sugieren los siguientes pasos: aumentar el flujo de salida de la bomba; instalar bypass entre descarga y succión de la BC; sustituir el impulsor por un material más resistente a daños por cavitación; aumentar la capacidad de salida de la BC; o modificar el diseño del impulsor [3,6].

## 3 FALLAS MECANICAS

Estas fallas tienen incidencia en distintos componentes de la BC y repercute, principalmente, en los requerimientos de potencias de parte del equipo.

### 3.1 Fallas en Cojinetes

Los cojinetes generalmente, entran en fallo por lubricación y/o contaminación del aceite, por temperatura causada por sobrecargas en los mismos, o por lubricación excesiva; fallas que pueden activar causas funcionales [8].

La sobrecarga en rodamientos es el resultado de diversas condiciones operativas: desbalanceo; eje flexionado; orificios de equilibrio en impulsor bloqueados; cavitación; altos EA



y ER causada por bajos caudales o falla mecánica dentro de la bomba; calentamiento excesivo de los cojinetes; Enfriamiento inadecuado en cojinetes; huelgos en anillos de desgastes fuera de tolerancias admisibles; desalineación entre la BC y Motor; BC operando lejos del punto BEP (altos ER en impulsor); tuberías ejerciendo tensión; accionamientos de bombas por correas; impulsar fluidos de alta densidad específica (ácido sulfúrico), que llega a duplicar el EA y ER en el rodamiento; oxidación de cojinetes antifricción; expansión térmica del eje mayor que la expansión térmica del rodamiento; impulsor emplazado muy lejos de los rodamientos; ajuste de interferencia incorrecto entre cojinete y eje (el eje estaba fuera de tolerancia y los cojinetes estaban demasiado apretados); tener frecuencia de paso de las paletas coincidente con la resonancia del conjunto de BC; o producir golpes de ariete en las líneas [8].

### 3.2 Fallas en sellos

La operación en seco de la BC conlleva a fallas en sellos mecánicos. Muchas aplicaciones se protegen utilizando sellos mecánicos duales presurizados, que pueden permanecer lubricados durante largos períodos de operación en seco. Una BC con sello de empaquetadura lubricada con fuente externa sobrevivirá mejor al funcionamiento en seco, pero en prolongados tiempos de operación, terminan colapsando.

Los sellos mecánicos, en general, fallan por dos razones: las pistas en contacto se abren o una de ellas presenta daños superficiales. Cuando se abre una cara de sellado, permite que los sólidos penetren entre ambas superficies; los sólidos se incrustan en la cara más blanda de carbono/grafito, que provoca un desgaste acelerado en la cara de mayor dureza. Este tipo de falla explica la mayoría de las fallas de los sellos mecánicos.

### 3.3 Fallas en lubricación

Es la causa de falla predominante en cojinetes. La sobrecarga en cojinetes genera excesivo calor en los mismos. El aumento de temperatura lleva a una disminución en la viscosidad del lubricante, y consecuentemente a la generación de más calor a medida que pierde su capacidad para soportar la carga. Se forma un residuo de barniz que luego se coquea a temperatura elevada. Esta coquización rompe la capacidad del aceite o la grasa para lubricar el rodamiento, además de introducir partículas sólidas en el lubricante [6]. La termografía infrarroja se puede utilizar para determinar si el rodamiento está sobrecargado por la cantidad de calor que se produce [1,3,7].

### 3.4 Vibraciones Excesivas



Los niveles de aceptabilidad en vibraciones están normalizados por la ISO 10816, con amplitud superior a 2,80 mm/s para máquinas pequeñas, 4,50 mm/s para máquinas medianas, 7,10 mm/s para grandes máquinas con fundaciones rígidas, y 11,2 mm/s para máquinas grandes con fundaciones flexibles.

Las vibraciones son el resultado de numerosas razones que las pueden provocar como desbalanceo del impulsor, desequilibrios hidráulicos, fallas en cojinetes, movimiento en fundaciones o bancadas, excentricidad de componentes, cavitación, y excitación hidráulica.

El desbalanceo del impulsor generalmente aparece como una vibración de frecuencia de velocidad de funcionamiento de 1x, y puede ser el resultado de un problema mecánico, como un sello mecánico o falla del cojinete, o un problema hidráulico. Los ejes también producen vibraciones no deseadas debido a un desequilibrio de masa o un arco natural en el eje. Los desequilibrios de masa y los arcos producen una frecuencia de velocidad de funcionamiento de 1x, dependiendo de si solo hay un defecto en el eje. El desequilibrio hidráulico se debe principalmente a una distribución desigual del flujo dentro de todos los pasos de las paletas, lo que provoca una vibración de frecuencia de velocidad de funcionamiento de 1x. Se ha encontrado que el aumento de la  $NPSH_A$  ayuda bajar el nivel de oscilaciones [4].

Varios autores han publicado frecuencias de vibración que se pueden encontrar en una BC y las posibles causas de cada vibración. Además, publicó una tabla que contiene las etapas de degradación de rodamientos y las vibraciones asociadas con cada etapa.[1,10]

### 3.5 Fatiga

Las BC son máquinas que intercambian energía con un fluido e inducen cargas cíclicas en sus componentes. Aunque las bombas centrífugas son principalmente equipos rotativos de estado estacionario, se encuentran aplicadas pulsaciones o tensiones fluctuantes. La fuente de estas tensiones cíclicas puede ser la interacción del fluido con los alabes del impulsor y del difusor. Las fuerzas inducidas mecánicamente son el resultado de los momentos de flexión que actúan sobre el eje de la bomba o un desequilibrio de un componente en el conjunto del rotor.

Una vez que se ha identificado la causa de la falla por fatiga, es factible adoptar acciones correctivas para cada problema. Estas acciones pueden incluir: utilizar materiales resistentes a la fatiga, modificar el diseño de la BC, tratar la superficie afectada o utilizar materiales más resistentes a la corrosión [3,5,6,8].

## 4 OTROS MODOS DE FALLAS



Hay algunos modos de falla que no entran en las categorías de problemas hidráulicos o mecánicos. Estos modos de falla son a veces estructurales, como en el caso de la erosión y corrosión, o son el resultado de una multitud de fuentes diferentes, como en el caso de un consumo excesivo de energía.

#### 4.1 Erosión

La erosión en las BC adopta una de las cinco formas: *erosión por cavitación*, *desgaste adhesivo*, *rozamiento*, *desgaste abrasivo*, y *erosión por impacto de partículas sólidas* [11]. El desgaste adhesivo es un desgaste por deslizamiento y es factible de abordar este tema de manera teórica la cual ofrecer una ecuación de desgaste general que cuantifica la predicción del mismo[4].

El desgaste abrasivo es el principal mecanismo de daño en las BC. Ocurre cuando las partículas sólidas en el fluido bombeado, ingresan al huelgo entre anillos de desgaste o en el chavetero del impulsor. Para minimizar este efecto, se deben tener en cuenta la tolerancia de los huelgos.

La velocidad de las partículas es importante en el nivel de daño en una BC. La bomba da energía cinética a la partícula arrastrada que, al chocar contra una superficie dura, erosiona el material. El rasgo característico del daño [Ver Foto 1] por erosión debido a las partículas sólidas que golpean la bomba suele ser reconocible; sin embargo, a veces se confunde con corrosión-erosión o viceversa.



Foto 1: Aspecto de la erosión por desgaste de partículas sólidas

#### 4.2 Corrosión

Corrosión es la alteración química de un material. Esta se manifiesta en diferentes formas: corrosión general, desaleación, corrosión galvánica, agrietamiento bajo tensión, fragilización por hidrógeno, corrosión inducida microbiológicamente, y corrosión intergranular.



Las BC fabricadas con aceros al carbono, hierro fundido o aleaciones de cobre experimentan corrosión. El acero al carbono, no desarrolla una película protectora de óxido y se corroe a una velocidad que depende de la temperatura, el contenido de oxígeno, el pH, el tipo de fluido y la velocidad del fluido. Para la mayoría de las aplicaciones en bombas, la tasa de corrosión es demasiado alta para que este material proporcione una vida útil prolongada, entonces se aplica una forma de revestimiento protector sobre el acero para evitar la corrosión [Ver Foto 2].



Foto 2: Aspecto de la corrosión en carcasa de BC

*Desaleación*, es la eliminación de una fase de una aleación multifásica o un elemento de un material. El caso más común en BC es la corrosión grafitica de la fundición gris [3].

*Corrosión Galvánica* ocurre cuando una aleación se acopla eléctricamente a otra y se expone en un líquido conductor. Varios factores afectan la tasa de corrosión galvánica, como la conductividad del fluido; la relación de área de los metales acoplados; potenciales negativos de los metales; y el uso de revestimientos para dificultar el proceso de corrosión galvánica [1,4].

*Agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC)*. Es peligrosa ya que no se detecta hasta que ha avanzado a una etapa que puede causar fallas catastróficas. Los factores que ayudan al SCC incluyen la tensión de tracción (residual o aplicada), un material susceptible, un entorno capaz de causar corrosión por tensión y el tiempo [1].

*Fragilización por Hidrógeno* resulta en agrietamiento, formación de ampollas, hidrolización o pérdida de ductilidad. El daño causado por la fragilización por hidrógeno se encuentra ocasionalmente en las BC con estructuras cromadas [1].

#### 4.3 Excesivo consume de potencia

El alto consumo de energía en BC es un indicador de diversas fallas; el principal origen es el desgaste, ya que los huelgos aumentan gradualmente llevando a la BC a una pérdida de rendimiento volumétrico, consecuentemente, esto lleva requerir más potencia del motor, lo que

implica un principio de falla potencial que, de no actuar, puede llevar a una funcional en la BC [3,8].

Otras causas: alta velocidad de rotación; empaquetadura muy ajustada; fluido impulsado con viscosidad mayor a la de diseño de la bomba; desalineación; impulsor rozando con carcasa; impulsor girando en dirección incorrecta; impulsor emplazado en reverso [5,6]; aire atrapado en interior de la bomba; fugas importante en línea de aspiración de la BC; la bomba impulsando un caudal más alto que su nominal; anillos de desgaste en impulsor con huelgo fuera de tolerancia; impulsor dañado; obstrucción mecánica en componentes internos de la BC; tubería ejerciendo presión sobre la bomba [1]. Los procedimientos correctivos para eliminar causas del alto consumo de energía incluyen: seguimiento periódico de la posición de la válvula de control del caudal; Registro periódico de Amperaje y Tensión del motor; medición periódica de altura de la BC; reparar fugas existentes; reducir velocidad del impulsor; restaurar huelgos a tolerancias admisibles; desmontar la bomba y renovar el impulsor, verificar huelgos y ajustar según sea necesario. Por la cantidad de fallas que causan un consumo de energía excesivo, para tener un diagnóstico correcto de la falla subyacente, se necesita relevar una variedad de datos basados en condiciones, desde información de proceso hasta mediciones de temperatura y vibración.

#### 4.4 Bloqueos

Los atascamientos pueden ser un modo de falla importante de las BC; existe poca evidencia en la literatura sobre estas fallas. El fluido bombeado contiene materiales sueltos que se alojan en el impulsor para obstaculizar y posiblemente detener la rotación del impulsor, o que obstruyen los pasajes entre las paletas del mismo, disminuyendo el caudal. Los procedimientos correctivos implican detener la bomba, retirar los objetos responsables del bloqueo [Ver Figura 3].



Foto 3: Aspecto de Bloqueo en Impulsor de BC

#### 4.4 Procedimiento API 697 Pump Repair

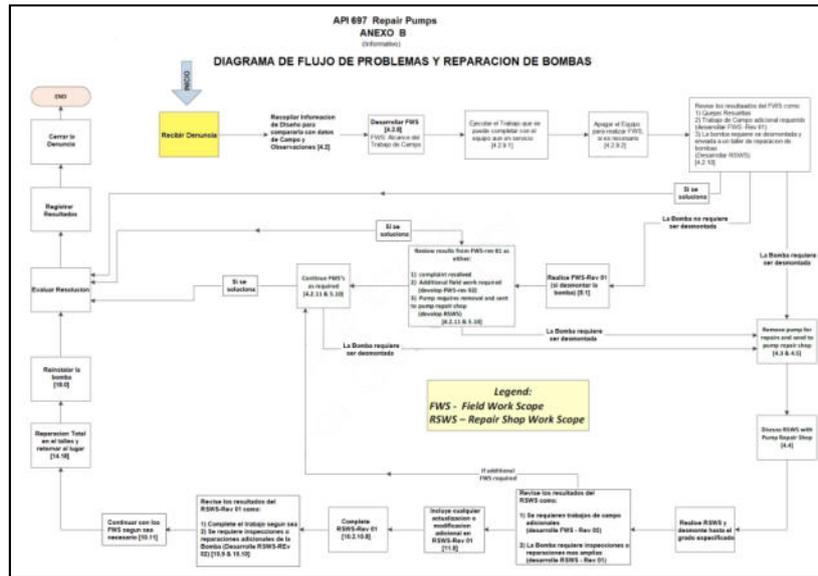


Figura 3: Diagrama de Flujo de Problemas y reparaciones de Bombas-API RP 697

## 6 CONCLUSIONES

Se ha presentado una revisión de las principales fallas que afectan a las BC. Se incluyeron a partir de la Norma API RP 697 Pump Repair-First Edition, del Manual de Datos OREDA Vol I y II (Offshore Reliability Data) y de la Norma ISO 14224, varios temas relacionados con cada tipo de falla, sus causas y efectos, síntomas, procedimientos correctivos mecánicos, etc.. Se dan detalles de los síntomas que un ingeniero podría utilizar para diagnosticar la falla, ya sea mediante inspección visual, de audio o vibración. Se hicieron comentarios respecto a las industrias donde este tipo de información, ampliamente conocida, no se utiliza en la medida en que debería ser a través Monitoreo de Condición (CBM) [7,9,10,11], y software para interpretar la información (post-procesamiento). A futuro, se busca alcanzar un sistema integrado de monitoreo de condición y administración de fiabilidad de activos para BC y estaciones de bombeo capaz de alertar a los operadores de fallas potenciales con una elasticidad temporal suficiente de modo que permita reducir costos de mantenimiento, mejora en la disponibilidad de equipos y prevenir daños significativos a la infraestructura al eliminar fallas funcionales.

## AGRADECIMIENTOS

Trabajo enmarcado en el Proyecto de Investigación **04/I-268 - Estudio y desarrollo de turbomáquinas y sistemas asociados aplicados a pequeñas fuentes de energía renovable II.-**



## REFERENCIAS

- [1] McKee, Kristoffer K. et al, A review of major centrifugal pumps failure modes with application to the water supply and sewerage industries. (2011) - ISSN 1329-7198
- [2] Karassik, Igor J., J. P. Messina, P. Cooper, and C. C. Heald, *Pump Handbook (3rd Edition)*. New York: McGrawHill, 2001.
- [3] Karassik, Igor J. - Centrifugal Pump Clinic - ISBN 0-8247-8072-8
- [4] Binamaa, M., Muhirwaa, A.; Bisengimanac, E. - Cavitation Effects in Centrifugal Pumps- A Review - Binama Maxime.Int. Journal of Engineering Research and Applications ISSN: 2248-9622, Vol. 6, Issue 5, (Part - 1) May 2016, pp.52-63
- [5] A. J. Stepanoff, *Centrifugal and axial flow pumps: theory, design and application*. New York: Wiley, 1957.
- [6] I. Karassik and J. T. McGuire, *Centrifugal pumps*. New York: Chapman & Hall, 1998.
- [7] R. S. Beebe, *Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring*. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2004.
- [8] SKF Bearing in Centrifugal pumps-Application Handbook (2012) SKF USa Inc. Failure Analysis of Machine ShaftsS. Shiels, "Optimizing centrifugal pump operation," *World pumps*, vol. 2001, pp. 35-39, 2001.
- [9] API 697 Recommended Practice (RP), Pump Repair (2019)
- [10] ISO 14224- Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment
- [11] OREDA 2015 -offshore and Onshore Reliability Data 6th Edition Vol.2



## PROYECTO DE UN NUEVO SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIONES

Fernando Palmieri<sup>1</sup>, Darío Violante<sup>1</sup>, Andreas Klemnow<sup>2</sup> y Wadi Chiapparoli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Vibraciones Mecánicas – UTN Facultad Regional San Nicolás  
Colon 332, San Nicolás, Buenos Aries, Argentina- fpalmieri@frsn.utn.edu.ar

<sup>2</sup> Grupo de Vibraciones Mecánicas – UTN Facultad Regional Delta  
San Martín 1175, Campana, Buenos Aires, Argentina- andreas.klemnow@gmail.com

### RESUMEN

El mantenimiento basado en la condición mediante el análisis de vibraciones, se ha generalizado en el ámbito industrial, gracias a la gran capacidad de procesamiento digital de los analizadores, que han evolucionado considerablemente desde los primeros años de su aplicación industrial. Actualmente, las técnicas convencionales de procesamiento para el análisis de señales de vibración (gráficas amplitud - tiempo, promediado temporal, transformada rápida de Fourier, envolvente en frecuencias, etc.), están incorporadas en analizadores comerciales de amplia difusión, que generalmente se emplean para elaborar rutinas de medición para mantenimiento basado en la condición.

No obstante, existen otras técnicas de tratamiento de señales de vibraciones en desarrollo (como el análisis de transformadas Wavelet o de transformada de Hilbert-Huang, Spectrum and Cepstrum, etc.) que normalmente no están disponibles en los equipos comerciales. Además, estos equipos generalmente son de un número reducido de canales y con poca capacidad de adaptarse a distintas configuraciones de sensores.

Es por ello que en este trabajo se presenta el proyecto para desarrollar un nuevo sistema de adquisición de datos multicanal para el análisis de dinámica de rotores que permita incorporar las herramientas más actuales de análisis de señales y detección de fallas, para los futuros estudios del grupo de vibraciones de la Facultad Regional San Nicolás. Se fundamenta la selección del hardware para su concreción y se presentan los primeros avances en el desarrollo del sistema.

Durante la primera etapa del proyecto se analizó el uso de placas comerciales dedicadas versus placas de desarrollo con procesadores programables con capacidad de procesamiento de señal. A sí mismo, se inició el desarrollo de la interfaz de análisis de vibración en un entorno de programación destinado a objetos. Se espera en el corto plazo contar con una versión funcional del sistema para validación experimental.

**Palabras clave:** Medición de vibraciones; Análisis de Señales; Sistema de adquisición



## 1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de convertir la energía en trabajo útil o viceversa, todas las máquinas vibran y rara vez se rompen sin dar alguna advertencia previa. Los signos de falla generalmente están presentes mucho antes de que la máquina se averíe por completo. Cuando las fallas comienzan a desarrollarse, también se modifican algunos de los aspectos dinámicos en la máquina, lo que afecta el nivel o la forma de las vibraciones de la misma. Tales cambios pueden servir para la identificación de fallas en desarrollo.

El mantenimiento basado en la condición mediante el análisis de vibraciones, se ha generalizado desde ya hace unos años en el ámbito fabril. Esto se ha debido principalmente a la gran capacidad de procesamiento digital de los analizadores comerciales disponibles en el mercado. Hoy en día, mediante el uso de mediciones in situ de las características del movimiento vibratorio de un sistema mecánico y su posterior análisis, se pueden detectar cambios que permiten identificar desperfectos o degradación.

Actualmente las técnicas convencionales de procesamiento para el análisis de señales de vibración como son las gráficas amplitud - tiempo, las técnicas de promediado temporal, la gráfica de espectro en frecuencias lograda por la transformada rápida de Fourier FFT y las técnicas de demodulación o envolvente en frecuencias están disponibles en la mayoría de los equipos de uno canal de medición. Además, existen otros que tienen 2, 3 o 4 canales de medición y permiten el trazado de orbitas, la determinación de fases, etc.

Existen otras técnicas de tratamiento de señales de vibraciones en desarrollo, como el análisis de transformadas Wavelet o de transformada de Hilbert-Huang, Spectrum and Cepstrum, la descomposición modal y las técnicas de detección automática, que normalmente no están disponibles en los equipos comerciales y pueden ser de gran utilidad para el estudio de problemas de dinámica de rotores en forma experimental o para analizar equipos industriales, donde las técnicas provistas en los sistemas comerciales no pueden dar una adecuada solución. Finalmente, como ya se ha mencionado los equipos comerciales que se emplean para elaborar rutinas de mantenimiento basado en la condición son de un número reducido de canales, uno o dos de medición más uno de fase, y con poca capacidad de adaptarse a distintas configuraciones o sensores. Es por ello que en aplicaciones de laboratorio o investigación es necesario desarrollar un sistema de adquisición de datos de "arquitectura abierta" que permita incorporar las herramientas más actuales de análisis de señales y detección de fallas para avanzar en el desarrollo de nuevas técnicas.

En este trabajo se describe el proyecto de un nuevo sistema de adquisición de datos multicanal para el análisis de vibraciones que debe ser adecuado a problemas de dinámica de rotores y permitir la incorporación de las herramientas más actuales de análisis de señales y detección de



fallas. El mismo será usado en los futuros estudios del grupo de vibraciones de la Facultad Regional San Nicolás.

## 2. ESTADO ACTUAL DEL ANALISIS DE VIBRACIONES

El análisis de vibraciones para el mantenimiento basado en la condición centra su desarrollo, a nivel industrial, en el uso de técnicas de tratamiento y representación de magnitudes medidas (vibraciones, por ejemplo) mediante algún dispositivo que transforma una característica de movimiento en una señal electrónica. Las dos formas principales de presentar esas señales en los equipos comerciales de análisis de vibraciones son: la representación de valor medido en el dominio del tiempo o en el dominio de las frecuencias. Esto permite obtener las gráficas llamadas de señal temporal y de espectro en frecuencias, respectivamente. Algunos equipos cuentan con alguna técnica extra de procesamiento como la envolvente en frecuencia.

Los primeros trabajos acerca del diagnóstico de vibraciones mediante análisis espectral se publicaron a principios de los 60 (Blackman y Tukey [1]) y no hubo demasiados avances en la primera parte de la década, principalmente debido al costo de los equipos de análisis. El desarrollo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) en 1965 (Cooley y Tukey [2]), permitió la construcción de analizadores espectrales comerciales en tiempo real, y, a medida que el uso de estos analizadores se hizo más generalizado, varios autores comenzaron a estudiar las características de las vibraciones de varias fallas típicas de máquina y cómo se podrían diagnosticar utilizando análisis espectral (Laszlo Boros y col. [3], Downham y Woods [4], Swansson [5], Braun [6] y Randall [7]). Sin embargo, incluso con el uso del análisis espectral, el diagnóstico de fallas utilizando la señal temporal, es aún un problema relativamente complejo y requiere habilidades especializadas.

Hasta fines de la década de 1980, el análisis de vibraciones de la máquina se basaba en la representación de la señal de vibración en el dominio de tiempo o frecuencia (espectro). No obstante, desde ese entonces hasta nuestros días han sido desarrolladas técnicas más avanzadas, algunas con el propósito de hacer más sencilla la interpretación de las señales medidas y la tarea del analista, a la hora de determinar a qué defecto o condición de la máquina corresponde la señal de vibración medida; otras con el propósito de mejorar la detección a partir de considerar nuevas formas de obtener la señal o procesarla.

Desde entonces se ha trabajado en el desarrollo de distintas técnicas, que se pueden agrupar siguiendo la clasificación propuesta por Asilturk y sus colaboradores [8] en:

- 1- Técnicas en el dominio del tiempo;
- 2- Técnicas en el dominio de la frecuencia o técnicas espectrales: como son la transformada rápida de Fourier, el método de la transformada de Hilbert y el análisis Power Cepstrum;



3- Técnicas que conjugan tiempo frecuencia, como la transformada de Fourier de corto período de tiempo, la distribución de Winger-Ville y la transformada Wavelet.

4- Técnicas de promediado sincrónico.

Algunos trabajos recientes muestran resultados prometedores en el uso de técnicas basadas en la transformada de Hilbert - Huang [9-10] y de la transformada Wavelet [11- 14] para el monitoreo de rodamientos y engranajes y máquinas rotantes.

Ya en los últimos años, diversos autores [15-17] coinciden en agrupar a las técnicas en 3 categorías:

1- Técnicas del dominio del tiempo, como valor RMS, valor de pico, factor de cresta y método de Kurtosis.

2- Técnicas del dominio de las frecuencias como la transformada rápida de Fourier, la envolvente en frecuencias, el Cepstrum y el Spectrum.

3 – Técnicas del dominio tiempo – frecuencia, como la transformada Wavelet WT, la transformada discreta wavelet WVD, la densidad de potencia espectral o PSD, la transformada de Hilbert – Huang o la transformada de Fourier de corto tiempo STFT.

Algunos estudios recientes han concentrado los esfuerzos en técnicas de análisis que permitan visualizar de manera temprana los fenómenos transitorios, correspondientes a las primeras instancias de fallas en rodamientos, aplicando técnicas de la transformada de Fourier de corto tiempo [18] y han demostrado su utilidad. A sí mismo, otros estudios recientes [19] analizan variantes de la transformada de Fourier para obtener un espectrograma en colores que muestra resultados superadores. No obstante, muchas de estas técnicas aún no están disponibles en los instrumentos de uso industrial y tampoco están muy desarrolladas en el ámbito académico en el país.

Además de la evolución de las técnicas de análisis de vibraciones, también se han ido desarrollando herramientas de diagnóstico de fallas basado en el modelo. El diagnóstico de fallas basado en el modelo consiste en estimar o predecir variables del proceso a partir la correlación del comportamiento de las mediciones con datos obtenidos de un modelo confiable del proceso, ya sea matemático o basado en señales [20]. Ya en 1994, Isermann [21] analizaba la importancia de los modelos realistas para esta técnica y sus principios de aplicación, que más tarde [22] ampliaría y ejemplificaría para problemas de transmisiones de vehículos, de dirección de vehículos y de motores de combustión.

Paralelamente, aparecen trabajos en el campo de máquinas rotantes como el de Loparo y colaboradores [23] donde se describen métodos para análisis de fallas de rotores basados en modelos para cojinetes y rodamientos, generando un filtro de detección de fallas. Marckert y col.



[24] emplean un ajuste por mínimos cuadrados para identificar la falla a partir de la correlación entre señal medida y señal obtenida del modelo para el caso de desbalance de rotores simples y logran identificar la posición de la falla y sus características. También Sekhar [25] emplea un ajuste de mínimos cuadrados para identificar fallas de fisuras en rotores. Más recientemente y para un rotor muy sencillo Jalan y Mohanty [26] usan la misma técnica para identificar desbalance, desalineación y fisuras en ejes con buenos resultados.

También se emplean redes neuronales como herramienta de identificación en lugar de un ajuste y en el trabajo de Zarei y sus colaboradores [27] se presenta un método basado en una red neural artificial para identificar fallas en rodamientos de motores eléctricos. En este sentido Aherwar [28] en su revisión menciona que entre las técnicas que se usan para identificar fallas en engranajes se encuentran además de las redes neuronales, los sistemas expertos, las técnicas basadas en modelos y las que usan la lógica Fuzzy. Actualmente, existen muchos estudios que trabajan técnicas de detección de fallas a partir de señales obtenidas de modelos y de condiciones normales, con redes neuronales [29-30]

Por último, Mohamad Hazwan Mohd Ghazali y Wan Rahiman [17] analizan las técnicas de monitoreo y diagnóstico presentadas en más de 100 artículos y realizan una interesante revisión de cómo estas técnicas se complementan con otras de detección automática basadas en inteligencia artificial, lógica difusa y algoritmos genéticos. Dichos autores concluyen, además, que las técnicas del dominio del tiempo y frecuencias son las más adecuadas para análisis de problemas estacionarios y las de dominio tiempo frecuencia para problemas transitorios, además que el uso de sistemas basados en computadoras revisten en el futuro mejores perspectivas de desarrollo que los analizadores independientes.

A pesar del desarrollo que están teniendo a nivel mundial todas estas técnicas, todavía, la mayoría no están disponibles dentro de las herramientas comerciales que tienen los analistas de vibraciones en el ámbito industrial nacional.

### 3. SISTEMA DISPONIBLE

Actualmente el laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Facultad Regional San Nicolás cuenta con un sistema de adquisición desarrollado hace más de 15 años por la Facultad Regional Delta y la empresa KPS S.A. Este sistema está basado en una PC de escritorio (Figura 1) que tiene una placa adquisidora de datos National Instruments NI PCI 6013 de 16 bits de resolución, 16 canales analógicos con cuatro ganancias configurables y una frecuencia de muestreo de 200.000 muestras por segundo. Como adecuación se cuenta con un sistema de filtros analógicos de ocho canales con filtros configurables vía puerto serie y dos canales más para disparos digitales.



Este sistema presenta el inconveniente de que el principal componente, la placa adquisidora, ya no tiene soporte por parte de su fabricante, entonces se dificulta la actualización informática. Además no es portátil por estar vinculado a una PC de escritorio. Por último, el software que lo acompaña está desarrollado bajo Pascal con entorno gráfico Delphi y ya no existen tantas librerías y controladores específicos de estos sistemas para las nuevas placas adquisidoras o hardware por no ser los más utilizados para sistemas de adquisición de datos en la actualidad.



Figura 1: Foto del sistema disponible

## 4. ALTERNATIVAS EVALUADAS PARA EL NUEVO SISTEMA

### 4.1 Hardware

Para el nuevo sistema de adquisición se analizó el uso de tres alternativas

Dispositivo multifunción de adquisición de datos similar a la actual pero con conexión USB, se evaluaron alternativas. La primera de marca National Instruments donde se analizaron varios modelos entre ellos el modelo USB-6211, el USB-6212 y el USB-6215. De los tres se eligió el modelo USB-6212, de 400.000 muestras por segundo, 16 bit de resolución, 16 entradas y 2 salidas analógicas, 32 entradas y salidas digitales [31]. La elección fue motivada por la cantidad de salidas y entradas que es similar a la placa disponible.

También se analizó una segunda marca, ADLINK Technology que tiene tres modelos equivalentes llamados USB-1901, USB-1902 y USB-1903. Siendo el modelo USB-1902 de 250.000 muestras por segundo, 16 bit de resolución, 16 entradas y 2 salidas analógicas, 8 entradas y 4 salidas digitales [32], el que más se asemeja a las necesidades del proyecto.

Se consideró además usar una placa de desarrollo electrónica con capacidad de adquisición de datos, se evaluaron varios modelos como la placa Analog Devices EVAL-CED1Z acoplada con el módulo también de Analog Devices EVAL-ADAS3023EDZ que tiene 8 canales con una



resolución de 16bit, con una frecuencia máxima de 125.000 muestras por segundo en cada canal [33-34].

Finalmente se evaluaron placas Arduino entre ellas la placa Arduino Due con microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 que tiene 12 entradas analógicas de 12bit de resolución y una tasa de muestreo teórica de 1.000.000 de muestras por segundo que se reparte en las 12 entradas [35].

En todos los casos la frecuencia de muestreo es adecuada para esta aplicación considerando que para analizar problemas de vibraciones se deben manejar frecuencias de 10kHz. Aun en los dispositivos que usan el multiplexado en todas las entradas analógicas. Las placas de desarrollo tienen más frecuencia de conversión ADC teórica pero no pueden aprovecharse todas las entradas disponibles. Los dispositivos Multifunción evaluados en primera instancia tienen mayor resolución y más canales útiles. Además, tienen escalas de ganancia ajustables por programación que son útiles para reducir la necesidad de adecuación de señal. Finalmente poseen soporte con librerías específicas y probadas para las funciones a usar en este proyecto, en contrapartida son más costosos.

#### 4.2. Software

Para el desarrollo del programa de adquisición se analizó como alternativas los lenguajes: Pascal, Basic, C++ o Python. Además para cada lenguaje se analizó si se tenía acceso a un entorno de programación orientada a objetos.

El lenguaje Pascal ya había sido usado en el desarrollo del sistema original, es conocido pero presenta la desventaja que no tiene soporte en las plataformas de los dispositivos DAQ (Data Acquisition) dedicados de NI y se debe recurrir a librerías que tienen algunos años. Está disponible en entornos gratuitos como Free Pascal pero no cuentan con demasiadas herramientas.

Tanto los lenguajes lenguaje Visual Basic, C++ y Python están disponibles en el entorno de desarrollo Visual Studio gratuito de Microsoft y existen librerías actualizadas para el manejo de los dispositivos Multifunción de adquisición de datos. Python es uno de los lenguajes que se están usando actualmente con frecuencia en aplicaciones industriales de adquisición y manejo de datos, pero no ha sido empleado anteriormente a este trabajo. Por último, tanto Visual Basic como C++ han sido empleados en el pasado para trabajos previos y son las alternativas más viables por conocimientos, disponibilidad de recursos y aptitud.

A partir de ese análisis se elige como plataforma de desarrollo Visual estudio con lenguaje Visual Basic o C++ según las librerías disponibles para el dispositivo de adquisición de datos adquirido.



## 5. ESQUEMA DE SISTEMA SELECCIONADO

El sistema que se pretende desarrollar planea reemplazar el existente, pero además se espera generar un software que permita adecuarse a más de un dispositivo de toma de datos. La cantidad de canales espera poder incrementarse respecto del actual.

La experiencia adquirida con los dispositivos multifunción específicos como el que provee National instruments es muy valiosa, es por ello por lo que se selecciona como primera opción utilizar el dispositivo NI USB-6212 o en su defecto el dispositivo ADLINK USB-1902. Una ventaja adicional de estos equipos es que requieren menos adecuación de señal porque ya cuentan con filtros y ganancias ajustables. Además, si el proceso de compra se dilata por cuestiones administrativas se puede comenzar a trabajar con la placa actual disponible, que se ha logrado funcione con las mismas librerías de programación. El sistema actual de filtros es compatible con el mencionado dispositivo, por lo que, solo con una adecuación de conexiones se puede comenzar el desarrollo sin necesidad de construir un nuevo sistema de filtros. Este sistema de filtros deberá desarrollarse posteriormente para poder elevar el número de canales.

Finalmente se plantea usar la mayor cantidad de procesamiento por software y evitar en lo posible los filtros analógicos a excepción de los que se colocan para evitar el aliasing o solapamiento y las protecciones.

El proyecto completo implica integrar los elementos descriptos en el esquema (figura 2):



Figura 2: Esquema del sistema de adquisición

En cuanto al Hardware se plantea desarrollar la alternativa de una versión demostrativa usando una placa Arduino para fines didácticos, esta alternativa será tenida en cuenta en el desarrollo del software. En todos los casos la comunicación será USB para poder usar una laptop.

Las etapas definidas en el proyecto son las definidas a continuación:

- 1- Desarrollo del software de análisis y representación de señales y gestiones de compra del nuevo dispositivo ADC. En la primera etapa se aprovecharán las señales medidas y



almacenadas con el sistema actual para comenzar el desarrollo del nuevo software, principalmente en lo que respecta a la implementación de las nuevas técnicas de procesamiento de señales y representación. Paralelamente se comenzará las gestiones de la compra del nuevo dispositivo para adquisición de datos.

- 2- Desarrollo del algoritmo de comunicación con el dispositivo ADC y hardware de adecuación de señales. Una vez adquirido el nuevo dispositivo se comenzará a desarrollar el software de medición y el sistema de adecuación de señales. Se deberá poder conectar sensores de proximidad y acelerómetros. En caso de sufrir demoras en la construcción del nuevo hardware de adecuación se procederá a adecuar el disponible que se emplea con la tarjeta NI PCI 6013 para emplearlo con la nueva tarjeta.
- 3- Finalmente se harán pruebas de campo y se continuarán implementando nuevas técnicas de procesamiento de señales

Finalmente, se espera desarrollar un segundo Hardware alternativo de menor potencia, con tecnología Arduino, que pueda usarse con el mismo software. Este segundo sistema se construirá con fines didácticos para instrumentar un banco de pruebas portátil que se encuentra disponible en el laboratorio y se espera emplear para capacitaciones y demostraciones en instituciones educativas.

## 6. AVANCES

A fines del 2022 se comenzaron las gestiones de compra del nuevo dispositivo de conversión digital analógico NI USB-6212. Las gestiones, a la fecha, están avanzadas y se espera la aprobación del banco para realizar la transferencia al exterior y concretar la compra. No obstante, el contexto actual ha demorado esta tarea que se inició en noviembre del año pasado cuando fue iniciado el proceso. Se espera poder concretar la compra en los próximos meses.

En caso de no poder concretar la misma se analizará continuar el desarrollo con la placa Analog Devices EVAL-CED1Z acoplada con la tarjeta EVAL-ADAS3023EDZ, que son de menor costo, pero requerirá más trabajo en el desarrollo del sistema de adecuación de señales. Paralelamente, se ha comprado una de placa de desarrollo Arduino para comenzar a trabajar en la versión didáctica.

A comienzos de este año se comenzó el desarrollo del software, ya se han incluido las rutinas convencionales como el promediado temporal y la transformada rápida de Fourier. Para probar estos algoritmos se aplican a datos medidos con el sistema anterior. También se logró controlar la placa antigua con las librerías actualizadas del fabricante. Esto llevo un tiempo considerable, dado que no existe soporte para la placa disponible.



Aun no se pudo implementar ningún algoritmo de tratamiento de señal más moderno que no esté incluido en los analizadores comerciales desarrollo (como el análisis de transformadas Wavelet o de transformada de Hilbert-Huang, Spectrum and Cepstrum, etc.). El proyecto se comenzó a ejecutar a fines del año pasado y fue presentado ante la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la UTN y aprobado con el código ASECSN0008611 a comienzos de este año.

## 7. CONCLUSIONES

La experiencia de los integrantes del proyecto con el sistema disponible permite concluir que el nuevo sistema es posible de construir.

El punto más crítico del proyecto desde el punto de vista económico es la adquisición del nuevo dispositivo de adquisición de datos (DAQ). Si bien las gestiones se han iniciado, el contexto no permite asegurar si se va a concretar. No obstante, se han planteado alternativas para desarrollar el sistema usando la placa de desarrollo.

## REFERENCIAS

- [1] Blackman, R.B. and Tukey, J.W. *The Measurement of Power Spectra*. Dover Publications, New York, 1958.
- [2] Cooley, J.W. and Tukey, J.W., *An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series*. Mathematics of Computing, Vol. 19, pp. 297-301, 1965.
- [3] Boros L., Bate H. and Bete G. *Early Detection of Gear Faults Using Vibration Analysis in a Manufacturer's Test Dep*. Bruel & Kjsjer, Denmark, <https://www.bksv.com/media/doc/bo0295.pdf>
- [4] Downham E. and Woods, R., *The Rationale of Monitoring Vibration on Rotating Machinery in Continuously Operating Process Plant*. ASME Vibration Conference, Paper 71, Vib. 96, 8 al 10 de setiembre, 1971, Toronto, Canadá.
- [5] Swansson, N.S., *Application of Vibration Signal Analysis Techniques to Signal Monitoring*. Conference on Friction and Wear in Engineering, pp. 262-267, 1980, Australia.
- [6] Braun, S., *Mechanical Signature Analysis*. Academic Press Inc., London, 1986.
- [7] Randall, R.B., *Frequency Analysis*. Brüel and Kjær, Copenhagen, 3rd edition, 1987.
- [8] Asilturk, I. Aslanci, H. and Ozmen, U. *Machinery Monitoring using Vibration Signal Analysis*. International Journal of Mechanical and Production Engineering. Vol. 5 (2), pp. 21-25, 2017.
- [9] Febgeli Ma, Xiaoshuia Chen and Jilong Du. *Bearing fault Based on improved Hibert-Huang Transform*. 5<sup>th</sup> International Conference on Civil Engineering and Transportation, 4 y 5 de Mayo de 2015, Ottawa, Canada.



- [10] Soualhi, A. Medjaher, K. and Zerhouni N., *Bearing Health monitoring based on Hilbert-Huang Transform, Support Vector Machine and Regression*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 1-11, 2014.
- [11] Li-Ye Zhao, Lei Wang and Ru-Qiang Yan, *Rolling Bearing Fault Diagnosis based on Wavelet Packet Decomposition and Multi-Scale Permutation Entropy*. Entropy, Vol. 17, pp. 6447-6461, 2015.
- [12] Riaz, S. Elahi, H., Javaid, K. and Shahzad T. *Vibration Feature Extracto in and Analysis for Fault Diagnosis of rotating Machinery- A Literature Survey*. Asian Pacific Journal of Multidisciplinary Research, Vol. 5 (1), pp. 103-110, 2017.
- [13] Zhengz, H. and Chen, L., *Gear fault diagnosis based on continuous wavelet transform*. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 16 (2–3), pp. 447-457, 2002.
- [14] Lebold, M., McClintic, K., Campbell, R., Byington, C. and Maynard, K., *Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics*. Proceeding of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, pp. 623-634, 1 al 4 de mayo, 2000, Virginia.
- [15] Vishwakarma M. and Singh S., *Review of Vibration Analysis Techniques for Rotating Machines*. International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 4 (3), 2015.
- [16] KiranKumar, M.V., Loksha, M., Kumar, S. and Kumar, A., *Review on Condition Monitoring of Bearings using vibration analysis techniques*. Materials Science and Engineering. Vol. 376 (2018) 012110, doi:10.1088/1757-899X/376/1/012110
- [17] Hazwan Mohd Ghazali M. and Rahiman W. *Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review*. Shock and Vibration, Vol. 2021, Article ID 9469318, 25 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>
- [18] Gang Yu, *A Concentrated Time–Frequency Analysis Tool for Bearing Fault Diagnosis*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 69 (2) pp. 371 – 381, 2020.
- [19] Khadersab, A. and Shivakumar, S. *Vibration Analysis Techniques for Rotating Machinery and its effect on Bearing Faults*. Procedia Manufacturing, Vol. 20, pp. 247-252, 2018.
- [20] Edwards, S., Lee, A.W., Friswell, M.I. *Fault Diagnosis of rotating machinery*. The Shock and vibration digest, Vol. 30 (1), pp. 4-13, 1998.
- [21] Isermann R. *On the applicability of model-based fault -detection for technical processes*. Control Engineering practice, Vol. 2 (3), pp. 439-450, 1994.
- [22] Isermann R. *Model- based Fault detection and diagnosis – Status and applications*. Automatic Control in Aerospace, Saint-Petersburg, Russia, 2004.



- [23] Loparo, K., Adams, M.L., Wei Lin, Farouk Abdel-Magied, M., Afshari, N., *Fault Detection and Diagnosis of Rotating Machinery*. IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 47 (5), pp. 1005-1014, 2000.
- [24] Markert R., Platz, R. and Seidler, M. *Model Based Fault Identification in Rotor Systems by Least Squares Fitting*. International Journal of Rotating Machinery, Vol. 7 (5), pp. 311-321, 2001.
- [25] Sekhar A.S. *Identification of a Crack in a Rotor System Using a Model-based Wavelet Approach*. Structural Health Monitoring, Vol. 2 (4), pp. 293–308, 2003.
- [26] Jalan, A. K., Mohanty, A. R. *Model Based Fault Diagnosis in Rotating Machinery*. International Journal of Performability Engineering, Vol.7 (6), pp. 515-523, 2011.
- [27] Zarei, J., Amin Tajeddini, M. and Reza Karimi, H., *Vibration analysis for bearing fault detection and classification using an intelligent filter*. Mechatronics, Vol. 24 (2), pp. 151-157, 2014.
- [28] Aherwar A. *An investigation on gearbox fault detection using vibration analysis techniques: a review*. Australian Journal of Mechanical Engineering. Vol. 10 (2), pp.1-16. 2012.
- [29] Sheng Guo, Tao Yang, Wei Gao and Chen Zhang, *A Novel Fault Diagnosis Method for Rotating Machinery Based on a Convolutional Neural Network*. Sensors, Vol. 18 (5), pp 1429, 2018, <https://doi.org/10.3390/s18051429>
- [30] Yu Wei, Yuqing Li, Minqiang Xu and Wenhua Huang, *A Review of Early Fault Diagnosis Approaches and Their Applications in Rotating Machinery*. Entropy, Vol. 21(4), pp. 409, 2018, <https://doi.org/10.3390/e21040409>.
- [31] National Instruments *USB-6212 Specifications*. Consultado el 10-5-2023 <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6212-specs/page/specs.html>
- [32] ADLINK Technology *USB-1901-1902-1903 datasheet*. Diciembre 2019, pp. 1-3 Consultado el día 10-5-2023 [https://www.adlinktech.com/Products/Data\\_Acquisition/USBDAQ/USB-1901\\_1902\\_1903](https://www.adlinktech.com/Products/Data_Acquisition/USBDAQ/USB-1901_1902_1903)
- [33] Analog Devices. *EVAL-CED1Z, Preliminary Technical Data*. 2007, pp. 1-24. Consultado el día 10-5-2023. [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/EVAL\\_CED1Z.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/EVAL_CED1Z.pdf)
- [34] Analog Devices. *ADAS3023. Data Sheet*. Enero 2017, pp. 1-30. Consultado el día 10-5-2023. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADAS3023.pdf>
- [35] Arduino. *Technical specifications for the Arduino® Due*. Consultado el día 10-5-2023. <https://docs.arduino.cc/hardware/due>



## Estudio metalográfico de fisuras generadas post soldadura en cintas de sierra utilizadas en aserradero de la UNLP

Nicolas Rosas<sup>1</sup>, F. Ruiz Diaz<sup>2</sup>, J. Lacoste<sup>2</sup>, L. Feloy<sup>2</sup>, A. Cozzarin<sup>2</sup>, D. Tovio<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Estudiante avanzado de Ingeniería Mecánica.

<sup>2</sup>ProInTec I&D - Departamento de Mecánica Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP) Calle 1 y 47, Tel: 423 – 6677/8 Interno 185  
La Plata, Buenos Aires, Argentina.

### RESUMEN

La UNLP posee un centro de capacitación, producción y servicio en madera en las cuales, entre otras tareas, lleva adelante el programa de “Solución habitacional de emergencia”. Durante los trabajos que se realizan allí, han surgido inconvenientes con las cintas utilizadas para cortar los troncos de manera longitudinal, los cuales presentan fisuras en las gargantas de los dientes de la hoja. Estas fisuras se forman repetidamente durante pocas horas de funcionamiento, lo que provoca que las cintas estén fuera de operación hasta que se completen las tareas de reparación, las cuales pueden demorar hasta 15 días. Este fenómeno ocurre con cintas de distintos proveedores (de origen brasileñas y austriacas), por lo que se puede asumir en primera instancia que la problemática radica en la operatoria y/o en el mantenimiento de las mismas.

En diálogo con los operadores del centro de corte, se pudo evidenciar que no hay un procedimiento adecuado para el posterior tratamiento térmico de los cordones de soldadura que unen los extremos de la cinta, ni de las reparaciones de las fisuras generadas durante la operación de las mismas

En el presente trabajo se realiza una caracterización mecánica del material constructivo de cintas de sierras sin fin del aserradero de la UNLP. Además, se evalúa metalográficamente el material base, y el cordón de soldadura para analizar la microestructura y el recorrido por el cual se propaga la fisura. Las tareas se llevaron a cabo en la UIDET ProInTec perteneciente al departamento de mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.

**Palabras clave:** Cintas de sierra; Microestructura; Propagación de fisuras; Metalografía.



## 1. INTRODUCCIÓN

El consejo social de la UNLP junto a la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, han llevado a cabo la creación del “Centro Tecnológico de la Madera” que se ubica en la ciudad de La Plata, Provincia de Buenos Aires. Cuenta con una superficie cubierta de más de 2 mil metros cuadrados que incluyen aserradero y sala de acopio, horno secadero, sala de afilado y cepillado, y taller de carpintería. En la actualidad se lleva adelante el programa de “Solución habitacional de emergencia”, el cual consiste en la fabricación de casas del estilo “canadiense” con el objetivo de paliar el déficit de vivienda que padecen los sectores más postergados. La madera utilizada para la construcción de las casas, son obtenidas en el mismo centro, a partir del corte de troncos de diferentes secciones, logrando implementar todo el proceso productivo.

En la etapa inicial del proceso para la obtención de la madera, que es el corte de los troncos, han surgido inconvenientes con las cintas utilizadas para realizar los cortes en el sentido longitudinal. Estas cintas, luego de realizar los primeros cortes, presentaban fisuras que se forman en la garganta de los dientes, generando que las mismas tengan que quedar fuera de operación y optar por cambiarlas o repararlas. Para encontrar una solución a la problemática, el consejo social de la UNLP decidió comunicarse con ingenieros forestales e Ingenieros mecánicos.

Desde la UIDET ProInTec perteneciente al Departamento de Mecánica de la Facultad de ingeniería de la UNLP se trabajó en la caracterización mecánica del material constructivo de las cintas de sierras sinfín del aserradero de la UNLP. Allí se evalúa metalográficamente el material base, y se analizó las posibles causas por las cuales se generan las fisuras a las pocas horas de uso de las sierras.

## 2. EQUIPAMIENTO

El centro de la madera está equipado, principalmente, por sierras sinfín (figura 1) y circulares, las cuales se utilizan para realizar los cortes longitudinales y transversales, que son utilizados luego en distintas etapas de producción, que no se abordarán en este informe.



Figura 1: Sierra Sinfín para cortes de troncos

Las sierras sinfín son utilizadas como sierra principal, para realizar un primer corte, como así también como sierra desdobladora, donde generalmente se le da el espesor a la pieza aserrada.

Desde el tablero de mando de este tipo de sierra se controla el posicionado y fijación de la troza (tronco de madera cortado a la longitud deseada y desramado) sobre las escuadras, la aproximación del carro a la cinta de corte, la velocidad de alimentación, la evacuación de la pieza y el retorno del carro (tiene la función de mover trozas o piezas parcialmente aserradas).

En una sierra sinfín, los parámetros que afectan al esfuerzo de corte son varios, como por ejemplo, la velocidad de corte que influye en el desgaste y la temperatura del diente.

Para maderas duras, la velocidad recomendada es de 35 m/s, para maderas blandas de 45 m/s, y para coníferas una velocidad intermedia de 40 m/s, ya que si bien son maderas blandas, la mayoría de ellas tiene presencia de resina [1].

El sistema de corte de la sierra sinfín está formado por una cinta dentada montada sobre dos volantes. La posición de corte de este tipo de sierra es del tipo vertical, con velocidades máximas de 1500 RPM, aunque la velocidad de corte en el momento de la utilización de la hoja no ha sido posible medir, ya que no es un dato que pudieron aportar los operarios encargados de ese sector.

## 2.1 Dientes sierra sinfín

Los dientes forman la parte de la cinta que corta la madera. En el diente de la sierra sinfín se reconocen las siguientes partes: lomo, punta y garganta [1], como se puede apreciar en la figura 2.

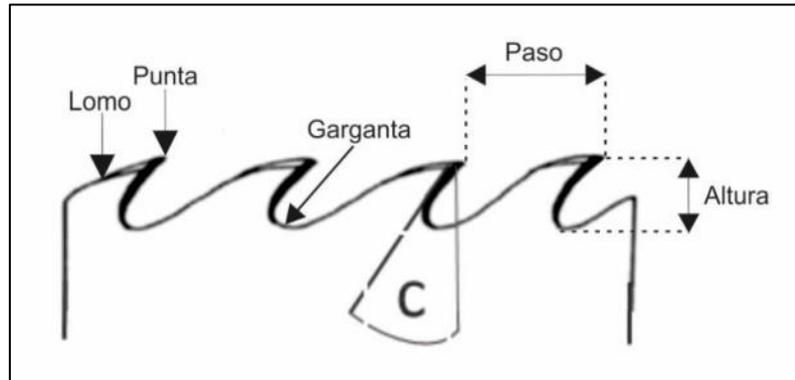


Figura 2: Detalle de las partes de una hoja [1].

Con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas de los dientes de sierra, se les aplica un proceso de recalado. Este procedimiento consiste en deformar plásticamente el material para aumentar su dureza y resistencia al desgaste, lo que a su vez prolonga su tiempo de funcionamiento.

En una sierra sin fin, las mayores tensiones se concentran en la garganta de los dientes, esto es debido a la forma de la hoja y la forma en que se aplica la carga durante el corte.

Además, la garganta de los dientes es la parte más estrecha de la hoja de la sierra, lo que implica que hay menos material para absorber la carga y la tensión. Esto hace que la garganta de los dientes sea una zona de alta concentración de tensiones [2] y, por lo tanto, más susceptible a fallas o fracturas si en la operación se aplica demasiada fuerza durante el corte [3], también podrían producirse por un excesivo sobrecalentamiento durante el proceso de rectificado y afilado, el uso de una rueda abrasiva inadecuada o un diseño incorrecto de la hoja. En la figura 3 se observa un análisis de la concentración de tensiones [2], visualizándose lo antes mencionado.

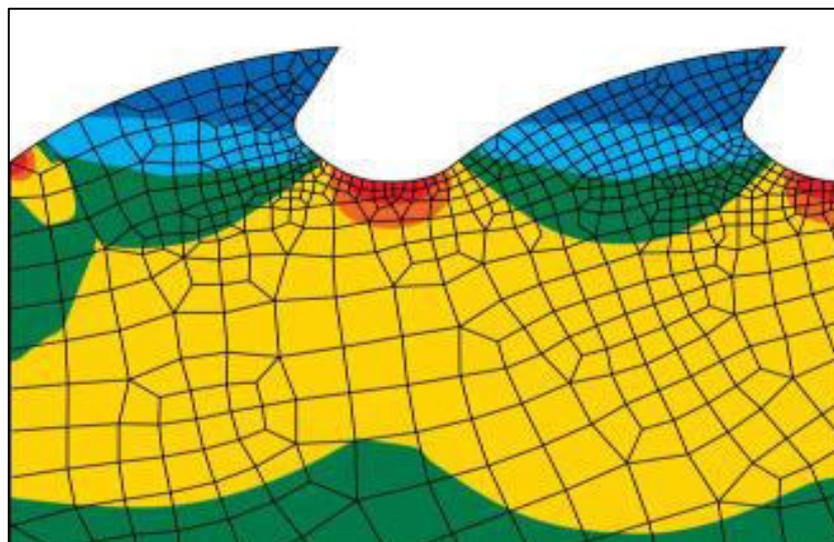


Figura 3: Detalle de concentración de tensiones en los dientes de sierra [2].



### 3. DESARROLLO

En el centro tecnológico de la madera se realiza el afilado de las hojas mediante la utilización de una afiladora (figura 4), a partir del método de mecanizado por arranque de viruta. Para afilar la sierra sinfín se emplea un disco de óxido de aluminio (figura 5) con grano de 46, 60 u 80 según lo recomendado por el fabricante. El trabajo se realiza en un banco donde se regula el avance en base al paso del diente, y la profundidad del trabajo en base a la altura del diente y la forma de la garganta como se observa en la figura siguiente.



Figura 4: Afiladora en posición de trabajo



Figura 5: Piedra de afilado

Luego del afilado y puesta a punto sobre la maquina, la hoja presenta fisuras a las pocas horas de uso que inician en cada una de las gargantas y se extienden hacia el interior de esta. En la



figura 6 se observa la fisura sobre la garganta, como se dijo anteriormente, esta fisura se presenta en todas las zonas de garganta de la hoja de corte, presentándose de igual forma y extensión.



Figura 6: Fisura en garganta de sierra.

Si se realiza un análisis del borde superior de la hoja [2], en donde entra en contacto con la piedra esmeril, se puede ver imperfecciones que va dejando con el avance del afilado (figura 7).

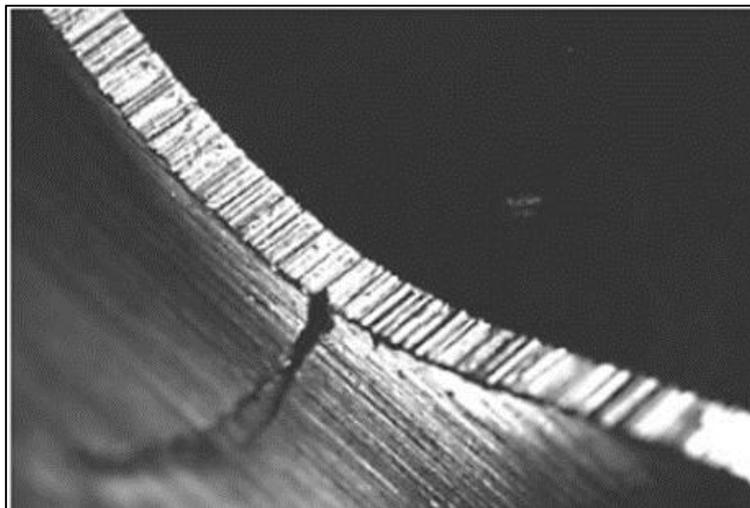


Figura 7: Las rebabas de rectificado que causan grietas en las cintas de sierra.

Se lleva adelante un análisis de la composición química del material, esto se lleva adelante con un equipo de fluorescencia de Rx S1 TITAN 600, donde se constato que el material pertenece a un acero SAE 1070.

Para una mejor observación se realiza un análisis metalográfico de la zona de estudio. Para ello se realiza un corte de la zona superior, y se la incluye en una resina autocurable para su manipulación (figura 8). Luego se procede a debastarlo mediante lijas de distintas granulometrias, para finalizar con un pulido en pasta de diamante de 1 micron. Finalmente se realiza un ataque químico con un reactivo específico para resaltar la microestructura.

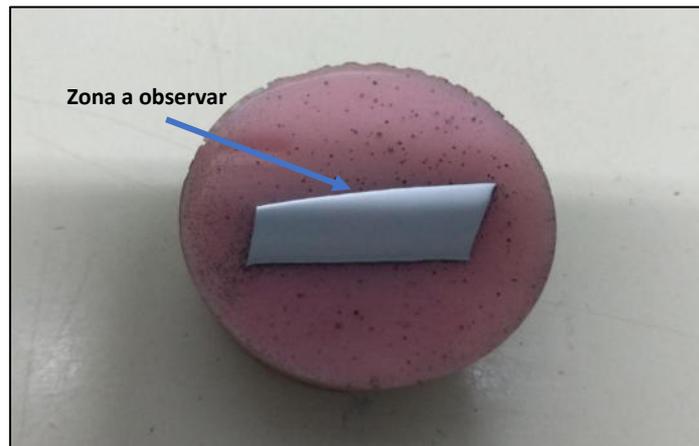


Figura 8: Muestra para estudio.

La observación de la microestructura se realiza mediante un microscopio estereoscópico marca Mikoba, estativo con macro enfoque con coliza y movimientos universales con base de sustentación, en donde se puede observar una zona blanca (figura 9) que bordea la zona superior de la hoja. Esta fase pertenece a una microestructura martensítica producto de la alta velocidad de enfriamiento, luego del calentamiento producido en la etapa de afilado. En cambio hacia el interior de la hoja se observa una microestructura que pertenece a una combinación de fases entre bainita y perlita.

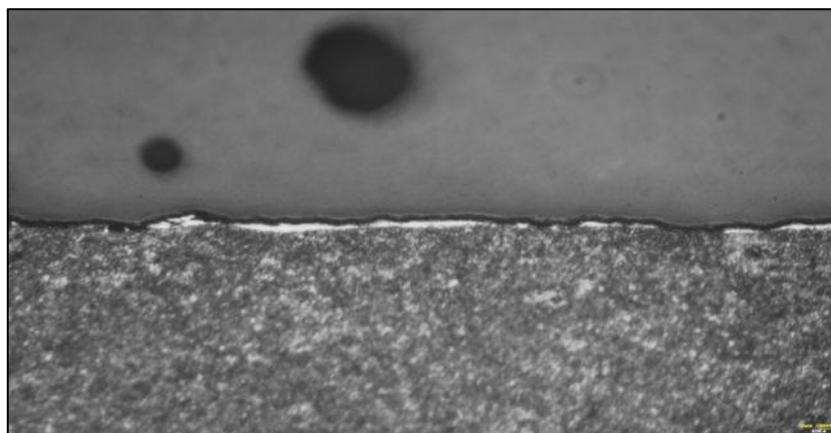


Figura 9: Microestructura de martensítica en borde de hoja. 200X.



Si se analiza con mayor profundidad, se puede observar que esa fase no es continua (figura 10) y presenta imperfecciones que pueden llegar a ser puntos de concentración de tensiones, donde bajo esfuerzo, son los iniciadores de la fisura que progresa hacia el interior de la hoja.

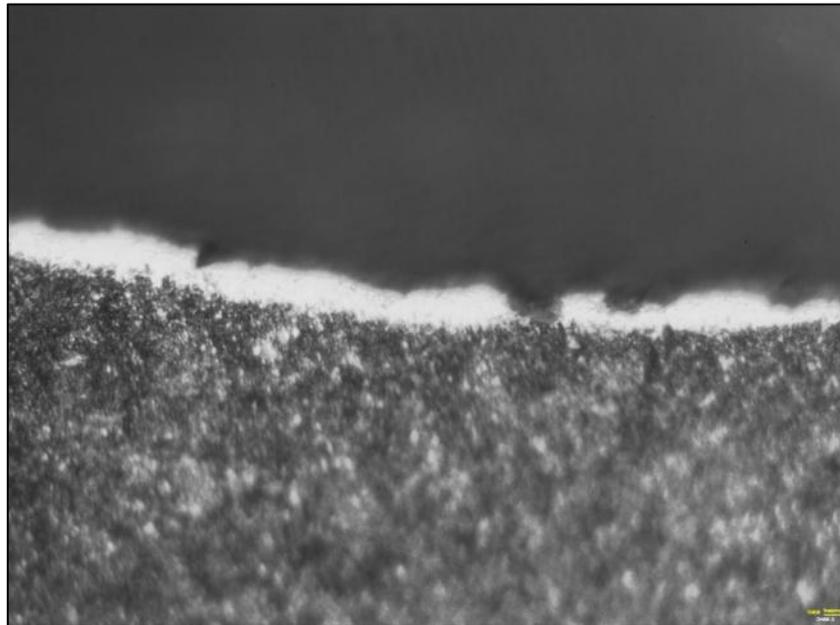


Figura 10: Fase discontinua en borde de hoja. 500X.

La microestructura martensítica se genera por la alta velocidad de enfriamiento luego del calentamiento local que tiene la hoja producto de la fricción entre la hoja de sierra y la muela esmeril. La máquina utilizada para lograr el filo no presenta un sistema de refrigeración que minimice el calentamiento, con lo que se podría optar por un proceso de desbarbado (figura 11) que permita eliminar la capa dura, principalmente de la zona de la garanta.



Figura 11: Desbarbador con carburo cementado [2].



#### 4. PROPUESTAS DE MANTENIMIENTO Y MEJORA

En base a las investigaciones anteriores [2,4] y los resultados obtenidos, se proponen las siguientes medidas de mantenimiento para prevenir la aparición de fisuras en las cintas de sierras sinfín:

- Controlar el tratamiento térmico: Realizar el tratamiento térmico en un equipo controlado por termostato a una temperatura de 400°C y enfriar lentamente durante 5 a 10 minutos dentro del mismo equipo.
- Pre calentamiento para mejorar la calidad de la soldadura: Realizar un pre calentamiento de la cara posterior de la hoja a 450°C para reducir el riesgo de agrietamiento y mejorar la calidad de la soldadura.
- Ajustar la profundidad de rectificado: Ajustar la profundidad de rectificado para evitar rebabas en el lado de separación del diente.
- Evitar sobrecalentamiento: Después del rectificado, asegurarse de que la garganta no presente zonas oscuras, ya que esto indicaría sobrecalentamiento del acero, lo que podría dar lugar a martensita por fricción, un material extremadamente duro y frágil que puede favorecer la formación de fisuras en la garganta durante su uso.
- Rectificar varias veces con profundidad pequeña: Se recomienda realizar rectificadores múltiples con una profundidad pequeña en lugar de un rectificado profundo para evitar la formación de nuevas fisuras. Además, se sugiere utilizar un desbarbador con carburo cementado para eliminar cualquier fricción martensítica y obtener una superficie suave en la garganta.

Al implementar estas propuestas de mantenimiento, se espera prolongar la vida útil de las cintas de sierras sinfín y reducir la incidencia de fisuras, lo que contribuirá a mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de aserrado en el aserradero de la UNLP.



## 5. CONCLUSIONES

En este estudio, se llevó a cabo una caracterización mecánica del material utilizado en las cintas de sierras sinfín del aserradero de la UNLP para evaluar las posibles causas de las fisuras durante el corte. Los resultados de la evaluación metalográfica permitieron observar la generación de una microestructura de alta dureza (martensita), que aparece durante el proceso de afilado debido al calentamiento localizado y una alta velocidad de enfriamiento. Esto sumado a que en la zona de la garganta presenta la mayor concentración de tensiones durante el proceso de corte, permite que las microfisuras generadas desde la martensita, se propaguen hacia el interior de la hoja. Cabe aclarar, que se lleva adelante un estudio desde el punto de vista del material, y no desde el proceso de corte, donde se podría evaluar velocidades de corte, tensiones cortantes, etc.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al personal del “Centro Tecnológico de la Madera” por la predisposición y habernos brindado en todo momento la información requerida.

## REFERENCIAS

- [1] Keil, G. D., Spavento, E. M., & Raffaelli, N. (Año). Industrialización de la madera; Transformación mecánica y química: tecnologías y puesta en valor sustentable. Editorial.
- [2] SANDVIK STEEL. The Handbook Production, use and maintenance of wood bandsaw blades Capítulos "Gullet Treatment" y "Grinding".
- [3] Precor. Fallas en el corte con Sierras Cinta; Manual del fabricante.
- [4] Precor. Manual de hojas de Sierras Cinta para madera; Manual del fabricante.



## ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES EN PLACAS DE ACERO DE NORMA BRASILEIRA ABNT 7007 Y ALUMINIO ANODIZADO 6063-T5

Victor Huaman <sup>1</sup>, Fernando de Azevedo <sup>2</sup> y Victor Gamarra <sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departamento de Mecánica (DME) – Universidad estatal de Sao Paulo (UNESP) – Facultad de Ingeniería de Guaratinguetá (FEG), Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Pedregulho, Guaratinguetá – São Paulo, Brasil

-----  
<sup>1</sup>victor.huaman@unesp.br

<sup>2</sup>fernando.azevedo@unesp.br

<sup>3</sup>victor.rosado@unesp.br

### RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio experimental, analítico y numérico de dos materiales ferrosos ABNT 7007 BR 190 y no ferrosos ALUMINIO ANODIZADO 6063-T5 que fueron sometidas a ensayos mecánicos de tracción uniaxial, según la norma ASTM E8/E8M-22, en formatos estándar con agujero central. El objetivo principal de este trabajo fue identificar las concentraciones de tensiones actuantes y deformaciones localizadas de forma experimental usando extensómetros en colocados en forma tangencial al agujero en 0° y 90°, luego determinar la deformación y tensión vía análisis computacional vía ANSYS STUDENT 2023, para luego comparar la variación entre el ensayo mecánico uniaxial por tracción y análisis computacional uniaxial; finalmente analizar las atenuaciones de la placa de ALUMINIO ANODIZADO 6063- T5, material que presentó falla estructural en los dos métodos mencionados; para ello aplicando métodos de elementos finitos aplicaremos aleatoriamente en los agujeros con dirección longitudinal de la placa, variando medidas en los diámetros y longitud al agujero central, a fin de tener resultados que reduzcan la concentración de tensiones nodo crítico local.

**Palabras clave:** *Ensayo mecánico uniaxial; Concentración de tensiones; Métodos de elementos finitos.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de métodos experimentales, métodos numéricos y métodos analíticos evalúan los proyectos de ingeniería en la industria. Para Pilkey et al (2020), la innovación y la creatividad de un nuevo producto ocurren principalmente en la fase de diseño conceptual, el análisis y la síntesis en la fase de diseño detallado. Sin embargo, dicho análisis requiere tiempo y no es trivial debido a la personalización de las operaciones, geometrías, propiedades y dimensiones de las piezas mecánicas, así como la complejidad de las cargas. El factor de concentración de tensiones (SCF) se define como el ratio de la relación entre la tensión máxima y la tensión normal en una discontinuidad [9]. La solución de Kirsch indica el factor concentración de tensión (Kt) del valor tres al agujero en la carga uniaxial. El factor concentración de tensión puede variar en condiciones de carga más complejas, es decir, estados de tensión diferentes de la tensión uniaxial. El aumento de concentración de tensiones causa fisuras y discontinuidades en el área de la sección transversal [10]. En el ensayo de tracción uniaxial, las deformaciones en el material son uniformemente distribuidas en todo el cuerpo, la carga crece a una velocidad lenta durante toda la prueba. También permite medir satisfactoriamente la resistencia del material y por defecto obtener la curva tensión vs deformación, a través de los puntos de convergencia que genera como resultados la máquina [5].

Como resultado, en el campo de tensiones calculadas por FEA (métodos de elementos finitos) tiene una serie de discontinuidades en el campo de la tensión, elemento a elemento, en vez de un componente real continuo. Una malla más gruesa puede ser aplicada inicialmente en un componente, sin embargo, por determinación exacta de la distribución de la carga de las tensiones en zonas localizadas se precisa tener una malla refinada; luego de tener una exactitud del nodo local se debe de aplicar un factor de reducción y que genera una nueva malla, esa acción se denomina convergencia que es una malla mucho más fina y calcula nuevamente las tensiones; el fin del proceso es llegar al resultado más próximo posible a un modelo experimental [6].

Ortega et al (2013), realizaron simulaciones vía ANSYS y obtuvieron curvas de concentración de esfuerzos. Los autores determinaron los esfuerzos máximos, los cuales se utilizaron para calcular el factor de concentración de esfuerzos, además de aplicar el método matemático de mínimos cuadrados para ajustar los datos de estas curvas a ecuaciones polinómicas de sexto grado con un valor de  $R^2$  entre 0.9987 y 1. El material empleado fue acero ASTM 36, los casos de estudios fueron en una placa plana rectangular con agujero centrado, una placa plana rectangular con muescas y una placa plana rectangular con filetes [8]. Luego, Ortega et al (2015), analizaron la concentración de esfuerzos en una placa plana sometida a carga axial, determinaron el factor de concentración de esfuerzos, utilizaron elementos finitos y aplicaron 125 simulaciones. Los factores de concentración de esfuerzos fueron graficados en función de

S/D (distancia entre el centro de los agujeros/diámetro de los agujeros) para las relaciones W/D (espesor de la pieza/diámetro del agujero) de 1.2, 1.5, 2, 2.5, 3. En los resultados graficados obtuvieron una regresión mediante el método de mínimos cuadrados generando ecuaciones que prediga el factor de concentración de esfuerzos al caso de estudio [7].

Ame y Bustamante (2018), analizaron cuantitativamente la influencia de los atenuadores de concentración de tensiones en material de acero SAE/AISI 1010, geoméricamente fue una placa plana con agujero central, sometida a carga uniaxial, luego adicionaron en la simulación dos agujeros sobre el eje geométrico de simetría longitudinal de la placa; con este caso de estudio mostraron la nueva distribución de las tensiones y gráficamente como reducir la atenuación de los concentración de tensión [3].

Para nuestro caso de estudio nos basaremos en la aplicación de concentradores de tensión en el acero ABNT 7007 y aluminio 6063-T5, del cual el material que resulte fallar, se le reducirá la concentración de tensiones localizadas vía análisis numérica computacional adicionando agujeros en dirección al eje de simetría longitudinal de la placa.

## 2. METODOLOGÍA

El objeto de estudio será en tres placas rectangulares con un orificio central para cada material en formato estándar (Acero ABNT 7007 BR 190 y Aluminio anodizado 6063-T5), con medidas especificadas como se observa (Figura 1), a la cual se la llamará cuerpo de prueba (CP).

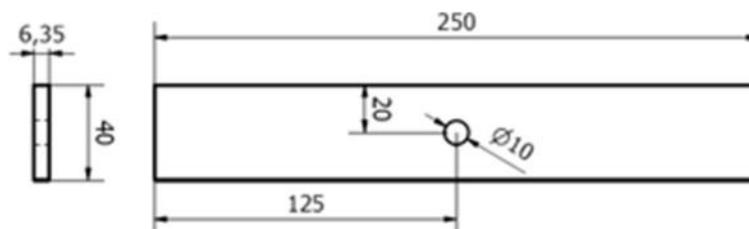


Figura 1. Cuerpo de prueba

El siguiente caso de estudio consistente en estudiar la concentración de esfuerzos en los agujeros centrales de los cuerpos de pruebas, para determinar la deformación de las placas se insertaron Strain Gages (extensómetros) KYOWA de resistencia  $119,8 \Omega$  de dimensión 3 mm x 5 mm, colocados en posición tangencial a la circunferencia en  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; para medición de la carga se usó el equipamiento Shimadzu modelo AGX-50KN que aplicaremos carga axial máxima de 48 KN en el Acero ABNT 7007 BR 190 y en Aluminio anodizado 6063-T5 menor o igual a 48 KN, aplicando a ambos cuerpos de pruebas velocidad de 2,25 mm/min según la norma ASTM E8E8M-22 [4], además utilizaremos el software de elementos finitos ANSYS® STUDENT 2023 para la simulación de tensión y deformación localizada, mediremos el porcentaje de error entre el experimento y la simulación. Finalmente analizaremos en el cuerpo

de prueba del aluminio anodizado 6063-T5, las relaciones entre  $L/D$  y  $D/d$  dando valores aleatorios en sus dimensiones, a fin de reducir la concentración de tensiones en la zona crítica.

En la elaboración de las simulaciones se le atribuye al material las siguientes propiedades, de acuerdo con sus certificados de calidad:

- Acero laminado ABNT 7007 BR 190, de baja resistencia (BR), con resistencia mínima a la fluencia  $S_y = 190$  MPa, con resistencia mínima a la ruptura o resistencia  $S_{ut} = 330$  MPa, alargamiento de 22%, modulo elástico de 210 GPa y razón de Poisson de 0.3 [1].
- Aluminio anodizado 6063-T5, de baja resistencia (BR), con resistencia a la fluencia  $S_y = 105$  MPa, con resistencia a la ruptura o resistencia  $S_{ut} = 145$  MPa, alargamiento de 8%, modulo elástico de 71 GPa y razón de Poisson de 0.33 [2].

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Resultados del método experimental analítico

Se procedió a realizar el ensayo de tracción, como se muestra (Figura 2) en los cuerpos de pruebas de acero (CP1-CP2-CP3), con una tensión de 252,27 MPa, produciendo una deformación promedio de 0,013 mm/mm sobrepasando su límite de fluencia (190 MPa). En el caso del aluminio (CP1-CP2-CP3) la tensión máxima llega a 224,90 MPA, pasando su límite de resistencia a la tracción (145 MPa) y produciendo una deformación promedio de 0,028 mm/mm. Se observó fisuras de 0,469, 0,322 mm y 0,615 mm de acuerdo con las muestras captadas con Microscopio Mitutoyo (Figura 3).

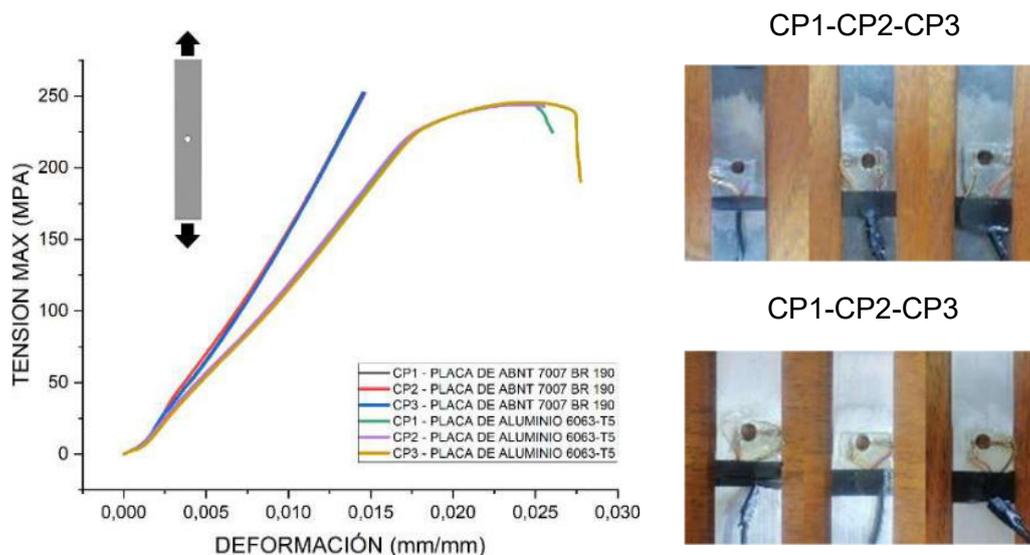


Figura 2. Curva Tensión vs Deformación entre probetas ABNT 7007 y 6063-T5



Figura 3. Medición de fisuras (mm) en cuerpos de prueba de Aluminio 6063-T5.

Para el ensayo experimental usando los extensómetros en el agujero central de todos los cuerpos de pruebas (ABNT 7007 y 6063-T5), se pudo conocer las deformaciones localizadas en  $0^\circ$  (transversal) y  $90^\circ$  (longitudinal), sin embargo, se debe de calcular las tensiones máximas según la Ecuación (2). De acuerdo con Norton (2013), usaremos la Ecuación (1) para hallar numéricamente el factor geométrico de concentración de tensiones ( $K_t$ ); el resultado calculado es de  $K_t = 2,425$ .

$$K_t = 3,0039 - 3,753 \frac{D}{w} + 7,9735 \left(\frac{D}{w}\right)^2 - 9,2659 \left(\frac{D}{w}\right)^3 + 1,8145 \left(\frac{D}{w}\right)^4 + 2,9648 \left(\frac{D}{w}\right)^5 \quad (1)$$

Donde:

$K_t$ : Factor geométrico de concentración de tensiones (adimensional)

$D$ : Diámetro del agujero central del cuerpo de prueba (mm)

$w$ : Ancho del cuerpo de prueba (mm)

De acuerdo con la solución de Kirsch [10], verificamos que el valor del factor geométrico de concentración de tensión no debe exceder a la proyección de la curva aplicada según NORTON. (Figura 4).

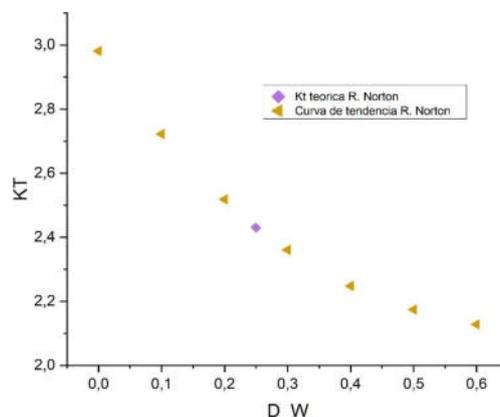


Figura 4. Factor de concentración de tensiones ( $K_t$ ) de los cuerpos de pruebas

Teniendo los valores de la tensión nominal (resultados obtenidos vía ensayo de tracción), también el factor geométrico de concentración de tensiones. De acuerdo con Norton (2013), aplicamos la Ecuación (2), para obtener tensiones máximas de los dos materiales.

$$\sigma_{maxima} = K_t * \sigma_{nominal} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma_{maxima}$ : Tensión Máxima de esfuerzo del cuerpo de prueba (MPa)

$K_t$ : Factor geométrico de concentración de tensiones (adimensional)

$\sigma_{nominal}$ : Tensión Mínima de esfuerzo del cuerpo de prueba (MPa)

Los resultados de las tensiones máximas experimentales en los cuerpos de prueba en la posición de longitudinal del extensómetro (90°) para el acero ABNT 7007 BR 190 fue de aproximadamente de 612 MPa y para el aluminio 6063-T5 fue de 580 MPa. Luego, los resultados de las tensiones máximas experimentales en los cuerpos de prueba en la posición de transversal del extensómetro (0°) para el acero ABNT 7007 BR 190 fue de aproximadamente de 600 MPa y del aluminio 6063-T5 fue de aproximadamente de 568 MPa, como se observa en la (Figura 5).

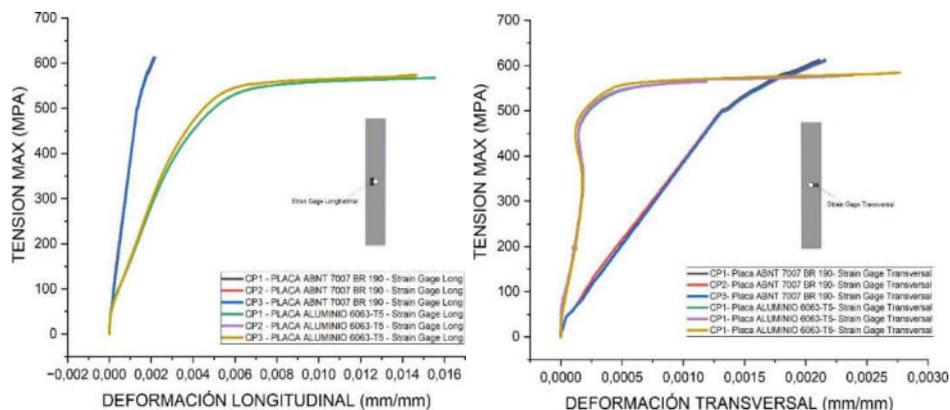


Figura 5. Curva Tensión vs Deformación con Extensómetros en 90° (longitudinal) y 0° (transversal)

## 3.2. Resultados simulados

### 3.2.1 Simulación numérica en placa de acero ABNT 7007 BR 190 y Aluminio 6063 T5

Usando la herramienta ANSYS, se aplicó el comando PATH para revelar los resultados locales de tensión y deformación de los extensómetros simulados y ubicados tangencialmente a 0° y 90° de la circunferencia, en acero ABNT 7007 BR190 (Figura 6) y aluminio 6063 T5 (Figura 7).

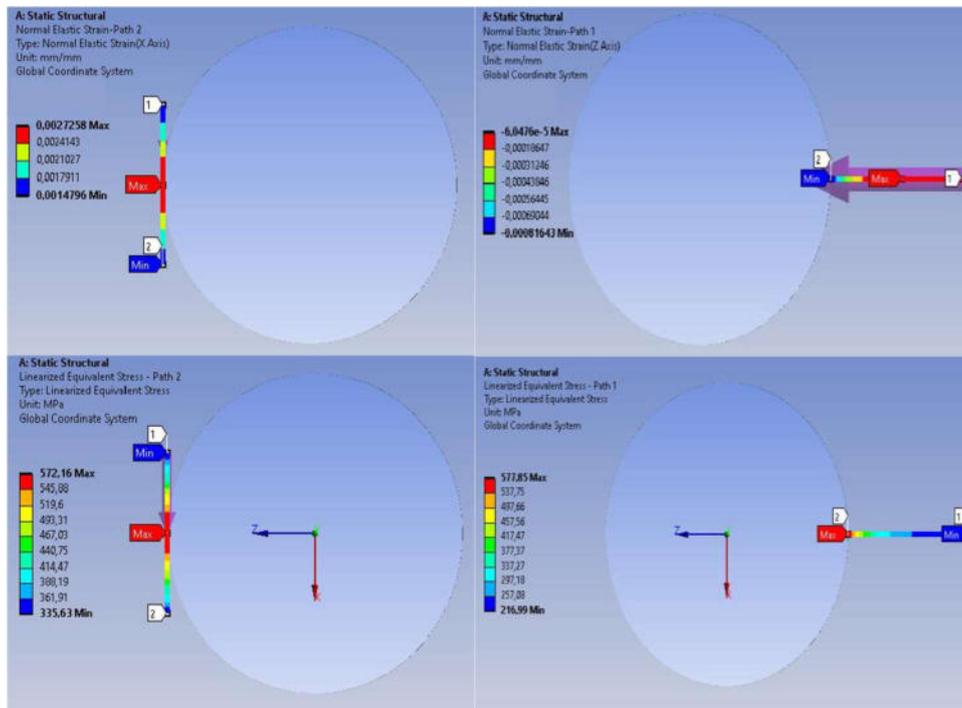


Figura 6. Path a 90° (izquierda) y Path a 0° (derecha), en acero ABNT 7007 BR190

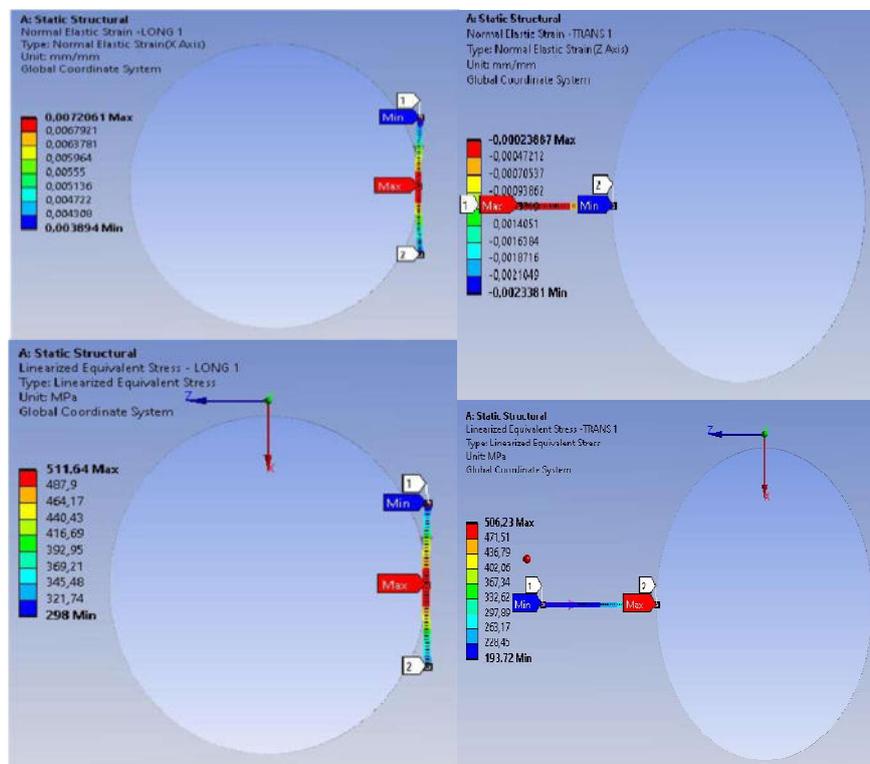


Figura 7. Path a 90° (izquierda) y Path a 0° (derecha), en aluminio 6063-T5

### 3.3. Resultados comparativos entre método experimental analítico y simulación

A continuación, los resultados experimentales de los dos materiales obtenidos en el ensayo mecánico uniaxial (figura 5) y los resultados de simulación estático del acero ABNT 7007 BR190 (figura 6) y del aluminio 6063-T5 (figura 7), se presentan en los diagramas la variación porcentual los resultados obtenidos mediante el extensómetro y el comando Path del Ansys.

El margen de la variación porcentual de la tensión máxima, como indica el diagrama comparativo (figura 8) entre el extensómetro en 90° y el PATH en 90° del acero ABNT 7007 BR190 fue de 7,04% y del aluminio 6063-T5 de 10,91%. Luego el margen de la variación porcentual de la tensión máxima, como indica el diagrama comparativo (figura 9) entre el extensómetro en 0° y el Path en 0° del acero ABNT 7007 BR190 fue de 5,9 % y del aluminio 6063-T5 de 14%. También, obtenemos el margen de la variación porcentual de la deformación longitudinal, como indica el diagrama comparativo (figura 10) entre el extensómetro en 90° y el PATH en 90° del acero ABNT 7007 BR190 fue de 2,09% y del aluminio 6063-T5 de 0,53%. Y finalmente el margen de la variación porcentual de la deformación transversal, como indica el diagrama comparativo (figura 11) entre el extensómetro en 0° y el Path en 0° del acero ABNT 7007 BR190 fue de 0,62 % y del aluminio 6063-T5 de 0,15%.

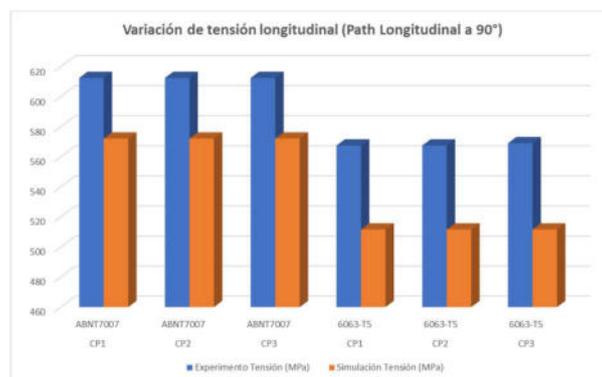


Figura 8. Diagrama comparativo de tensión máxima entre extensómetro (90°) y Path (90°)

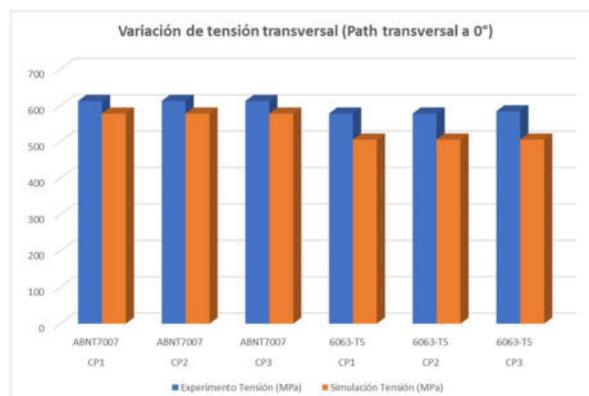


Figura 9. Diagrama comparativo de tensión máxima entre extensómetro (0°) y Path (0°)

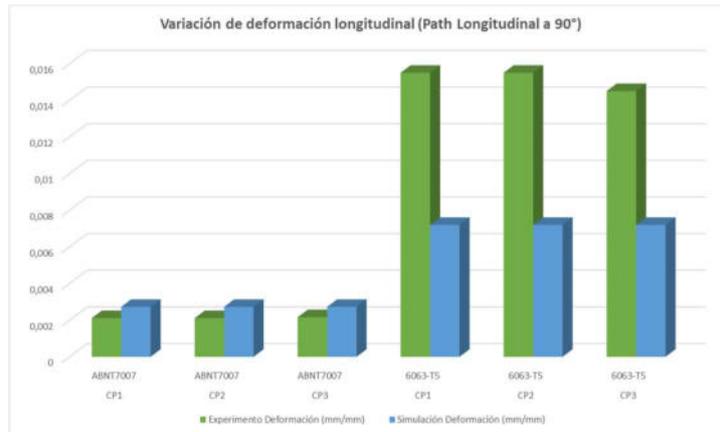


Figura 10. Diagrama comparativo de deformación entre extensómetro (90°) y Path (90°)

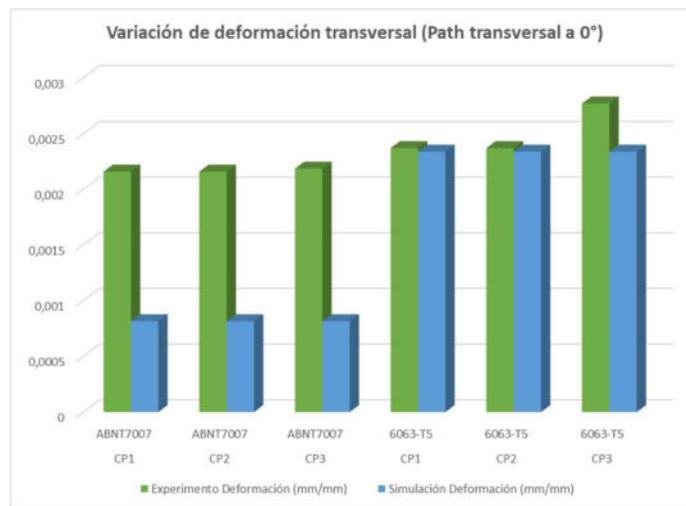


Figura 11. Diagrama comparativo de deformación entre extensómetro (0°) y Path (0°)

La simulación numérica muestra la convergencia para los materiales; en el cuerpo de prueba del acero ABNT 7007 BR 190, genera una tensión máxima de 615,02 MPa (Figura 12.a) y para el cuerpo de prueba del Aluminio 6063 T5, genera una tensión máxima de 555,5 MPa (Figura 12.b). El tipo de malla es triangular y de tamaño entre vértices en promedio miden 0,10 mm.

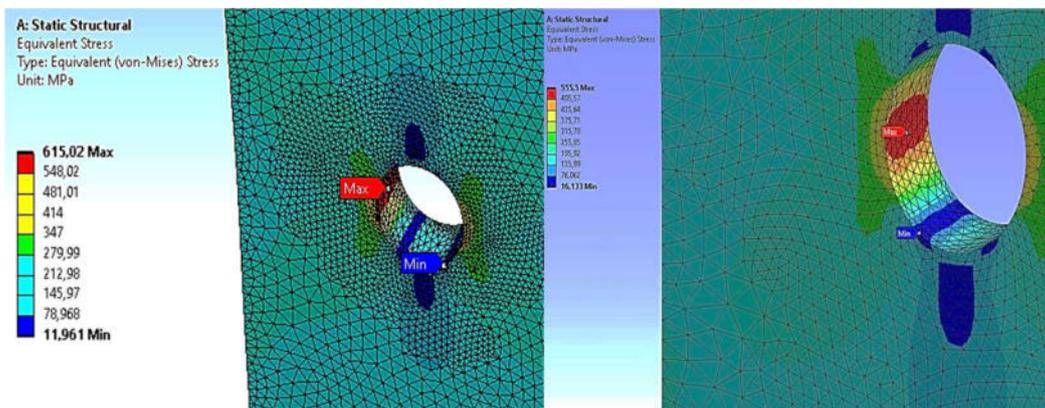


Figura 12. Convergencia de malla del agujero de: (a) ABNT 7007 BR 190 y (b) Aluminio 6063



De los resultados generados por la convergencia en la simulación numérica, se compara con los resultados experimentales, en el acero ABNT 7007 BR 190 la variación es de 2% y en el aluminio 6063 T5 de 1,98%.

### 3.4. Análisis de la influencia de concentración de tensión en aluminio 6063 T5.

Habiendo identificado el nodo crítico en la placa de aluminio 6063 T5, analizaremos en la tracción uniaxial, reducir la tensión o esfuerzo localizado sobre el valor en el punto **Z**, adicionando agujeros simétricos longitudinalmente al agujero central, como se muestra en la Figura 13. Se analizan distintas aleaciones dimensionales en el diseño donde intervienen los diámetros **d** y las longitudes **L** (generando variación longitudinal entre los puntos **X** y **Z**). Las variables **d** y **L** son factores influyentes en la concentración de tensión. La fuerza longitudinal aplicada es de 42844,68 N. Se mantienen las medidas estándar del cuerpo de prueba del aluminio 6063-T5, de acuerdo con el diseño inicial (Figura 1).

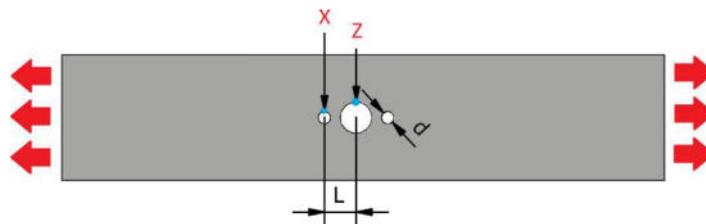


Figura 13. Identificación de atenuadores de Tensión

Las relaciones entre **D/d** son de: 5; 2,5; 1,67; 1,25 y 1. Se genera las combinaciones aleatorias con las relaciones de entre **L/D** son de: 1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 y 2. Se calcula el valor de la concentración de tensión en el punto **Z** del agujero central. Obteniendo las relaciones de **D/d** (diámetro central entre diámetro aleatorio) y **L/D** (longitud aleatoria entre diámetro central), teniendo como dato constante del diámetro central (**D=10 mm**), aplicando numéricamente vía Ansys la convergencia en la zona **Z** obtendremos las tensiones localizadas (Tabla 1) de las 30 simulaciones realizadas y la curva generada por la convergencia de puntos de las tensiones del punto **Z**, como se muestra en la Figura 14.

Tabla 1. Resultados de concentración de Tensión en el punto **Z** de las relaciones **L/D** y **D/d**

$\sigma_z$	L/D					
D/d	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
5	532,58	490,72	543,57	532,36	507,69	504,52
2,5	522,31	529,25	525,42	527,59	499,32	516,62
1,67	501,83	501,23	504,66	495,1	439,15	504,28
1,25	462,19	457,79	426,62	463,69	467,3	467,12
1	422,8	384,73	409,56	418,58	424,1	424,1

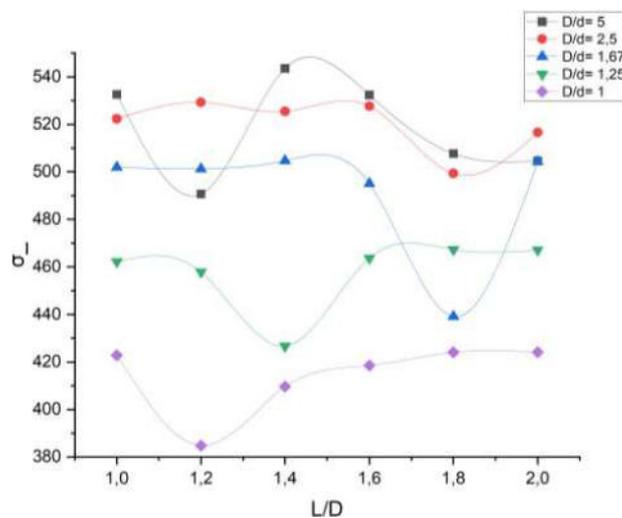


Figura 14. Curva de concentración de tensiones en punto Z de las relaciones L/D y D/d

#### 4. CONCLUSIONES

Los métodos numéricos analíticos vía Ansys, aplicados a la resistencia del acero ABNT 7007 BR 190 y al aluminio 6063 T5 fue para validar con el método experimental; comparando margen de error mínimo. Luego observando que los agujeros del aluminio 6063 T5 aparecen fisuras por el ensayo de tracción uniaxial, se generó relaciones entre diámetros y longitudes para obtener resultados de concentración de tensiones localizada. Para el cálculo numérico computacional se realizó 30 simulaciones en diversas relaciones entre diámetros y distancias aleatorias L/D y D/d, para disminución del valor de la tensión localizada en el punto crítico. No se recomienda es la relación de diámetros D/d=5, donde la tensión localizada tiene desfases en todos los puntos de L/D; la tensión local del agujero llega a 543,57 MPa, en el cual generan fisuras en la práctica. Por otro lado, la concentración de tensión moderada es la relación de diámetros D/d=1,67, que es lineal entre los puntos de L/D = 1 hasta 1,5; generando la tensión local a 420 MPa de carga axial. La atenuación más eficaz es la relación de diámetros D/d = 1, siendo la tensión máxima de 424,1MPa en la relación L/D = 1,8 y la tensión mínima de 384,73 MPa en la relación L/D = 1,2, donde también el factor de atenuación KA = 0,7 que es el valor mínimo en relación con los demás resultados. Sin embargo, no se recomienda su aplicación por fines de geométricos al diseño mecánico. Finalmente, el caso de estudio numérico, analítico y experimental no se generaliza a otros diseños mecánicos en material de aluminio 6063 T5; se puede abordar este caso de estudio futuramente aplicados en materiales compuestos.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Concejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico del Brasil (CNPq), a la Coordinación de A perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior del Brasil (CAPES), y al Departamento de Mecánica de la



Universidad Estatal Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) del campus de Guaratinguetá (FEG) por el apoyo incondicional para la realización y financiación del trabajo.

## 6. REFERENCIAS

- [1] ABNT 7007. *Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural*, tercera edición, Asociación brasileira de normas técnicas, Brasil, 2016.
- [2] ABNT NBR 8117. *Alumínio e suas ligas - Arames, barras, perfis e tubos extrudados*, cuarta edición, Asociación brasileira de normas técnicas, Brasil, 2021.
- [3] Amé, R. M., Bustamante, G., Xxiii, J., Prov, R., de Zamora, L., & Aires, A. (n.d.). *Análisis cuantitativo de la influencia de los atenuadores de concentración de tensiones en el diseño de componentes de máquinas*, VI Congreso argentino de ingeniería mecánica y I congreso de ingeniería ferroviaria, registro (ISBN 978-9874698704), del 10 al 12 de octubre de 2018, Tucumán-Argentina.
- [4] ASTM E8/M8-22. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials-*. 31p. *American Society for Testing and Materials*, Estados Unidos, 2022.
- [5] de Souza S.– *ENSAIOS MECANICOS DE MATERIAIS METÁLICOS* - Quinta edição Editora: Edgard Blucher, Brasil, 1995
- [6] NORTON, R. *Projeto de máquinas: uma abordagem integrada*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, Brasil, 2013.
- [7] Ortega-Francisco, Palacios-Francisco, & Garcia-José, G.-D. (2015). *Concentración de esfuerzos en una placa con dos barrenos centrados sometida a carga axial*. In Artículo Revista de Tecnología e Innovación Marzo (Vol. 2, Issue 2). [www.ecorfan.org/bolivia](http://www.ecorfan.org/bolivia), 2015.
- [8] Ortega Herrera Francisco Javier, Guzmán José Miguel, G., Rangel Gustavo, R., & Venegas Alejandra, G. *Esfuerzos En Placas Planas Sometidas a carga axial*, MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, registro (ISBN978-607-95309-9-0), del 25 al 27 de septiembre, 2013, Pachuca, México, 2013
- [9] PILKEY W.; PILKEY D. e ZHUMING BI. *PETERSON'S STRESS CONCENTRATION FACTORS* - Fourth Edition - John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, Estados Unidos, 2020.
- [10] YOUNG W.; BUDYNAS R. *ROARK'S FORMULAS FOR STRESS AND STRAIN* - Seventh Edition - McGraw-Hill, Estados Unidos, 2002.



## COMPARAR A INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG E SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO, QUANTO AO RISCO DE PERFURAÇÃO E VAZAMENTO DE FLUIDO, ASSIM COMO O RISCO DE TRINCA A FRIO

**Fernando Marques Fernandes<sup>1</sup>, Carlos Alberto Amaral Moino<sup>2</sup>, Heitor Pereira Bernardes<sup>3</sup>, Larissa Pagotto Gomes<sup>4</sup>, Luis Rodrigo Rochelle<sup>5</sup>, e Thaís Dantas Silva<sup>6</sup>**

<sup>1 a 6</sup> Departamento de Engenharia Mecânica – UNISANTA – Universidade Santa Cecília  
Rua Oswaldo Cruz, 277 – Santos – São Paulo – Brasil – [fmarques@unisanta.br](mailto:fmarques@unisanta.br)

### RESUMO

Este trabalho teve como objetivo comparar a influência dos processos de soldagem TIG (GTAW) e soldagem com eletrodo revestido (SMAW), em uma tubulação sendo resfriada com a passagem de fluido, o que caracteriza a soldagem em operação. Os aportes térmicos de soldagem para cada processo de soldagem foram avaliados. A soldagem foi realizada na parede externa do tubo API 5L Gr. X65 – CE: 0,41% e com espessura de 7,10 (0,280”), simulando o enchimento com solda. Água potável na temperatura ambiente, em torno de 20,4 °C, foi utilizada como fluido de resfriamento. A temperatura interna do tubo e a taxa de resfriamento foram monitoradas. Ensaio não destrutivo (inspeção visual e líquido penetrante), ensaios destrutivos (tração e dureza) e análise macrográfica e micrográfica, realizados nos 4 trechos de enchimento com solda, serviram de base para a avaliação. Os resultados mostraram que a possibilidade de perfuração e vazamento de fluido durante a soldagem em operação não ocorreu, pois, a temperatura na parede interna do tubo ficou muito abaixo da temperatura estabelecida por norma (980 °C de acordo com PRCI R2269-01R – Final Report). No entanto, a zona de fusão (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA) tiveram maior penetração no processo SMAW. Não foi observado o aparecimento de fases frágeis devido ao resfriamento rápido (estrutura martensítica), porém o resfriamento causado pelo fluido provocou o aumento da dureza na ZF e ZTA, e ainda reduziu o alongamento no ensaio de tração. Este aumento ficou mais evidente no processo de soldagem com Eletrodo Revestido. Pelos resultados apresentados e de acordo com os aportes térmicos (HI – Heat Input) empregados (HI TIG ≈ HI SMAW) é possível verificar que o processo de soldagem SMAW oferece maior risco de perfuração.

**Palavras Chave:** Soldagem em Operação; Soldagem em carga; Tubulações Industriais.



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Objetivo

Comparar a influência dos processos de soldagem TIG (GTAW) e soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW), quanto ao risco de perfuração e vazamento de fluido, assim como o risco de trinca a frio (“Hydrogen Cracking”), levando em consideração os aportes térmicos (HI – “Heat Input”), em um tubo sendo resfriado com a passagem de fluido (água na temperatura ambiente de 20,4 °C), o que caracteriza a soldagem em operação (“In-Service Welding”).

### 1.2. Revisão Bibliográfica

A soldagem envolve muitos fenômenos metalúrgicos como, por exemplo, fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e tensões de contração, que podem causar muitos problemas práticos. Os problemas podem ser evitados ou resolvidos aplicando-se parâmetros de soldagem adequados para uma determinada atividade.

A maioria dos processos de soldagem por fusão é caracterizada pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada. Esta energia concentrada pode gerar em pequenas regiões temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material.

Após a soldagem a dissipação de calor ocorre principalmente por condução na peça das regiões de maior temperatura para o restante do metal. A variação da temperatura em diferentes pontos da peça durante a soldagem pode ser estimada na forma de uma curva denominada ciclo térmico de soldagem. Os pontos mais próximos da junta sofrerão uma variação de temperatura devido à passagem da fonte de calor. Essa curva apresenta pontos importantes: temperatura de pico ( $T_p$ ), temperatura crítica ( $T_c$ ), tempo de permanência acima de uma temperatura crítica ( $t_p$ ).

Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) é um processo que utiliza eletrodo sólido de tungstênio não consumível. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte. Para a solda TIG podemos utilizar um metal de enchimento (chamado vareta), ele é adicionado no limite da poça de fusão. A soldagem TIG produz uma solda limpa e de alta qualidade e como não gera escória, a chance de inclusão desta no metal de solda é eliminada, e a solda não necessita de limpeza no final do processo. Os tipos de gases mais indicados para o processo TIG são argônio, hélio ou mistura entre esses dois gases.

A soldagem em eletrodo revestido também conhecida como Shielded Metal Arc Welding (SMAW) é um processo manual no qual um fio elétrico é mantido entre a extremidade do eletrodo metálico revestido e a peça a ser trabalhada com alto calor. Esse calor que é produzido pelo fio, vai fundindo

o metal juntamente com o eletrodo e o revestimento. Conforme a soldagem vai acontecendo, os gases que vão se soltando, vão protegendo o metal de solda da contaminação.

Esse processo de soldagem é bastante utilizada para soldar ferro e aço, mas também pode ser usado em ligas de níquel, cobre e alumínio.

Além de ser encontrados facilmente no mercados, os eletrodos revestidos proporcionam uma solda limpa e rápida na peça. É um processo onde há baixo investimento, pois os equipamentos podem ser usados para diversos outros processos, além da flexibilidade de aplicação.

Mas, além de suas vantagens, esse processo possui uma baixa produtividade e requer cuidados especiais com os eletrodos e delicadeza na hora da soldagem. E há também um volume maior de gases e fumos gerados no processo.

O eletrodo revestido é um ótimo condutor metálico que permite facilmente a passagem da corrente elétrica. É formado por um núcleo metálico, chamado alma. Essa alma tem como principal função, conduzir a corrente elétrica e fornecer metal para a junta da peça. Já o seu revestimento, é extrusado sobre varetas metálicas.

### 1.3. Metodologia

O tubo utilizado foi o API 5L Gr. X65, com diâmetro nominal de 12" (323 mm) e espessura de parede de 7,10 mm (0,280"), Figura 1. A composição química do tubo foi testada por análise com espectrômetro de emissão óptica e ratificada através do Certificado de Material fornecido na aquisição do material.



Figura 1: Tubo utilizado para o ensaio

As soldagens de enchimento com solda, foram executadas em 4 regiões da parede externa do tubo, com 200 mm de comprimento cada. No intuito de avaliar os efeitos do resfriamento acelerado, causado pela passagem do fluido interno, foram avaliadas as seguintes condições:



Condição 1 - Utilizado o processo soldagem TIG (GTAW) com corrente contínua e polaridade direta (CC-), corrente elétrica de 156 A, tensão elétrica de 22 V, velocidade de avanço de 6 cm/min., aporte térmico (HI – “Heat Input”) de 20,59, varetas classe ER70S-3, com gás de proteção argônio 99,99% de pureza, com passagem de fluido interno.

Condição 2 - Utilizado o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) com corrente contínua e polaridade inversa (CC+), corrente elétrica de 98 A, tensão elétrica de 25 V, velocidade de avanço de 6 cm/min., aporte térmico (HI – “Heat Input”) de 22,05, eletrodo revestido classe E7018, com passagem de fluido interno.

Condição 3 - Utilizado os mesmos parâmetros do processo TIG acima, porém sem a passagem de fluido interno (soldagem convencional);

Condição 4 - Utilizados os mesmos parâmetros do processo Eletrodo Revestido acima, porém sem a passagem de fluido interno (soldagem convencional).

As variáveis do fluido no interior do tubo, como vazão, pressão e temperatura de entrada da água foram mantidas fixas. As variáveis do processo: intensidade de corrente elétrica e tensão elétrica foram registradas através de alicate amperímetro e voltímetro, respectivamente. Calculada a velocidade de avanço através da relação entre o comprimento da solda e o tempo gasto para sua realização.

Foi utilizado termopar tipo “K” (temperatura máxima de leitura: 1.300 °C), fixado com poliuretano (PU) na parede interna do tubo, sob as regiões soldadas, para as leituras das temperaturas, a fim de registrar as temperaturas máximas nas regiões sob as poças de fusão, nas quatro condições de soldagem apresentadas acima, Figura 2.



Figura 2: Taxa de resfriamento obtida com aquecimento em 3 pontos defasados 120° e passagem de fluido



Ensaio Não Destrutivos: Após a soldagem, 100% das juntas soldadas foram submetidas à inspeção visual e líquido penetrante (LP). Os ensaios de LP foram conduzidos de acordo com a norma ASME Section V [1] e por Inspetor Certificado.

Ensaio Mecânicos: Realizado ensaio de tração transversal e dureza em todas as soldas. Os ensaios foram realizados com base nas especificações de fabricação dos materiais e nas normas aplicáveis na qualificação dos procedimentos de soldagem, no caso as normas API 1104 [2] e ASME Seção IX [3]. A norma ASTM A370 [4] estabelece os métodos e definições para os ensaios mecânicos.

Exame Macrográfico e Ensaio de Dureza Rockwell C (HRC): realizado o exame macrográfico para identificar as regiões e extensão da zona termicamente afetada (ZTA), assim como a ocorrência de descontinuidades internas nas soldas. Um corpo de prova (CP) foi preparado para cada solda. As amostras foram cortadas, lixadas e atacadas com Nital 10% por cerca de 20 segundos. O ensaio de dureza Rockwell C (HRC) foi realizado com carga de 100 Kgf nos CPs de macrografia. As medições de dureza no metal de base, ZTA e poça de fusão foram realizadas na face do corte transversal a face da solda. A norma ASTM E 140-07 [5] foi utilizada para a conversão de dureza HRC para dureza Vickers (HV).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Análise Química

A Tabela 1 demonstra que, a composição química do tubo atendeu às exigências da norma API 5L para o material informado. O carbono equivalente (CE) foi calculado conforme indicado Equação 1 em 0,41%, próximo do limite máximo previsto para o Grau X-65, que é de 0,43%. O tubo foi escolhido para este trabalho, de forma que o CE estivesse próximo ao limite máximo da especificação, pois na soldagem, altos valores de CE implicam em uma maior susceptibilidade a formação de estruturas frágeis e trincas a frio.

Tabela 1: Composição Química dos Materiais de Base

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ELEMENTOS (%)								
Elemento/Amostra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Tubo	0,134	0,215	1,540	0,015	0,005	0,020	0,022	0,010
Norma API SPEC 5L	0,28 máx.	-	1,40 máx.	0,030 máx.	-	-	-	-

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ELEMENTOS (%)							
Elemento/Amostra	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	B
Tubo	0,021	0,003	< 0,002	0,037	< 0,001	0,052	< 0,001
Norma API SPEC 5L	-	-	-	-	-	-	-

### 2.2. Cálculo do Carbono Equivalente – CE (%)



$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$

$$CE_{IIW} = 0,134 + \frac{1,54}{6} + \frac{(0,020+0,022+0,052)}{5} + \frac{(0,010)}{15} \quad (2)$$

$$CE_{IIW} = 0,41\% \quad (3)$$

### 2.3. Parâmetros de Soldagem

- Posição de soldagem: 5F
- Processo usado: manual
- Cordões de solda sobre superfície livre (semelhante ao amantegamento)
- Vazão de fluido (água) no tubo: 5,3 l/min

### 2.4. Execução da Soldagem

Condição 1 - Utilizado o processo soldagem TIG (GTAW) com corrente contínua e polaridade direta (CC-), corrente elétrica de 156 A, tensão elétrica de 22 V, velocidade de avanço de 6 cm/min., aporte térmico (HI – “Heat Input”) de 20,59, varetas classe ER70S-3, com gás de proteção argônio 99,99% de pureza, com passagem de fluido interno.

Condição 2 - Utilizado o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) com corrente contínua e polaridade inversa (CC+), corrente elétrica de 98 A, tensão elétrica de 25 V, velocidade de avanço de 6 cm/min., aporte térmico (HI – “Heat Input”) de 22,05, eletrodo revestido classe E7018, com passagem de fluido interno, Figura 3.



Figura 3: Primeiro passe de solda com eletrodo revestido e passagem de fluido

Condição 3 - Utilizado os mesmos parâmetros do processo TIG, porém sem a passagem de fluido interno (soldagem convencional);

Condição 4 - Utilizados os mesmos parâmetros do processo Eletrodo Revestido, porém sem a passagem de fluido interno (soldagem convencional).



Equação de Aporte Térmico (HI – “Heat Input”)

$$HI \text{ (KJ/cm)} = \eta \times \frac{\text{corrente (A)} \times \text{tensão (V)}}{\text{velocidade (cm/min)}} \quad (4)$$

Onde:  $\eta$  – eficiência de transferência (TIG = 60% e Eletrodo Revestido = 90%)

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados e o cálculo do aporte de calor (HI).

Tabela 2: Informações Sobre os Procedimentos de Soldagem

PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM					
Processo de Soldagem	Tipo de corrente / Polaridade	Tensão Elétrica (V)	Corrente Elétrica (A)	Velocidade (cm/min.)	Aporte Térmico (KJ/cm)
TIG	CC (-)	22	156	6	20,59
Eletrodo Revestido	CC (+)	25	98	6	22,05

#### 2.4.1. Controle da Temperatura Durante a Soldagem

A Tabela 3 mostra que a temperatura do fluido interno ficou por volta de 20,4 °C. Desta forma, conclui-se, que durante os experimentos foi possível manter as faixas de temperatura do fluido pré-estabelecidas.

Tabela 3: Temperaturas Registradas Durante a Soldagem

REGISTRO DA TEMPERATURA MÁXIMA DURANTE A SOLDAGEM				
Localização/Processo	SEM FLUIDO		COM FLUIDO	
	Eletrodo Revestido	TIG	Eletrodo Revestido	TIG
Fluido Interno (°C)	-	-	20,4	20,4
Parede externa, adjacente a solda (°C)	450	440	410	390
Parede interna, sob a poça de fusão (°C)	594	594	509	500
$\Delta t_{250-100}$ (°C/s)	0,92		21,4	

Em relação a temperatura interna da parede do tubo, a Tabela 3 apresenta os máximos obtidos, e pode ser observado que:

A máxima temperatura interna da parede do tubo foi de 594 °C nos procedimentos com Eletrodo Revestido e TIG, ambos sem fluido, e 509 °C no procedimento com Eletrodo Revestido com fluido. A norma N-2163 [6] especifica que, para evitar perfuração durante a soldagem em operação, a temperatura interna da parede deve ser inferior a 980 °C.

Conclui-se que para todos os procedimentos, a temperatura interna máxima do tubo está abaixo da máxima especificada por norma, minimizando a possibilidade de perfuração durante a soldagem.

Em relação aos resultados da taxa de resfriamento ( $\Delta t_{250-100}$ ), pode ser observado que:

A taxa de resfriamento para a condição sem fluido foi muito inferior à obtida com a presença do fluido no interior do tubo. Isto mostra o forte efeito de resfriamento provocado pelo fluido durante a soldagem em operação.

Os resultados permitem concluir que, sobre as temperaturas máximas obtidas e as taxas de resfriamento no interior do tubo, nos procedimentos realizados, não houve risco de perfuração durante a soldagem.

## 2.5. Ensaio Não Destrutivos

Os corpos de prova para ensaios, foram extraídos perpendicularmente aos cordões de solda.

Foram realizados: Ensaio Visual e Líquido Penetrante (Figura 4), estes não apresentaram evidências de descontinuidades. Os enchimentos com solda, foram considerados aprovados conforme os critérios de aceitação das normas ASME seção IX [3] e API 1104 [2].



Figura 4: Ensaio de líquido penetrante realizado no cordão de solda – processo SMAW

## 2.6. Macrografia

Para cada procedimento foram realizados 3 passes e 1 camada, com e sem a passagem de fluido. A penetração da zona de fusão (ZF) e zona afetada termicamente (ZTA) foi maior para o processo SMAW. Figura 5 e Figura 6.



Figura 5: Polimento e ataque com nital 10% para ensaio de macrografia

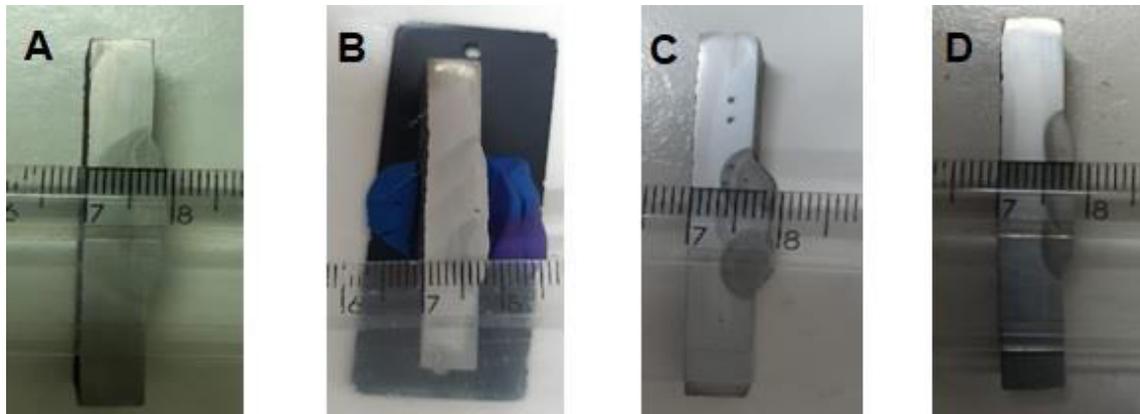


Figura 6: **A** - Eletrodo revestido sem fluxo, **B** - TIG sem fluxo, **C** - Eletrodo revestido com fluxo e **D** - TIG com fluxo

## 2.7. Micrografia

A microestrutura do metal de base (MB) é constituída de estrutura tipicamente hipoeutetóides ( $C < 0,77\%$ ), composta por ferrita e perlita em proporções similares. ZF é constituída em sua maioria de ferrita e perlita alinhada.

As amostras de Eletrodo Revestido e TIG, com passagem de fluido, não apresentaram formação de fases frágeis (estrutura martensítica), Figura 7 e Figura 8.



Figura 7: Microestrutura do eletrodo revestido com passagem de fluido



Figura 8: Microestrutura do processo TIG com passagem de fluido

## 2.8. Ensaio de Dureza

Dureza Vickers: A Tabela 4 apresenta os resultados de dureza obtidos, o valor máximo da média de dureza encontrado foi de 302 HV, para a zona fundida (ZF) do procedimento com Eletrodo Revestido e passagem de fluido. Pode ser observado um acréscimo significativo na média de dureza tanto na ZF como na ZTA para todos os procedimentos em comparação ao metal de base utilizado (tubo). Os valores de dureza obtidos nas ZFs das 2 soldas também são bem superiores aos procedimentos de soldagem convencional, onde os consumíveis de soldagem utilizados (TIG e eletrodo revestido) apresentam dureza entre 180 e 220 HV.

Os resultados da dureza ratificam os valores obtidos nos ensaios de tração, Tabela 5, tendo sido observado um aumento da dureza acompanhado com um aumento do limite de resistência e queda da ductilidade.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de dureza

RESULTADOS ENSAIOS DE DUREZA				
	PROCESSO	Trecho	HV (10 Kgf)	
			Ensaio	API 1104
sem fluido	Metal de Base (MB)	Tubo	205	245 máx.
	Eletrodo Revestido	ZTA	202	350 máx.
		ZF	214	275 máx.
	TIG	ZTA	192	350 máx.
ZF		215	275 máx.	
com fluido	Eletrodo Revestido	ZTA	257	350 máx.
		ZF	302	275 máx.
	TIG	ZTA	236	350 máx.
		ZF	260	275 máx.



## 2.9. Ensaio de Tração

A Tabela 5 apresenta, de forma geral, uma relativa queda no alongamento da solda, quando comparado ao metal base, atribuído ao efeito do resfriamento do fluido. A soldagem com eletrodo revestido apresentou uma redução de alongamento mais elevada do que a permitida pela norma. Esta queda mais acentuada na ductilidade foi atribuída a maior penetração da poça de fusão e maior proximidade entre o fluido e a fonte de calor de soldagem, que proporcionou um aumento na taxa de resfriamento.

Tabela 5: Resultados dos Ensaio de Tração

RESULTADOS ENSAIOS DE TRAÇÃO								
	PROCESSO	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)		LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)		ALONGAMENTO (%)		REGIÃO FRATURA
		Tubo	API SPEC 5L	Tubo	API SPEC 5L	Tubo	API SPEC 5L	
sem fluido	Metal de Base (MB)	523	450 mín.	610	535 mín.	30,0	20 mín.	MB
	Eletrodo Revestido	520		603		18,4		ZTA
	TIG	528		615		18,1	17 mín.	MB
com fluido	Eletrodo Revestido	510	620	11,3	ZTA			
	TIG	515	618	14,8	MB			

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na soldagem em operação, o resfriamento causado pelo fluido em circulação, elevou significativamente a taxa de resfriamento na parede do tubo, quando comparado à soldagem convencional, sem resfriamento.

Os resultados mostraram que o risco de perfuração, durante a soldagem em operação, é mínimo para os parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho, pois a temperatura na parede interna do tubo (509 °C com fluido) ficou abaixo da temperatura máxima estabelecida por norma (PETROBRAS N-2163 [6]).

No entanto, a zona de fusão (ZF) e zona afetada termicamente (ZTA) tiveram maior penetração no metal de base para o processo SMAW.

Não foi observado o aparecimento de fases frágeis (estrutura martensítica) devido a taxa de resfriamento maior, contudo o resfriamento causado pelo fluido provocou o aumento da dureza na ZF e ZTA, e ainda reduziu o alongamento no ensaio de tração. Este aumento ficou mais evidente no processo de soldagem com Eletrodo Revestido.

Com os resultados obtidos e de acordo com os aportes térmicos empregados, é possível verificar que o processo de soldagem SMAW oferece maior risco de perfuração e está mais susceptível a formação de fases frágeis quanto comparado com o processo de soldagem GTAW.

## AGRADECIMENTOS



Os autores agradecem a direção da UNISANTA por todo apoio recebido durante a execução deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] American Society for Mechanical Engineers. ASME Section V: non destructive examination. USA: ASME; 2007. 304 p.
- [2] American Petroleum Institute. API 1104: standard for welding pipelines and related facilities. Washington: API; 2013.
- [3] American Society for Mechanical Engineers. ASME Section IX: qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators. USA: ASME; 2019.
- [4] American Society for Testing and Materials. ASTM A 370: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken: ASTM; 2008. 47 p.
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM E 140-07: Hardness conversion tables for metals.
- [6] Petrobras. N-2163: soldagem e trepanação em equipamentos, tubulações industriais e dutos em operação. Rio de Janeiro: Petrobras, 2021.



## ANÁLISE DE MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE DE EMBARCAÇÃO DE APOIO PORTUÁRIO

**Fernando Marques Fernandes<sup>1</sup>, Carlos Alberto Amaral Moino<sup>2</sup>, Bruno Lopes Chagas da Silva<sup>3</sup>, Caio Fillipe Mello Carvalho dos Santos<sup>4</sup>, Jonathan Bizari de Souza Villanova<sup>5</sup>, Matheus Lima de Oliveira<sup>6</sup>, Matheus Vilardo Affonso Galeti<sup>7</sup> e Paulo Ricardo Vasques<sup>8</sup>**

<sup>1 a 8</sup> Departamento de Engenharia Mecânica – UNISANTA – Universidade Santa Cecília  
Rua Oswaldo Cruz, 277 – Santos – São Paulo – Brasil – [fmarques@unisanta.br](mailto:fmarques@unisanta.br)

### RESUMO

A manutenção é um dos fatores mais importantes para a competitividade de uma empresa. A definição adequada da estratégia de manutenção aplicada aos equipamentos é imprescindível para garantir a qualidade e segurança do processo. Com o crescimento da competitividade mundial no mercado de transportes marítimos de cargas, torna-se essencial que a manutenção seja realizada de forma assertiva e com baixo custo. Desta forma, esse estudo desenvolve estratégias de manutenção para o principal equipamento do terminal portuário, do ponto de vista operacional e financeiro. Devido a esta importância, este trabalho descreve a implementação do plano de manutenção utilizando ferramentas da Confiabilidade e demonstra a estrutura montada na empresa para criação da política de manutenção atual. A definição dos critérios de avaliação e decisão para as melhores práticas de manutenção são discutidos no desenvolvimento da pesquisa. O resultado encontrado foi a proposta de implementação dos planos de manutenção com enfoque nos sistemas classificados como críticos do equipamento, no qual foram definidos através de análises sistemáticas de indicadores e históricos do equipamento e construção de FMEA.

***Palavras Chave: Confiabilidade; Plano de manutenção; Estratégia de manutenção; FMEA.***



## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é uma das maiores potências em importação e exportações do continente, pois conta com uma extensa costa litorânea e fácil acesso aos principais centros comerciais do país. Com a globalização, principalmente do mercado de produtos, o número de importações e exportações no país aumentou consideravelmente nos últimos anos. Com este aumento de demanda dos portos, exigiu-se a construção de novas embarcações de apoio portuário, para atender a demanda de cabotagem. Uma das embarcações mais importantes no papel de apoio portuário é o rebocador.

O rebocador é uma embarcação de médio porte, com função de auxiliar na atracação, desatracação, manobrabilidade e garantir a segurança dos navios de carga no interior do porto. Com os navios cada vez mais pesados, são necessários rebocadores mais potentes e com novas tecnologias para suprir a demanda portuária, com isso a competitividade desse mercado aumenta, e a confiabilidade passa a se tornar um fator crucial para o sucesso de uma companhia nesse ramo.

Para um estudo de aumento de confiabilidade aplicamos o FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), que é um estudo de engenharia aplicado durante a fase de projeto, e operacional do produto possam identificar as principais e mais importantes atividades para o melhor manutenção, e operacionalidade do produto, evitando falhas e avaliando processos de melhoria.

### 1.1. Objetivo

Buscar a Implementação da Engenharia de Confiabilidade no Setor Naval, buscando melhorias operacionais para o setor, aplicando estratégias de FMEA, planos de manutenção, especificação de equipamentos, lista de criticidade de equipamentos, tempo médio entre falhas, tempo médio entre reparos, lista de materiais estocáveis, para que durante sua operação tenhamos melhores resultados operacionais, como maior disponibilidade, menor volume de falhas, garantindo também menor custo e maior segurança.

### 1.2. Fundamentação

A manutenção é considerada a engenharia do componente uma vez que estuda e controla o desempenho de cada parte que compõe um determinado sistema. Digamos que é um conjunto de cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de máquinas, equipamentos, ferramentas e instalações. Esses cuidados envolvem a conservação, a adequação, a restauração, a substituição e a prevenção. Resumidamente a manutenção visa atuar no sistema como um todo com o objetivo de evitar quebras e/ou paradas na produção, bem como garantir a qualidade planejada dos produtos.



O conceito de manutenção nada mais é do que realizar todas as atividades necessárias para assegurar que um determinado equipamento continue desempenhando as suas funções para as quais foi projetado e construído, em níveis de desempenhos exigidos e satisfatórios.

De acordo com [1], os tipos de manutenção aplicados nos principais modelos estratégicos e apresentados na Figura 1 são:



Figura 1: Tipos de Manutenção

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O local escolhido para desenvolvimento da pesquisa está localizado no porto de Santos (São Paulo - Brasil), ele foi projetados para realizar a construção, manutenção e reparo de embarcações de pequeno e médio porte, utilizadas principalmente para apoio marítimo e portuário.

### 2.1. O Equipamento

A embarcação de apoio portuário, também conhecida como rebocador, equipamento de estudo, é o principal equipamento para rebocagem e apoio oceânico, sendo responsável pela fase inicial ou final do processo de atracação e desatracação no porto. Sendo assim, deve-se exigir maior empenho e compromisso com as estratégias de manutenção deste, visto o impacto operacional em caso de indisponibilidade do equipamento. O rebocador escolhido para o estudo, foi fabricado no estaleiro Wilsons Sons e possui as seguintes características:

- Rebocador: Delphinus
- Casco: WS-122
- Ano de Fabricação: 2012;
- Força de Tração: 75,1 Toneladas;
- Comprimento: 32 metros;
- Largura: 11 metros.;



Por se tratar de un equipamiento nuevo, el rebocador citado posee tecnología avanzada y recursos que facilitan en sus mantenimientos correctivos emergenciales, e también alerta antes que ocurran las fallas que puedan ocasionar en paradas inesperadas y accidentes que puedan ocurrir, a través de sus sistemas supervisórios, PLC (Power Line Communication) y registros de alarmes de mantenimiento.

O sistema supervisório es un software desarrollado para que sea posible realizar la gestión visual del comportamiento de las máquinas, identificar posibles fallas y defectos. También es un equipamiento donde quedan salvos los alarmes ya solucionados para que exista un estudio para el análisis de falla.

## 2.2. Estudio de Caso

El estudio de caso de esta investigación fue ejecutado en uno de los principales equipos de la embarcación de apoyo portuario, debido al análisis realizado donde percibimos que el guincho es el equipo con mayor número de fallas durante la maniobra, el mismo es el mayor responsable del apoyo durante la entrada y movimiento de los buques dentro del puerto, siendo este el proceso más importante y peligroso durante la navegación, y analizado de esta forma como el equipo que más exige políticas rígidas y consistentes de mantenimiento. Los temas siguientes serán presentados el equipo en estudio, abordando las características técnicas, funciones durante la operación y el modo de mantenimiento adoptado antes de la implementación de la Mantenimiento Centrada en Confiabilidad.

El equipo posee tambor bipartido accionado hidráulicamente, un tambor es usado para tareas regulares de reboque y el otro puede ser equipado con un cable idéntico y actúa como reserva en caso de emergencias.

El guincho, Figura 2, tiene las siguientes capacidades en cada tambor, no siendo aplicadas simultáneamente:

- Velocidad tambor 1, en sentido de giro anti horario (recolviendo) hasta 10 m/min
- Velocidad tambor 2 en sentido de giro anti horario (recolviendo): hasta 40 m/min
- Fuerza del freno: 200 ton
- Sección de longitud del tambor 1 y 2: 730 mm
- Diámetro del rollo que soporta el cable: 2160 mm, suficiente para almacenar un cable, con longitud total máxima de 150 m y diámetro 96 mm.



Figura 2: Guincho

### 2.3. Estrutura de Implementação da Manutenção Centrada em Confiabilidade

De acordo com [2], os principais temas para a realização do ciclo FMEA são:

- Avaliação Cíclica de Criticidade de Equipamentos;
- Manutenção Preditiva.
- Demanda de Serviços de Manutenção;
- Indicadores de Manutenção;
- Suprimentos e Custos;

#### 2.3.1. Divisão de Sistemas do Equipamento

O equipamento foi dividido em oito sistemas, Figura 3.

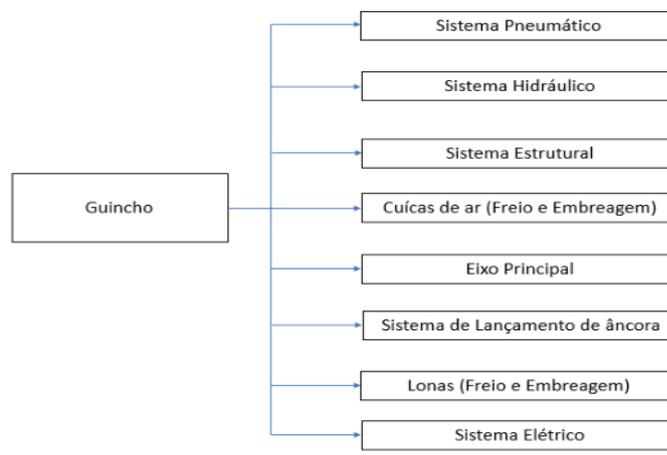


Figura 3 - Sistemas do Equipamento



### **2.3.2. Conceitos para Análise de Criticidade dos Equipamentos**

Foram adotados métodos de análise baseados em históricos do equipamento, indicadores de manutenção e impacto em itens como segurança e operacionalidade.

#### **2.3.2.1 Segurança**

Conforme histórico do equipamento, foram analisadas todas as falhas potenciais que o componente do sistema pode apresentar e elencadas em três níveis:

1. Não ocasiona acidente com pessoas ou processo;
2. Pode ocasionar risco de acidente com pessoas ou processo;
3. Ocasiona acidente com pessoas ou processo.

#### **2.3.2.2 Meio Ambiente**

Similar ao indicador de segurança, o meio ambiente segue a mesma estrutura de análise:

1. Não ocasiona acidente ambiental;
2. Pode ocasionar acidente ambiental;
3. Ocasiona acidente ambiental.

#### **2.3.2.3 Impacto à Operação**

O indicador de impacto à operação foi definido conforme tempo de inatividade do equipamento em caso de falha do componente do sistema:

1. Não impacta operacionalidade do equipamento;
2. Impacta a operação do equipamento em até 2 horas (Contabilizando tempo médio de reparo);
3. Impacta a operação do equipamento mais de 2 horas.

#### **2.3.2.4 Custo**

O método ABC (Activity-Based Costing) criado por [3], é um método de análise das despesas relacionadas à materiais, onde são apresentadas três classificações conforme o histórico de consumo. Nesse estudo, a metodologia foi aplicada para identificar os sistemas que mais tiveram custos para correção de falhas e quebras, sendo:

- A.** 20% dos sistemas que mais tiveram custo para correção das falhas do quadrimestre analisado;
- B.** Os seguintes 40% dos sistemas que mais tiveram custos para correção das falhas no quadrimestre analisado;
- C.** Os 40% restantes.



Para a indicação da criticidade do equipamento no processo de operação conforme [4], foi identificada a taxa de disponibilidade do equipamento em 86,8% e assim determinado o grau da implicação de sua ausência na operação. De acordo com [5], os níveis de aceitação dos riscos operacionais, econômicos, de meio ambiente e segurança, são determinados conforme a política interna da empresa. O grau de criticidade de uma máquina é estabelecido pelo maior nível de complexidade de solução de suas falhas utilizando uma matriz de criticidade que, através dos valores de frequência e gravidade, geram a classificação dos equipamentos.

#### 2.4. Elaboração do FMEA

O estudo de FMEA necessita da identificação dos seguintes aspectos para cada função de uma instalação, que neste trabalho foi referenciado como subsistema ou componente:

- Causa da Falha – Porquê da falha;
- Efeito da Falha – Impacto na função principal;
- Criticidade – Severidade do efeito.
- Função – O fim a que o equipamento foi projetado;
- Falha Funcional – Perda da função, ou desvio;
- Modo de Falha – Possibilidade e o que pode falhar.

Os subsistemas/componentes classificados com Criticidade Alta no Guincho, de acordo com o método de Análise por Matriz de Ponderação foram:

- Sistema de Frenagem do Tambor;
- Sistema de Embreagem;
- Sistema de Liberação de Emergência (Quick Release);
- PLC;
- Bombas Hidráulicas acionadas pelos motores diesel;
- Motor Elétrico acionador da Bomba hidráulica;
- Sensores Pick Ups e Válvulas Solenóides;
- Cintas e Lonas;
- Tubulações e Mangotes Hidráulicos;

Foram utilizados dados de histórico do equipamento que apontassem registros de ocorrências em segurança e meio ambiente, classificados conforme Tabela 1.

Tabela 1: Notas de Critério de Severidade



<b>Nota Critério de Severidade</b>	
Danos pessoais com grande potencial de morte ou danos irreversíveis ao Meio Ambiente	10
Danos pessoais com afastamento e possibilidade morte e/ou invalidez ou risco de danos irreversíveis ao Meio Ambiente	8
Danos pessoais com possibilidade de afastamento ou riscos de danos de difícil reversão ao Meio Ambiente	6
Danos pessoais leves ou risco de danos reversíveis a longo prazo ao Meio Ambiente	4
Possibilidade de danos pessoais leves e risco de danos reversíveis com ações imediatas ao Meio Ambiente	2
Sem danos pessoais e sem danos ambientais	1

Para o Critério de Ocorrência (O), foram utilizados históricos de falhas para definir possíveis faixas de falhas, conforme realidade do equipamento em estudo e foram estabelecidas notas conforme Tabela 2.

Tabela 2: Notas do Critério de Ocorrência

<b>Nota Critério de Ocorrência</b>	
< 3 Semanas	10
3 Semanas < O < 1 Mês	8
1 Mês < O < 3 Meses	6
3 Meses < O < 6 Meses	4
6 Meses < O < 1 Ano	2
O > 1 Ano	1

Para o Critério de Detecção, foram criadas notas conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Notas de Critério de Detecção

<b>Nota Critério de Detecção</b>	
Probabilidade remota com as ferramentas existentes na empresa	10
Muito pouco provável diagnóstico	8
Pouco Provável diagnóstico	6
Provável diagnóstico	6
Muito Provável diagnóstico	4
Diagnóstico instantâneo	2

A Tabela 4, apresenta a definição de criticidade do subsistema em relação ao NPR (Número de Prioridade de Risco).

Tabela 4 - Faixa de Criticidade conforme NPR

NPR Inferior	NPR Superior	Classificação
1	65	Baixo
66	140	Médio
141	1000	Alto

Após a realização da metodologia, é possível representar o desenvolvimento do FMEA aplicado ao equipamento em estudo, conforme Tabelas 5, 6 e 7.



Tabela 5 - Desenvolvimento do FMEA (Sistema Mecânico)

SISTEMA	ITEM / FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	Risco de Acidente (S)	CAUSA DA FALHA	OCORRENCIA (O)	MEIO DE DETECÇÃO	DIAGNÓSTICO (D)	NPR	NÍVEL DE CRITICIDADE (Alto / Médio / Baixo)
SISTEMA MECÂNICO	FREIO DO TAMBOR - FRENAR O TAMBOR	Tambor deslizando, freio não consegue travar o tambor	TAMBOR DESLIZANDO, FREIO NÃO CONSEGUIE TRAVAR O TAMBOR	DIMINUIÇÃO DA ESPESURA DA CINTA DO FREIO (CORROSÃO)	4	CORROSÃO	2	INSPEÇÃO VISUAL DA CONDIÇÃO DA CINTA	2	16	BAIXO
				AJUSTE DO FREIO MUITO FROUXO	6	FALHA NO PROCEDIMENTO	4	INSPEÇÃO VISUAL E MEDIÇÃO DE FOLGA DO FREIO	4	96	BAIXO
		Tambor lento durante giro	TAMBOR LENTO DURANTE GIRO	DETERIORAÇÃO DA LONA DO FREIO (DESGASTE)	6	DESGASTE MECÂNICO	6	MEDIÇÃO DE ESPESURA DA LONA DO FREIO	4	144	ALTO
				AJUSTE DO FREIO MUITO APERTADO	4	FALHA NO PROCEDIMENTO	4	INSPEÇÃO VISUAL E MEDIÇÃO DE FOLGA DO FREIO	2	32	BAIXO
	EMBREAGEM DO TAMBOR - ACOPLAR O TAMBOR PARA GIRO DO GUINCHO	Eixo principal gira, porém o tambor não	EIXO PRINCIPAL GIRA, PORÉM O TAMBOR NÃO	DETERIORAÇÃO DA LONA DA EMBREAGEM (DESGASTE)	4	DESGASTE MECÂNICO	2	INSPEÇÃO VISUAL E MEDIÇÃO DE FOLGA DA EMBREAGEM	4	32	BAIXO
				CINTA DA EMBREAGEM COM BAIXA ESPESURA	4	CORROSÃO	2	INSPEÇÃO VISUAL DA CONDIÇÃO DA CINTA	2	16	BAIXO
				CUÍCA NÃO ABRE TOTALMENTE	4	FALHA DA BOMBA HIDRÁULICA	2	VERIFICAÇÃO PERIÓDICA DA PRESSÃO NOS MANÔMETROS DO SISTEMA	2	16	BAIXO
	QUICK RELEASE - LIBERAR TODO O FREIO DO TAMBOR EM EMERGÊNCIA	Quick release não libera totalmente o tambor	QUICK RELEASE NÃO LIBERA TOTALMENTE O TAMBOR	FALTA PRESSÃO NA GARRAFA ACUMULADOR	8	FALHA DA BOMBA HIDRÁULICA/ MOTOR HIDRÁULICO	2	VERIFICAÇÃO PERIÓDICA DA PRESSÃO NOS MANÔMETROS DO SISTEMA	2	32	BAIXO
				EIXO TRAVANDO PARA DESLIZAR	8	FALHA NA LUBRIFICAÇÃO DO EIXO DE ABERTURA DO FREIO	2	LUBRIFICAÇÃO PERIÓDICA	4	64	BAIXO
	CUÍCA - AÇÃO	Cuíca não abre totalmente	CUÍCA NÃO ABRE TOTALMENTE	VAZAMENTO DE ÓLEO HIDRÁULICO NO SISTEMA DE CUÍCA	6	DESGASTE MECÂNICO DAS VEDAÇÕES	6	ABERTURA E INSPEÇÃO DAS VEDAÇÕES DA CUÍCA	6	216	ALTO
				VAZAMENTO DE ÓLEO HIDRÁULICO NO SISTEMA DE CUÍCA	6	DESGASTE MECÂNICO DAS VEDAÇÕES	6	ABERTURA E INSPEÇÃO DAS VEDAÇÕES DA CUÍCA	6	216	ALTO

Tabela 6 - Desenvolvimento do FMEA (Sistema Hidráulico)

SISTEMA	ITEM / FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	Risco de Acidente (S)	CAUSA DA FALHA	OCORRENCIA (O)	MEIO DE DETECÇÃO	DIAGNÓSTICO (D)	NPR	NÍVEL DE CRITICIDADE (Alto / Médio / Baixo)	
SISTEMA HIDRÁULICO	VÁLVULA 3/2 VIAS REGULADORA DE PRESSÃO HIDRÁULICA	EQUIPAMENTO ROTACIONA EM APENAS UMA VELOCIDADE	BOBINA NÃO ATUA A VÁLVULA	4	ROMPIMENTO / FOLGA NA FIAÇÃO ELÉTRICA	2	INSPEÇÃO VISUAL	2	16	BAIXO	
			VAZAMENTO EXCESSIVO DE ÓLEO HIDRÁULICO PELA VÁLVULA	4	EXCESSO DE VIBRAÇÃO NO EQUIPAMENTO	2	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	10	80	MEDIO	
			ENTUPIMENTO DE REDE	4	SUJEIRA NO SISTEMA	6	FLUSH PERIÓDICO NO SISTEMA	6	144	ALTO	
	TUBULAÇÕES E MANGOTES DE ÓLEO HIDRÁULICO	BAIXA PRESSÃO DE ÓLEO HIDRÁULICO	TUBULAÇÕES E MANGOTES VAZANDO	CORROSÃO NAS TUBULAÇÕES E DESGASTE DOS MANGOTES	8	CORROSÃO NAS TUBULAÇÕES E DESGASTE DOS MANGOTES	8	INSPEÇÃO VISUAL/ ULTRASSOM	8	512	ALTO
				TUBULAÇÕES FROUXAS	6	TUBULAÇÕES FROUXAS	2	INSPEÇÃO E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	8	96	MEDIO
				CORROSÃO NAS TUBULAÇÕES E DESGASTE DOS MANGOTES	8	CORROSÃO NAS TUBULAÇÕES E DESGASTE DOS MANGOTES	8	INSPEÇÃO VISUAL/ ULTRASSOM	8	512	ALTO
	TANQUE DE ÓLEO HIDRÁULICO	AUMENTO NO NÍVEL DE ÓLEO	CONTAMINAÇÃO DO ÓLEO POR MEIOS EXTERNOS	4	CORROSÃO / VIBRAÇÃO	2	INSPEÇÃO VISUAL /	8	64	BAIXO	
	TROCADOR DE CALOR - REFRIGERAÇÃO DO ÓLEO HIDRÁULICO	ALTA TEMPERATURA DE ÓLEO	AQUECIMENTO DO SISTEMA	ENTUPIMENTO DAS TUBULAÇÕES/ CORROSÃO	4	ENTUPIMENTO DAS TUBULAÇÕES/ CORROSÃO	4	INSPEÇÃO VISUAL	2	32	BAIXO
				PARADA TOTAL DO GUINCHO POR	4	PARADA TOTAL DO GUINCHO POR	2	INSPEÇÃO VISUAL	2	32	BAIXO



Tabela 7 - Desenvolvimento do FMEA (Sistema Elétrico)

SISTEMA	ITEM / FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	Risco de Acidente (S)	CAUSA DA FALHA	OCORRÊNCIA (O)	MEIO DE DETECÇÃO	DIAGNÓSTICO (D)	NPR	NÍVEL DE CRITICIDADE (Alto / Médio / Baixo)
SISTEMA ELÉTRICO	MOTOR ELÉTRICO ACIONA A BOMBA HIDRÁULICA LOCALIZADA DENTRO DA UNIDADE HIDRÁULICA	BOMBA HIDRÁULICA NÃO GIRA	SOBREAQUECIMENTO DAS ESPIRAS DO MOTOR	8	CURTO CIRCUITO	4	MEGAGEM DAS BOBINAS	4	128	MÉDIO
			SOBRECORRENTE NO MOTOR / DESARME DO DISJUNTOR	6	ENTUPIMENTO DE REDES DE RECALQUE / TRAVAMENTO MECÂNICO	2	MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E CORRENTE	4	48	BAIXO
	PLC - REALIZAR COMANDOS AUTOMATIZADOS DO EQUIPAMENTO	PARALISAÇÃO PARCIAL OU TOTAL DO EQUIPAMENTO	SOBREAQUECIMENTO DAS CONEXÕES ELÉTRICAS	6	POSSÍVEL CURTO CIRCUITO	4	INSPEÇÃO VISUAL, MEDIÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE	4	96	BAIXO
			COMANDOS NÃO ATUAM	8	RELÉS / BASE DE RELÉS NÃO ATUANDO DEVIDO A FOLGAS, OU EXCESSO DE SUJEIRAS	2	INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	10	160	ALTO
			FOLGAS NAS CONEXÕES ELÉTRICAS	6	EXCESSO DE VIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO	4	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	8	192	ALTO
	SENSOR INDUTIVO DE PRESENÇA (PICK UP) - IMPEDE QUE O TAMBOR DO GUINCHO SEJA ACOPLADO CASO O PICK UP ESTEJA POSICIONADO PARA DESCIDA DO MOLINETE	PARALISAÇÃO PARCIAL DO EQUIPAMENTO	EMBREMAGEM DO GUINCHO NÃO PERMITE ACOPLAR O TAMBOR	6	QUEBRA DO SENSOR POR AVARIA MECÂNICA/ ROMPIMENTO DE CABO	8	INSPEÇÃO VISUAL	4	192	ALTO

## 2.4. Elaboração do Plano de Manutenção do Guincho

As atividades a ser realizadas e maneira como devem ser realizadas, foram mapeadas conforme FMEA e manual do fabricante do equipamento.

### 2.4.1. Plano Diário

- Verificação visual de pastilhas e discos de freio;
- Verificação visual do sistema de freio da tubulação hidráulica.

### 2.4.2. Plano Semanal

- Verificação visual do freio de conexão aparafusado;
- Verificar o nível de óleo dos freios da unidade hidráulica;
- Verificar os sistemas hidráulicos quanto a danos;
- Verificar desgaste excessivo, sons ou comportamentos incomuns e defeitos;
- Verificar a pressão no freio e a pressão no acumulador da embreagem.

### 2.4.3. Plano Mensal

- Verificar o funcionamento da bomba hidráulica;



- Verificar se há vazamentos durante o funcionamento da bomba ou ruídos anormais;
- Testar o dispositivo de quick release (alívio de emergência);

#### **2.4.4. Plano Trimestral**

- Realizar análise de vibração e termografia, nos painéis elétricos e nos equipamentos rotativos;
- Inspeccionar a espessura da lona do freio e, se necessário, ajustar/ substituir a lona.

#### **2.4.5. Plano Semestral**

- Lubrificar os bicos de graxa.

#### **2.4.6. Plano Anual**

- Realizar troca de óleo da caixa de engrenagens;

### **3. CONCLUSÕES**

Durante o trabalho foram apresentados os resultados a partir da realização do projeto de planos de manutenção, regulado com ferramentas de confiabilidade aplicadas no equipamento que mais apresentava falha ao longo da operação no porto de Santos, o guincho de reboque, com o propósito de analisar o desempenho do equipamento durante a operação ao longo do tempo.

Com a aplicação do FMEA esperamos que as falhas que surgem durante a operação sejam reduzidas, gerando maior disponibilidade das embarcações, com isso apresentando menor número de afretamento, também reduzindo os gastos com materiais e mão de obra, visto que serão previstos antes que possam ocorrer as falhas é possível realizar um comparativo no mercado e definir qual a melhor proposta, tornando a manutenção mais barata do que se fosse em um atendimento emergencial.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a direção da UNISANTA por todo apoio recebido durante a execução deste trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

- [1] NBR 5462-1994 - Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.
- [2] Kardec, A.; Nascif, J. - Manutenção Função Estratégica. São Paulo, Qualitymark Editora, 4. Ed, 2017.
- [3] Kaplan, R. S.; Cooper, R. - Custo e Desempenho: administre seus custos para ser mais competitivo. São Paulo, Futura, 1998.

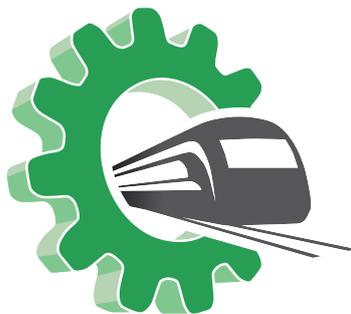


[4] Mobley, K.; Higgins, L. R. W. - Maintenance Engineering Handbook. New York Editora, 7<sup>a</sup> Edición, Nova Iorque, 2008. Disponível em <http://www.gammaexplorer.com/wp-content/uploads/2014/03/Maintenance-Engineering-Handbook-7th-Edition.pdf> - Acesso em Nov/2022.

[5] Carazas, F. J. G. - Decisões Baseadas em Risco: Método aplicado na Indústria de Geração de Energia Elétrica para seleção de equipamentos críticos e políticas de manutenção. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Área Temática

# Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas





## INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL, LA CANTIDAD DE DIENTES DE LAS POLEAS Y LA PÉRDIDA DE RENDIMIENTO EN UNA TRANSMISIÓN FLEXIBLE DE CORREA SINCRONIZADORA

Ricardo Mario Amé<sup>1</sup>; Daniel Hernán Lezama<sup>1</sup>; Luis Oscar Cottone<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Lomas de Zamora  
Juan XXIII y Ruta Provincial 4. Lomas de Zamora. Provincia de Buenos Aires. Argentina.  
[ingricardoame@gmail.com](mailto:ingricardoame@gmail.com);

### RESUMEN

En este trabajo se analiza la relación entre la temperatura superficial externa de una correa sincronizadora y su relación con la cantidad de dientes de las poleas.

Para ello se utilizó un banco de pruebas disponible en el cual se colocaron sendas poleas sincronizadoras de una cantidad determinada de dientes y la correa correspondiente. Sobre este mecanismo se tomaron los datos. A continuación, y manteniendo la misma correa, se colocaron poleas con otra cantidad de dientes y se repitió la toma de datos.

Los valores de temperatura se llevaron a una tabla y luego a un gráfico, a fin de visualizar la posible variación entre estos valores según las distintas cantidades de dientes de las poleas que conforman el mecanismo.

Las hipótesis son: a) para igual correa (cambiando la distancia entre centros) su temperatura es inversamente proporcional a la cantidad de dientes de las poleas; b) la elevación de la temperatura es directamente proporcional al valor del momento de torsión resistente, c) la diferencia relativa entre los distintos valores de la temperatura medida se mantiene para cada mecanismo, independientemente del momento de torsión resistente que soporte y d) las menores temperaturas identifican la mejora en el rendimiento del conjunto .

Este trabajo debe ser tomado como una comunicación de avance del proceso de investigación que se está llevando adelante.

**Palabras Clave:** *Transmisiones flexibles, Rendimiento mecánico, Correas sincronizadoras.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La transmisión flexible por correa sincronizadora es un mecanismo ampliamente difundido. Se la utiliza en todo dispositivo, maquinaria o equipo que requiera la inexistencia de resbalamiento relativo entre la polea conductora y la conducida. El rendimiento mecánico se ubica entre el 97 al 99% [1], siendo de los más altos, si se lo compara con otras transmisiones flexibles, como las de correas de sección trapecial o plana, con 92% a 97% [2], o por cadenas, con 94% a 98% [2].

En el presente trabajo se ha teorizado sobre la hipótesis que indica una relación inversamente proporcional entre la temperatura superficial externa de la correa y la cantidad de dientes de las poleas, para una transmisión de relación 1 a 1. Se admite que la generación de temperatura es un factor de pérdida de energía.

En cuanto al análisis de la influencia de la temperatura en las características funcionales de las correas, algunos trabajos [3] se focalizan en la aceleración de los daños por fatiga en correas de sección trapecial que por ella se producen; otro [4] estudia la variación del coeficiente de fricción entre la correa de sección trapecial y la polea de fundición de hierro en función de la presión superficial y la temperatura, concluyendo que ésta modifica el coeficiente de fricción, reduciéndolo, y además, aporta el dato de que la elevación de la temperatura observada en los ensayos es entre 3 y 4 °C por sobre la del ambiente. En [5] se elabora un modelo matemático y su comprobación práctica para medir el flujo de calor a través de la transmisión de correa sincronizadora, a partir de distintos valores de la carga de montaje, velocidad angular y del momento de torsión resistente; concluyendo que la temperatura en la polea motriz es siempre mayor a la de la correa y que la temperatura de esta es igual en todo su desarrollo: este trabajo es muy importante y concluye que la elevación de temperatura produce desgaste de los dientes de las poleas y pérdida de peso de la correa. Otro trabajo significativo es aquel [6] en donde se determina la temperatura generada por fricción (al momento del ingreso y egreso del dentado de la correa sincronizadora en la polea) y por su deformación elástica. Se obtiene que la pérdida total de potencia de la transmisión resultó de 31,17 J/s y la eficiencia del 98,27%, valor obtenido sin considerar la disipación de energía provocada por la vibración o la rotación de los rodamientos, según estos autores y en concordancia con lo ya referenciado anteriormente [1].

Finalmente, en [7] se estudia los efectos térmicos a largo plazo que se producen en una transmisión flexible por correa de sección trapecial; se entiende que el aumento de la temperatura en el sistema de transmisión por correa es un problema importante que no se puede ignorar, en esta referencia se considera la temperatura generada por la fluencia viscosa del material de la correa y por la fricción entre esta y la polea.

La disponibilidad de material de estudio respecto de la generación de temperatura por diseño del mecanismo no es lo suficientemente deseable. Además, debe distinguirse la generación de



temperatura por rozamiento (correas planas y de sección trapecial) de la que se genera en las correas sincronizadoras, en donde dicho efecto es casi inexistente. En el presente trabajo se vincula la cantidad de dientes de las poleas a la generación de temperatura superficial de la correa. En esta etapa inicial de la investigación se realizan las mediciones y primeras aproximaciones para dos mecanismos de poleas de distinta cantidad de dientes y para la transmisión con momento de torsión resistente nulo.

Queda pendiente la prosecución de las mediciones de temperatura para momentos resistentes escalados de menor a mayor.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO.

### 2.1. Materiales.

El objeto de estudio es una correa sincronizadora. Se utiliza un banco de pruebas existente, (véase Figura 1) sobre el cual ya se han realizado otras experiencias. El mismo consta de un motor eléctrico monofásico de 1,5 KW; 220 VCA de alimentación y 1500 r.p.m. de velocidad de sincronismo; un brazo de palanca de 500 mm entre centros, para la detección del momento de torsión de reacción; un árbol auxiliar montado sobre dos cojinetes y una bomba de engranajes para generar resistencia. Las poleas se colocan, una en el extremo del árbol del motor y la otra en el árbol auxiliar. El brazo de palanca está unido, en el extremo opuesto al árbol motor, a una celda de carga de tracción, marca Flexar código CZA50 y ésta con su sistema electrónico de medición.

Para comenzar se optó por una correa código 360H-075 de 12,7 mm de paso; 914,4 mm de longitud, 72 dientes y 19,05 mm de ancho; y dos poleas iguales de 19 dientes código 19H con 76,81 mm de diámetro primitivo. A cada una de ellas se le mecanizó el agujero y chavetero para montar sobre sus respectivos árboles. La distancia entre centros es ajustable y se fijó en 336 mm. Luego de las mediciones de temperatura sobre este conjunto, se reemplazaron las poleas por otras de 26 dientes, código 26H con diámetro primitivo de 105,11 mm. No se reemplazó la correa y se ajustó la distancia entre centros a 292 mm.

Para la medición de la temperatura se utilizó un termómetro digital por infrarrojo marca Benetech modelo GM550E (véase la Figura 2). La temperatura se midió en grados Celsius y el termómetro se reguló para un índice de emisividad de 0,93 [8], recomendado para cauchos oscuros. La distancia de medición fue de entre 100 y 120 mm, lo que da un área de control de 100 mm<sup>2</sup> según la relación  $L/D = 12/1$  indicada en el instrumento.



Figura 1: Banco de pruebas utilizado en la experiencia. Foto de los autores.

Este termómetro tiene un error de  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ , lo cual a los fines del presente trabajo y siendo las mediciones de índole comparativas y no absolutas, resulta útil.



Figura 2: Termómetro digital por infrarrojo. Fotografía de los autores.

## 2.2. Método.

Se colocó el conjunto compuesto por la correa y las dos poleas iguales de 19 dientes. Se ajustó la distancia entre centros. La primera serie de mediciones se hizo con momento resistente nulo. La medición de la temperatura superficial externa de la correa  $T_c$ , se realizó en el centro de la distancia entre ejes, en el ramal tenso, según se muestra en la Figura 3.

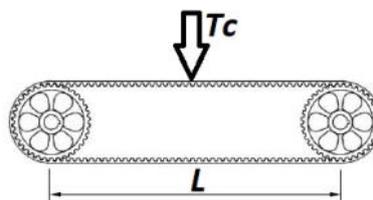


Figura 3: Esquema del mecanismo e indicación del punto de toma de temperatura.



Se midió la temperatura de la correa  $T_c$  y del medio ambiente (dentro del laboratorio), y se calculó la diferencia. La razón de ello es desvincularse de la incidencia del ambiente en los resultados. Se efectuaron varias sesiones de medición, en distintos días. Luego de sucesivos ajustes y pruebas, se obtuvieron dos tandas de datos (mediciones N°3 y N°4) cuyos valores se indican en la Tabla 1.

Tabla 1: Mediciones N°3 y N°4 de temperatura en el mecanismo con poleas de 19 dientes.

Minuto	Temp. Correa	Temp. Amb.	Diferencia	Temp. Correa	Temp. Amb.	Diferencia
0	24,5	24,5	0	26,4	26,4	0
2	29,3	24,3	5	31,3	26,1	5,2
4	31,7	24,4	7,3	32,1	25,9	6,2
6	30,8	24,6	6,2	33,5	25,8	7,7
8	30,5	24,5	6	34,1	26	8,1
10	33,1	24,3	8,8	34,2	25,6	8,6
12	33,6	24	9,6	35,6	25,5	10,1
14	33,5	24,4	9,1	35,4	25,3	10,1
16	34,3	24	10,3	35,5	25,5	10
18	34,6	24,1	10,5	35,3	25,3	10
20	34,8	24,2	10,6	35,8	25,3	10,5
22	34,9	24	10,9	36,2	25,1	11,1
24	34,7	24,1	10,6	36,9	25	11,9
26	36,1	23,7	12,4	37,2	25	12,2
28	36,2	24,1	12,1	37	25,3	11,7
30	36,2	23,9	12,3	37,3	25,1	12,2
32	36,8	24	12,8	37,2	24,6	12,6
34	37,1	24	13,1	36,8	25,6	11,2
36	36,6	24,2	12,4	36,9	25,3	11,6
38	36,7	24	12,7	37,7	25,3	12,4
40	37,3	24,1	13,2	37,6	24,8	12,8

Con el fin de obtener un resultado unificado, se calculó el promedio de las diferencias de temperatura, para cada minuto de los consignados en la Tabla 1, y con ello se elaboró el gráfico de la Figura 4.

El paso siguiente consistió en cambiar las poleas de 19 dientes por las de 26 dientes y mantener la misma correa, ajustando la distancia entre centros a 292 mm.

Se realizaron tres sesiones de medición de temperatura, siguiendo el mismo procedimiento anterior, y se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 2. A los fines de unificar los



datos se calculó el promedio de la diferencia para cada minuto y se elaboró el gráfico de la Figura 5.

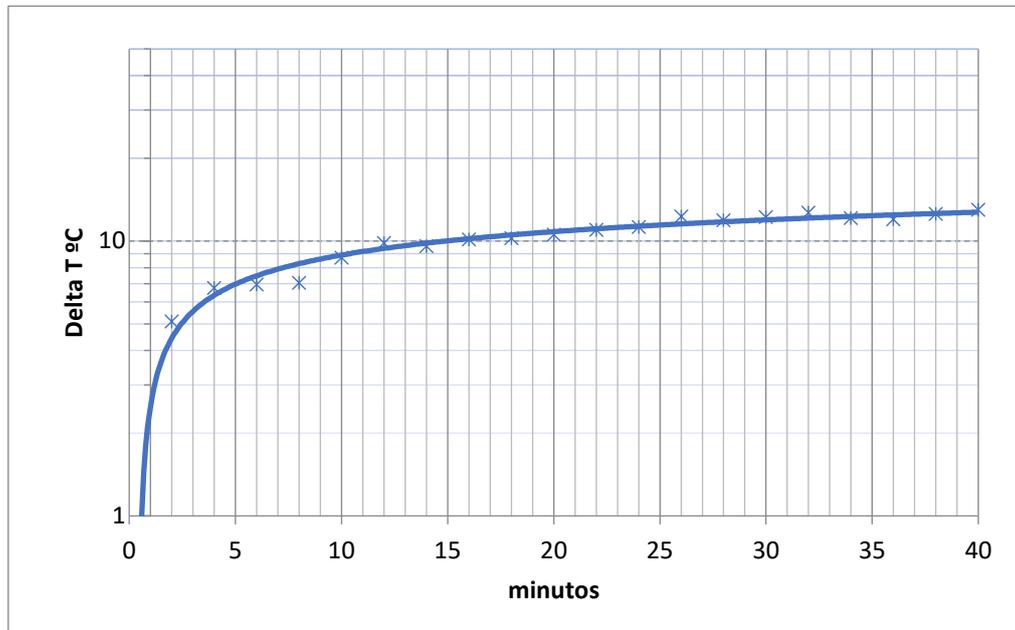


Figura 4: Evolución promedio de la temperatura para el mecanismo de poleas 19 dientes.

Tabla 2. Mediciones N°1; N°2 y N°3 de temperatura en mecanismo con poleas de 26 dientes.

Minuto	Temp. Correa	Temp. Amb.	Diferencia	Temp. Correa	Temp. Amb.	Diferencia	Temp. Correa	Temp. Amb.	Diferencia
0	25,5	25,5	0	23,2	23,2	0	23	23	0
2	28,8	25,4	3,4	26,9	22,9	4	26,7	22,6	4,1
4	29,5	25,6	3,9	27	22,4	4,6	27,2	23	4,2
6	29,9	25,4	4,5	27,6	22,4	5,2	27,16	22,8	4,36
8	30,6	25	5,6	28,6	22,5	6,1	27,6	22,4	5,2
10	31	25,4	5,6	28,8	22,2	6,6	27,6	22,4	5,2
12	31,5	25,3	6,2	29,2	22,1	7,1	28,7	21,6	7,1
14	31,5	24,7	6,8	29,4	22,2	7,2	28,2	21,7	6,5
16	32	24,9	7,1	30	22,1	7,9	27,8	21,8	6
18	32,3	25	7,3	30,1	21,9	8,2	29,7	21,7	8
20	32,3	24,8	7,5	30,4	22,1	8,3	29,5	21,5	8
22	32,6	25	7,6	30,7	22,4	8,3	30,2	21,4	8,8
24	32,6	24,5	8,1	30,5	22	8,5	30,2	21,6	8,6
26	32,8	24,6	8,2	31,1	22,4	8,7	30,1	21,6	8,5



28	32,8	24,8	8	31,2	22,5	8,7	30,5	21,7	8,8
30	32,9	24,7	8,2	31,3	21,9	9,4	30,3	21	9,3
32	33,1	24,8	8,3	31,8	21,9	9,9	30,5	21,5	9
34	33,2	24,9	8,3	31,2	21,9	9,3	30,7	21,5	9,2
36	33,3	25	8,3	31,5	22,1	9,4	31,2	21,5	9,7
38	33,6	24,2	9,4	31,7	22,1	9,6	30,9	21,3	9,6
40	33,8	24,2	9,6	31,9	21,7	10,2	31,1	21,5	9,6
42	32,3	24,6	7,7	32,1	22,2	9,9	31	21,5	9,5
44	33,8	24,7	9,1	32,3	22,1	10,2	31,3	21,4	9,9
46	33,4	24,8	8,6	32,1	22,1	10	31,4	21,6	9,8
48	33,9	24,5	9,4	32,1	22,2	9,9	31,6	21,6	10
50	34,1	24,7	9,4	32,5	22,1	10,4	31,6	21,7	9,9
52	33,3	24,7	8,6	32,2	22,2	10	31,4	21,4	10
54	34,1	24,8	9,3	32,3	22,2	10,1	31,4	21,2	10,2
56	34,2	24,8	9,4	32,4	22,1	10,3	31,2	21,5	9,7
58	34,1	24,4	9,7	32,6	22,3	10,3	31,5	21,3	10,2
60	33,7	24,7	9	32,8	22,3	10,5	31,5	21,4	10,1

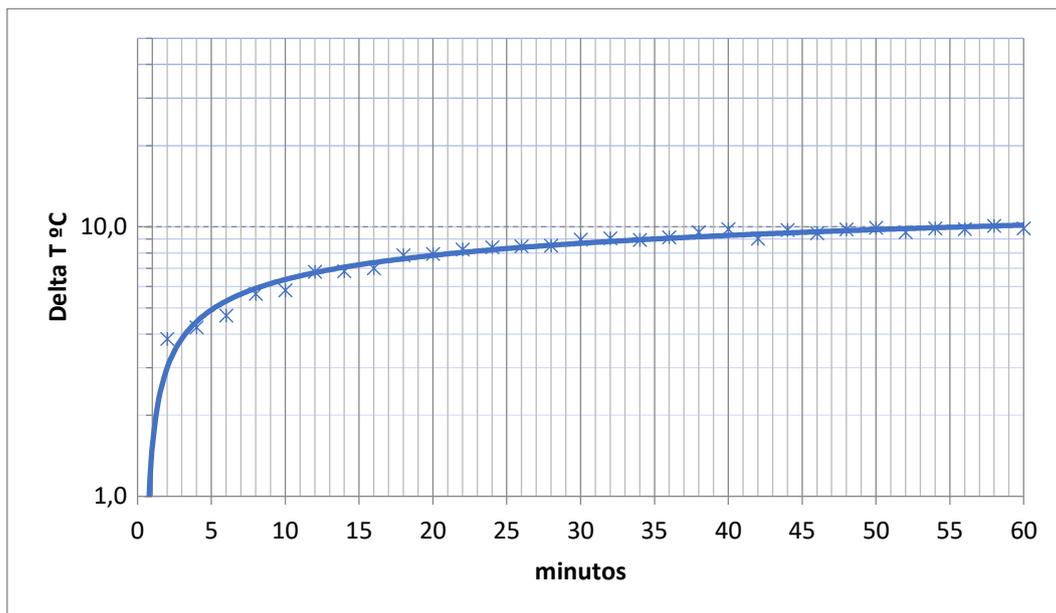


Figura 5: Evolución promedio de la temperatura para el mecanismo con poleas de 26 dientes.

### 3. RESULTADOS.



Se debe considerar que esta primera medición se realizó sin momento de torsión resistente, por lo que la temperatura desarrollada es función, mayormente, de la elasticidad viscosa de la correa. En estas condiciones, observando el gráfico de la Figura 4 respecto del de la Figura 5, se observa que la temperatura de estabilización es menor en el segundo caso.

Es importante destacar que ello se produce a pesar de que la correa se expone a una mayor frecuencia de las tensiones variables, dado la reducción de la distancia entre centros respecto del mecanismo de poleas menores y aun considerando que se desplaza a una velocidad lineal de  $8,05/5,88 = 1,369$  veces mayor.

La temperatura de equilibrio inferior se podría asociar a una mejora en el rendimiento mecánico del mecanismo, aunque, para aseverar esto aún se requieren más pruebas y la evaluación del efecto de transferencia de calor por convección, ya que ello es dependiente de la velocidad relativa entre el fluido (el aire) y el cuerpo caliente (la correa).

Con el fin de obtener otros parámetros de comparación, se calcula el “Gradiente” de crecimiento de temperatura para cada curva promedio en tres instantes: “Gradiente inicial”; “Gradiente a los 15 minutos” y “Gradiente a los 40 minutos”.

La Figura 6 y la Figura 7 indican este concepto.

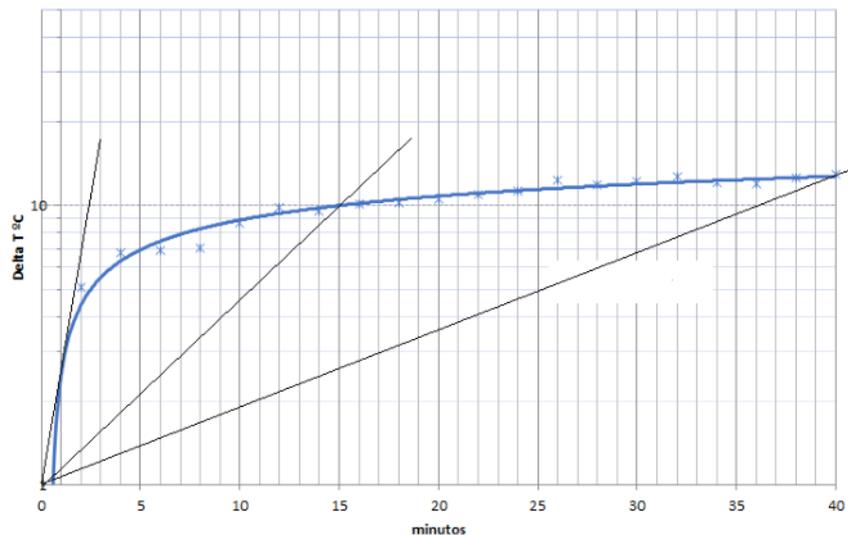


Figura 6: Gradientes para el mecanismo de poleas de 19 dientes

La expresión que identifica la curva es:

$$Y = 2,7772 \ln(x) + 2,4987$$

Con la cual se puede calcular:



- a) Gradiente inicial. Es la tangente a la curva con una recta que parte de 0. Ello resulta al minuto 1,0. La temperatura promedio para ese momento es:

$$AT = 2,7772 \ln(1) + 2,4987 = 2,4987^{\circ}C$$

De lo cual se obtiene el gradiente inicial:  $\frac{2,4987}{1} = 2,4987 [^{\circ} \frac{C}{min}]$

- b) Gradiente de los 15 minutos:  $AT = 2,7772 \ln(15) + 2,4987 = 10,01^{\circ}C$

Se obtiene:  $\frac{10,01[^{\circ}C]}{15[min]} = 0,667^{\circ}C/min$

- c) Gradiente de los 40 minutos:  $AT = 2,7772 \ln(40) + 2,4987 = 12,74^{\circ}C$

Se obtiene:  $\frac{12,74[^{\circ}C]}{40[min]} = 0,318^{\circ}C/min$

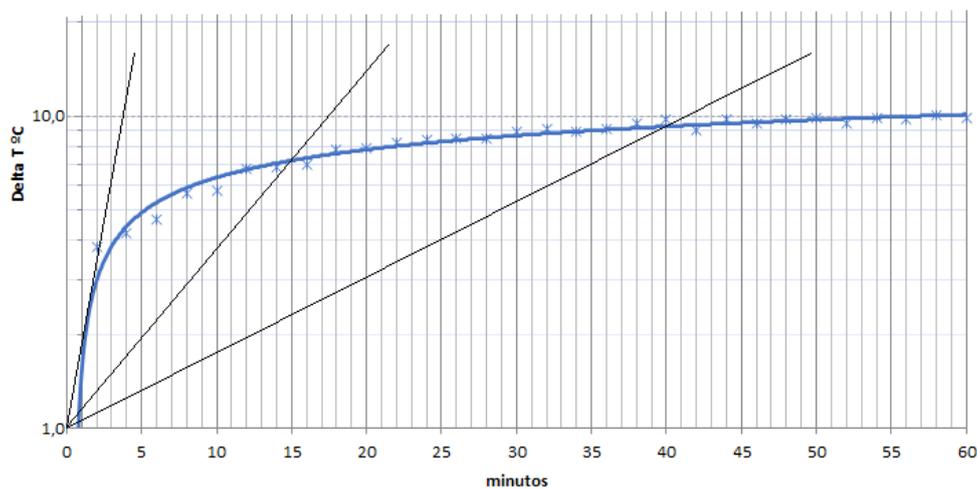


Figura 7: Gradientes para el mecanismo de poleas de 26 dientes.

La expresión que identifica la curva es:

$$Y = 2,1031 \ln(x) + 1,5303$$

Con la cual se puede calcular:

- d) Gradiente inicial. Es la tangente a la curva con una recta que parte de 0. Ello resulta a los 1,5 minutos. La temperatura promedio para ese momento es:

$$AT = 2,1031 \ln(1,5) + 1,5303 = 2,38^{\circ}C$$

De lo cual se obtiene el gradiente inicial:  $\frac{2,38}{1,5} = 1,586 [^{\circ} \frac{C}{min}]$

- e) Gradiente de los 15 minutos:  $AT = 2,1031 \ln(15) + 1,5303 = 7,225^{\circ}C$



Se obtiene:  $\frac{7,225[^\circ\text{C}]}{15[\text{min}]} = 0,481^\circ\text{C}/\text{min}$

f) Gradiente de los 40 minutos:  $AT = 2,1031 \ln(40) + 1,5303 = 9,288^\circ\text{C}$

Se obtiene:  $\frac{9,288[^\circ\text{C}]}{40[\text{min}]} = 0,232^\circ\text{C}/\text{min}$

#### 4. CONCLUSIONES PRELIMINARES Y PROPUESTAS A FUTURO.

La Tabla 3 muestra el resultado comparado de los gradientes. De la misma se deduce que, para esta primera etapa de la investigación, el crecimiento por minuto de la temperatura en el mecanismo de poleas de 19 dientes es más rápido que en el de 26 dientes, tal como se planteaba en una de las hipótesis.

Tabla 3. Comparación de gradientes de crecimiento de la temperatura según el mecanismo

Mecanismo con	Gradiente inicial. [°C/min]	Gradiente a los 15 minutos. [°C/min]	Gradiente a los 40 minutos. [°C/min]
poleas de 19 dientes	2,498	0,667	0,318
poleas de 26 dientes	1,586	0,481	0,232

Los resultados mostrados deben ser tomados como preliminares ya que el trabajo está en desarrollo. Se deben realizar más mediciones de temperatura con otros juegos de poleas para certificar esta tendencia. Además, como ya se indicó anteriormente, se debe considerar el efecto de disipación de temperatura por convección, ya que afecta al valor medido con el termómetro. Para considerar el real efecto de la mayor velocidad lineal, está previsto hacer funcionar el mecanismo de poleas de 26 dientes a una que genere la frecuencia de ciclo de cargas igual al que se produce en el mecanismo de poleas menores. Los ensayos con momentos de torsión resistentes de distintos valores crecientes pueden arrojar resultados interesantes, ya que, a mayor diámetro de polea, la fuerza periférica disminuye, lo que podría generar una diferencia de temperatura más significativa del mecanismo con poleas mayores respecto de aquel con poleas de menores dimensiones.

#### AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a la Asociación APUEMFI por el financiamiento en la adquisición de los materiales y a la empresa Antrieb Sudamericana S.A. por el aporte de mecanizados y accesorios de adaptación al banco de pruebas.



## REFERENCIAS

- [1] Budynas, Richard G., Nisbett, J. Keith. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. 8° Edición. Editorial McGraw Hill/Interamericana Editores SA de CV. México. 2008.
- [2] Palmgren, Hans. *The V-belt Handbook*. Hans Palmgren and Studentlitteratur 1986. Sweden.
- [3] S. Sundararaman, S.; Hu, J.; Chen, J.; Chandrashekhara, K. *Temperature dependent fatigue-failure analysis of V-ribbed serpentine belts*. International Journal of Fatigue. Volume 31, Issues 8–9, August–September 2009, Pages 1262-1270.
- [4] Dag Fritzson. *Friction of elastomer composites: Influence of Surface temperatura, sliding speed and pressure*. Wear, 139 (1990) 17-32.
- [5] Merghache, Sidi Mohammed; El Amine Ghernaout, Mohamed. *Experimental and numerical study of heat transfer through a synchronous belt transmission type AT10*. Applied Thermal Engineering 127. 2017. Pages. 705-717.
- [6] Wenbo Li; Xiaojie Zhang; Yuanyuan Shang; Qi Chen; Chunhua Chen; Zhenxiang Xin. *Investigation of dynamic heat generation and transfer behavior and energy dissipation for nonlinear synchronous belt transmisión*. Applied Thermal Engineering. 144. 2018. Pp. 457-468.
- [7] Zuqing Yu; Yaqi Cui; Qun Zhang; Jian Liu; Yuxiang Qin. *Thermo-mechanical coupled analysis of V-belt drive system via absolute nodal coordinate formulation*. Mechanism and Machine Theory, 174. 2022. 104906.
- [8] Cengel, Yunus, A.; Ghajar, Afshin, J. *Transferencia de calor y Masa. Fundamentos y aplicaciones*. 4° Edición. McGraw-Hill. 2011.



## ANÁLISIS DE FALLA POR FATIGA DE PERNO DE UNIÓN DE CABEZA DE BIELA DE MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

**Ricardo Mario Amé<sup>1</sup>; Agustín Gualco<sup>1</sup>; Sebastián Zappa<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Lomas de Zamora.  
Juan XXIII y Ruta Prov. N°4, Lomas de Zamora, Prov. de Buenos Aires  
[ingricardoame@gmail.com](mailto:ingricardoame@gmail.com); [agustingualco@yahoo.com.ar](mailto:agustingualco@yahoo.com.ar); [zappasebastian@gmail.com](mailto:zappasebastian@gmail.com)

### RESUMEN

La biela es un componente de máquina diseñado para conformar un mecanismo que transforma un movimiento alternativo en uno rotativo. Dicho elemento está formado por una cabeza, un cuerpo y un pie. Opera bajo un estado complejo de cargas de tracción y compresión. La sujeción entre la cabeza de la biela y el cigüeñal se realiza por medio de dos bulones. El objetivo del presente trabajo fue determinar el motivo de la falla de uno de los bulones de la cabeza de la biela. El análisis fue realizado mediante el estudio de las cargas actuantes sobre el bulón, observación con lupa, microscopía óptica y electrónica de barrido. Se pudo observar que, en el asiento de la cabeza del bulón dañado, las líneas originales de mecanizado fueron removidas, como consecuencia del movimiento relativo entre las superficies de contacto, situación no observada en el bulón que no ha fallado. El mencionado movimiento relativo entre partes permitió la aparición de tensiones adicionales sobre dicho elemento. En este sentido, y de acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que la rotura del bulón se produjo por fatiga, como consecuencia de un torque de apriete insuficiente.

**Palabras Clave:** *Falla por fatiga; Análisis de falla; Fatiga; Tensiones variables.*



## 1. INTRODUCCIÓN

En la literatura especializada en diseño de componentes de máquinas existen abundantes referencias a fallas resultantes de la presencia de tensiones variables. Por sus características particulares es muy interesante su descripción y el análisis de sus causas, más allá de las derivadas de este estado de tensión. El daño progresivo por fatiga es bien conocido. Se viene estudiando desde principios del siglo XIX. El proceso de inicio y desarrollo de la falla se conoce muy bien y existen modelos matemáticos que permiten realizar diseños que aseguren la vida útil teórica deseada. No obstante, se siguen presentando fallas de este tipo no deseadas. Es en este punto que la capacidad técnica se pone a prueba para identificar la causa que produjo el daño inesperado.

Se puede ver en [1] imágenes de fallas en árboles de transmisión con chavetero; en un árbol cigüeñal de motor de combustión interna (ambas en la página 351); fotografías de árboles con chaveteros o con agujero transversal [2] (página 261); en [3] un eje con agujero central en donde la falla se inició en tres puntos de la misma sección (página 19); en [4] se pueden observar distintos ejemplos de fallas en cuerpos con rosca, en un tornillo de filete cuadrado (página 15), en un eje con filete trapecial (página 19) y en una pieza con rosca triangular (página 20) y en [5] fotografías inéditas del autor donde se observa la falla en un árbol ferroviario, en uno de reductor de engranajes y en la ranura de un chavetero tallado en un árbol de máquina (página 96).

En [6] los autores analizan la relación entre el aflojamiento del bulón y la falla por fatiga para distintos valores de precarga de apriete inicial, concluyendo que, cuando la precarga es elevada la falla puede restringirse y sucede por acción de las tensiones normales cíclicas; por el contrario, cuando es baja, la falla se produce por efecto de la fricción y de las tensiones de corte. Otro estudio relacionado con la falla de un bulón puede leerse en [7] en donde los autores expresan que la falla por fatiga es un subproducto común de una precarga inadecuada.

El efecto de auto aflojamiento por vibraciones rotacionales de un bulón ha sido estudiado en [8] en donde se concluye que la amplitud de la vibración y la precarga influyen para que ello suceda y, aunque en el estudio no se llega al colapso del bulón, puede entenderse que en una ampliación específica ello sí sucedería. Otro trabajo de análisis de falla en un bulón se puede leer en [9] en donde se determina que el efecto de cargas dinámicas adicionales a las previstas inicialmente, sumadas a las propias de la aplicación, más el efecto concentrador de tensión dado por el filete de la rosca motivaron la falla. Otro trabajo que relaciona el aflojamiento del apriete del bulón con la falla progresiva por fatiga se puede leer en [10] en donde se indica que el proceso de aflojamiento se puede predecir de manera efectiva y que tiene un desarrollo similar a la curva característica de fatiga tensión-ciclos.

Como ha quedado expresado anteriormente, la mayor dificultad no consiste en identificar el tipo de falla, ya que ella presenta, en la sección dañada, claras evidencias, como son las líneas de playa, la zona de inicio y la zona de rotura final; la dificultad se presenta en la determinación de los factores que iniciaron el proceso que concluye en la falla.

Algunos autores [1-3] ofrecen tablas con esquemas que vinculan la figura final observable en la sección de falla con parámetros relacionados a concentradores de tensión (débiles locales; débiles periféricos o fuertes periféricos) y tipos de tensiones variables (axiles cíclicas, flexión cíclica unilateral, bilateral o rotativa). Así, se puede identificar, con cierto grado de certeza el proceso que llevó al colapso de la pieza y actuar de modo tal de evitarlo en un futuro, o al menos prever su vida útil.

No obstante, existen casos en los cuales las piezas han sido diseñadas con conocimiento de la temática y, sin embargo, fallan. Es aquí donde se ubica el caso que se presenta a continuación. Un caso real, sucedido a un vehículo de uno de los autores de este trabajo.

## 2. OBJETO DE ESTUDIO.

El elemento de máquina que sufrió la falla es un componente de la biela de un motor de combustión interna. Este motor pertenece a una motocicleta que realizaba un viaje por ruta a marcha moderada. El vehículo contaba con sólo 7000 kilómetros de rodaje y estaba en perfectas condiciones de mantenimiento. En determinado momento el motor se bloqueó, deteniéndose, sin posibilidad de puesta en marcha.

Luego de ser trasladado a un taller especializado y desarmado totalmente para observar los daños, se encontró: la biela quebrada y sin la mitad de la cabeza adosada (Figura 1) y el block perforado (Figura 2).



Figura 1: Biela quebrada y cabeza desacoplada.



Figura 2: Block perforado.

Un detalle importante fue observar que uno de los bulones que fijan la cabeza de la biela presentaba una rotura típica de sobrecarga instantánea (bulón 2), y había quedado una parte dentro del orificio de la cabeza. El otro bulón presentaba una configuración de rotura distinta (bulón 1), (Figura 3). Es este último bulón el objeto de estudio.

A simple vista se apreciaba, en el bulón 1, una falla de las características de daño acumulado por fatiga (Figura 4). Se planteó la hipótesis de que rompió por fatiga y, luego, el bulón compañero no resistió los esfuerzos y colapsó con fractura violenta generando todos los daños observados.

Para comprobar esta hipótesis se realizó un estudio metalográfico y de observación asistida con elementos de óptica.



Figura 3: Bulones rotos de distinta manera.



Figura 4: Falla en el bulón probablemente por fatiga.

### 3. METODOLOGÍA Y RESULTADO.

Se llevó el conjunto de biela y pistón al laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora para su estudio (Figura 5).



Figura 5: Conjunto de biela y pistón dañados.

La Figura 5 muestra la cabeza o sombrerete de la biela donde se encontraban los dos bulones dañados. Uno de ellos, el identificado como "bulón 1" presentaba una fractura plana a 90° grados respecto al eje principal y el otro identificado como "bulón 2" una fractura a 45° con deformación plástica.

El estudio detallado del bulón 1 mostró una sección de rotura con las características habituales de aquellas debidas a fatiga: zona de inicio de falla, zona de propagación con líneas de playa y zona final (Figura 6).

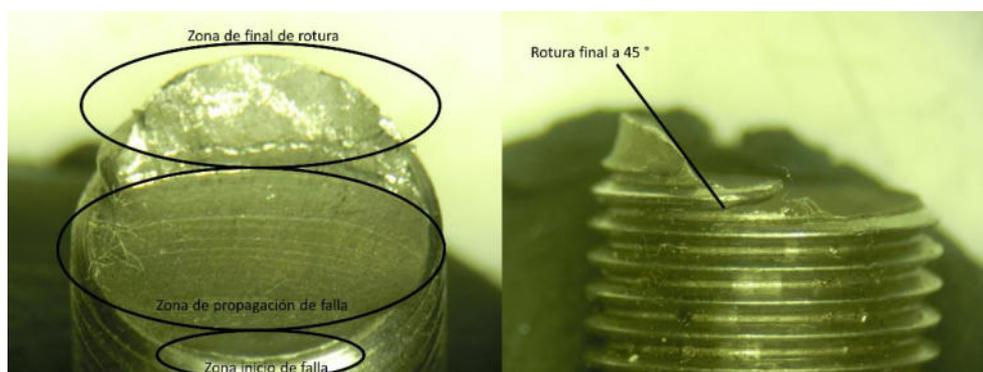


Figura 6: Sección de falla con características de fatiga y zona de la rosca de final de rotura.

El periodo de propagación, conocido como “zona II”, es progresivo y con velocidad de avance lenta hasta alcanzar el área crítica resistente donde se produce el colapso de la pieza. La zona de inicio corresponde con el concentrador de tensiones de la rosca (flanco inferior). No se detectan inicios múltiples de fisuras. La zona de propagación (caracterizada por las marcas de playa) se extiende en una sola dirección hasta 3/4 de la sección del bulón, lo que estaría indicando una adecuada resistencia del material. En zona final de la falla se observa una clara rotura con deformación plástica a 45°.

En la Figura 7 se muestra un corte transversal del bulón 1. En dicha imagen se puede observar que el radio de acuerdo y el paso de la rosca del bulón están dentro de lo esperado para este tipo de aplicaciones. Esto indicaría que las deformaciones producidas estuvieron comprendidas dentro del período elástico.

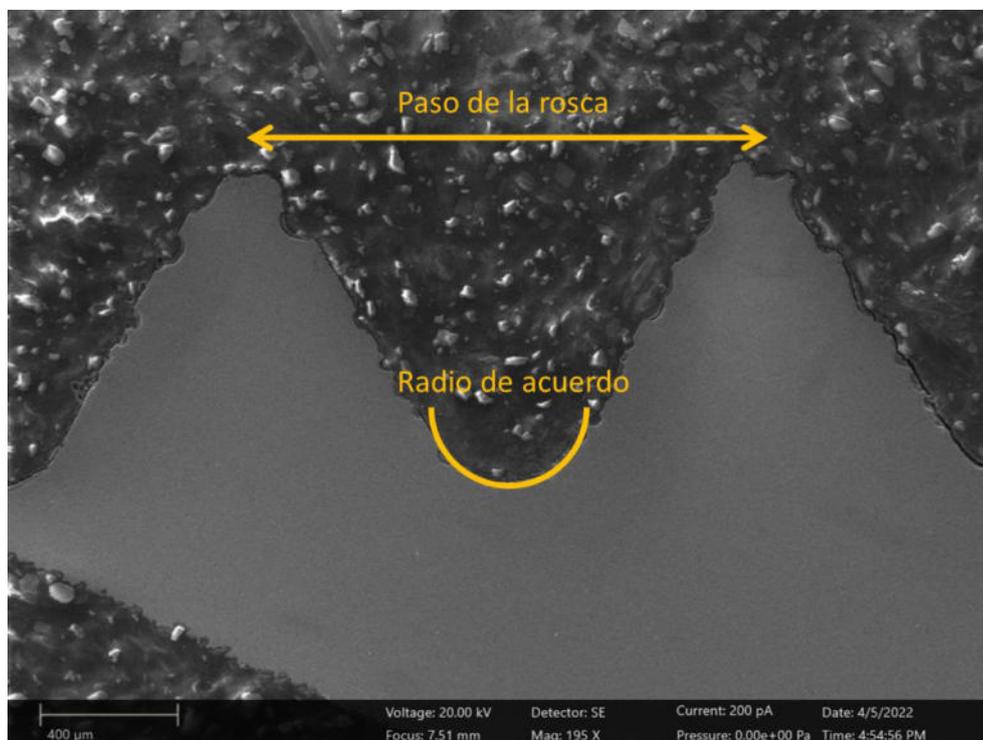


Figura 7: Microscopía electrónica de barrido del bulón 1.

En la Figura 8 se puede observar el detalle del filete de rosca, el cual presenta fisuras en la parte inferior del flanco de carga de la rosca, en dirección y plano coincidente con el de la fractura.

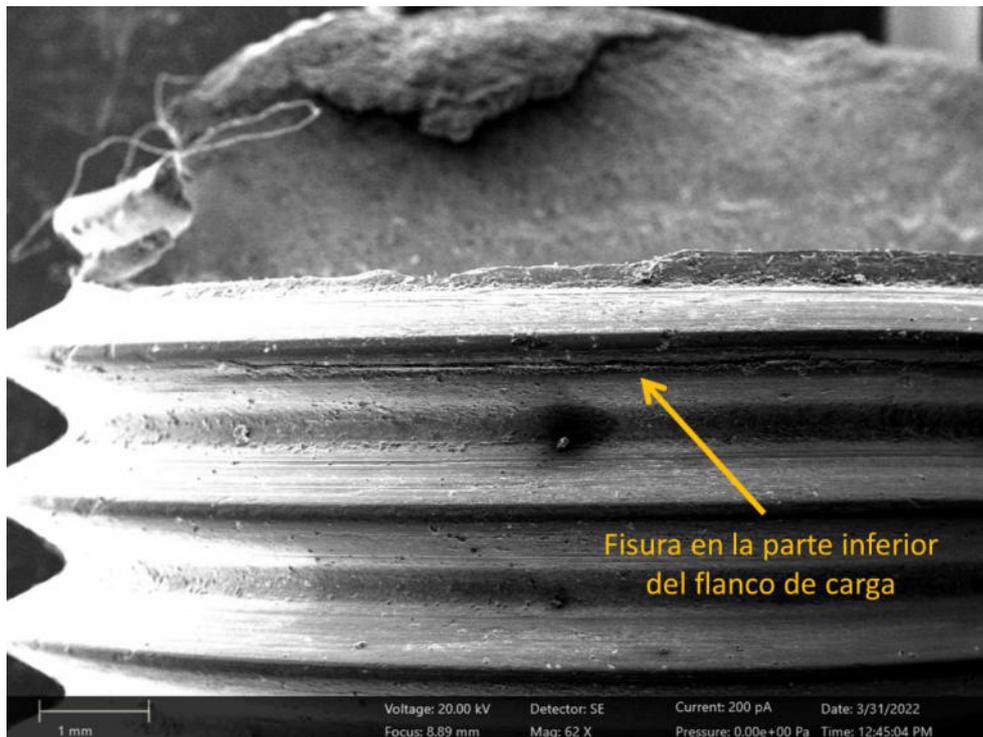


Figura 8: Microscopía electrónica de barrido del bulón 1. Fisuras en el flanco de la rosca.

Hasta este punto el estudio identifica una clara falla por tensiones variables, pero no el motivo de ellas, más allá de las propias cargas variables que se generan en el normal funcionamiento de este mecanismo.

Las Figuras 9a y 9b muestran imágenes de los asientos de las cabezas de los bulones. La 9a del bulón 1 y la 9b del bulón 2.

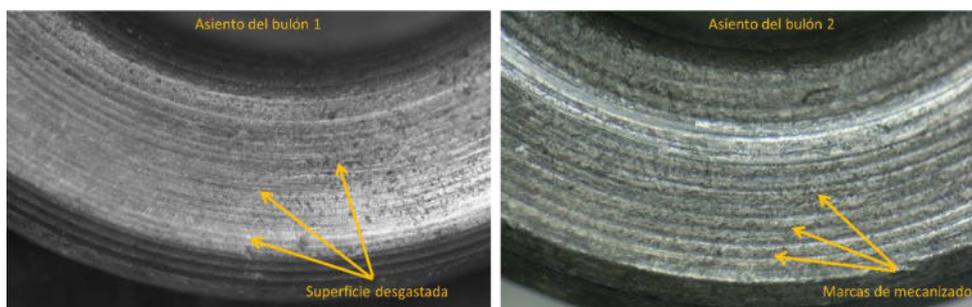


Figura 9a a la izquierda y 9b a la derecha: Imagen ampliada del asiento de la cabeza de bulones. Bulón 1 en la Figura 9a y bulón 2 en la Figura 9b.



En estas imágenes, se puede observar que el asiento del bulón 1 (correspondiente a la fractura por fatiga), presenta un asiento de cabeza con desgaste superficial, pues las líneas originales de mecanizado han sido borradas, seguramente por el movimiento relativo entre las superficies de contacto. Por el contrario, en el bulón 2 las marcas del mecanizado se ven con claridad, indicando la inexistencia de movimiento entre las partes. Esto sugiere que el bulón 1 no fue, originariamente, ajustado de modo suficiente. En estos casos es común, dada la importancia del elemento, que su ajuste responda a un momento de torsión verificado.

#### 4. CONCLUSIONES.

Del estudio realizado se concluye que la falla en el bulón 1 de fijación del sombrerete de cabeza de biela falló por fatiga, y el compañero por sobrecarga instantánea. Las características de la superficie de rotura con líneas de playa, zona de inicio y zona de fin son claras para esta afirmación. El bulón 2 presentó una fractura a 45° con deformación plástica debido a un elevado estado de tensiones, indicando que el mismo rompió después de la falla de bulón 1.

Otra conclusión importante es que la falla progresiva que produjo la rotura se debió a la falta de ajuste adecuado del bulón, lo que derivó en movimiento relativo entre su asiento y la pieza que debía ajustar. Este movimiento relativo se identificó con el incremento de tensiones variables asociadas que no hubieran existido de estar adecuadamente apretado.

Es interesante destacar que aquí, la falla prematura por fatiga no fue producto de un concentrador de tensiones importante, a pesar de la existencia del filete de rosca, ya que no se hubiera producido de haber estado adecuadamente ajustado el bulón de unión.

#### REFERENCIAS

- [1] Norton, Robert L. *Diseño de máquinas*. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana SA, México. México. 1999.
- [2] Budynas, Richard G., Nisbett, J. Keith. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. 8ª Edición. Editorial McGraw Hill/Interamericana Editores SA de CV. México. 2008
- [3] V. Dobrovolski; K. Zablonki; S. Mak; A. Radchik; L. Erlj. *Elementos de máquinas*. Editorial MIR. Moscú. 1976.
- [4] Brand, A.; Flavenot, J. F.; Gregoire, R.; Tournier, C. *Données Technologiques sur la Fatigue. Mécanique et matériaux*. 3ª Edición. Editorial Centre Technique des Industries Mecaniques. CETIM. Paris. 1991.



- [5] Amé, Ricardo Mario. *Fundamentos para el diseño mecánico de componentes de máquinas*. 2° Edición. Edición del Autor. Buenos Aires. 2019.
- [6] Guangwu Yang; Long Yang; Jingsong Chen; Shoune Xiao; Shilin Jiang. *Competitive Failure of Bolt Loosening and Fatigue under Different Preloads*. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 34:141. Año 2021.
- [7] Eccles, Bill. *Failure of an M24 Engine Mounting Bolt*. Fastener Technology International. August 2006.
- [8] Zhibin Li; Yan Chen; Weicheng Sol; Peng Jiang; Jiacheng Pan; Zhenqun Guan. *Study on self-loosening mechanism of bolted joint under rotational vibration*. Tribology International. Volume 161, September 2021.
- [9] Feng Yun; Xiaochun Zhao; Chunyu Liu; Jun Liu. *Fracture Analysis of high strength bolt in wind turbine*. Journal of Physics Conference Series, 2044(1), October 2021.
- [10] Guangwu Yang; Chengjian Che; Shoune Xiao; Bing Yang; Tao Zhu; Shilin Jiang. *Experimental Study and Life Prediction of Bolt Loosening Life under Variable Amplitude Vibration*. Shock and Vibration, Volume 2019, Article ID 2036509, 8 pages. 2019.



## CRITERIOS PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO DE ÁRBOLES DE MÁQUINAS

Sandra Robles<sup>1</sup>, Javier Masetro<sup>2</sup> y Alberto Romeo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur – Avenida. Alem 1253 – 8000 Bahía Blanca – República Argentina - [srobles@uns.edu.ar](mailto:srobles@uns.edu.ar); [apromeoing@gmail.com](mailto:apromeoing@gmail.com)

<sup>2</sup>Facultad Regional Rosario – Universidad Tecnológica Nacional – E. Zeballos 1341 – 2000 Rosario - República Argentina - [javier.masetro@gmail.com](mailto:javier.masetro@gmail.com)

### RESUMEN

En un sistema ensamblado de elementos de máquinas, las fallas que motivan salir del servicio al conjunto, suelen observarse en algún árbol. Para poder proponer soluciones que permitan soslayar estas fallas, se deben analizar exhaustivamente las posibles causas. La experiencia muestra que, el origen de las fallas, pueden derivar del material y tratamiento térmico utilizado en la fabricación del árbol, por efecto de la corrosión química, deficiencias del montaje, uso y/o mantenimiento, por vibraciones funcionales, o con mayor certeza, del diseño asociado a los árboles de máquinas que se fabrican escalonados o perfilados, debido a las inevitables discontinuidades geométricas que se requieren para localizar los elementos que van calados sobre los mismos, que incrementan bajo sollicitación, las tensiones concentradas en las zonas críticas de las entalladuras, donde se inicia la grieta que origina el colapso por fatiga.

El objetivo de este trabajo es mostrar, que cabe optimizar el comportamiento de árboles de máquinas para un eficaz servicio, a través de modificaciones en el diseño, contemplando diversos casos de fallas por fatiga.

De las causas mencionadas, si bien otorgamos relevancia en actuar sobre el material y el tratamiento térmico del mismo, de donde es posible lograr la mejora en el comportamiento en servicio del árbol de máquina, a criterio de los autores, la solución más racional, se obtiene al enfatizar el análisis integral de las discontinuidades geométricas y los criterios de diseño aplicados, promoviendo variantes mejoradas, para minimizar y/o evitar efectos no deseados que significan la concentración de tensiones producidas en las entalladuras, asociadas a las discontinuidades geométricas.

**Palabras clave:** Árboles; fallas; materiales de fabricación; criterios de diseño; concentradores de tensión.



## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las causas de fallas en los árboles de máquinas, es motivo permanente de investigaciones [1-6]. La vigencia y la importancia del tema se refleja en un extenso artículo publicado en el año 2022, que basado en una revisión bibliográfica de las publicaciones de los últimos veinte años, analiza casos de fallas de árboles, e incursiona en el intento de distinguir las posibles causas de estas fallas [1]. Los árboles son componentes críticos de las máquinas, Se diseñan escalonados o perfilados, configuración necesaria por razones que de hecho constituyen una necesidad práctica para vincular, localizar y/o fijar axialmente los elementos que van calados sobre los mismos. Mayoritariamente, las fallas ocurren en zonas de entallas, agujeros, muescas diversas, cambios de diámetros transversales, en las discontinuidades geométricas de la configuración del árbol en general. Estadísticamente, en un orden del 33%, debido a ensambles, uso o mantenimiento desacertados Otra causa de importancia que se destaca, es el diseño inapropiado de la pieza (23%) o consecuencia del factor del material utilizado en su fabricación (5,5%) [1]. Las fallas por ensambles, uso o mantenimiento desacertados, forman parte de la concepción técnica y tecnológica de los operadores, por lo cual, al entender de los autores de este trabajo, se corresponden con mala praxis.

Ante la ocurrencia de un fallo, resulta relevante el análisis de los materiales, tratamientos térmicos y métodos utilizados en la fabricación de la pieza; pero aun reviste mayor importancia, los criterios de diseño de árboles que permitan proponer medidas eficaces para evitar que se reitere la falla (revamping). En condiciones normales de servicio de las máquinas, la fractura por fatiga, de este componente esencial, es un tipo común de fallo, que se relaciona a ciclos de carga y al incremento de las tensiones máximas en las entallas propias de las discontinuidades geométricas del diseño. En las configuraciones de diseño de árboles, de resultar factible, se debe procurar situar los concentradores de tensión en zonas de mínimos esfuerzos internos. Esto contribuye a una distribución equilibrada de los esfuerzos en todas las áreas del árbol. Aplicar criterios de diseño que atenúen los cambios bruscos en la geometría, evitando el quiebre de las líneas de flujo, y distribuyan apropiadamente las tensiones, reduce la probabilidad de que se produzcan fallas por fatiga.

## 2. FALLOS POR FATIGA ASOCIADO AL DISEÑO DE ÁRBOLES DE MÁQUINAS

En las aplicaciones de ingeniería, entre el 70 al 90% de los daños mecánicos por fallo de las piezas son consecuencia de la fatiga, lo que provoca pérdidas económicas significativas [7-8]. El fallo por fatiga, es un tipo común de fallo en árboles, se produce a tensiones por debajo del límite elástico o de rotura admisible del material y se inicia con la aparición de grietas en zonas críticas, donde se localizan concentradores de tensión. En la mayoría de las máquinas las solicitaciones en el árbol, son de flexo-torsión y, con menor frecuencia, están solicitados a torsión, en



ocasiones, con tensiones normales combinadas, que pueden producir un estado multiaxial de tensiones de mayor o menor complejidad. Al presentar un estado cíclico de cargas, acompañado con la presencia de un concentrador de tensión localizado, se generan grietas, que por el estado de carga y por el transcurso del tiempo de servicio crecen y se propagan, reduciéndose progresivamente el área de la sección resistente del árbol hasta que se produce la fractura en forma repentina

### 2.1. Uso combinado de entallas como mejora en el diseño de árboles

Bonnett [2] señala en una de sus publicaciones “El método más eficaz para optimizar el comportamiento a la fatiga es la mejora del diseño”. Este criterio, que data de 1998, en general permanece vigente. Este trabajo aborda la consideración de los criterios de diseño aplicados en árboles, con enfoque en la atenuación de los concentradores de tensión, con el propósito de disminuir la probabilidad de falla por fatiga, tanto desde el diseño original como en la modificación de diseños inadecuados o reparaciones desacertadas que han fallado (revamping), lo cual reviste suma importancia [3].

En una investigación realizada por los autores [4] en el análisis del agregado de una ranura semicircular antes de un resalto, como criterio de diseño, se pudo demostrar que las tensiones producidas por la discontinuidad del resalto, mediante el agregado de la ranura semicircular de alivio, suaviza las líneas de flujo longitudinales, que restringen el valor de las tensiones producidas en la entalla (Figura 1). Desde el punto de vista ingenieril es una solución conveniente, dado que atenúa el efecto de la concentración de tensiones y no reviste dificultades para el mecanizado, ya que pueden fabricarse con bajo costo por la actual disponibilidad de equipamiento CNC [6, 9-10]. El criterio expuesto consiste en diseñar entallas combinadas, que en la acción mancomunada mejoran sustancialmente el comportamiento a fatiga del árbol. Refrendan este criterio trabajos posteriores de otros autores [11-12].

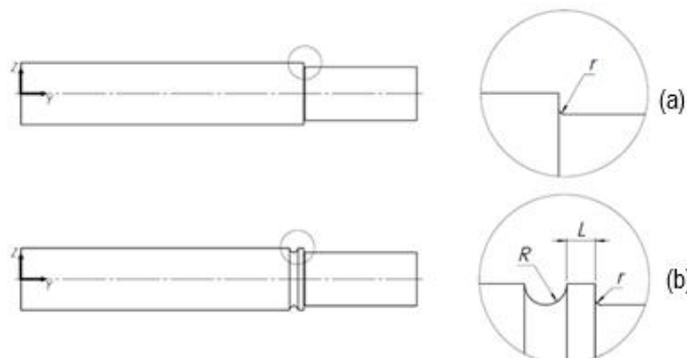


Figura 1: Diseño modelo árbol con escalón a) con ángulo de acuerdo. b) con ranura semicircular de alivio próxima al resaldo.

Otro estudio [13] refiere al análisis de entallas combinadas y la apreciación de la concentración de tensión, en relación al acuerdo entre diámetros y la cercanía de un chavetero.



Cabe mencionar que, la deficiencia en los diseños de árboles en la consideración de las entallas, se evidencia en las publicaciones actualizadas sobre el diagnóstico de fallas prematuras de componentes de máquinas [1,5-6].

## 2.2. Evaluación del material utilizado en la fabricación de árboles con entallas

Se menciona de la actuación profesional de uno de los autores de este trabajo, un caso de estudio del árbol motriz de un elevador de cangilones, fabricado en acero normalizado SAE 1045, tensión de rotura 680 MPa, tensión admisible a fatiga 68 MPa, que en servicio falló prematuramente por fatiga. Se consideró como solución inicial, desde el punto de vista del material, fabricarlo en acero normalizado SAE 4140 con tensión de rotura 890 MPa, tensión admisible a fatiga 89 MPa, que significa un 30,8 % de aumento en la resistencia a fatiga, en comparación con el material original utilizado. Dado que la sensibilidad a las entallas del acero normalizado SAE 4140 es mayor que en el SAE 1045, de mantenerse el diseño geométrico original, la resistencia real a fatiga bajo carga, de ambos materiales, resulta prácticamente equivalente y por ende el problema persistiría. El límite de resistencia a fatiga real del acero normalizado SAE 4140, resulta inferior al límite de resistencia a fatiga nominal, por lo que debe considerarse el límite de resistencia a fatiga corregida. Implica que, debe ajustarse el diseño de las entallas para atenuar los efectos de concentración de tensiones.

Cabe destacar que, el solo cambio de material por uno de mayor resistencia nominal a la fatiga, mediando equivalencia constructiva del elemento, no garantiza per sé la solución requerida, es por ello que el diseño de las entallas debe acompañarse de criterios, que signifiquen la atenuación de los factores concentradores de tensión, constituyendo la solución recomendada para soslayar los fallos de fatiga. Un estudio de caso similar se observa en la referencia [3].

## 2.3. Falla por deficiencia de montaje, uso y/o mantenimiento.

En la consideración del error de montaje, uso y/o mantenimiento como causa de fallo, se infiere que suele ser motivo de mala praxis técnica y/o tecnológica. En el caso específico de la transmisión del momento torsor a través de una chaveta y chavetero en el cabo de un árbol, se realizó un estudio [14], que reveló que se induce un momento flector a través de la fuerza equivalente del contacto de la chaveta con el chavetero, cuya magnitud depende de la distancia de esta fuerza a la sección 1-1 (Figura 2), que es la zona crítica que se verá afectada. Si no apoya el cubo (Figura 2 (a)), el momento flector inducido no equilibrado, incrementará las tensiones en la sección 1-1, en un porcentaje importante. Esta situación conlleva a la necesidad de diseñar un respaldo en el cabo del árbol, donde puede y debe apoyar el cubo del elemento montado sobre el mismo (Figura 2 (b)), a los efectos de equilibrar el momento flector inducido. Esto implica que a lo efectos de que no se cometa error de montaje, el criterio de diseño aplicado debe incluir el resalto y debe especificarse un montaje para garantizar el apoyo del cubo.

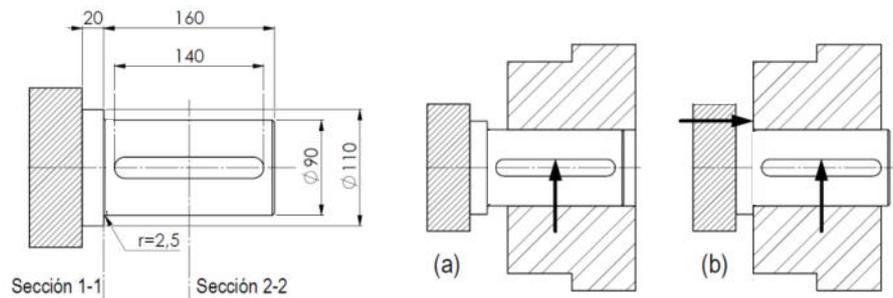


Figura 2: Cabo de árbol en estudio a) cubo no apoya b) cubo apoya

En otro trabajo se analizó el caso de grandes tambores de ingeniería de transportadores de banda y elevadores de cangilones [15]. Se observó, que la tendencia actual de diseño de fabricantes reconocidos, es aplicar árboles lisos de diámetros importantes con solo un chavetero en el extremo (Figura 3 (a)). El tambor se vincula al árbol mediante anillos de contracción (Shrink Discs) y se monta el conjunto sobre soportes autoalineantes. Al ser un árbol no escalonado con chavetero en el extremo, cuando se acopla a la fuerza motriz, se induce un momento flector que incrementara las tensiones en la zona de ajuste forzado del anillo de contracción más cercano. Consecuentemente, para disminuir las mismas, lo cual implica una mejora del diseño como se demostró en el trabajo de la referencia, debe especificarse un rebaje del diámetro en el cabo de árbol, para conformar un respaldo para el apoyo del cubo involucrado (Figura 3 (b) y (c)).

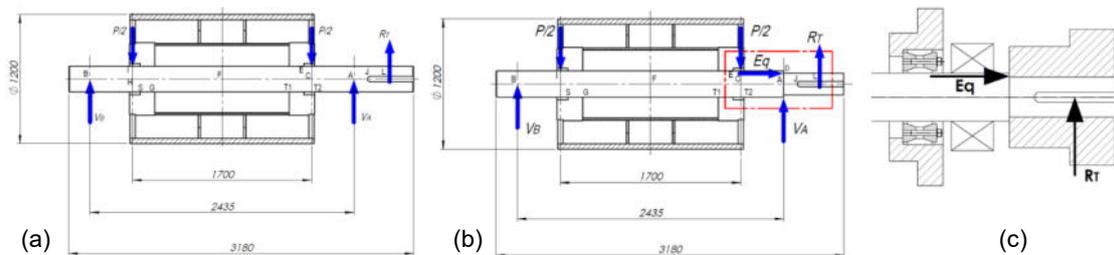


Figura 3: a) Árbol liso con chavetero. b) Árbol con el resalto c) Detalle equilibrio del  $M_f$

En el trabajo de la referencia [5] se aborda el caso de la fractura por fatiga, de un árbol del tambor de un transportador de banda. El mismo se reparó incorrectamente, mediante soldadura de aporte y posteriormente falló en servicio, debido a dos acciones desacertadas de mantenimiento, que destacan en la conclusión de la investigación, vinculadas a la mecanización en la zona del resalto por cambio de diámetro del árbol con un ángulo muy agudo y al efecto térmico de la soldadura en la zona del resalto.

#### 2.4. Aplicación de criterios para el diseño de árboles



#### 2.4.1. El diseño inadecuado conduce a fallas

Osgood [16] menciona que toda la maquinaria y componentes estructurales que experimentan fatiga, en general tienen alguna deficiencia de diseño. Se presenta como ejemplo, el árbol de un soplador que colapsó prematuramente por fatiga [17]. Se trata de un extractor de aire industrial que dejó de funcionar al fracturarse el árbol del álabe, como consecuencia de una fisura por fatiga. La grieta se inició en un cambio de sección con un acuerdo agudo.

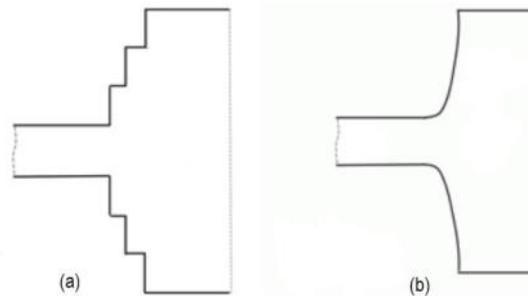


Figura 4: a) Diseño original del árbol. b) Diseño mejorado del árbol.

El diseño original era inadecuado para las condiciones operativas reales, por cuanto disponía de escalones mecanizados con bordes afilados (Figura 4 (a)) que pudo funcionar mientras se mantuvo una estricta alineación. Al aparecer un mínimo desbalanceo, factible en este tipo de equipamiento, los ángulos de acuerdo afilados dieron inicio a la grieta, que condujo a la fractura del árbol. Se mejoró el diseño con la reducción gradual del diámetro del árbol. (Figura 4 (b)).

Desde la ingeniería de diseño, en particular en el caso de árboles, es poco recomendable realizar ángulos de acuerdo afilados, donde hay cambio de diámetros en la sección transversal. En la Figura 5, se presentan criterios de diseño, los cuales muestran mejoras de izquierda a derecha y en la Figura 6 se destacan las líneas de flujo de fuerzas correspondientes, las que permiten corroborar la mejora de los diferentes diseños [9,18].

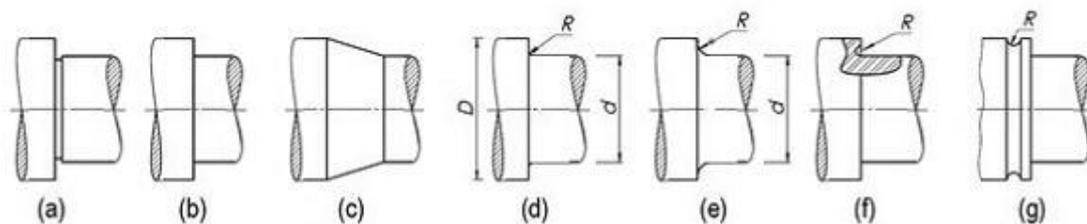


Figura 5: Configuraciones en la zona de acuerdo a) con salida de herramienta ángulo filoso. b) con ángulo de radio afilado. c) con reducción gradual de diámetro. d) con ángulo de radio chico. e) con radio mayor. f) con radio socavado. g) con complemento de ranura semi circunferencial.

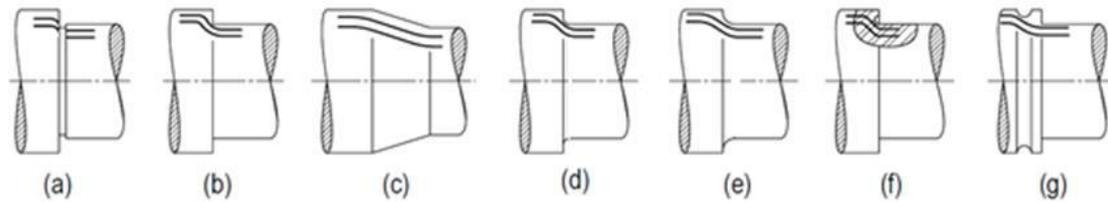


Figura 6: Líneas de flujo de fuerza según configuración del acuerdo. a) - g) Ídem Figura 5

Los rodamientos en forma estándar presentan un ángulo de esquina predeterminado. Requieren que se especifique en el diseño del árbol donde irán montados, un ángulo de filete en el acuerdo del resalto, menor al del rodamiento, para garantizar el apoyo plano correcto tanto sobre el respaldo como sobre el árbol. Estos diseños, producen tensiones localizadas, que pueden inducir el inicio de fisuras que, al propagarse, devienen en rotura por fatiga. Como alternativa, se implementan variantes de mejora en el diseño para atenuar la concentración de tensiones y mantener el apoyo plano necesario, (Figura 7). Algunos de estos diseños fueron estudiados por la norma DIN 509 de 1998 [19]. En las Figuras 7(a-c) se muestran diseños mejorados. Por otra parte, la ranura de salida de herramienta, cuando se rectifica el asiento del rodamiento, es un fuerte concentrador de tensiones (Figura 7 (d)), que puede mejorarse (Figura 7(e)).

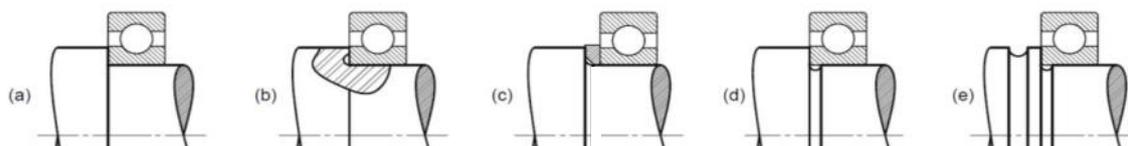


Figura 7: Configuraciones a) estándar rodamiento. b) Mejorado con radio socavado. c) Mejorado con aro de separación (amplia el ángulo). d) Riesgoso por la ranura de salida de herramienta (no recomendado). e) Con ranura semicircular de alivio para minimizar concentración de tensiones.

#### 2.4.2 Modificar el diseño de los árboles que fallaron en su diseño original: Revamping

Un estudio [3] refiere al análisis de la rotura de un árbol de un transportador en una planta de coque. La superficie de fractura del árbol, fabricado en acero grado 45C8 de diámetro original 65 mm, presentó rotura por fatiga como consecuencia principal de flexión rotativa. Para determinar las posibles causas usaron técnicas de diagnóstico de fallas y realizaron cálculos de vida útil basados en el diseño. Se concluyó que las tensiones superaban las admisibles. Una opción de rediseño que se debatió consistía en aumentar el diámetro a 70 mm. La otra opción era cambiar el material a 42CrMo4 con temple y revenido y modificar el diseño, con un radio de filete mejorado, debido a la sensibilidad a la entalla de este material. Del caso presentado, se puede deducir que para evitar la reiteración de la falla debe modificarse el diseño original, lo cual verifica la importancia de concebir el componente, aplicando apropiados criterios de diseños.



## 2.5. Análisis crítico del diseño de árboles con discontinuidades y cargas combinadas

Es importante destacar que un árbol no puede diseñarse, calcularse y proyectarse dimensionalmente en forma directa. Es necesario un diseño previo con dimensiones, que admitan evaluar los momentos de inercia de cada tramo del árbol, para proceder a la comprobación por rigidez para validar el diseño. El caso de cargas combinadas es el problema más complejo en aplicaciones prácticas. El uso de procedimientos de diseño convencionales que se emplean habitualmente, tienen su propia importancia y deben tenerse en cuenta tanto las tensiones (resistencia mecánica) como las deformaciones (rigidez) y un exhaustivo análisis integral de las entallas para minimizar y/o evitar, desde el diseño, la concentración de tensiones en las mismas. Este criterio debe aplicarse tanto en un diseño original, en la verificación de un diseño o en un diseño modificado por revamping.

El diseño de árboles con discontinuidades múltiples y condiciones de carga combinadas es poco considerado por investigadores. Los autores han presentado un trabajo, en esta área del conocimiento, sobre los criterios de diseño bajo cargas combinadas con múltiples discontinuidades, comparando los criterios de origen U.S.A. y europeos, a los efectos de validar un diseño existente [21].

En el análisis crítico del diseño, adquiere particular relevancia la forma de transmisión del momento torsor. La manera habitual, por razones de fabricación sencilla y económica, es a través de la vinculación cubo-árbol mediante chaveteros y chaveta. En referencia a esta vinculación, Kresinsky. et. al. [22] expresa "Sin embargo, la experiencia demuestra que las diferentes ubicaciones y los diferentes mecanismos de fallo complican la evaluación de la resistencia a la fatiga y causan grandes incertidumbres en el diseño de ingeniería". Como criterio de diseño, en cuanto al valor estimado del factor de concentración de tensiones en la transmisión del momento torsor a través de chaveteros y chavetas, bajo estado de carga predominante de torsión o de flexión, no hay concordancia entre recomendaciones normativas e investigadores, dado que las distintas investigaciones al respecto, aplicando elementos finitos o estudios experimentales, aún no han brindado una respuesta satisfactoria [21,24-27]. Una dificultad radica en evaluar la interferencia real entre la chaveta y los chaveteros. Inclusive en este tema se ha solicitado la modificación de la DIN 743 de cálculo de árboles [24]. Distintas fuentes [25,28,29,30] atribuyen factores diferenciados en la consideración de la concentración de tensiones en los chaveteros. Resulta importante observar, las divergencias que surgen como consecuencia de los radios de acuerdo en la base de los chaveteros durante su fabricación [25]. Estudios realizados mediante elementos finitos no han logrado aún disponer de datos significativos. Algunos autores, atribuyen los mayores valores a la flexión [28,31,32,33,34,35] mientras que otros, a la torsión [24,27,29,36,37]. Un caso paradigmático de estas divergencias contradictorias, lo revelan las referencias [33] y [37], dado que se trata del mismo autor en dos épocas diferentes. Patel et.al [20] indican en su trabajo "Pederson (2009) ha proporcionado una ecuación para el factor de



concentración de tensiones para chavetero en carga de torsión y amplió el rango de la ecuación dada por Peterson (1997), Xiaobin (2013) ha dado las ecuaciones para chavetero tipo perfil y tipo patín en las tres cargas axiales, de flexión y torsión mediante el uso de la técnica de ajuste de curvas”.

Otras investigaciones, han centrado el estudio del diseño de árboles sometidos a torsión o flexo-torsión, en el efecto de la concentración de tensiones en las entallas, donde la modificación del valor del ángulo de filete en el acuerdo, altera sensiblemente el valor de las tensiones, relevando la importancia del criterio de diseño aplicado. Como resultado de estas investigaciones, se han concebido ecuaciones, tablas y/o gráficos de los factores de los concentradores de tensión, recomendados para uso habitual en los cálculos ingenieriles [5,20,24,25,27,39].

### 3. VERIFICACIÓN POR RIGIDEZ EN EL DISEÑO DE ÁRBOLES

Como antes se expresó, debe realizarse un diseño previo con dimensiones, el cual se comprueba su resistencia a fatiga de acuerdo a las condiciones de carga. El diseño validado a resistencia se debe verificar, para asegurar que las deformaciones de torsión, deflexión elástica, vibraciones longitudinales y torsionales encuadren dentro de las restricciones establecidas. En el diseño verificado a rigidez, el factor determinante es el ángulo de torsión. La rigidez torsional determina la deformación angular, si el ángulo girado es excesivo, pueden producirse vibraciones y perturbaciones nocivas para la función deseada del árbol. Por ello, el mismo convencionalmente se restringe, por el comportamiento elástico de los aceros, particularmente ante la presencia de momento torsor fluctuante. En la literatura que considera el cálculo de árboles de máquinas pueden encontrarse los valores convencionales admisibles de las restricciones correspondientes a distorsión torsional, deflexión elástica y velocidades críticas de flexión y torsión.

En el año 2014, los autores, frente a la inquietud de evaluar el efecto bajo carga de torsión de las deformaciones sobre las entallas, realizaron una investigación para analizar el comportamiento del ángulo de torsión (giro de la sección transversal) y de distorsión (giro de la directriz longitudinal), al modificar el ángulo de acuerdo en las variaciones de diámetros. En árboles perfilados, el cálculo teórico aproxima el ángulo de deformación, que al dividirlo por la longitud total determina el ángulo de distorsión unitaria, que se compara con valores testigos confiables. En esa oportunidad, no se encontraron investigaciones que contemplen el análisis de los ángulos de acuerdo en los cambios de diámetros en árboles de longitudes medias ( $l > 10d$ ) sometidos a torsión pura, y su influencia sobre el incremento de las tensiones localizadas. Se realizó un cálculo teórico, con técnicas numéricas y ensayos experimentales [23]. Se pudo concluir que para el mismo momento torsor aplicado, la modificación del ángulo de acuerdo en la discontinuidad afectaba al ángulo de torsión y por ende el ángulo de distorsión o barrenado, de donde se deduce la posible influencia sobre el factor de concentración de tensiones. Esto



podría explicar, las diferencias que diversos autores atribuyen al factor de concentración de tensiones por torsión en chaveteros, en función de los ángulos en la base de los chaveteros, de la interferencia real entre chaveta y chaveteros y de la magnitud del par aplicado.

#### 4. CONCLUSIONES

El desarrollo de la tecnología en la industria conlleva una acentuada tendencia hacia el incremento de velocidades de producción y alta dinámica, aumento de cargas combinadas más complejas, lo cual incrementa la posibilidad que se produzcan fallos por fatiga. En el mismo sentido, el avance tecnológico se ha ocupado de encontrar soluciones a la ocurrencia de fallos, que retiran de servicio a equipamiento de producción, con el consiguiente perjuicio operativo y económico. Buena parte de las referencias consideradas para el desarrollo de este trabajo, reflejan este avance tecnológico, a través de la utilización de distintos softwares de modelado y simulación, (algunos disponen módulos con métodos de predicción de vida útil a fatiga), aplicados para comprobar las tensiones y deformaciones, de los componentes, bajo diferentes estados de carga o para evaluar los factores de concentración de tensiones. Estas tecnologías, factible de utilizar con entrenamientos adecuados y experiencias diversas, resultan un instrumento de sumo interés y gran potencial para el diseño de árboles. Asimismo, lo más importante es la interpretación de los resultados que se obtienen. Es en esa interpretación, donde lo relevante son los criterios de diseño del proyectista, para entender y priorizar las variables que debe modificar, a los efectos de la optimización de los modelos, para que representen significativamente su probable comportamiento real.

El interés de los autores en enfatizar la importancia de aplicar criterios apropiados, sea para mejorar el diseño de árboles desde su origen, o para un eventual revamping por falla del componente por diseño original inadecuado u otras causas, se sustenta en asegurar resultados satisfactorios al utilizar las nuevas tecnologías, cuando quien las aplique, disponga de criterios pertinentes.

#### REFERENCIAS

- [1] Nan H., Ning D., Shen Q., Weimin G., Long L., Na X., Linan T., Huixia X., Xiangfeng C., Fahmi Z., Chi-Man L.W. *Failure modes, mechanisms and causes of shafts in mechanical equipment*. Engineering Failure Analysis, 136, 106216, 2022.
- [2] Bonnett, A.H. *Cause, analysis and prevention of motor shaft failures*. Conference Record of 1998 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Cat. No.98CH36219, Portland, ME, USA 1998.
- [3] Palit, P., Pal, U., Gokarn, P., Kanrar S. *Revamping Shaft Design for Combating Fatigue Failure*. Journal of Failure Analysis and Prevention, 21, 138–148, 2021.



- [4] Robles S.I., Alessio D., Ortega N.F. y Romeo A.P. *Atenuación del efecto de concentradores de tensiones en árboles de máquinas sometidos a torsión pura*. IV CAIM, ISBN 9789874557100, 2-5 setiembre, Resistencia, Chaco, Argentina, 2014.
- [5] Van Zyl G. and Al-Sahli A. *Failure analysis of conveyor pulley shaft. Case Studies*. Engineering Failure Analysis, 1, 2, 144-155, 2013.
- [6] Pinho de Castro JT., Albuquerque Simões D.I., Mota de Menezes I.F., Meggiolaro M.A., Fernando Martha L. *A note on notch shape optimization to minimize stress concentration effects*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 84, 72-85, 2016.
- [7] Zhang L., Jiang B., Zhang P., Yan H., Xu X., Liu R., Tang J. and Ren C. *Methods for fatigue-life estimation: A review of the current status and future trends*. Nanotechnology and Precision Engineering, 6, 2, 025001, 2023.
- [8] Będkowski W. *Assessment of the fatigue life of machine components under service loading. A Review of Selected Problems*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 52, 2, 443-458, 2014.
- [9] Decker K. *Manual del ingeniero técnico volumen XIII: Elementos de Máquinas*, 1ª edición en español, URMO, España, 1980.
- [10] Stiopin P.A. *Resistencia de Materiales*, 2ª Edición en español, M.I.R., URSS, 1976.
- [11] González Mendoza, J.M., Alcántara Montes, S., Silva Lomelí, J.J., De La Cruz Alejo, C., Ocampo Ramírez, A. *Size Optimization of shoulder filleted shafts with relief grooves for improving their fatigue lives*. Ingeniería e Investigación, 37, 3, 85-91, 2017.
- [12] Ali, Permana D.I., Yudha H.N. *Analysis of variance dimension of reinforcement to stress concentration factor using Finite Element Method*. SINERGI, 26, 3, 295-302, 2022.
- [13] Amé R., Dasso G., Lezama D. *Tensiones localizadas producidas por discontinuidades geométricas combinadas*, Revista Cubana de Ingeniería 2, 2, 43-48, 2011.
- [14] Robles S.I., Alessio D., Romeo A. *Diseño de árbol para la transmisión de momento torsor mediante chaveta*. Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica COCIM, noviembre 2017.
- [15] Robles S.I., Alessio D., Romeo A. *Consideraciones de diseño del árbol de un tambor motriz con chavetero en cabo de árbol*. VI CAIM/ICAIFE, ISBN 9789874698704, 10-12 octubre, Tucumán, Argentina, 2018.
- [16] Osgood C.C. *Fatigue design*. Oxford Pergamon Press, Oxfordshire, 1982.
- [17] Phillips J. (27 de abril de 2017). *Improper design leads to fatigue failure in blower shaft*. <https://www.warrenforensics.com/2017/04/27/improper-design-leads-to-fatigue-failure-in-blower-shaft/>.
- [18] Orlov P. *Ingeniería de diseño*. Editorial MIR, Moscú, 1986.
- [19] Amaral Dias G.C., Vale Jéderson J.L., da Silva J. *Numerical evaluation of stress concentration factor for different designs of shaft shoulder applied toradial bearings housings*. 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 20-25 October, Uberlândia, MG, Brazil, 2019.



- [20] Patel B.P., Prajapati H.R., Thakar D.B. *Critical Review on design of shaft with multiple discontinuities and combined loadings*. 1st International Conference on Contemporary Issues in Engineering & Technology, ICCIET, 19–21 March, Mehsana, India, 2014.
- [21] Robles-Romeo –*Árboles de transmisión. Reflexiones sobre criterios de diseño*. VII CAIM, ISBN 9789504202103, 15-17 Setiembre, San Nicolas, Buenos Aires, Argentina, 2021.
- [22] Kresinsky F., Leidich E. *Failure mechanism in feathered key shaft hub connections under torsional load*. 34th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, ISBN 978-88-8303-863-1, Italy University of Trieste, 2017.
- [23] Robles SI., Romeo A., Masetro J., Gázquez N. *Estudio de la variación del ángulo de distorsión en árboles con discontinuidades geométricas sometidos a torsión pura*. IV CAIM, ISBN 9789874557100, 2-5 setiembre, Resistencia, Chaco, Argentina, 2014.
- [24] Kresinsky F., Leidicha E., Hasse A. *Different Failure Mechanisms in Keyed Shaft-Hub Connections under Dynamic Torque Load*. Procedia Structural Integrity 17,162–169, 2019.
- [25] Xiaobin Le P.E. Zelong L. *Stress concentration factors due to typical geometric discontinuities for shaft design by numerical simulation*. 120<sup>th</sup> ASEE Annual conference and Exposition, June 23 - 26 - Atlanta, Georgia, 2013
- [26] Pedersen N.L. *Stress concentrations in keyways and optimization of keyway design*. Journal Strain Analysis, 45, 8, 593–604, 2010.
- [27] Pilkey, W.D. *Peterson's Stress Concentration Factors*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [28] Mott R., Vavrek E., Wang J. *Machine Elements in Mechanical Design*. Pearson, 2018
- [29] Budynas R., Nisbett J. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw Hill, 2016
- [30] Jiang W. *Analysis and Design of Machine Elements*. John Wiley & Sons, 2019.
- [31] DIN 743-1/2/3. *Calculation of load capacity of shafts and axles*. German Institute for Standardization, 2012.
- [32] Juvinall R., Marshek K. *Fundamentals of Machine Components Design*. John Wiley, 2012.
- [33] Niemann G., Winter H., Höhm B. *Manuale Degli Organi Delle Macchine*. Tech. Nuove, 2006.
- [34] Glukhikh V., Prilutsky A. *Расчет и проектирование валов*, Санкт-петербург. (Cálculo y Diseño de árboles en cajas de engranajes), 2010. <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1130.pdf>.
- [35] Amodio D. *Fatica II*, versione pdf del materiale proiettato in aula, página 23. <http://dma.dima.uniroma1.it:8080/users/broggiato/cdm/ancona/no/no-ancona.html>
- [36] Norton R. *Diseño de Máquinas. Un Enfoque Integrado*. Pearson Educación, 2011.
- [37] Niemann G., Hirt M. *Elementos de Máquinas*. Editorial Labor, 1987.
- [38] Pedersen, N. L. *Stress concentrations in keyways and optimization of keyway design*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Volume 45, Issue 8, pp. 593 – 604, 2010.
- [39] Voigt S., *Achsen und Wellen: Tragfähigkeitsnachweis nach DIN 743*, AUAS, 2015. [https://www.hsanhalt.de/fileadmin/Dateien/FB6/personen/voigt\\_st/Lehrunterlagen/01\\_ME/06\\_1\\_Achsen\\_und\\_Wellen\\_DIN\\_743.pdf](https://www.hsanhalt.de/fileadmin/Dateien/FB6/personen/voigt_st/Lehrunterlagen/01_ME/06_1_Achsen_und_Wellen_DIN_743.pdf).



## EL ESTADO ACTUAL DEL DIMENSIONADO Y TOLERADO DE COMPONENTES MECÁNICOS - LAS ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS DE PRODUCTO (GPS)

José Jorge Alvarez <sup>1</sup>, Fabian Claudio Nessler <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño - Universidad Nacional de Córdoba  
Av. Haya de la Torre s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina - [jose.alvarez@unc.edu.ar](mailto:jose.alvarez@unc.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento Mecánica - Facultad Regional Santa Fe – Universidad Tecnológica Nacional  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina - [fnessler@frsf.utn.edu.ar](mailto:fnessler@frsf.utn.edu.ar)

### RESUMEN

En los últimos tiempos la especificación de la geometría de una pieza mecánica en los planos, ha ido evolucionando, desde la concepción original consistente en la indicación de cotas funcionales con sus correspondientes tolerancias, hacia sofisticadas especificaciones como las que se encuentran en la industria hoy en día. Estas especificaciones se basan en lo que se denomina el sistema de Especificaciones Geométricas de Producto (GPS). El mismo surgió a partir de la Norma ISO 14638, la cual establece una serie de clasificaciones y categorías, agrupando las distintas instancias que van desde las especificaciones de los productos, sus interpretaciones en la fabricación y la evaluación final del producto fabricado.

En buena parte, todo este campo se encuentra vinculado con la generalización del uso de las máquinas de medir por coordenadas, las cuales, asociadas con poderosos softwares de cálculo y evaluación aportan una mirada muy diferente a la metrología de productos, comparándolo con los métodos tradicionales basados en instrumentos individuales como calibres, micrómetros, bloques patrones y otros instrumentos de evaluación punto a punto para la medición de las cotas.

Por todo esto nos vemos obligados a la incorporación de una nueva terminología, en algunos casos de cierta complejidad, la que se debe abordar y adoptar en forma paulatina en la industria. En nuestro país el panorama de aplicación de estos nuevos conceptos es diverso para las distintas ramas de la industria, existiendo empresas como las automotrices en las que está bastante aceitado su uso desde hace tiempo, y en el otro extremo, otras en las que no se tiene noticia de su existencia. En el presente artículo se analiza del estado actual del dimensionado mediante la metodología GPS y sus perspectivas de aplicación en el ámbito industrial.

**Palabras clave:** Especificaciones Geométricas de Producto; Dimensiones y Tolerancias; Matriz GPS.



## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de indicación de dimensiones y tolerancias de ISO estaba basado en el antiguo sistema ISA de mediados de la década de 1940. Este consistía la especificación de cotas lineales con solamente tolerancias, lo cual daba lugar a numerosas ambigüedades de especificación. Una primera aproximación para tratar de levantar estas ambigüedades fue la aparición de las tolerancias denominadas geométricas, en las cuales fijaban requisitos suplementarios de forma y posición especificando situaciones funcionales un poco más controladas.

En la década del 90 trabajaban en estos temas tres comités técnicos de ISO, hasta que, en 1996, con la finalidad de ordenar las diferentes normativas, se creó el comité ISO/TC 213: "Dimensional and Geometrical Product Specifications and Verification". La idea de este comité era ordenar y unificar los esfuerzos hasta allí realizados, creando lo que dio en llamarse "Especificaciones geométricas de productos" (GPS por sus siglas en inglés). Las actividades del comité comprenden la normalización sobre las tolerancias dimensionales y geométricas, las propiedades de las superficies y los principios de verificación relacionados con ellos. Contempla además los equipos de medición y los requisitos para su calibración, incluida la incertidumbre de la medición tanto dimensional y como geométrica.

Paralelamente y con cierta antelación, en EEUU surgió una actividad semejante, la cual se basó fundamentalmente en la norma ASME Y14.5, que según su propia definición establece un lenguaje de diseño para el dimensionamiento geométrico y tolerancia (siglas GD&T en inglés). Los conceptos técnicos aportados por este otro sistema son bastante similares a los del ISO-GPS. Según algunos autores existe una correspondencia de alrededor del 70% entre sus temas (y con una gradual equiparación a través del tiempo), pero obviamente no pueden ser utilizados de manera indistinta.

Como piedra fundamental de la actividad del comité ISO/TC 213 se delinea el documento ISO/TR 14638: "Especificaciones geométricas de producto (GPS) - Plan maestro" [1], el cual fijaba las distintas actividades a llevar a cabo, a la vez que designó grupos de trabajo para las distintas especialidades y ramas de actividad relacionadas.

Además del mencionado documento, es de primordial importancia la norma IRAM-ISO 8015: "Especificaciones geométricas de producto (GPS). Aspectos fundamentales. Conceptos, principios y requisitos" [2] donde se indican las reglas fundamentales que aplican al sistema ISO GPS.



## 2. LA MATRIZ GPS

En el plan maestro del ISO/TC 213, plasmado en ISO/TR 14638 se introdujo la denominada “Matriz GPS”, que no es otra cosa que un cuadro de doble entrada, denominado “Normas GPS generales”, en el que listan todas las características geométricas consideradas en el paquete de normas (por ejemplo, dimensión, radio, posición y otros) y seis categorías, denominadas los eslabones de la cadena GPS. En la Figura 1 se muestra la configuración general de la matriz GPS. Allí puede verse que, además, en la misma matriz hay un espacio para incluir las normas GPS fundamentales, otro para normas GPS globales (por ejemplo, ISO 1 sobre la temperatura estándar de referencia), y otro más para normas GPS complementarias (por ejemplo, reglas para indicaciones en dibujos en relación a procesos específicos, como fundición o soldadura y sobre productos específicos como roscas o engranajes).

La finalidad de esta matriz consiste en indicar con una marca las intersecciones correspondientes entre característica y eslabón, según los temas de incumbencia de cada norma. Por ejemplo, en el caso de la norma IRAM-ISO 286-1 [3], que trata sobre las tolerancias en medidas lineales, se debería marcar la fila 1 en su intersección con las columnas 1 y 2.

		Normas GPS Globales						
		Normas GPS Generales						
Normas GPS fundamentales	Características GPS		Eslabones de la cadena					
			1	2	3	4	5	6
	1	Dimensión o tamaño	Documentación del producto (Cotificación)	Definición de las tolerancias (Definición y sus valores teóricos)	Definiciones de la característica o el parámetro real	Evaluación de las desviaciones de la pieza fabricada	Requerimientos del equipo de medición a utilizar	Requerimientos de calibración de los equipos de medición
	2	Distancia						
	3	Radio						
	4	Ángulo						
	5	Forma de una línea independiente de una referencia						
	6	Forma de una línea dependiente de una referencia						
	7	Forma de una superficie independiente de una referencia						
	8	Forma de una superficie dependiente de una referencia						
	9	Orientación						
	10	Posición						
	11	Alabeo circular						
	12	Alabeo total						
	13	Referencias						
	14	Perfil de rugosidad						
	15	Perfil de ondulación						
	16	Perfil primario						
	17	Imperfecciones superficiales						
18	Aristas							
		Normas GPS complementarias						

Figura 1: La matriz GPS de la norma ISO/TR 14638

Según lo establecido por el comité, esta matriz debe aparecer en todos los documentos de la serie GPS, en donde, para cada documento normativo que aparezca se indica qué eslabones de la cadena son alcanzados.



Como se puede entender, las tres primeras columnas se relacionan con las especificaciones de las piezas, las cuales son necesarias para establecer contratos sin ambigüedad, mientras que las tres restantes tienen que ver con la etapa de verificación de lo fabricado. En todas las normas del conjunto GPS que se publican se incluye una sección donde se muestra la matriz y se marca la posición de los tópicos abarcados por dicha norma. Es de destacar que, aunque esta tabla aparece en todas las normas GPS, pocos usuarios de las mismas comprenden el significado de la información ahí proporcionada, en principio porque no conocen las implicancias de la ISO/TR 14638.

Con posterioridad, la norma fue revisada con la finalidad de clarificar las distintas definiciones, y realizar cambios que le aportaran una mayor facilidad de uso. Así surgió la ISO 14638:2015 [4], la cual propuso una nueva versión de la matriz. Esta versión, además de simplificar y disminuir la cantidad de filas agregó una columna más, la cual se ubica entre los conjuntos de las tres columnas de especificaciones y de las tres de mediciones.

	Eslabones de la cadena						
	A	B	C	D	E	F	G
	Símbolos e indicaciones	Requisitos de las características	Propiedades de las características	Conformidad y no conformidad	Medición	Equipo de medición	Calibración
Dimensión o tamaño							
Distancia							
Forma	•	•					
Orientación	•	•					
Posición	•	•					
Alabeo	•	•					
Perfil de rugosidad							
Perfil de ondulación							
Imperfecciones superficiales							

Figura 2: La matriz GPS de la norma ISO 14638:2015

Esta nueva columna, que de alguna manera hace de nexo entre ambos grupos, se refiere a los aspectos de conformidad o no conformidad, es decir, incluye las normas que establecen reglas específicas sobre cómo hacer las comparaciones entre lo medido y lo especificado. Las normas fundamentales en esta columna son las IRAM-ISO 14253-1 y -2 [5], que establecen los requisitos para la determinación de la conformidad o no conformidad contra las especificaciones, y a la vez proporcionan una guía para la estimación de incertidumbres durante las mediciones GPS, tanto en la verificación de los productos como en la calibración del equipo de medición.



La configuración de la nueva matriz quedó tal como se muestra en la Figura 2. En la misma, solo con fines de ejemplo, se muestran indicados con un punto los eslabones que afectaría la norma IRAM-ISO 1101 [6], que trata sobre las tolerancias de forma y posición.

Con la finalidad de mostrar cómo se puede dar el encadenamiento de normas para un caso concreto, en la Figura 3 se muestra el camino completo a través de la matriz GPS, que podría llegar a seguir una especificación geométrica determinada. En este caso se muestra una especificación de rectitud, por ejemplo, aplicada a las generatrices de un cilindro.

Eslabones de la cadena						
A	B	C	D	E	F	G
Símbolos e indicaciones	Requisitos de las características	Propiedades de las características	Conformidad y no conformidad	Medición	Equipos de medición	Calibración
IRAM-ISO 14405-1	IRAM-ISO 286-1	IRAM-ISO 16610-1	IRAM-ISO 14253-1	ISO 1938-1	ISO 463	ISO TS 15530

Figura 3: Ejemplo del encadenamiento de normas en la matriz GPS

En este ejemplo, en la columna A se muestra la manera de indicar en el plano el requisito de rectitud (el símbolo correspondiente), especificado según la norma IRAM-ISO 14405-1. En la columna B se muestra el valor propio del requisito (0,1 mm), el cual se encuentra especificado por la norma IRAM-ISO 286-1. En la columna C se aclara como debe ser obtenido ese requisito. En este caso, se trata de la aplicación de un filtro en la medición, aplicando la norma IRAM-ISO 16610-1.

Con respecto a las columnas de la derecha, en la columna E se menciona la norma que contempla cómo y con qué realizar la medición. En particular, la norma ISO 1938-1 define las características metrológicas y de diseño de los calibres para dimensiones lineales. En la columna F se menciona una norma sobre cómo debe ser el instrumento a utilizar. En este caso un comparador, encontrándose en la norma ISO 463 especificaciones sobre su diseño y características metrológicas. A continuación, en la columna G, está la norma ISO/TS 15530 que trata sobre el uso de patrones y su evaluación de incertidumbre.

En el medio de ambos grupos de columnas se encuentra la columna D, que hace de vínculo entre ambos grupos, contemplando los criterios de aceptación o rechazo (conformidad o no conformidad), y la estimación de la incertidumbre en las mediciones, de acuerdo a lo especificado en la norma IRAM-ISO 14253-1.

Debe aclararse que el mencionado es un ejemplo muy simple, como para poner a consideración los distintos aspectos que podrían estar relacionados con cada una de las siete columnas previstas en la matriz GPS. Por supuesto, hay casos en que las normas abarcan más de una

columna a la vez. Se aclara también que las normas indicadas en este ejemplo han sido puestas a título puramente informativo y, por lo tanto, no necesariamente sean de aplicación específica al caso analizado, ni las únicas a tener en cuenta en una situación real.

### 3. LA GEOMETRÍA EN LAS DISTINTAS INSTANCIAS DE UN PRODUCTO

Para especificar cada parte de una pieza dentro del sistema GPS, en lugar de simplemente asignarle una cota con sus tolerancias dimensionales, se aplica una serie de especificaciones a la geometría ideal teórica, conformándose una zona tridimensional en la que la pieza real debe encontrarse incluida, para de esta manera poder decir que la misma cumple con la especificación. En esta nueva concepción, que arranca en el proceso de diseño y llega hasta la evaluación final de las piezas fabricadas, aparecen cuatro instancias perfectamente definidas, tal como se muestra en la Figura 4.

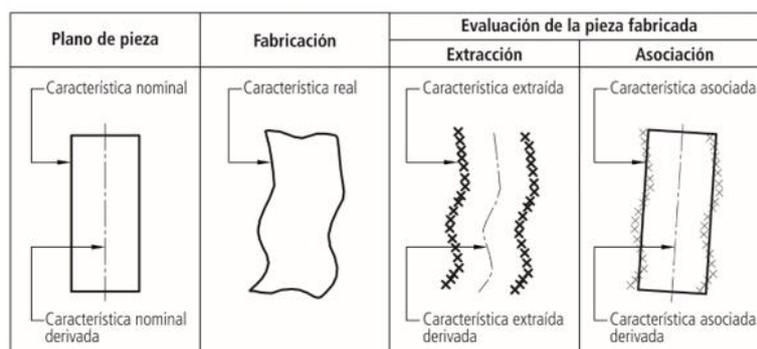


Figura 4: De la especificación a la verificación geométrica

En primer lugar, se tiene lo que especificó el diseñador en el plano de la pieza, mencionado como la característica nominal, que en este caso es un cilindro, con su diámetro respectivo y su eje ideal. A dicho eje también se lo denomina como una característica, y por el hecho de provenir del cilindro nominal, se convierte en una característica nominal derivada.

Se sabe que, en los procesos de fabricación, por diversos motivos, nunca se obtienen piezas perfectas, apareciendo siempre desviaciones respecto a los valores óptimos, e incluso entre las piezas de un mismo lote. A estas piezas se las denomina la pieza real, la que obviamente posee una característica real. Dicha pieza es llevada a una máquina de medir 3D, en la cual se obtienen las coordenadas de distintos puntos de la pieza, según el protocolo de medición que se haya establecido. En esta instancia se llega a la característica extraída, con su respectiva característica extraída derivada. Dicha operación es conocida como extracción.

Como último paso, quedaría por rearmar nuevamente el cilindro y su respectivo eje a partir de los puntos medidos con la máquina, obteniendo lo que se conoce como característica asociada.



Esta característica será un cilindro de un determinado diámetro, con su eje recto, convenientemente orientado en el espacio. Ambas cosas, tanto el diámetro del cilindro asociado, como la posición del eje van a surgir del algoritmo de cálculo que se aplique al conjunto de puntos tridimensionales obtenidos mediante la máquina de medir. A esta operación se la conoce como asociación y existen diversos algoritmos y metodologías normalizados para realizarla.

#### 4. EL USO DE MODIFICADORES EN LAS ESPECIFICACIONES

Las normas publicadas por el comité ISO/TC 213 son muy numerosas y variadas. Solo a título de ejemplo y como una primera aproximación al uso de algoritmos en la etapa de asociación, puede citarse la notación introducida por la norma IRAM-ISO 14405-1 [7]. Esta norma le otorga al diseñador diversas herramientas como para poder especificar una determinada característica geométrica de variadas maneras, ya sea contemplando el método de medición y/o verificación que se proponga o por la función que deba cumplir la pieza.

Dicha norma propone el uso de 16 modificadores, denominados fundamentales, para agregar a la especificación de las dimensiones lineales. Dichos modificadores se expresan a través de un par de letras encerradas en un óvalo.

En este contexto, existen formas de especificar para las dimensiones locales, que es el caso de la acotación tradicional, donde la misma se verifica simplemente por la distancia entre dos puntos. Pero además se propone un grupo de especificaciones denominadas globales, en las cuales, para su verificación, luego de la obtención de una serie de puntos tridimensionales, se los asocia siguiendo un determinado criterio.

También se propone otro conjunto de especificaciones en las cuales la característica se obtiene por cálculo, por ejemplo, dividiendo el área encerrada por una curva cerrada, como si esta fuera una circunferencia a la cual se le calcula el diámetro. Y finalmente existe otro grupo de especificaciones en las que la característica se obtiene mediante la aplicación de criterios estadísticos.

A modo de ilustración del uso de modificadores, se muestran algunos ejemplos en la Figura 5.

$$\begin{array}{ccc} \phi 10 \pm 0,1 \text{ (LP)} & \phi 10 \pm 0,1 \text{ (GG)} & \phi 20 \pm 0,1 \text{ (GN)} \\ \phi 20 \pm 0,1 \text{ (GX)} & \phi 30 \text{ h6 (LP)} & \end{array}$$

Figura 5: Ejemplos de modificadores según la norma IRAM-ISO 14405-1

En el primer caso, el modificador LP indica que se está refiriendo al tamaño entre dos puntos, es decir, la medición se hará de la manera tradicional, ya sea con un calibre o un micrómetro.



En el segundo, el símbolo GG indica que en la evaluación se debe utilizar un criterio de asociación de mínimos cuadrados, es decir, que luego de haber obtenido una serie de puntos tridimensionales, se los trata a estos aplicando dicho criterio para obtener una forma, la que se utiliza para la evaluación de la cota especificada. En el caso del tercero y el cuarto, con GN y GX se indica que el criterio de asociación es otro, en este caso el de mínimo circunscrito o máximo inscrito.

En el último ejemplo puede verse el uso del modificador de distancia entre dos puntos, pero aplicado a una cota especificada con tolerancias según la norma IRAM-ISO 286-1.

La misma norma contempla otros modificadores denominados complementarios, los cuales tienen usos diversos, entre los que se encuentran el que indica el requisito de envolvente, aplicación en zonas parciales, la evaluación en una determinada dirección, etc. Con respecto al requisito de envolvente (símbolo ) , cabe acotar que anteriormente a la aparición de la normativa GPS, se entendía que esta era la condición por defecto para cualquier cota, y por lo tanto no era necesaria la inclusión del símbolo indicado. En la actualidad, esto ha cambiado, y en efecto, tal como lo indica la norma IRAM-ISO 8015, rige el principio de independencia. Este principio expresa que, por defecto, cada especificación GPS para una dimensión o una relación entre dimensiones debe ser cumplimentada en forma independiente de las demás especificaciones, salvo que haya una indicación adicional en contrario.

Finalmente debe notarse que la nomenclatura de la norma IRAM-ISO 14405-1 con respecto a los modificadores presenta dos letras, siendo la primera la que indica el tipo de especificación (local, global, etc.) y la segunda la que define el criterio/regla. Por ejemplo, GG, donde la primera G corresponde a especificación global, mientras que la segunda al criterio de mínimos cuadrados (la letra G se corresponde con Gaussiano, que es otra denominación del criterio de mínimos cuadrados). Se comenta, además, que en otras normas del grupo GPS se encuentran definidos los mismos criterios, pero en algunos casos utilizando solo una letra (dejando de lado la primera que indicaba el carácter de local, global, etc). Un ejemplo de esto es la norma IRAM-ISO 1101 donde dichos criterios se encuentran definidos con una sola letra, en correspondencia con la segunda.

## 5. EL ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA ISO-GPS

Según consta en la página oficial de ISO, en la actualidad el sistema GPS consta de alrededor de 150 documentos. Los mismos operan de manera diversa sobre distintas etapas de la cadena completa de lo que se denomina el "Ciclo de vida de los productos", involucrando el diseño, la manufactura, la metrología, la vida de los productos y el fin de la vida de los mismos. Conceptualmente, debe entenderse que, desde la etapa de diseño, ya se debe especificar en el



desarrollo de un producto el tratamiento al final de su vida útil, involucrando cuestiones como el reciclado, la reutilización o incluso la deposición final. Tomando las etapas concretas de la fabricación, es conocido el esquema conceptual que representa las vinculaciones y actores entre las tres instancias por las que transita una pieza fabricada, el cual sería tal como el indicado en la Figura 6. Debe aclararse que incluso el mismo comité ISO/TC 213 incluye un diagrama similar en sus publicaciones.[8]

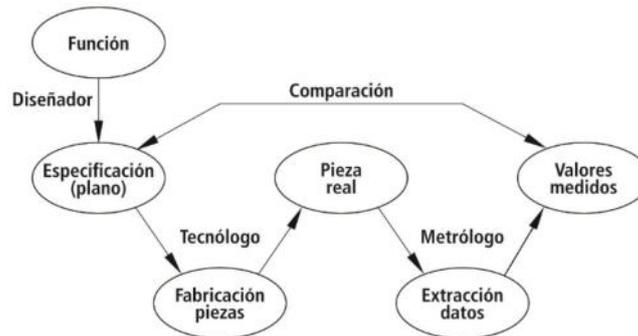


Figura 6: Mapa conceptual de un proceso de fabricación

De acuerdo a este esquema, las piezas son diseñadas, luego fabricadas y a continuación deben ser medidas con el objeto de comprobar el cumplimiento o no de las especificaciones, con lo cual se podría pensar en tres estadios concretos sobre las piezas:

- la pieza creada por el diseñador;
- la pieza fabricada;
- y la pieza efectivamente medida.

Tal como se ve en la Figura 6, existen instancias concretas, con profesionales a su vez muy especializados, que llevan adelante el proceso de fabricación en su conjunto. Esta visión del proceso de fabricación no es totalmente nueva, ya que siempre existieron las instancias mencionadas. Lo nuevo es la necesidad de especializaciones concretas en cada instancia y la necesidad de un esquema normativo que vincule los distintos sectores, que no es otra cosa que el sistema ISO-GPS que se analiza aquí.

Hace unos años, las funciones en muchos casos eran cubiertas por los mismos profesionales, en el caso de las empresas pequeñas o en el caso de las mayores tal vez no existía esa interrelación tan precisa entre los distintos sectores.

Por otro lado, se debe tener presente que en el sistema GPS conviven dos sistemas de metrología:

- La metrología convencional, basada en calibres duros (calibres, micrómetros, comparadores, bloques patrones, mármoles de medición, calibres de comprobación de distinto tipo, incluyendo los calibres pasa/no pasa, etc.).



- La metrología computacional digital basada en los conjuntos de puntos relevados y el software para su evaluación y análisis (máquinas de medición por coordenadas, brazos articulados, equipos de medición de redondez, etc.).

De hecho, si bien la tendencia a largo plazo es la del segundo grupo, a la fecha existe la posibilidad dentro del sistema GPS de especificar las dimensiones para ser abordadas con los métodos de la metrología convencional citados. Podría decirse, que, al momento, se emplea una especificación híbrida, es decir que en algunos casos utiliza un sistema y en otros, el otro.

## 6. EL ESTADO ACTUAL EN NUESTRO PAÍS

Acompañando el panorama global citado, en nuestro país la aplicación de estos nuevos conceptos es diverso y variado entre las distintas ramas de la industria. Se puede decir que están a la vanguardia las industrias de la cadena automotriz. De hecho, todas las terminales automotrices reportan a su casa matriz, a la vez que están inmersas en cadenas globales, donde la aplicación del sistema ISO-GPS es moneda corriente. Como dato destacado, debe tenerse en cuenta que cualquier empresa autopartista que pretenda ser proveedor de una terminal automotriz en nuestro país, tiene que obligatoriamente contar con una máquina de medir por coordenadas o actualmente scanners 3D.

Obviamente, la industria de componentes aeronáuticos y aeroespaciales se encuentra en una etapa de implementación similar. Pero en otras industrias, muchas veces se tienen pocas o ninguna noticia de todo esto. Por ejemplo, en la industria de maquinaria agrícola, están los fabricantes de tractores y cosechadoras, que dependen de casas matrices a nivel global, los que podrían considerarse en un estadio similar a las automotrices. Pero están las empresas locales, que producen equipos diversos como sembradoras, equipos de labranza, pulverizadoras o equipos para forraje, donde, a nivel general el uso de este sistema es incipiente o incluso podría decirse que nulo.

En lo que respecta a normalización, IRAM a través de sus Organismos de Estudio de Normas viene trabajando desde hace varios años en el paquete de normas GPS, habiendo producido la adopción idéntica de cerca de 25 normas, entre las que se encuentran las normas citadas en el presente artículo.

## 7. CONCLUSIONES

Con la generalización de las tecnologías digitales, incluyendo el Internet, a nivel mundial la fabricación viene experimentando cambios profundos, habiéndose iniciado una nueva era que se ha llamado la "Tercera Revolución Industrial", caracterizada por la digitalización en los procesos de fabricación. En este contexto, la forma en que se crea, intercambia y procesa la



información de diseño, fabricación e inspección de los productos viene experimentando cambios acelerados. Acompañando a la fabricación asistida por computadora, los métodos de inspección tradicionales basados en dispositivos físicos como superficies planas, bloques patrones o angulares, y diversos instrumentos de mano para efectuar fundamentalmente mediciones punto a punto, están siendo desafiados por el surgimiento del mundo digital. Así surgen los sistemas de medición por coordenadas (CMM) y dispositivos de escaneo que pueden recopilar y transmitir grandes cantidades de datos de coordenadas 3D, denominados "nubes de puntos". A su vez, esta información es manejada por diverso tipo de software que tiene el potencial de simular numéricamente la geometría de las piezas fabricadas, y compararla con la nominal, verificando el cumplimiento de las especificaciones, casi sin recurrir al tipo de dispositivos físicos mencionados. En el límite se menciona incluso la posibilidad de interpretación y verificación de las especificaciones por la máquina en sí misma, sin prácticamente la intervención del operador humano, cuyas funciones se limitarían solo a la supervisión.

Desde organismos estales como cámaras empresarias se vienen promoviendo la capacitación a nivel industrial en tecnologías de medición por imágenes que dan un nuevo paso a equipos de medición digitales que utilizan como resultado final la comparación de modelos extraídos con los modelos nominales que poseen un volumen de datos y precisión cada vez mayor. Esta promoción va de la mano del reducido costo de los equipos y no compleja capacitación para su utilización y evaluación de los resultados metrológicos o la posibilidad de enviar y evaluar los resultados metrológicos en otras locaciones.

Obviamente, en este nuevo mundo digital, la forma de realizar las especificaciones de diseño de los productos debe ser otra, en la cual el sistema de especificación geométrica de productos GPS es el lenguaje universal. En el mismo, no solo se trata de especificar las cotas de una pieza de manera unívoca, como tradicionalmente se hacía, sino de tener en cuenta en la especificación muchos más aspectos relacionados con diferentes datos, a lo largo del ciclo de vida de un producto. Asimismo, se incorpora a la especificación el uso de distintos modelos informáticos, físicos y matemáticos con miras a la mayor integración posible en la digitalización de la fabricación.

## REFERENCIAS

- [1] ISO/TR 14638:1995, Geometrical product specification (GPS) - Masterplan. ISO. 1995
- [2] IRAM-ISO 8015, Especificación geométrica de productos (GPS). Aspectos fundamentales. Conceptos, principios y requisitos. IRAM. 2016



- [3] IRAM-ISO 286-1, Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 1 - Base de tolerancias, diferencias y ajustes. (ISO 286-1:2010, IDT). IRAM. 2019
- [4] ISO 14638:2015, Geometrical product specifications (GPS) - Matrix model. ISO. 2015
- [5] IRAM-ISO 14253-1, Especificación geométrica de productos (GPS). Inspección por medición de piezas y equipo de medición. Parte 1 - Requisitos para la determinación de la conformidad o no conformidad con las especificaciones. (ISO 14253-1:2017, IDT). IRAM. 2022
- [5] IRAM-ISO 14253-2. Especificación geométrica de productos (GPS). Inspección por medición de piezas y equipo de medición. Parte 2 - Guía para la estimación de incertidumbres durante las mediciones GPS, durante la calibración del equipo de medición y en la verificación de los productos. (ISO 14253-2:2011, IDT). IRAM. 2022
- [6] IRAM-ISO 1101, Especificación geométrica de productos (GPS). Tolerancias geométricas. Tolerancias de forma, orientación, posición y alabeo. (ISO 1101:2017, IDT). IRAM. 2020
- [7] IRAM-ISO 14405-1, Especificación geométrica de productos (GPS). Tolerancias dimensionales. Parte 1 - Dimensiones lineales. (ISO 14405-1:2016, IDT). IRAM. 2019
- [8] Scott P. *Proposed New Structure for Geometrical Product Specifications and Verification*. Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) The Future Metrology Hub. Presentación digital. March 2023.



## OPTIMIZACION DE CHASIS DE SEMIRREMOLQUE DE VUELCO TRASERO MEDIANTE EL USO DE ACEROS MICROALEADOS

**Marcos Marino, Marcelo Costamagna y Carlos Tais**

Departamento de Ingeniería Mecánica – UTN Facultad Regional Villa María  
Avda Universidad 450, Villa María, Argentina- mmarino@frvm.utn.edu.ar.

### RESUMEN

En este trabajo se propone rediseñar un chasis de semirremolque utilizado en el transporte de cargas por carreteras, cuya característica principal es la capacidad de transportar cargas a granel y descargar las mismas por su parte trasera, a partir de la elevación de la caja o batea, mediante un sistema hidráulico de la parte delantera de la misma.

Estos equipos son aptos para el transporte de granos, áridos, etc. siendo los mismos descargados en los lugares de uso. La capacidad máxima de carga a transportar depende de la configuración de ejes empleada, estando ésta reglamentada en la Ley Nacional de tránsito 24.449 y en el Decreto 32/2018.

En nuestro caso optamos por una configuración S1-D2-D1-D2 (camión tractor con un eje delantero ruedas simples y dos ejes traseros con ruedas dobles, remolque con dos ejes dobles traseros y un eje con ruedas dobles autodireccional), apto para transportar un Peso Bruto de 52,5 toneladas. El rediseño se realizará utilizando materiales microaleados Avanzados de Alta Resistencia (AHSS - Advanced High Strength Steel). La característica principal de este tipo de materiales es la de ofrecer un alto valor en la resistencia a la fluencia con límites elásticos superiores a los 550 MPa y tensiones de rotura superiores a los 700 MPa, valores muy superiores a los que tienen los aceros convencionales, lo cual permite disminuir las secciones resistentes y por ende el peso propio de la unidad, aumentando así la capacidad de carga neta a transportar.

Se realiza un análisis de tensiones y deformaciones en la estructura aplicando las condiciones de carga que permite la normativa actual, mediante la técnica del Método de Elementos Finitos con el objetivo de obtener una estructura confiable y resistente.

**Palabras Clave:** Transporte, Semirremolque, Aceros Microaleados, Capacidad de carga



## 1. INTRODUCCIÓN

La importancia que ha tomado el transporte de cargas por carreteras requirió grandes esfuerzos a las industrias del sector a fin de lograr equipos cada más eficientes, seguros y livianos con el propósito de transportar la mayor cantidad de carga útil en cada viaje y durante la circulación sin carga una reducción importante en el consumo de neumáticos y combustible. Es por ello que los fabricantes están incorporando en sus equipos piezas construidas en Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS). [1-4]

La característica principal de este tipo de material es la de ofrecer un alto valor en la resistencia a la fluencia, con límites elásticos superiores a los 550 MPa y tensiones de rotura superiores a los 700 MPa [5, 6], valores muy superiores a los que tienen los aceros convencionales, lo cual resulta en la posibilidad de disminuir las secciones resistentes y por ende el peso propio de la unidad. Otra de las ventajas radica en la disminución del esfuerzo y en la complejidad de la manipulación de las partes que deben ensamblarse en cada uno de los conjuntos y subconjuntos durante el proceso de fabricación. Este aspecto es importante ya que, si bien existen empresas con un alto grado de automatización en sus procesos, también existe una gran cantidad de ellas, en las que las tareas se realizan de modo manual o semi manual.

Es relevante mencionar que los cambios en las condiciones del proceso de producción que deben realizarse al incorporar estos materiales son mínimos debido a las buenas características de soldabilidad y conformación que estos aceros poseen, lo cual prácticamente no requiere la incorporación de tecnología adicional.

A lo expresado anteriormente deben sumarse las nuevas configuraciones de semirremolques que fueron habilitadas a partir del año 2018 por el Ministerio de Transporte de la Nación según el decreto 32/18 [7] que modifica el Decreto 779/1995 de la Ley Nacional de Tránsito 24449, lo que permitirá una importante reducción en el costo de cada tonelada transportada por carreteras de la República Argentina a partir del incremento del máximo peso bruto total autorizado (PBT).

La máxima carga neta o útil que se puede transportar dependerá de la configuración del equipo, cantidad de ejes y del peso propio del semirremolque. Por lo tanto, utilizando unidades con un menor peso propio (tara) se logra un transporte más eficiente.

Es en ese contexto en el cual se propone el uso de aceros microaleados AHSS para el diseño de un semirremolque tipo volcador trasero de uso muy difundido en la industria minera, cerealera y vial, entre otras.

La máxima capacidad de carga total de este equipo es de 52,5 toneladas, correspondiendo 18 toneladas en el tándem trasero de ejes, 10,5 toneladas en el eje direccional levadizo, 18 toneladas en el tándem trasero de ejes del camión y 6 toneladas en el eje simple del camión.

El objetivo de este trabajo es analizar la factibilidad de utilizar aceros AHSS para su construcción y determinar los esfuerzos y deformaciones en la estructura resultantes con la máxima capacidad de carga permitida.

## 2. METODOLOGÍA

El empleo de los aceros AHSS en la fabricación de equipos de transporte de carga ha sido estudiado anteriormente por los autores de este trabajo [8], en donde se analizó el comportamiento de este material para acoplados de 4 ejes, demostrando el ahorro que se produce mediante el uso de este material.

El equipo estudiado en el presente trabajo es un semirremolque de dos ejes en tándem más uno levadizo, y se utilizará en este caso el material denominado DOMEX 700 [9].

Se propone el estudio sobre un modelo simplificado de semirremolque de 9.00 m de largo, de dos ejes traseros y uno autodireccional elevable, estando éste separado 2.4 m del primer eje del tándem, y un perno rey ubicado en la zona delantera del remolque que permite su vínculo con el camión tractor. Este modelo se muestra en la Figura 1. La capacidad de carga bruta es de 52.5 tn e incluye la carga de servicio, peso propio de la estructura y el peso del resto de los elementos constituyentes del equipo (ejes, suspensión, etc).

En este modelo se incluyen los elementos estructurales de relevancia como las vigas principales y travesaños, considerando que los elementos no considerados como teleros y faldones le aportaran una rigidez adicional.

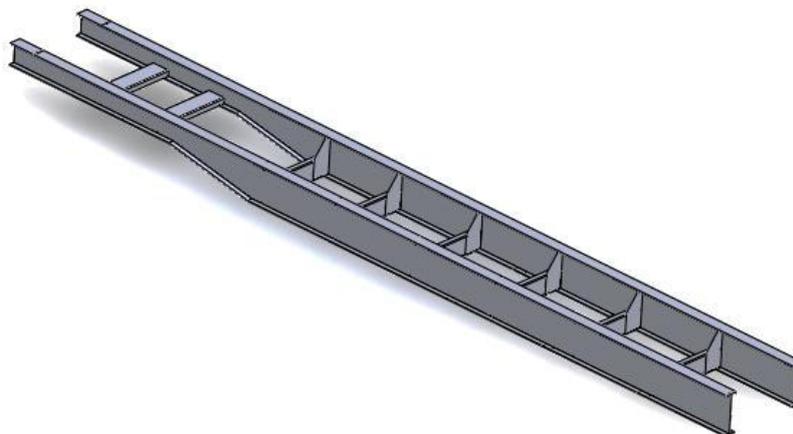


Figura 1: Modelo de chasis del semirremolque analizado



En el caso de las vigas principales se proponen espesores de 9 mm para las alas y de 5 mm para el alma en el caso del acero AHSS.

La transferencia de la carga transportada a la estructura resistente se efectuó considerando la batea de carga apoyada sobre las vigas principales.

En este estudio se plantea el predimensionamiento de la estructura considerando que el coeficiente de seguridad resultante en el caso de acero AHSS debe ser el mismo que el obtenido en el análisis presentado en [8] para el acero F36, teniendo en cuenta los diferentes valores de límites de fluencia de cada material. Para las hipótesis de carga planteadas, se considera que un coeficiente de seguridad aceptable es de 1.75 [10]. Bajo estas condiciones de trabajo se puede estimar la magnitud de reducción de volumen y su consecuente disminución en el peso propio de la estructura.

## 2.1. Modelo matemático

Para el estudio propuesto anteriormente se plantea un análisis estático lineal en donde se incluyen coeficientes de mayoración de carga para cumplir con la normativa específica vigente de diseño de este tipo de equipos [11].

La ecuación que describe el campo de desplazamientos  $u_i$  ( $i = 1..3$ ) de un material isotrópico y homogéneo, sometido a fuerzas aplicadas en su superficie y despreciando fuerzas de volumen es [12]

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu)u_{k,ki} = 0 \quad i, k = 1..3 \quad (1)$$

En la Ecuación (1) los parámetros  $\lambda$  y  $\nu$  son las constantes de Lamé, propias para un material dado, que caracterizan la relación entre el tensor de tensiones  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1..3$ ) y el tensor de deformaciones  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = 1..3$ ).

La Ecuación (2) es lineal y permite obtener el campo de desplazamientos  $u_i$  ( $i = 1..3$ ) del cuerpo. La definición del tensor de deformaciones en términos de desplazamientos es:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad i, j = 1..3 \quad (2)$$

De la relación constitutiva de cada material, el tensor de tensiones se calcula mediante:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda e\delta_{ij} \quad i, j = 1..3 \quad (3)$$

Donde  $e = \varepsilon_{kk}$  ( $k = 1..3$ ) es la traza del tensor de deformaciones,

Para analizar el estado tensional se utiliza el criterio de la máxima energía de distorsión [12].

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (4)$$



donde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  son las tensiones principales.

Se muestran en la Tabla 1 los valores máximos admisibles de esfuerzo que serán comparadas con los resultados de la simulación para determinar el coeficiente de seguridad de acuerdo a:

$$CS = \frac{\sigma_{fl}}{\sigma_{eq}} \quad (5)$$

donde  $\sigma_{fl}$  es el esfuerzo de fluencia del material y  $\sigma_{eq}$  es el esfuerzo equivalente calculado a partir de la teoría de la máxima energía de distorsión:

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales.

Material	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo elasticidad [MPa]	Coefficiente de Poisson	Límite de fluencia [MPa]	Tensión de rotura [MPa]
AHSS DOMEX 700	7800	200.10 <sup>3</sup>	0.3	700	900
F36	7850	200.10 <sup>3</sup>	0.28	250	550

La carga aplicada considera sobrecargas debido a los efectos dinámicos, errores en la distribución de las mismas y situaciones de impacto debido al deterioro de las carreteras, estas se estiman en un 30% del valor de la carga neta a transportar [12]. Se ha tenido en cuenta además el peso propio de la estructura

Los vínculos aplicados a la estructura corresponden a los apoyos sobre las vigas del conjunto de los ejes y elásticos. En la Figura 2 se muestra la aplicación de las condiciones de borde y cargas al modelo.

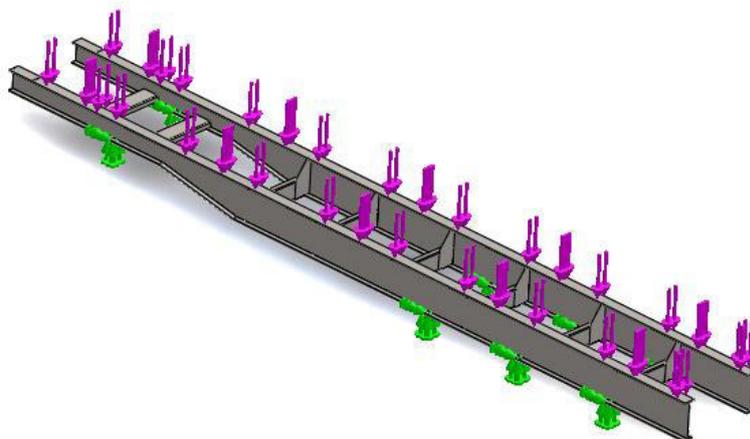


Figura 2: Condiciones de borde y cargas aplicadas



Las simulaciones se realizan utilizando software de cálculo comercial basado en el Método de Elementos Finitos SolidWorks Simulation, [13]. Los diferentes elementos estructurales han sido modelados utilizando elementos sólidos con seis grados de libertad por nodo. La malla generada se corresponde con la geometría a discretizar utilizando elementos cuadriláteros de segundo orden.

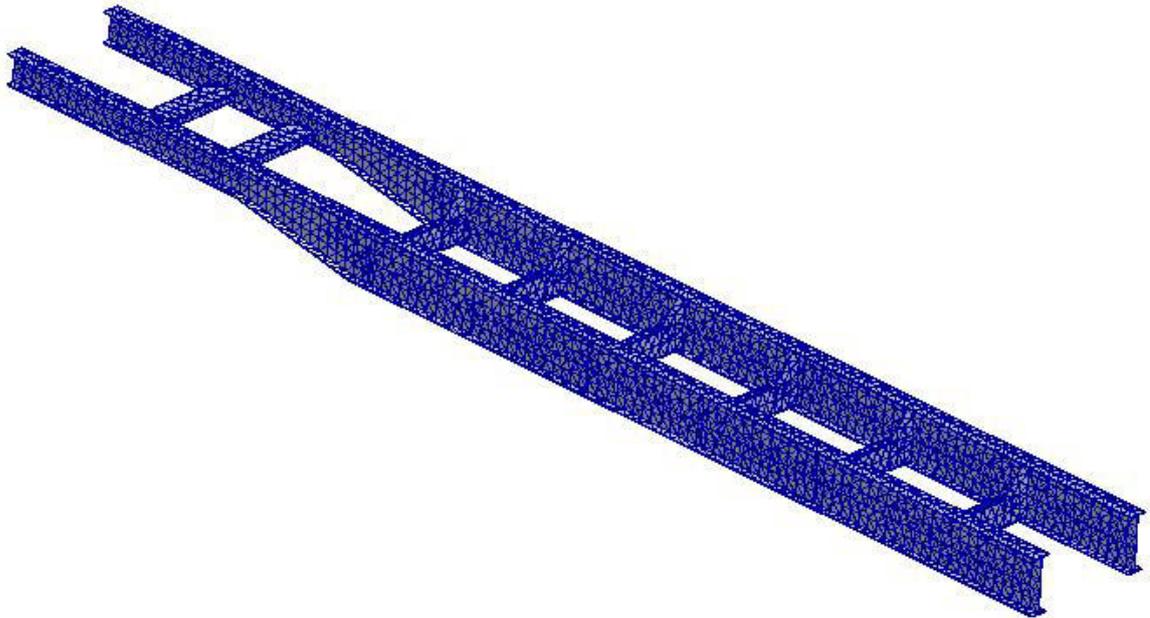


Figura 3: Discretización con elementos sólidos cuadriláteros

El modelo posee 18252 elementos y 38636 nodos. El análisis de convergencia (no incluido por razones de espacio) demuestra que con esta discretización los resultados obtenidos poseen una precisión adecuada.

### 3. RESULTADOS

Como puede observarse en la Figura 3, los esfuerzos en el chasis son inferiores a los 1381 Kgf/cm<sup>2</sup>. Lo cual muestra que la estructura cumple satisfactoriamente con los requerimientos relacionados con las tensiones, considerando que el material utilizado posee una tensión de fluencia de 7138 Kgf/cm<sup>2</sup>.

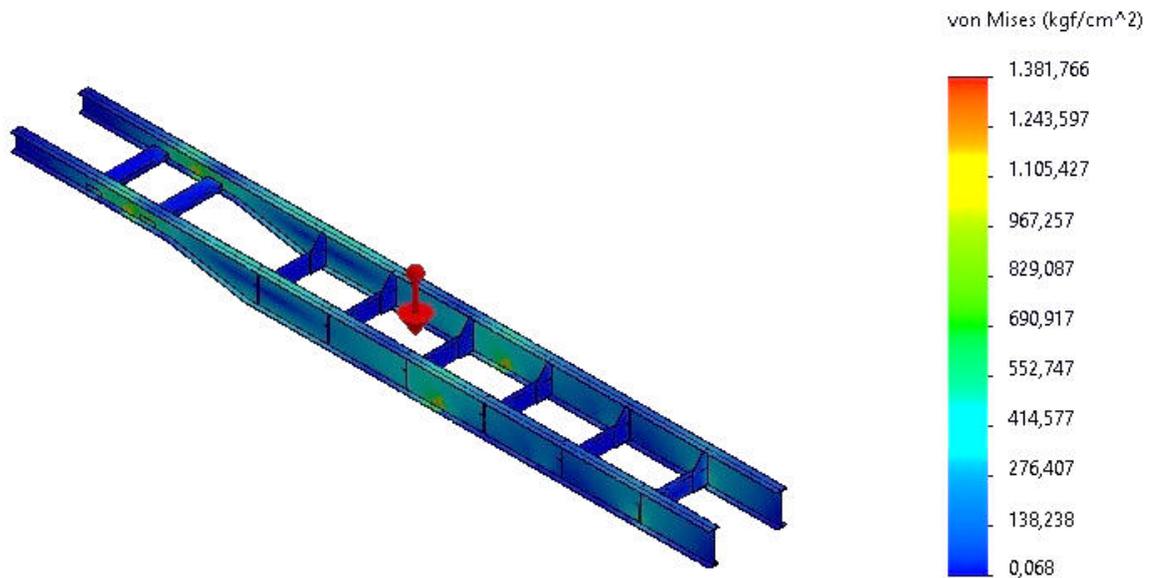


Figura 3: Distribución de tensiones en la estructura del chasis

En la Figura 4, se muestra el campo de deformaciones presente en la estructura para la carga máxima. Como puede apreciarse, los valores máximos alcanzan a 1,76 mm y se encuentran en la zona central de la estructura. Esta deformación se considera muy adecuada para la estructura del semirremolque.

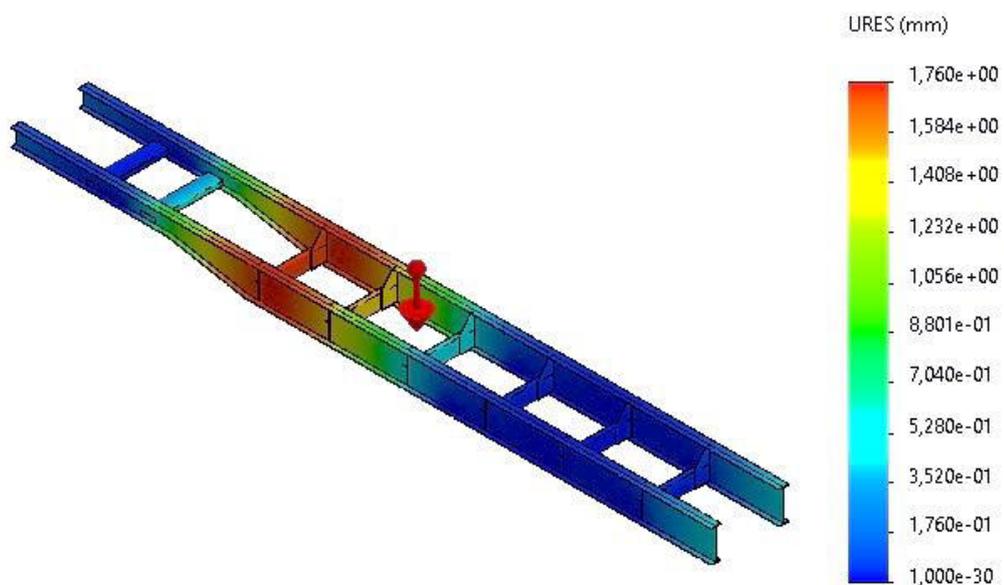


Figura 4: Deformaciones en el chasis de semirremolque (URES)

Dado que el requisito planteado era obtener un coeficiente de seguridad no menor a 1.75, se analiza en la Figura 5 el valor de este parámetro. Se muestra en la misma que su valor mínimo es de 3,9, muy superior al límite establecido.

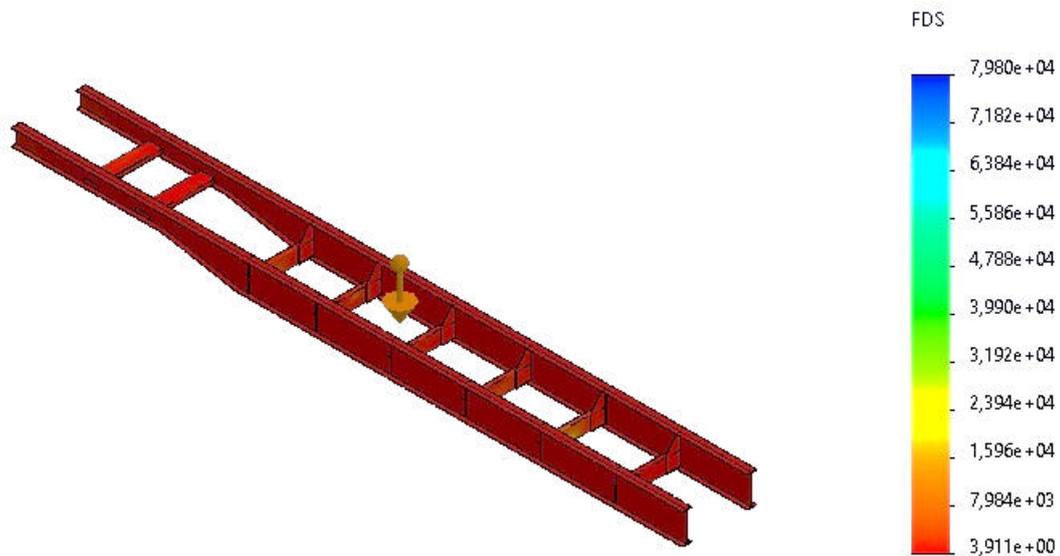


Figura 5: Coeficiente de Seguridad (FDS)

#### 4. CONCLUSIONES

Mediante el análisis efectuado en el presente trabajo se concluye que la estructura cumple satisfactoriamente con las condiciones requeridas de tensión de trabajo y la deflexión vertical máxima cuando es sometida al estado de carga considerado. Si bien los esfuerzos cuando se utiliza un acero AHSS son considerablemente inferiores a el esfuerzo de fluencia de material F-36, las deformaciones son superiores a las que se obtienen con la construcción del equipo con material F-36 situación que se compensa con la deformación previa de la estructura (contraflecha), procedimiento usual en la fabricación de este tipo de estructuras. Esto demuestra que es factible el uso de este tipo de materiales en la fabricación de semirremolques.

La estructura fabricada con acero AHSS posee un peso propio de 715 kg, mientras que la construida en acero comercial F-36, tiene un peso de 1065 kg. Se puede concluir que si bien ambas estructuras cumplen satisfactoriamente las condiciones de carga impuestas, se logran reducciones superiores al 30% en el peso propio de la unidad cuando se usan aceros de alta resistencia. Esto se traduce de manera directa en un incremento de la carga útil a transportar con lo cual se logra una importante reducción del costo de tonelada transportada.



## REFERENCIAS

- [1] Bouaziz, O., Zurob, H., and Huang, M., *Driving force and logic of development of advanced high strength steels for automotive applications*. Steel research international, 84(10), 937-947. 2013
- [2] Matlock, D. K., Speer, J. G., De Moor, E. and Gibbs, P. J., *Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview*. Jestech, 15(1), 1-12. 2012
- [3] Kwon, O., Lee, K. Y., Kim, G. S. and Chin, K. G., *New trends in advanced high strength steel developments for automotive application*. Materials Science Forum, 638, pp. 136-141. 2010.
- [4] Kuziak, R., Kawalla, R. and Waengler, S., *Advanced high strength steels for automotive industry*. Archives of civil and mechanical engineering, 8(2), 103-117. 2008
- [5] Frommeyer, G., and Brück, U., *Microstructures and Mechanical Properties of High-Strength Fe-Mn-Al-C Light-Weight TRIPLEX Steels*. Steel Research International, 77(9-10), 627-633. 2006
- [6] Yan, B., & Xu, K., *High strain rate behavior of advanced high strength steels for automotive applications*. Iron and Steelmaker, 30(6), 33-42. 2003
- [7] Ministerio de Transporte, *Ley Nacional de Tránsito 24449*. 1994.
- [8] Marino, M., Costamagna, M. and Tais, C. *Estudio de aceros microaleados de alta resistencia para su empleo en semirremolques*, Mecánica Computacional, XXX, págs. 91-97. 2011
- [9] DOMEX. *Catálogo DOMEX 700MC. Informe Técnico*, Society American Engineering, 2000.
- [10] Faires, V. M., *Diseño de Elementos de Máquinas* (4ta Edición), Montaner y Simon 1994
- [11] ASSHTO *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 1993
- [12] Boresi A. P., and Schmidt R. J., *Advanced Mechanics of Materials*. John Wiley and Sons, 5 Edición, 1993.
- [13] Dassault Systems. <https://www.3ds.com>, 2019.



## DESARROLLO DE UN BANCO DE ENSAYOS DE DESGASTE EROSIVO EN LÍNEAS Y ACCESORIOS DE CAÑERÍAS

Adrian Urrestarazu<sup>1 y 2</sup>, Nicolas Zabala<sup>3</sup>, Julián Culleton<sup>1</sup>, Lucas Longstaff Alvarez<sup>1</sup>,  
Jesús Sarabia<sup>1</sup> y Damián Urrestarazu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de ingeniería – Universidad Nacional del Sur (UNS),  
Av Alem 1254, Bahía Blanca – Argentina – [adrian.urrestarazu@uns.edu.ar](mailto:adrian.urrestarazu@uns.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento de L.O.I., Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRBB), Bahía Blanca-  
Argentina

<sup>3</sup> Instituto de tecnología Aplicada (ITA), Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA-  
UACO), Caleta Olivia - Argentina

### RESUMEN

El desgaste erosivo es uno de los principales mecanismos de falla en tuberías que afecta al sector industrial atribuyéndose grandes pérdidas económicas. Además, y más importante aún, puede tener un impacto negativo en cuestiones de seguridad y el medioambiente, con lo cual, la determinación y predicción del desgaste bajo diferentes condiciones operativas resulta muy importante desde el punto de vista industrial.

Actualmente, por la escasa producción de petróleo convencional, los trabajos de fracturación hidráulica crecen día a día, lo que posibilita que tome relevancia el estudio fluido-dinámico de las líneas de perforación no convencionales. El fluido de fracturación suele incorporar hasta un 5 % de arena de sostenimiento y es la principal responsable de la erosión de los componentes del sistema.

En este trabajo se muestra la ingeniería y el proceso de desarrollo de un banco de ensayos que permite la validación experimental de modelos teóricos simples. Cuenta con la posibilidad de modificar las velocidades del fluido y el trazado para ensayar diferentes accesorios en 1"; ¾ y ½". Dispone de un equipo de bombeo 7,5 Kw con variador de frecuencia. Se instrumentó para registrar presiones en diferentes sectores del proceso. Los elementos erosivos a utilizar se corresponden morfológicamente con los empleados en las perforaciones no convencionales.

Desde el punto de vista tecnológico, contar con modelos computacionales validados experimentalmente capaces de reproducir el comportamiento fluido-dinámico de las líneas, junto con los mecanismos de desgaste, permitirá optimizar el diseño del trazado de las líneas hidráulicas, minimizando las fallas.

**Palabras clave:** Tribología; Erosión; Desgaste; Fracking.



## 1. INTRODUCCIÓN

La erosión es un tipo de desgaste que genera grandes pérdidas económicas y reduce las prestaciones de los equipos; dicho mecanismo se encuentra presente en casi todas las ramas de la ingeniería (minería, hidráulica, agrícola, etc.). El fenómeno es un proceso complejo afectado por numerosos factores, donde pequeños cambios en las condiciones operativas pueden afectar significativamente el daño producido. Por lo mencionado, actualmente resulta muy difícil predecir la tasa de desgaste en una cañería sometida a un proceso erosivo [1,2].

### 1.1. Fractura

La fracturación hidráulica o estimulación hidráulica (también conocida como fracking en inglés) es un método utilizado para crear fracturas artificiales en la piedra donde se encuentra un reservorio no-conventional de hidrocarburos. Estas fracturas permiten que el petróleo o el gas contenido en la roca puedan migrar a través de los poros de ésta, hacia el reservorio convencional de hidrocarburos (pozo de petróleo). Las fracturas se logran inyectando a alta presión, agua, agentes de sostén y fluidos especiales (ver Figura 1).

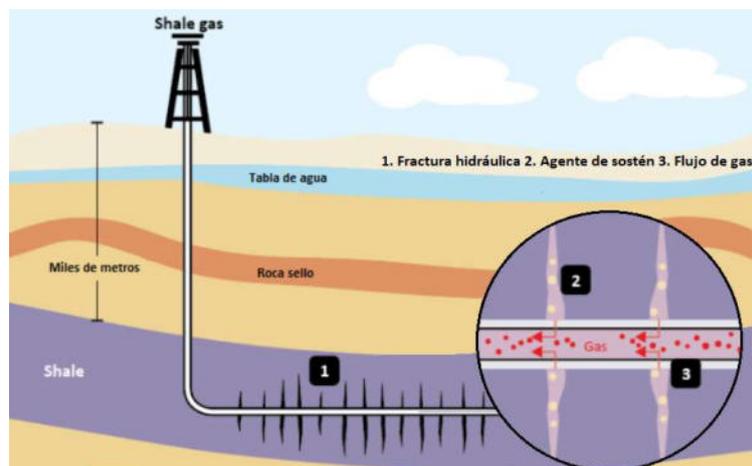


Figura 1: Esquema básico de una fractura (Fuente: British Broadcasting Corporation (BBC))

En los procesos de fractura, el fluido de trabajo con agente de sostén causa serios problemas de erosión en la superficie interior de las tuberías de las líneas de alta presión con flujos de alta velocidad, que conducen a la pérdida de material y consecuentemente, la falla del equipo. La erosión en las líneas puede verse afectada por muchos factores, incluyendo las propiedades de flujo multi-fásico, materiales de fabricación y tratamiento térmico de tuberías, tensión aplicada en las zonas críticas, etc. En general, los sectores más afectados son donde se realizan cambios de dirección del fluido en las líneas (generalmente codos a 90°), los cuales habitualmente presentan averías [3,4].

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Arenas para fractura

Las características específicas requeridas en este tipo de agentes de sostén están dadas por la fricción, presión y fuerza a la que se ven sometidas durante la fase de inyección del fluido de fractura en el pozo, y en la fase posterior de fracturar la roca al depositarse en las grietas generadas. Las especificaciones están establecidas en la normativa API RP 56, e ISO 13503-2:2006 y su correspondiente API RP 19C (ver Tabla 1).

Tabla 1: Tamaños reconocidos de arenas de fractura hidráulica. Fuente: [5]

	Mallas ASTM-mm								
	6/12 3,35/1,70	8/16 1,18/2,36	12/20 0,85/1,70	16/30 0,60/1,18	20/40 0,85/0,425	30/50 0,30/0,6	40/70 0,212/0,425	70/140 0,106/0,212	
Tamices ASTM necesarios para el ensayo granulométrico	4	6	8	12	16	20	30	50	Máx. 0,1%
	6	8	12	16	20	30	40	70	90%
	8	12	16	20	30	40	50	100	
	10	14	18	25	35	45	60	120	
	12	16	20	30	40	50	70	140	
	16	20	30	40	50	70	100	200	
	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja	Bandeja

#### 2.1.1 Forma de los granos

En fractura se utilizan las arenas que tienen ciertas características de esfericidad y redondez dado que es necesario minimizar el desgaste erosivo. Las arenas utilizadas para los modelos son las empleadas en la industria del Fracking de origen nacional e internacional (China, EE UU, Brasil), naturales y sintéticas, con diferentes granulometrías según malla ASTM #20/40; #30/50; #40/70; #70/140, las cuales fueron caracterizadas morfológicamente en el Laboratorio de Materiales de la UNS (ver Figura 2).

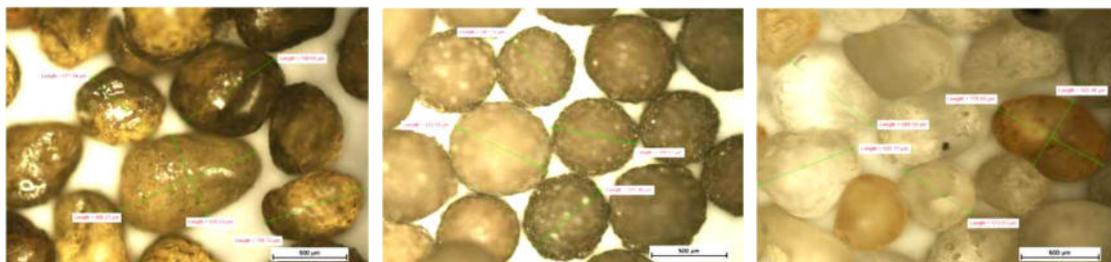


Figura 2: Izq.:20/40 Resinado; Cent.: Cerámico 20/40; Der.: Natural 30/50

## 2.2 Modelos de erosión

Muchos investigadores han realizado experimentos para proporcionar datos sobre la distribución de la erosión en codos de 90°. En algunos casos se utiliza la técnica de la medición de masa antes y después del ensayo [6,7]. Esta técnica ampliamente difundida de "pérdida de masa", permite cuantificar el efecto global de la erosión en el accesorio, pero no da la distribución de la pérdida de masa sobre el mismo [1]. El desgaste por erosión prolongado en el tiempo, conduce a una gran concentración de tensiones en las zonas críticas, que hacen que el material sea aún más susceptible a la interacción con las partículas erosivas. Con el aumento de la presión interna de la línea, la tasa de desgaste erosivo se incrementa, a causa del aumento de las tensiones de tracción sometidas en las porciones exteriores de los codos.

### 2.2.1 Factores característicos que intervienen

Los mecanismos de remoción que actúan durante desgaste erosivo cuando una partícula sólida impacta sobre una superficie, difieren según el material sea dúctil o frágil (Ver Figura 3). Partículas con una dureza superior a la de la superficie causarán un mayor desgaste. [3,4]. Los rangos de desgaste dependen de la forma de la partícula y del tamaño; donde las angulares son más perjudiciales que las redondas. El ángulo de impacto es un factor que también influye fuertemente en los resultados obtenidos. En materiales dúctiles se presenta un máximo cuando los ángulos de impacto están comprendidos entre 20 y 30°, a diferencia de los materiales frágiles en los cuales es mayor de 90° [2-4].

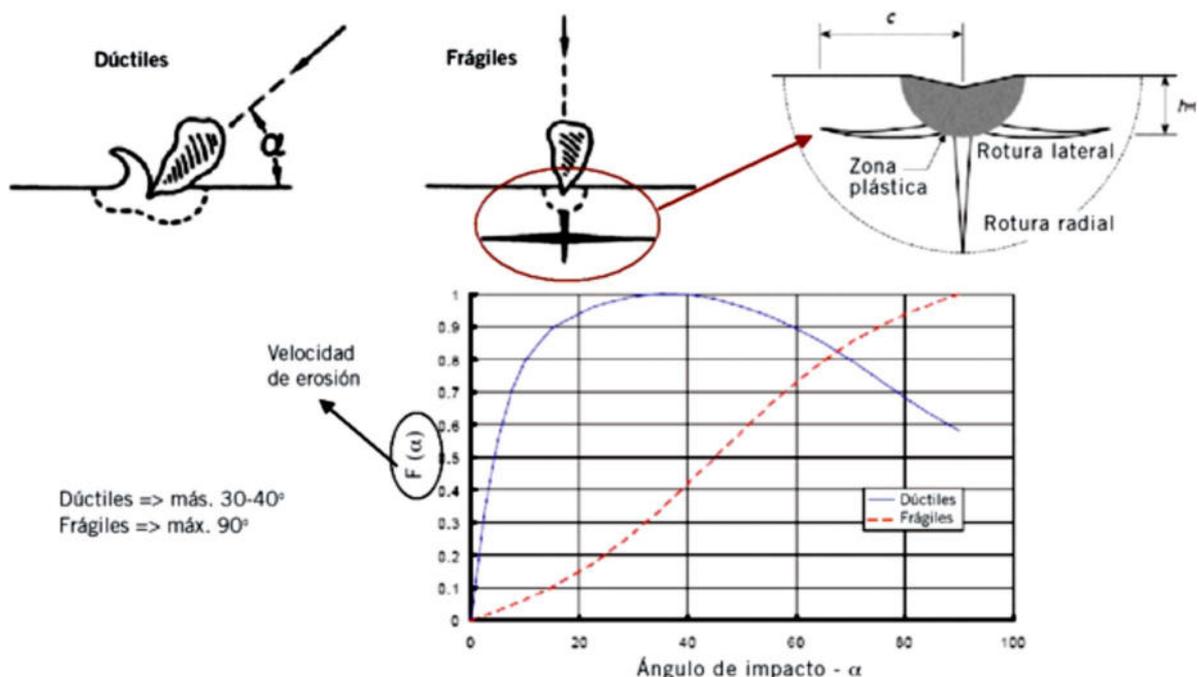


Figura 3: Mecanismos de daño por impacto de partículas. Fuente: [8]

### 2.2.2 Modelo de flujo de fluidos desarrollados

Se utilizaron métodos de simulación computacional de fluidos, más conocido como CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) [9]. En este trabajo, en primer lugar, se modela la trayectoria de la sustancia líquida. El mallado utilizado es de tipo no estructurado mediante geometrías prismáticas. Las velocidades que se modelan varían desde 0,05 hasta los 10 m/s y los tamaños de cañería corresponden a  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  y 1". En esta etapa se analiza sólo el comportamiento del flujo en un codo radio corto de 90°. Se modela con agua dado que es el fluido utilizado en el fracking. A veces se emplean lodos de base acuosa, pero esto no se consideró en esta etapa inicial. Para este estudio se concentró la atención en los resultados de velocidad, dirección y la presión en cada punto de contacto entre el fluido y la superficie de la instalación (ver Figura 4 Izq.). Luego de obtenerse la representación del comportamiento del fluido, el siguiente paso es incorporar las partículas arrastradas y la influencia del impacto en la cañería (ver Figura 4 Der.). Para esto se determina una cantidad de partículas (entre 50 y 300), las cuales son arrastradas por el flujo ya simulado. Por último, a los resultados obtenidos de velocidad y ángulo de impacto respecto de la superficie, se le acoplan modelos matemáticos [10,11] para determinar la tasa de desgaste producida en las diferentes zonas.

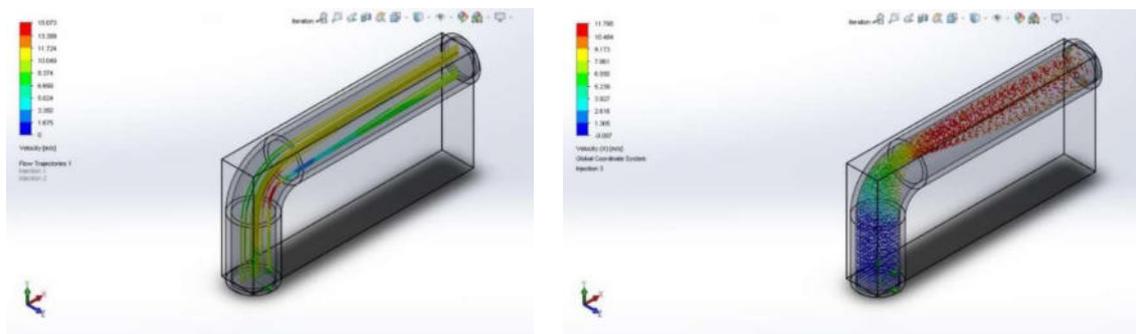


Figura 4: Izq.: Trayectoria del flujo en una línea de 1" Sch 40 con una velocidad de entrada de fluido igual a 10 m/s. Der.: Trayectoria de las partículas de arena (granulometría ASTM #20/40)

### 3. PROYECTO

El banco fabricado consiste en dos recorridos de igual longitud y un trazado simétrico respecto del plano medio de la instalación con diámetros de caños nominal de  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{2}$ " (ver Figura 5). Ambos trazados son alimentados por una motobomba eléctrica que toma el fluido de un tanque de abastecimiento el cual recibe la descarga de ambos recorridos, cerrando así el circuito hidráulico. El sistema está diseñado para funcionar haciendo recircular el fluido a través de uno o dos ramales, seleccionando cada uno independientemente con válvulas esclusas que se encuentran luego de la reducción sobre cada tramo recto. Para conseguir igual velocidades de flujo en las cañerías de  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{4}$ " se utiliza un variador de frecuencia para controlar la velocidad



de la motobomba (RPM). Además, la descarga de la bomba cuenta con una válvula globo para realizar un ajuste fino de regulación.

### 3.1 Consideraciones de diseño

A continuación, se enumeran las condiciones de borde más relevantes para el diseño:

*Potencia máxima disponible: 7,5 [KW] (limitada por el laboratorio); Velocidad de flujo máxima: 10 [m/s]; longitud de tramos rectos del circuito: 10 veces el diámetro de los caños como mínimo para asegurar flujo completamente desarrollado a la entrada de los accesorios; fluido utilizado: mezcla de 95 % agua y 5 % de partículas sólidas en suspensión; Componentes standard para facilitar el intercambio; mantener homogeneidad de la mezcla en el tanque sin utilizar dispositivos auxiliares; dispositivos de detención en caso fugas en el circuito producto de la erosión.*

### 3.2 Circuito y determinación de la velocidad del flujo

En el modelo de circuito se analizaron varias alternativas usando distintas configuraciones hasta llegar al modelo final (ver Figura 5). Se desea ensayar velocidades similares a las de fractura. El caudal de trabajo varía según los requerimientos de la perforación, pero generalmente oscilan entre 30 y 60 BPM (barriles por minuto) con presiones máximas de 15.000 PSI (< 1000 bar). Con estos datos se determinó (considerando un tubing de 3 1/2") una velocidad promedio de 10 m/s para el flujo. Se limita en el banco dado que velocidades más altas requerirán mayor demanda energética en los ensayos.

*Aspectos considerados: Circuito bridado y roscado, desarmable en tramos para su posterior análisis; una sección de cañería principal y 2 secciones de cañerías de menor diámetro independientes para analizar diferentes velocidades y geometrías; longitud suficiente entre accesorios y bridas para la medición de caudal; manómetros en los diferentes tramos de cañería.*

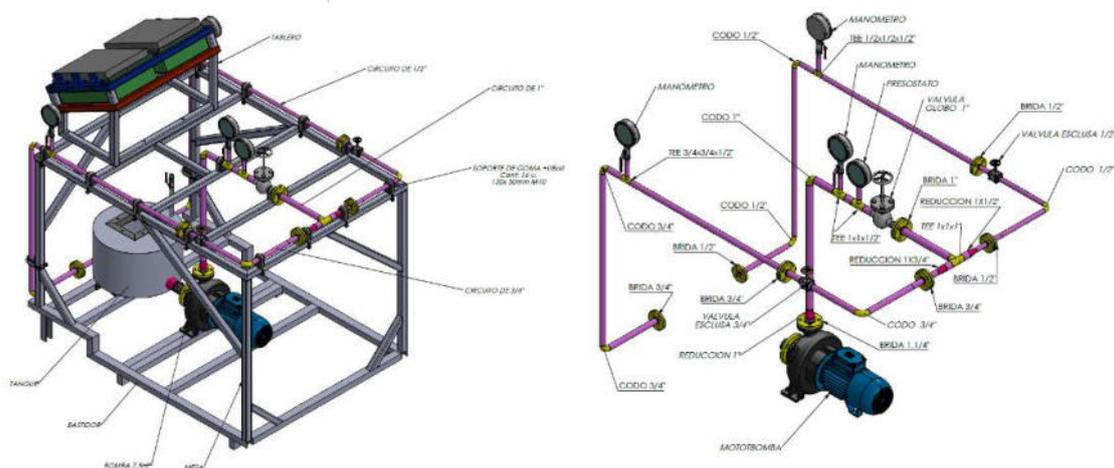


Figura 5: Banco de ensayo para la evaluación del desgaste de accesorio de cañerías



### 3.2.1 Espesor de cañerías y serie de accesorios

El cálculo del espesor de cañería se realiza según la norma ASME B 31.3. Según la norma el espesor requerido por la presión interna es menor al correspondiente de SCH 40 comercialmente disponible  $\frac{1}{2}$  (0,109");  $\frac{3}{4}$  (0,113") y 1" (0,133). Teniendo en cuenta de que el objetivo del banco es erosionar las cañerías, este espesor escogido resulta conveniente desde el punto de vista económico. Un SCH 80 permitiría realizar ensayos de mayor duración, pero influiría directamente en el costo. Para el cálculo de la serie de los accesorios y válvulas se utilizó la norma ASME B31.3 considerando las siguientes variables:

*Material accesorios ASTM A105: Acero al carbono; temperatura de trabajo máxima: 90 [°C]; presión de trabajo máxima operativa = 10 [kg/cm<sup>2</sup>].*

Por lo tanto, según la norma ASME B31.3, podemos trabajar con la serie 150# en todo el trazado.

### 3.3 Cálculo de la instalación y selección del equipo de bombeo

A partir de la determinación de las dimensiones y los componentes de la instalación, y de las condiciones de flujo, se calcula la curva característica de la misma, obteniendo una para cada ramal del circuito (Ecuación 1). Tanto para el cálculo de las pérdidas de carga en tramos rectos como en accesorios se utilizó la ecuación de Darcy-Weisbach, dado que es la más exacta para cálculos hidráulicos.

$$H_{caño} = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad H_{accesorio} = K * \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

Donde:

*L: longitud de la cañería / D: diámetro de la cañería / V: velocidad del fluido / g: aceleración de la gravedad; g = 9,81 [m/s<sup>2</sup>] / f: coeficiente de fricción, obtenido del Diagrama de Moody a partir del número de Reynolds del flujo y de la rugosidad relativa "ε" de los caños. La rugosidad relativa (ε) surge del cociente entre la rugosidad absoluta (K) y el diámetro de la cañería (D).*

Los números de Reynolds obtenidos para las líneas trabajando con agua de 1",  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{2}$ " con un rango de velocidades de hasta 10 m/s son muy elevados (>50.000), correlacionándose con un flujo turbulento. En función de los requerimientos de altura y caudal, se preselecciona una bomba modelo CS32-200, la cual tiene los siguientes puntos de encuentro:

Funcionando con el circuito de 1/2", el punto de encuentro es: Q = 4,60 [m<sup>3</sup>/h] y H = 40 [m.c.a.] y para de 3/4" es Q = 10,30 [m<sup>3</sup>/h] y H = 52 [m.c.a.] (ver Figura 6).

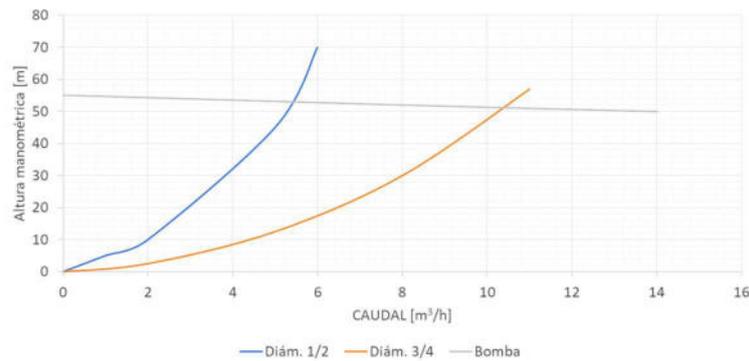


Figura 6: Diagrama de la instalación para la línea de  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  con el punto de encuentro con la curva característica de la bomba seleccionada

Especificaciones técnicas bomba seleccionada:

Caudal: hasta 36 m<sup>3</sup>/h - Altura de elevación: hasta 56 m; Sistema “Back Pull-Out” que permite el fácil montaje y desmontaje del motor con las partes rotantes de la bomba; Serie normalizada derivada de la norma EN 733 (ex DIN 24255); La temperatura máxima del líquido a bombear es de 90°C, y la temperatura ambiente máxima es de 40°C; Potencia 7,5 hp / 2900 RPM.

Para calcular la velocidad del fluido en función de la frecuencia, se utilizaron las ecuaciones de afinidad (Ecuación 2). Las mismas permitieron determinar el caudal, la altura manométrica y la potencia consumida por el equipo de bombeo para las diferentes velocidades angulares. La intersección de la nueva curva de la bomba, con las curvas de la instalación determinan el punto de trabajo.

$$\frac{Q_1}{Q_x} = \frac{n_1}{n_x} \quad \frac{H_1}{H_x} = \left(\frac{n_1}{n_x}\right)^2 \quad \frac{P_1}{P_x} = \left(\frac{n_1}{n_x}\right)^3 \quad (2)$$

Donde:

$n$ : velocidad angular [rpm] /  $Q$ : caudal volumétrico [l/s] /  $H$ : altura [m] /  $P$ : potencia [kW]

### 3.4 Bastidor y mesa

En el modelo de bastidor y mesa, se analizaron varias alternativas con diferentes perfiles y los costos de fabricación, hasta llegar al modelo final. Para el mismo se utilizó un UPN 50x38 disponible en el laboratorio para su uso y estructural 40x40x1.6. El bastidor está formado por una base construida con dos largueros y seis travesaños, cinco de estos últimos sirviendo de apoyo para el tanque y la motobomba. Existe un desnivel entre los apoyos del tanque con respecto a los de la bomba para lograr que la admisión de esta quede alineada con el fondo del tanque. Sobre esta base está apoyada una mesa rectangular con tres travesaños equidistantes entre sí y los bordes de la mesa. Estos servirán de apoyo para soportar las cañerías que componen el



circuito hidráulico y el tablero de control del banco (ver Figura 7). Además, se decidió colocar ocho refuerzos en los laterales de la mesa los cuales garantizan una mayor rigidez estructural para evitar desplazamientos excesivos de las cañerías y así obtener un correcto funcionamiento.

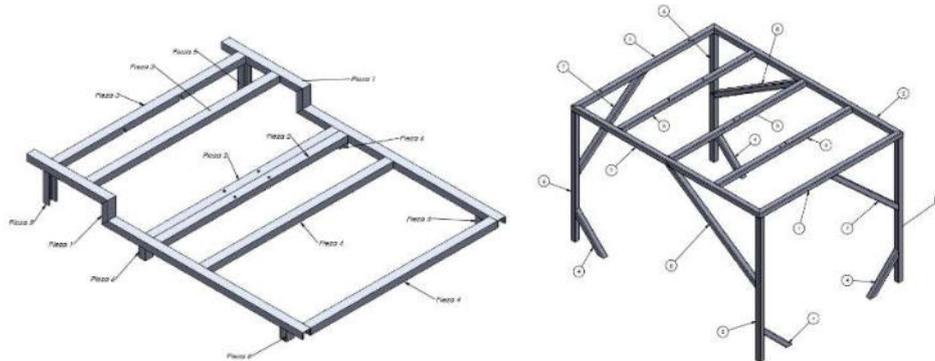


Figura 7: Izq.: Bastidor para bomba y tanque; Der.: Mesa soporte de cañería y tableros

### 3.5 Recipiente

Para la selección del recipiente que contiene el líquido de trabajo, se analizaron dos alternativas: un tanque prismático y otro cilíndrico. Analizando las alternativas, el prismático tiene una configuración de paredes rectas y esquinas a 90° y lados irregulares lo cual genera acumulación de arena en los vértices por el escaso movimiento del líquido y cómo no se desea utilizar un mecanismo de agitación, la opción quedó descartada. Por otro lado, la desventaja del tanque cilíndrico adoptado (ver Figura 8) es que necesita el rolado de la chapa (3,2 mm de espesor).

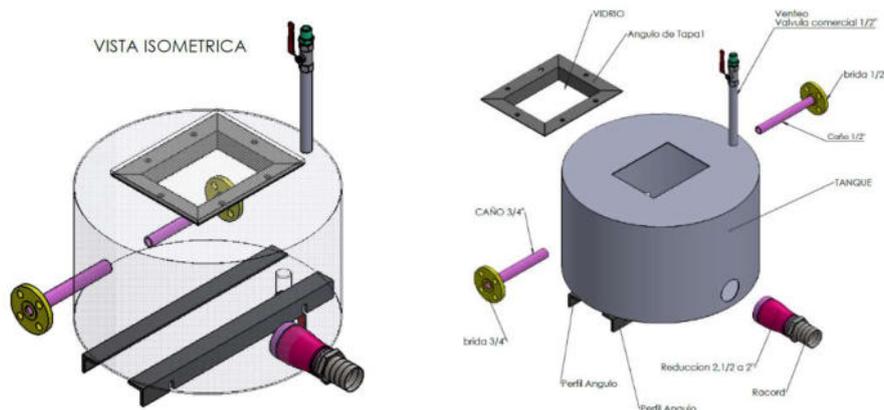


Figura 8: Tanque de aspiración y descarga del equipo de bombeo.

### 3.6 Tensión sobre los accesorios

#### 3.6.1 Bastidor

Se calcularon las cargas sobre la estructura y el tanque para hallar las zonas más solicitadas y realizar los cálculos de soldadura.

*Determinación de las cargas: bomba 68 kg; tanque 84 kg; válvulas/accesorios/cañerías 35 kg; Tablero control 10 kg.* Con todas las cargas determinadas se procedió a construir el modelo del bastidor y mediante un estudio con el Método de Elementos Finitos se obtuvieron los diagramas de esfuerzos en la estructura. Como se esperaba, los esfuerzos que soporta la mesa son lo suficientemente pequeños como para poder despreciarlos, por lo que se centró el estudio sobre la base del bastidor. Partiendo de la simulación localizamos el punto de mayor sollicitación al momento flector, ya que la influencia del esfuerzo de corte y el esfuerzo axial son tan bajos que pueden ser despreciadas. *El momento flector de mayor magnitud es  $M_f = 81,47$  [Nm].*

Siendo el material de nuestra elección un acero AISI 1020, cuya tensión de fluencia es de 350 MPa, procedemos a calcular la tensión admisible del material utilizando un factor de seguridad de 6. Tensión de admisible:  $\sigma_{adm} = 58$  MPa. El factor de seguridad fue determinado teniendo en cuenta el hecho de que a medida que funcione el banco, el rodete de la bomba va a ser erosionado por el fluido que impulsa, provocando un desbalanceo del mismo con la consecuente generación de vibraciones que serán absorbidas por el bastidor. A partir de la fórmula del momento resistente:  $W = M_{fl} / \sigma_{adm}$ ; obtenemos el valor mínimo de éste que requerimos en el perfil para que sea adecuado para utilizarlo.  $W = 81,47$  Nm / 58 MPa. Determinando un volumen  $W = 1,4$  cm<sup>3</sup>. La selección del perfil UPN 50 x 38 proporciona una rigidez adecuada para minimizar los desplazamientos generados por las vibraciones anteriormente mencionadas.

### 3.6.2 Recipiente

Se modeló por elementos finitos el tanque mediante un mallado estándar con sólidos tetraédricos. *Se determinó que la tensión máxima es de 58,5 MPa.* (ver Figura 9).

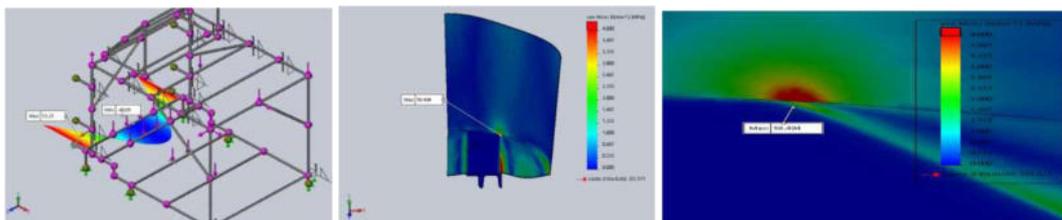


Figura 9: Análisis de tensiones en la estructura y el tanque

El cálculo del factor de seguridad del tanque usando el valor de tensión máxima arrojó un valor igual a 6 (factor =  $351,5$  MPa /  $58,5$  MPa). Este factor puede indicar un excesivo sobredimensionamiento, pero al tener en cuenta el desgaste producido por la erosión que genera la descarga del circuito sobre la pared del tanque, así como también los efectos de las vibraciones y de la recirculación del fluido cuando el banco esté en funcionamiento, concluimos que el espesor del tanque planteado es el adecuado para garantizar el correcto funcionamiento.

#### 4. SISTEMA DE CONTROL Y SEGURIDAD

El control y la seguridad que forma parte del equipo son estrictamente necesarios en el laboratorio. En el caso del presente proyecto, se decidió contar con un PLC para obtener un desempeño confiable en los circuitos de mando y señalización. El PLC recibe entradas de diferentes sensores y ejecuta decisiones lógicas basadas en un programa almacenado en la memoria. El programa permite parar el equipo de forma manual o automática si se detectan cambios en la presión y caudal (la presión disminuye por causa de una pinchadura o el caudal se reduce por falta de líquido en el sistema). **ENTRADAS DIGITALES:** I1 Pulsador de marcha general del sistema “STAR” / I2 Pulsador de paro general del sistema “STOP” / I3 Interruptor de “Parada de emergencia” / I4 Presostato / I5 Caudalímetro “on-off”. **SALIDAS DIGITALES:** Q1 Señal de activación VARIADOR / Q2 Encendido-luz piloto “Verde” / Q3 Parada-luz piloto “Rojo”.

#### 5. RESULTADOS

Se lograron desarrollar algunos modelos teóricos, los cuales se contrastarán con los ensayos del banco fabricado (ver Figura 10). Actualmente el desarrollo de los ensayos experimentales se vio afectado principalmente por los errores en la lectura del caudal, lo cual impide la medición exacta de la velocidad del flujo. Se está trabajando en un sistema de validación volumétrica.



Figura 10: Banco de ensayos de desgaste erosivo

#### 6. CONCLUSIONES

Se procedió al diseño y fabricación del tribómetro para la validación de modelos de desgaste erosivo. El trabajo se extendió más del plazo estipulado por las dificultades en la construcción y la medición de caudal. Los ensayos de este tribómetro contribuirán a la capacitación de alumnos de ingeniería e incrementa la posibilidad de realizar ensayos de desgaste por erosión en el marco de los proyectos de investigación del departamento de ingeniería de la UNS. Además, se podrá estudiar a dicho fenómeno, en orden a adquirir herramientas conceptuales para enfrentar situaciones típicas de la industria local y regional.



## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a el equipo técnico del Laboratorio de Máquinas Primarias (Departamento de ingeniería - UNS) Walter Thögersen y Nicolas García por la ayuda en la fabricación del banco y periféricos.

## REFERENCIAS

- [1] Solnordal, C.B., Chong, Y.W., Boulanger, J. *An experimental and numerical analysis of erosion caused by sand pneumatically conveyed through a standard pipe elbow*. *Wear*, 336-337, 43-57, 2015.
- [2] Edwards, J.K., Mclaury, B.S., Shirazi, S.A. *Modeling solid particle erosion in elbows and plugged tees*. *J. Energy Resour. Technol.*, 123(4), 277-284, 2001.
- [3] Lin, N., Lan, H., Xu, Y., Dong, S., Barber, G. *Effect of the gasesolid two-phase flow velocity on elbow erosion*. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 26, 581-586, 2015.
- [4] Zhu, Hongjun, Wang, Jian, Ba, Bin, Wu, Ze, Wang, Wei. *Numerical investigation of flow erosion and flow induced displacement of gas well relief line*. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 37, 19-32, 2015.
- [5] Bouso, J.L. *Las arenas de fractura hidráulica*. ERAL Chile S.A. Perumin. 2015
- [6] Chen, X., Mclaury, B.S., Shirazi, S.A. *Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees*. *Comput. Fluids*, 33(10), 1251-1272, 2004.
- [7] Mazumder, Q.H., Shirazi, S.A., Mclaury, B.S. *Prediction of solid particle erosive wear of elbows in multiphase annular flow-model development and experimental validations*. *J. Energy Resour. Technol.*, 130, 1-10, 2008.
- [8] Códaga D, Rebasea N., Weber G., Garza L. y Cabo G. *Evaluación y predicción de erosión en tubería de producción, en el proceso de fractura hidráulica*. Petrotecnia, 2015.
- [9] Zienkiewicz, O. C., Taylor R. L., Nithiarasu P. *The finite element method for fluid dynamics*. Vol 3, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [10] Oka, Y. Isomoto, K. Okamura, and T. Yoshida. *Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation*. *Wear* 259.1-6: 95-101, 2005.
- [11] Oka, Y. I., and T. Yoshida. *Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage*. *Wear* 259.1-6: 102-109, 2005.



## DISEÑO Y CÁLCULO DE TRANSMISIONES DE POTENCIA CON CORREAS DE SECCIÓN TRAPEZIAL EN BARCOS ARENEROS Y PRESTACIONES OBTENIDAS

**Horacio M. Mirassou**

Departamento Académico de Mecánica - UTN Facultad Regional General Pacheco  
Hipólito Yrigoyen 288, General Pacheco, Buenos Aires, Argentina  
[hmirassou@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:hmirassou@docentes.frgp.utn.edu.ar)  
[hmmirassou@yahoo.com](mailto:hmmirassou@yahoo.com)

### RESUMEN

Este trabajo se relaciona con otro cuyo título es "Diseño y cálculo de cajas de engranajes especiales para barcos areneros y prestaciones obtenidas" presentado en el Sexto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica VI CAIM 2018 e incluido en sus memorias. La arena utilizada en el Gran Buenos Aires se extrae principalmente del fondo del río Paraná con barcos areneros, mediante bombas centrífugas de características especiales denominadas bombas de refoulado, ubicadas en el interior de cada barco, utilizando tuberías de aspiración sumergidas en el agua.

La arena aspirada se descarga en una gran pileta ubicada dentro del barco y luego se la transporta a instalaciones terrestres para su posterior comercialización. Cada bomba de refoulado funciona con una frecuencia de giro y una demanda de potencia aproximadamente constantes, y según sus características y dimensiones sus valores suelen estar entre 450 y 750 r.p.m., y 150 y 650 CV. Generalmente son accionadas por motores diesel de características diversas, según cada barco. La mayoría de las transmisiones de potencia entre motores y bombas de refoulado se hacen con correas o con cajas de engranajes.

En este trabajo se muestran las características de algunas transmisiones de potencia con correas de secciones trapeziales 5V y 8V, que fueron diseñadas y fabricadas en Argentina en forma especial para algunos barcos areneros, y los buenos resultados obtenidos luego de ser utilizadas durante varios años. En cada caso se presentan vistas en corte con cotas de dimensiones y cálculos de dimensionamiento de las transmisiones con correas, incluyendo sus poleas acanaladas y árboles sometidos a flexión y torsión. Las correas de secciones trapeziales 3V, 5V y 8V constituyen un desarrollo tecnológico más reciente y avanzado con respecto a las correas clásicas de secciones A, B, C, D, E.

**Palabras Clave:** *Transmisiones de Potencia, Correas de Sección Trapezial.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se relaciona con otro, cuyo título es “Diseño y cálculo de cajas de engranajes especiales para barcos areneros y prestaciones obtenidas” [1], presentado en el Sexto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica VI CAIM 2018 e incluido en sus memorias, de modo que la primera página de la Introducción de [1] es común a ambos. Aquí no se transcribe todo el contenido de esa página, solamente algunos datos que se utilizan en las siguientes secciones.

Las características y dimensiones de los barcos areneros son muy diversas. Los volúmenes de las piletas en donde se descarga la arena pueden variar entre aproximadamente 80 y 2000 m<sup>3</sup>, según cada barco. Las bombas de refoulado tienen diferentes dimensiones y características, variando los diámetros nominales de sus tuberías (de aspiración y descarga) entre 8”, 10”, 12”, 14” y 16”. Generalmente se trabaja con una sola o con dos bombas de refoulado, y con una o dos tuberías de aspiración. Los barcos areneros tienen en común el ciclo de trabajo. Desde el fondo del río se succiona una mezcla con 5 a 15% de arena, y el resto agua, que se derrama de la pileta y retorna al río, porque se la utiliza solamente para impulsar a los granos de arena, obligándolos a ascender por las tuberías de aspiración. Se busca maximizar los porcentajes de arena logrados, que dependen principalmente de la profundidad de aspiración, que puede variar mucho según la zona del río en donde se realiza la operación de carga, y por otro lado de las características del sistema de tuberías y bombas utilizado.

Por eso, y según el volumen de la pileta, el tiempo necesario para la operación de carga puede variar habitualmente entre una y siete horas, durante el cual la demanda de potencia y la frecuencia de giro de los árboles de las bombas son aproximadamente constantes. Cuando la pileta está llena, el barco retorna a la costa de las instalaciones terrestres, donde se descarga la arena. Una sola bomba se utiliza para el refoulado, impulsando una mezcla con 20 a 25% de arena, desde la pileta del barco hasta la pileta, silo o depósitos ubicados en tierra; mientras que otra bomba, denominada de “barrido”, se utiliza para enviar agua a la pileta del barco, con un caudal de aproximadamente 75 a 80% del caudal de la mezcla refozada a tierra. Esta operación suele tardar entre 2 y 4 horas, según cada barco e instalación. La demanda de potencia es aproximadamente constante (puede ser un poco mayor al inicio de la operación), y también la frecuencia de giro de los árboles de las bombas. Una bomba utilizada para refoulado cuando se carga arena en el río, puede utilizarse para el barrido, cuando se descarga arena a tierra. En las secciones 3 y 4 se exponen las características de dos transmisiones de potencia con correas de secciones trapeciales 5V y 8V, que fueron diseñadas y fabricadas en forma especial para el accionamiento de bombas de refoulado. Se presentan los cálculos de dimensionamiento. Se ha considerado en general este ciclo de trabajo (con un viaje diario): 4 hs. en la operación de carga, descanso de 8 hs. por navegación, 4 hs. en la operación de descarga de arena a tierra, descanso de 8 hs. por navegación. Resultan 8 hs. de trabajo diarias (salvo excepción).



## 2. CRITERIOS Y MÉTODOS PARA DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE TRANSMISIONES DE POTENCIA CON CORREAS DE SECCIONES TRAPECIALES

En [2] págs. 575 a 594 se explican los conceptos principales del tema transmisiones de potencia con correas en general y correas planas, y en [2] págs. 595 a 605 se trata el tema correas de secciones trapeziales clásicas A, B, C, D, E, con ecuaciones y datos para cálculos de elección y dimensionamiento. En [2] pág. 596 se expresa que actualmente en USA se tiende a preferir correas de secciones trapeziales 3V, 5V, 8V, pero no se presenta información para su cálculo.

En [3] págs. 750 a 760 se expone el tema transmisiones de potencia con correas en general y correas planas, y en [3] págs. 760 a 765 se trata el tema correas de secciones trapeziales clásicas A, B, C, D, E, con ecuaciones y datos para cálculos de elección y dimensionamiento. En [3] no se mencionan correas de secciones 3V, 5V, 8V. En [4] y [5] se expone el tema transmisiones de potencia con correas en general y correas planas de modo semejante al de [3], y el tema correas de secciones trapeziales clásicas A, B, C, D, E. Se presentan datos para el cálculo de su vida útil medida en cantidad de ciclos. En [4] y [5] en las tablas 17-16 y 17-17 se incluyen datos para el cálculo de la vida útil de correas con secciones A, B, C, D, E, 3V, 5V, 8V, pero no se da el resto de la información necesaria para dimensionar transmisiones de potencia con correas de secciones 3V, 5V, 8V. Eso solamente se encuentra en [6] (en la bibliografía citada en este trabajo), y se aplica en los cálculos de los casos presentados en las siguientes secciones 3 y 4.

En [7] no se trata el tema transmisiones de potencia con correas, se cita en este trabajo para realizar cálculos de resistencia a la fatiga de árboles sometidos a flexión y torsión, y sus deflexiones elásticas, para eso también se citan [2-5]. [8] se cita para efectuar cálculos de elección de rodamientos. En [6] pág. 67 se presenta la notación utilizada en sus fórmulas, con definición de variables, algunas de las cuales se utilizan para otras clases de correas que se incluyen en [6], pero en este trabajo solamente se dan ejemplos con correas de secciones 5V y 8V. La Figura 1a (tomada de [6] pág. 7) muestra una correa de sección 5V. La Figura 1b (tomada de [2] pág. 595) es un esquema utilizado para explicar el denominado “efecto de cuña”, conocido desde hace décadas, el cual permite transmitir una determinada potencia con una menor fuerza radial en comparación con una transmisión semejante realizada con correas planas.

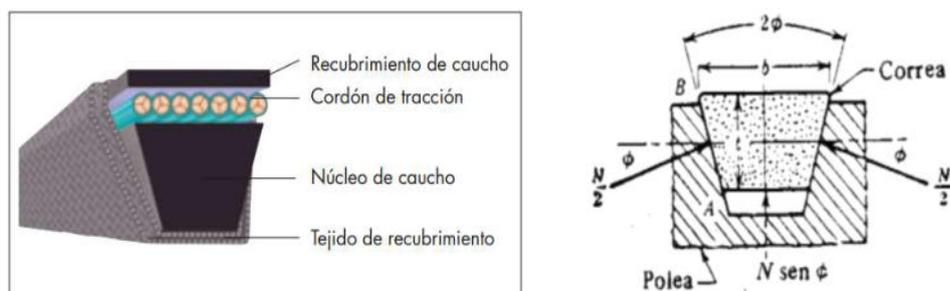


Figura 1: (a) Correa de sección 5V; (b) Correa de sección trapezoidal en un canal de polea



En este trabajo se denominan  $d$  y  $D$  a los diámetros exteriores de las poleas menor y mayor respectivamente, y  $A$  a la distancia entre ejes, que en [6] pág. 67 se denomina  $a$ , (y  $d_{dk}$  y  $d_{dg}$  a los diámetros de referencia de las poleas menor y mayor respectivamente). De los esquemas de [6] págs. 7, 20, 44 y 45, se deduce que el diámetro de referencia es igual al diámetro exterior en las poleas para secciones 5V y 8V. Entonces con esas correas la relación de transmisión se calcula con el cociente  $D/d$ . En [6] pág. 7 se dan dimensiones de las secciones 3V, 5V, 8V; se expresa que el perfil 8V suele utilizarse en transmisiones de cargas pesadas, como molinos o trituradoras de piedra. En [6] pág. 44 Tabla 11 se dan dimensiones de los canales para correas de secciones 3V, 5V, 8V, con tolerancias y rugosidad superficial, datos a ser utilizados en la fabricación de poleas. Esto es según normas RMA/MPTA de USA. En [6] pág. 154 se presenta una lista de normas DIN, ISO, RMA, SAE y ASAE que tratan sobre las diversas clases de correas y poleas incluidas en el catálogo [6], en cuya pág. 20 se presenta una lista de las correas estandarizadas 3V, 5V, 8V, cuyas denominaciones son iguales a 10 veces los desarrollos exteriores de las correas expresados en pulgadas. En [6] pág. 80 se da la ecuación para calcular el desarrollo de referencia  $L_{dth}$  de una correa (instalada en sus poleas y por lo tanto estirada normalmente), en función de los diámetros de referencia de las poleas ( $d_{dg}$  y  $d_{dk}$  para la grande y la pequeña respectivamente) y la distancia entre ejes  $a$ . Esa ecuación también es aplicable a los otros tipos de correas presentados en [6]. Por lo expresado arriba en esta página, con la notación adoptada en este texto, se tiene:  $a = A$ ,  $d_{dg} = D$ ,  $d_{dk} = d$ . Esa ecuación se transcribe aquí como Ecuación (1), la cual también se encuentra en [3] pág. 762 y en [4] pág. 880.

$$L_{dth} = 2A + 1,57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4A} \quad (1)$$

En [6] pág. 80 se recomienda cumplir la relación que aquí se transcribe como Ecuación (2).

$$0,7(D + d) < A < 2(D + d) \quad (2)$$

Se debe calcular la velocidad tangencial  $v$  en [m/s] de la correa con la Ecuación (3), tomada de [6] pág. 80, donde:  $n_k$  = frecuencia de giro de la polea pequeña en [r.p.m.] y  $d$  en [mm]. El divisor es un valor redondeado de  $60000/\pi$ . Es una fórmula básica de un movimiento circular uniforme.

$$v = \left( \frac{d \cdot n_k}{19100} \right) \quad (3)$$

En [6] pág. 7 se expresa que superando 42 m/s se debe consultar con la empresa fabricante de las correas, la velocidad máxima posible para correas de secciones 3V, 5V, 8V es 55 m/s.

Con la Ecuación (4), tomada de [6] pág. 80, se calcula la frecuencia de flexión  $f_b$  de una correa.  $L_{dst}$  en [mm] es el desarrollo de referencia estandarizado de una correa (se elige de [6] pág. 20).

$$f_b = \left( \frac{2000 \cdot v}{L_{dst}} \right) \quad (4)$$



$f_b$  debe ser menor a 100 [1/s] para correas de secciones 3V, 5V, 8V según [6] pág. 7.

Con la Ecuación (5), tomada de [6] pág. 81, se puede calcular el ángulo de contacto  $\beta$ .

$$\cos(\beta/2) = \left( \frac{D-d}{2.A} \right) \quad (5)$$

De [6] pág. 68 tabla 17 se obtiene el coeficiente  $c_1$  en función de  $\beta$ .

De [6] pág. 69 tabla 18 se obtiene el coeficiente de carga  $c_2$  en función de características de la máquina motriz y la máquina impulsada, y la cantidad de horas de funcionamiento diario.

De [6] pág. 71 tabla 20 se obtiene el coeficiente  $c_3$  en función del tipo de correa.

La potencia nominal a transmitir expresada en [kW] se denomina  $P$ .

Multiplicando  $P$  por  $c_2$  se obtiene la potencia de cálculo  $P_B$ , eso es:  $P_B = c_2 P$

Ingresando con  $n_k$  y  $P_B$  al Diagrama 3 de [6] pág. 74 se elige la sección de correa adecuada.

De [6] pág. 87 tabla 31 se obtiene la potencia nominal  $P_N$  que puede transmitir una correa de sección 8V en función de  $d$  y  $n_k$ , lo mismo para la sección 5V en la tabla 29 de [6] pág. 85.

Con la Ecuación (6), tomada de [6] pág. 81, se calcula la cantidad necesaria de correas  $z$ .

$$z = \frac{P \cdot c_2}{P_N \cdot c_1 \cdot c_3} \quad (6)$$

La Ecuación (7) tomada de [6] pág. 81 calcula la fuerza estática mínima  $T$  por ramal de correa.

Para calcular la fuerza centrífuga,  $k$  es la masa en kg por metro de longitud. Ese dato se puede obtener de [6] pág. 7 de la tabla para correas 3V, 5V, 8V, indicado como Peso por metro (kg/m).

$$T = \frac{500 (2,02 - c_1) P_B}{c_1 \cdot z \cdot v} + k \cdot v^2 \quad (7)$$

La Ecuación (8) tomada de [6] pág. 81 permite calcular la fuerza estática total mínima  $S_a$  que las correas ejercen sobre el árbol de la polea.

$$S_a = 2.T.z \cdot \text{sen} \left( \frac{\beta}{2} \right) \quad (8)$$

En el primer montaje  $S_a$  es 30% mayor, según [6] pág. 81. La secuencia de cálculo con las Ecuaciones (1) a (8) se aplica en las siguientes Secciones 3 y 4. En [6] pág. 17 se declara que las correas trapeciales S=C PLUS permiten rendimientos de 97%, valor comparable a los obtenidos con cajas de engranajes. En [3] pág. 750 se expresa que utilizando correas se reducen notablemente los costos con respecto al uso de engranajes. En [6] pág. 68 se declara que las potencias nominales  $P_N$  de las tablas 27 a 55 corresponden a una vida útil teórica de una correa de 25000 horas bajo condiciones ideales. En [6] págs. 126 y 127 se explica la relación entre el porcentaje de estiramiento de una correa instalada y la fuerza  $T$ . En [6] pág. 128 se presentan fórmulas para calcular la fuerza dinámica actuante sobre los árboles de las poleas funcionando.

### 3. CASO 1: TRANSMISIÓN DE POTENCIA CON CORREAS DE SECCIÓN TRAPEZOIDAL 8V

Un esquema básico se muestra en la Figura 2a (vista desde la popa del barco), en la cual  $d$  y  $D$  son los diámetros exteriores de las poleas, y  $A$  es la distancia entre ejes de dos poleas. El motor acciona a las dos poleas centrales (que en esa vista están superpuestas), las correas transmiten el movimiento a las poleas laterales, montadas en los árboles de las bombas centrífugas.

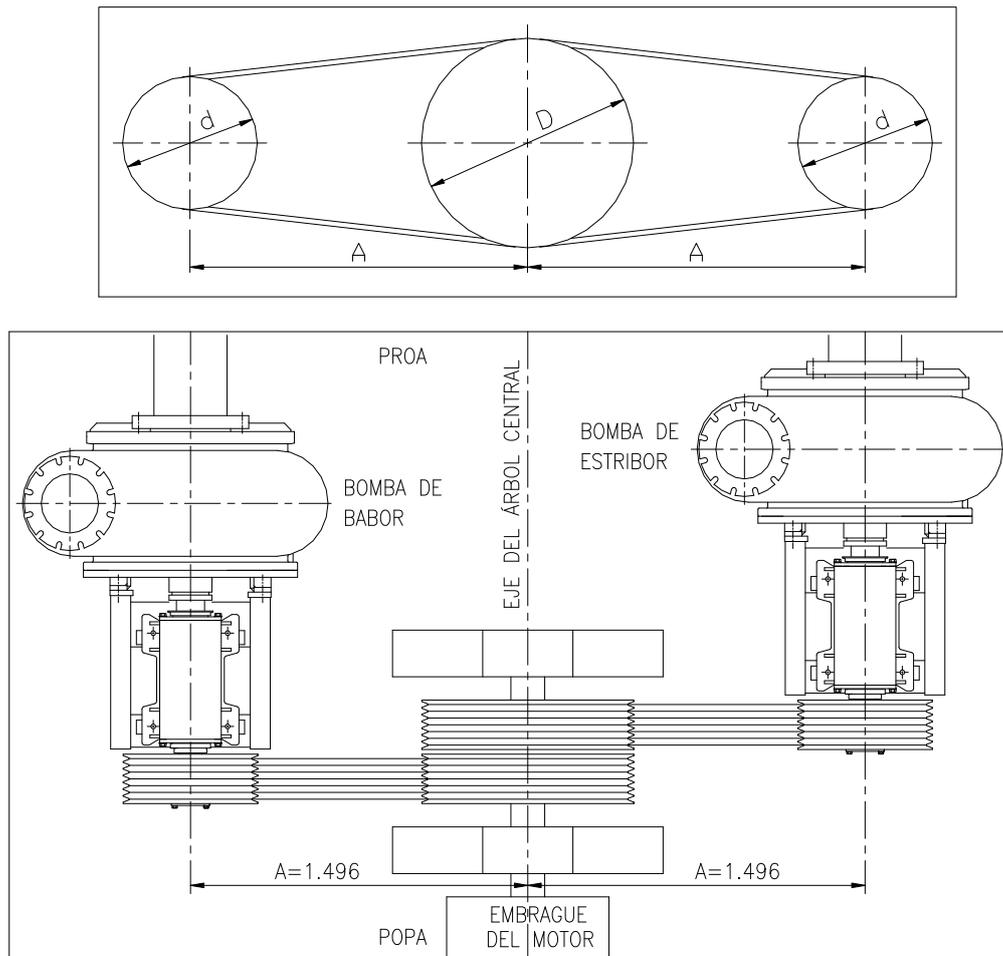


Figura 2: (a) Caso 1 Esquema de Vista desde la popa del barco; (b) Caso 1 Vista en planta

En la Figura 2b se muestra una vista en planta del conjunto. En la Figura 3 se muestran vistas en corte de esas poleas, en la primera etapa de su mecanizado. En la Figura 4 se muestra una vista en corte parcial de una polea montada en el árbol de una de las bombas, el cual está soportado por dos rodamientos cónicos, alojados en un soporte vinculado a la base de la bomba. Se fabricaron dos poleas grandes ( $D = 940$  mm) y dos pequeñas ( $d = 597$  mm). Esta transmisión de potencia es multiplicadora de velocidad, la relación es:  $D/d = 1,5745$ , de modo que las frecuencias de giro nominales del motor diésel y las bombas son 381 r.p.m. y 600 r.p.m. respectivamente. En este texto luego se explica cómo se definieron los diámetros  $D$  y  $d$ .

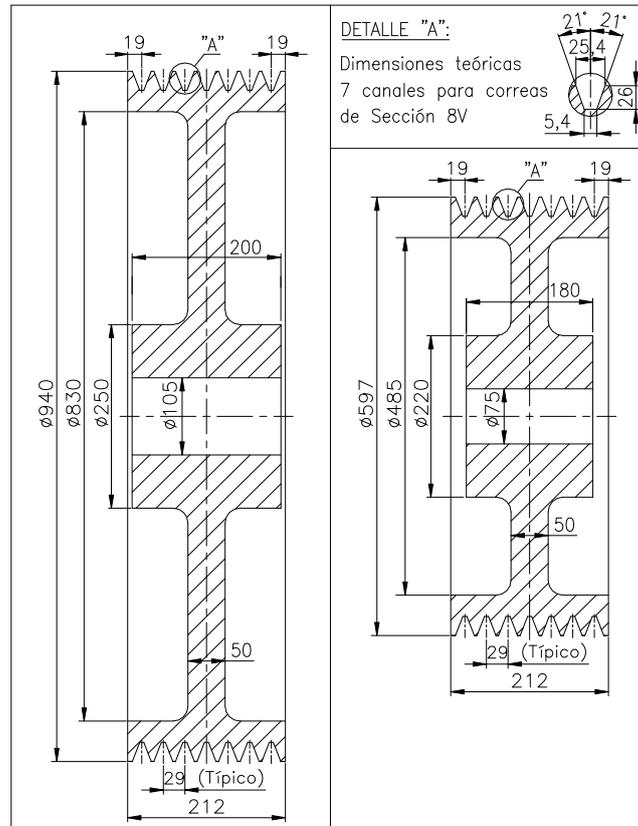


Figura 3: Primera etapa del mecanizado de las poleas del Caso 1

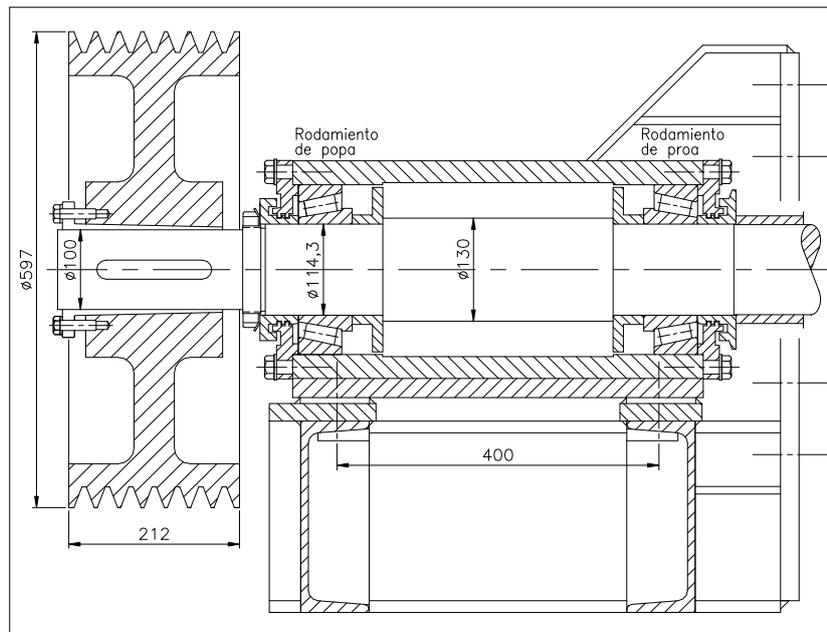


Figura 4: Vista en corte parcial de una polea montada en el árbol de una bomba del Caso 1



En el presente ejemplo las correas son 8V 2120 (luego se explica el porqué de su elección), entonces su desarrollo exterior nominal es  $212'' = 5385$  mm (correa libre sin estirar, antes de ser instalada en las poleas). Ingresando los datos:  $A = 1496$  mm,  $D = 940$  mm,  $d = 597$  mm, a la Ecuación (1), se obtiene:  $L_{dth} = 5425$  mm. Pero la Ecuación (1) es aproximada, reemplazando al coeficiente 1,57 por  $\pi/2$ , resulta:  $L_{dth} = 5426$  mm, valor que es 0,76 % mayor al desarrollo exterior nominal de  $212'' = 5385$  mm, estiramiento que resultó suficiente para el funcionamiento de la transmisión (el proveedor de las correas aconsejó un estiramiento de 0,78 %). En este caso especial, la distancia entre ejes  $A$  ya estaba definida por las bases fijas de las bombas, que desde su instalación en 1983 y hasta 2011 (28 años) habían sido accionadas con correas planas, con poleas lisas de diámetros 991 y 629 mm (relación 1,5755), ancho de correa: 220 mm. Durante ese período de tiempo fue necesario reemplazar varias veces los rodamientos de popa (ver Figura 4), que se dañaban por la gran fuerza del tensado de las correas planas, que también fueron renovadas varias veces. En 2011 se decidió reemplazar esa transmisión por una nueva con correas de sección 8V. Se realizaron varios cálculos, hasta definir  $D$  y  $d$  que cumplieran una relación  $D/d$  semejante a la original, y que  $L_{dth}$  calculable con la Ecuación (1) resultase mayor, con el porcentaje adecuado, al desarrollo de una correa estandarizada, se eligió la 8V 2120. Se previó realizar el montaje de este modo: quitar los bulones de la base de una bomba, desplazarla una distancia suficiente para montar las correas, ubicar esa base en su sitio original con dos aparejos estirando las correas, finalmente fijar la base con bulones. De ese modo se instalaron las correas estiradas con el porcentaje previsto.

Cálculos de verificación de la Ecuación (2):  $A$  debe ser mayor a:  $0,7 (D+d) = 1076$  mm, y  $A$  debe ser menor a:  $2 (D+d) = 3074$  mm, se cumplen ambas condiciones. Luego con la Ecuación (3), con ( $n_k = 600$  r.p.m.) y ( $d = 597$  mm) resulta: ( $v = 18,754$  m/s) < (42 m/s) => ( $v$  es admisible). En la Ecuación (4)  $L_{dst}$  es el desarrollo de referencia standard de la correa:  $212'' = 5385$  mm, con ( $v = 18,754$  m/s) resulta: ( $f_b = 7$  [1/s]) < (100 [1/s] =  $f_b$  límite) => ( $f_b$  es admisible).

Con la Ecuación (5) se calculó el ángulo de contacto:  $\beta = 166,8344^\circ$ .

De [6] pág. 68 tabla 17 se obtiene el coeficiente  $c_1$  en función de  $\beta$ , resulta:  $c_1 = 0,99$

De [6] pág. 69 tabla 18 se obtiene el coeficiente de carga  $c_2$  en función de características de la máquina motriz (motor de combustión con frecuencia de giro menor a 600 r.p.m.) y la máquina impulsada (bomba de una draga), para funcionamiento diario menor a 10 horas es:  $c_2 = 1,4$

De [6] pág. 71 tabla 20 se obtiene el coeficiente  $c_3$  en función del tipo de correa, resulta:  $c_3 = 0,98$

La potencia  $P$  a transmitir para impulsar una bomba en este caso es:  $P = 300$  CV = 220,6 kW

La potencia de cálculo  $P_B$  considerando al coeficiente  $c_2$  es:  $P_B = c_2 P = 1,4 P = 309$  kW

Ingresando con  $n_k$  y  $P_B$  al Diagrama 3 de [6] pág. 74 se verifica que la sección 8V es adecuada.

De [6] pág. 87 tabla 31 se obtiene la potencia nominal  $P_N$  que puede transmitir una correa de sección 8V en función de  $d$  (597 mm) y  $n_k$  (600 r.p.m.), es:  $P_N = (54,61 + 2,73) \text{ kW} = 57,34$  kW

Con la Ecuación (6) se calcula  $z$  (cantidad necesaria de correas). Introduciendo los datos es:



$$z = (1,4 \times 220,6 \text{ [kW]}) / (57,34 \text{ [kW]} \times 0,99 \times 0,98) = 5,55 \Rightarrow 6 \text{ correas}$$

Para lograr una mayor vida útil (luego se comenta esto) se decidió utilizar 7 correas 8V 2120 para impulsar cada bomba. Con los datos obtenidos se trazaron los planos mostrados en la Figura 3, los cuales resultaron suficientes para encargar la construcción de las poleas (de material fundición gris) a una fábrica de poleas, que las mecanizó con tolerancias dimensionales y de forma según las normas para poleas correspondientes, como las incluidas en [6] pág. 154. En esa fábrica de poleas utilizan su propio “know-how”, al comprador no le fue necesario especificar cuáles normas aplicar. Luego el taller que se encargó de montar las poleas fabricó los manguitos cónicos de sujeción y mecanizó sus alojamientos cónicos y chaveteros en las poleas, para instalarlas en los árboles de las bombas y en el árbol central existente, los cuales se conservaron sin modificaciones. Ese taller es reconocido por la buena calidad de sus trabajos.

Con Ecuación (7) se calculó  $T$  (fuerza estática mínima por ramal de correa);  $k$  es la masa en kg por metro de longitud (dato “Peso por metro” de [6] pág. 7):  $k = 0,575$ ; se obtuvo:  $T = 1426,7 \text{ N}$ .  $T$  en el primer montaje es 30% mayor:  $T = 1,3 \times 1426,7 \text{ N} = 1855 \text{ N}$

En [6] pág. 126 se explica el control de la pretensión de la correa  $T$  mediante el valor de adición del desarrollo (relación entre  $T$  y el porcentaje de estiramiento inicial). En la tabla 63 de [6] pág. 127 se vinculan valores de  $T$  en [N] con valores de adición del desarrollo en [1/1000]. Al valor obtenido ( $T = 1855 \text{ N}$ ) le corresponde un estiramiento inicial de 0,58 %, pero por lo explicado en la página anterior, en este Caso 1 se tiene un estiramiento inicial de 0,76 %, el cual provoca una fuerza de valor:  $T = 2220 \text{ N}$ , (se obtuvo interpolando en la tabla 63 de [6] pág. 127).

Ese valor de  $T$  es 55 % mayor al mínimo del primer cálculo (1426,7 N). Esto se hizo según la recomendación del proveedor de las correas, para este caso con distancia entre ejes fija, porque una vez instaladas estas correas no se podrán volver a estirar. Con la Ecuación (8) se calcula la fuerza estática total inicial:  $S_a = 2 \times (2220 \text{ N}) \times 7 \times \sin 83,4172^\circ \Rightarrow S_a = 30875 \text{ N} = 3148 \text{ kgf}$

$S_a$  causa un momento flexor  $M_f$  en el extremo en voladizo del árbol de la bomba. En una sección bajo el rodamiento de popa (a 0,19 m del centro de polea) es:  $M_f = S_a \cdot (0,19 \text{ m}) = 5866 \text{ Nm}$

Con diámetro del árbol 114,3 mm es:  $W_x = 146,6 \text{ cm}^3 \Rightarrow \sigma = M_f / W_x = 40 \text{ MPa} = 408 \text{ kgf/cm}^2$

El momento torsor constante es:  $M_t = 9549,3 \text{ P/n}_k = 9549,3 \times (220,5 \text{ kW}) / (600 \text{ rpm}) = 3510 \text{ Nm}$

$W_p = 2 W_x = 293,2 \text{ cm}^3 \Rightarrow \tau = M_t / W_p = 12 \text{ MPa} = 123 \text{ kgf/cm}^2$  ( $\tau$  es tensión de corte constante)

$M_f$  es alternante, provoca fatiga al material del árbol. Pero la tensión  $\sigma$  no es tan grande como para provocar la rotura del árbol, cuyo material es acero SAE 1045 dureza entre 170 y 200 HB.

El factor  $N_f$  de seguridad a la fatiga se puede calcular con la ecuación 9.5b de [7] pág. 573.

(Acero de 170 HB)  $\Rightarrow S_{ut} = 586 \text{ MPa} \Rightarrow S_e' = 0,5 S_{ut} = 293 \text{ MPa} \Rightarrow S_e = 0,471 S_e' = 138 \text{ MPa}$   
 $S_e$  = límite de resistencia a fatiga corregido, (coeficiente 0,471 según [7] pág. 376 ecuación 6.6).

$C_{carga} = 1$ ,  $C_{tamaño} = 0,751$ ,  $C_{superficie} = 0,833$ ,  $C_{temperatura} = 1$ ,  $C_{confiabilidad} = 0,753$  (para 99,9 %)

(Acero SAE 1045 con 170 HB)  $\Rightarrow S_y = 0,62 S_{ut} = 363 \text{ MPa} \Rightarrow S_{ys} = 0,58 S_y = 210 \text{ MPa}$

Ingresando  $\sigma$ ,  $S_e$ ,  $\tau$ ,  $S_{ys}$ , en la ecuación 9.5b de [7] pág. 573 se obtiene:  $N_f = 3,38 \Rightarrow$  verifica



Este cálculo de  $N_f$  es conservador porque se consideró la fuerza estática de precarga inicial en cada ramal de correa ( $T = 2220$  N). Cuando las poleas giran, por efecto centrífugo la fuerza radial resultante  $S_a$  se reduce un poco. En [6] pág. 128 se presentan ecuaciones para calcular la fuerza radial  $S_{dyn}$  en función de  $P_B$ ,  $c_1$ ,  $v$ ,  $\beta$ ; introduciendo los datos de este Caso 1 se obtiene:

$S_{dyn} = 17464$  N. Este valor es 56,56 % del valor de  $S_a$  de la página anterior, que se obtuvo considerando un estiramiento inicial de 0,76 %, mayor al normal (que es 0,58 % para este caso) obtenido en la página anterior. En cambio este valor de  $S_{dyn}$  corresponde al estiramiento normal. En cuanto a la vida útil de las correas, [6] pág. 68 declara 25000 horas (bajo condiciones ideales) si se calcula la cantidad necesaria de correas con potencias nominales  $P_N$  de tablas 27 a 55. Si se elige utilizar mayor cantidad de correas, en [6] no se dan datos para estimar la mayor duración esperada. Eso se encuentra en [4] págs. 878 a 886, y en [5] págs. 898 a 906 (ambos contenidos similares); sus fórmulas requieren datos en unidades anglosajonas. Se deben estimar: un factor de servicio  $K_S$  ([4] pág. 882 tabla 17-15) que influye mucho en el resultado, y un factor de diseño  $n_d$  (habitualmente igual a 1). Para este Caso 1 con 7 correas (y  $K_S = 1,1$ ) la vida útil calculada resulta ser 15623 horas, y con 6 correas (con los otros datos iguales) resulta ser 3890 horas. Si se estima  $K_S = 1,014$ , con 7 correas resultan 31727 horas, y con 6 correas resultan 8174 horas. Según estas fórmulas, al adicionar una correa la vida útil se multiplica aproximadamente por 4. En [4] algunos datos de correas se tomaron de catálogos de otros fabricantes distintos al de [6].

#### 4. CASO 2: TRANSMISIÓN DE POTENCIA CON CORREAS DE SECCIÓN TRAPEZIAL 5V

En la Figura 5 se muestra una vista en corte de la polea motriz montada en su árbol, soportado por dos rodamientos instalados en soportes standard, fijados a una base vinculada al casco de un barco arenero pequeño. El árbol es accionado por una toma de potencia por proa del motor diésel principal, con embrague electromagnético. El motor principal impulsa a la hélice del barco con su toma de potencia por popa, con embrague mecánico y caja reductora a engranajes. La frecuencia de giro del motor es 1500 r.p.m. y la de la bomba de barrido impulsada por las correas es 500 r.p.m.,  $P$  es 100 CV. Esta transmisión se diseñó y fabricó en Argentina en 2011, incluso la toma de potencia, diseñada para adaptar el embrague de proa (industria nacional). En la Figura 5 la proa está a la derecha. A proa de la polea, a poca distancia, existe un mamparo estanco transversal. El árbol mostrado está en el centro longitudinal del casco. Paralelo a ese eje está el árbol de la bomba de barrido impulsada, cuya boca de aspiración está ubicada hacia popa.

Iniciando los cálculos de las correas, de [6] pág. 69 tabla 18 se obtiene  $c_2$  para un motor de combustión ( $n$  mayor a 600 r.p.m.) que impulsa una bomba centrífuga, uso diario < 10 hs., resulta:  $c_2 = 1,1 \Rightarrow P_B = P$ .  $c_2 = 110$  CV = 81 kW; en [6] pág. 74 diagrama 3 para  $P_B$  y  $n_k = 1500$  r.p.m. se obtiene que la sección 5V es adecuada, se requiere:  $d_{min} = 140$  mm (de [6] pág. 7).

Se definieron:  $d = 200$  mm ,  $D = 600$  mm ,  $A = 1535$  mm , correas 5V 1700 ( $L_{dst} = 4318$  mm)

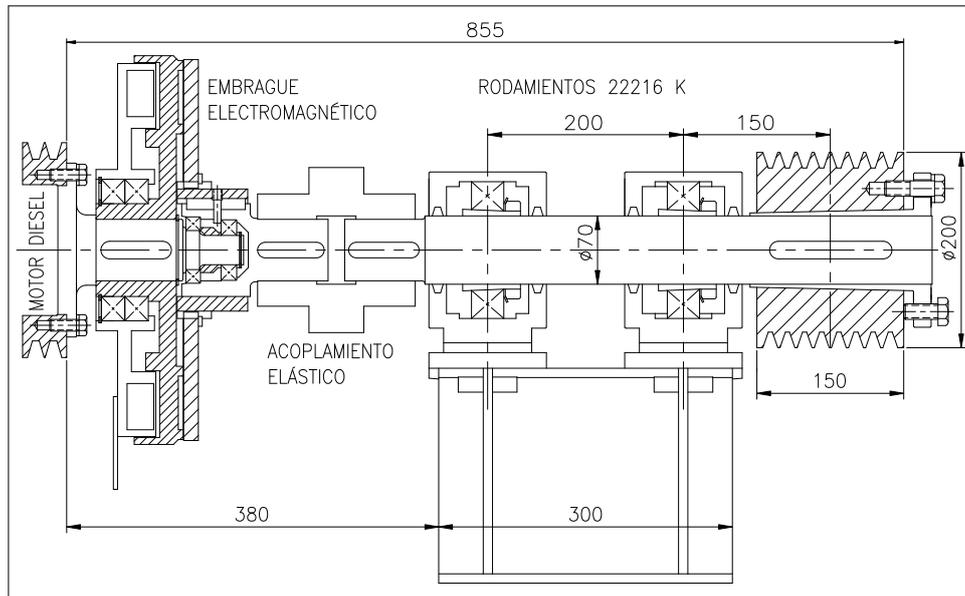


Figura 5: Vista en corte parcial de la polea motriz, montada en su árbol, del Caso 2

Con la Ecuación (1) se calcula el desarrollo de referencia de correa instalada:  $L_{dth} = 4352$  mm  
 $(L_{dth} / L_{dst}) = (4352 / 4318) = 1,00787 \Rightarrow$  (montaje bomba debe permitir este estiramiento inicial)  
 El esquema de una transmisión en [6] pág. 77 tiene cotas de los recorridos  $x$  e  $y$  necesarios para efectuar el montaje y ajuste (estiramiento) de las correas. En [6] pág. 76 tabla 23 se dan  $x$  e  $y$ .  
 En esta transmisión nueva se previó que la bomba pueda desplazarse con esos recorridos.  
 $D$  y  $d$  se definieron considerando que cuanto más grandes son, la cantidad necesaria de correas es menor, pero con los valores elegidos las correas pasan por arriba de los refuerzos del casco.  
 En la Ecuación (2),  $A$  debe ser mayor a  $(0,7 (D+d) = 560$  mm) y menor a  $(2 (D+d) = 1600$  mm), se adoptó  $A$  cercano al límite superior para alejar la bomba del motor y aumentar al ángulo  $\beta$  que se calcula con la Ecuación (5), resulta:  $\beta = 165^\circ \Rightarrow c_1 = 0,99$  (de [6] pág. 68 tabla 17).  
 $c_3 = 1,03$  (de [6] pág. 71 tabla 20).  $P_N = (12,85+1,24)$  kW = 14,09 kW (de [6] pág. 85 tabla 29 en función de  $n_k$  y  $d$ ). Con la Ecuación (6) resulta:  $z = 81 / (14,09 \times 0,99 \times 1,03) = 6$  correas  
 Se decidió preparar poleas para 8 correas 5V 1700, para aumentar la vida útil (en caso de utilizar correas de la marca del catálogo [6]) o permitir instalar correas de otras marcas más económicas y de menor calidad (de las cuales no se disponen datos publicados de su  $P_N$ ). Con la Ecuación (3) resulta:  $v = 15,707$  m/s. Con la Ecuación (4) resulta:  $f_b = 7,28$  [1/s]  $\Rightarrow$  ( $f_b$  es admisible).  
 Se calculó  $T$  con la Ecuación (7) con  $k = 0,19$  (de [6] pág. 7). Resulta:  $T = 382,206$  N.  
 $T$  se incrementa 30% en el primer montaje  $\Rightarrow T = 1,3 \times 382,206$  N = 497 N  
 Con este último valor de  $T$  en la Ecuación (8) se obtiene:  $S_a = 7884$  N = 804 kgf  
 $S_a$  causa un momento flexor  $M_f$  en el extremo en voladizo del árbol mostrado en Figura 5, en una sección ubicada en el centro del rodamiento más cercano es:  $M_f = (0,15$  m) .  $S_a = 1182,6$  Nm  
 $M_f$  causa tensión alternante:  $\sigma = 35,12$  MPa ; el momento torsor causa:  $\tau = 7,66$  MPa (constante)



Efectuando cálculos como en el Caso 1, se obtiene que el factor  $N_f$  de seguridad a la fatiga es 4,05 cuando  $T$  es 497 N. El material del árbol del Caso 2 es similar al del Caso 1.

De [6] pág. 127 tabla 63 (para sección 5V,  $T = 497$  N) se obtiene un estiramiento inicial de 0,27%. Eso se consigue con: ( $L_{dth} = 4330$  mm)  $\Rightarrow$  ( $A = 1524$  mm), que es 11 [mm] menor a 1535 [mm]. La bomba se instaló de modo que se puede ajustar convenientemente la distancia  $A$ .

Para un estiramiento 0,76% se obtiene  $T = 1200$  N, eso es 2,41 veces mayor al normal 497 N. En ese caso en el árbol la tensión  $\sigma$  crece 2,41 veces ( $\sigma = 84,8$  MPa alternante), pero la tensión  $\tau$  permanece igual ( $\tau = 7,66$  MPa constante). Efectuando cálculos, de modo semejante al del Caso 1, se obtiene que el factor  $N_f$  de seguridad a la fatiga es 1,69 cuando  $T$  es 1200 N. La vida útil (según [8]) del rodamiento de proa es: 53600 horas con estiramiento 0,27%, 2850 horas con estiramiento 0,76%, 20000 horas con estiramiento 0,39%. Carga radial:  $P = S_a \cdot (350 / 200)$

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Consultando con la empresa del Caso 1, responden que actualmente (julio 2023) la transmisión de potencia funciona con las mismas correas que se instalaron en setiembre 2011. Al momento de redacción de este texto no presentan síntomas de deterioro. Con 6,75 horas diarias y 314 días de trabajo promedio en un año, resultan 2120 horas anuales, en 11,8 años son 25016 horas. Entonces se han cumplido las 25000 horas de vida útil que declara el fabricante de las correas. El cálculo indica utilizar 6 correas como mínimo en cada transmisión, pero se instalaron 7. La vida útil real alcanzada se conocerá empíricamente, cuando se deban reemplazar las correas.

## REFERENCIAS

- [1] Mirassou H.M. *Diseño y cálculo de cajas de engranajes especiales para barcos areneros y prestaciones obtenidas*. Sexto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica VI CAIM 2018, ISBN 978-987-46987-0-4, 10 al 12 de Octubre de 2018, San Miguel de Tucumán.
- [2] Faires V.M. *Diseño de elementos de máquinas*. Montaner y Simón, España, 1977.
- [3] Shigley J.E., Mischke C. *Diseño en Ingeniería Mecánica, 5ª Ed.* McGraw-Hill, México, 1990.
- [4] Budynas R.G., Nisbett J.K. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 8ª Edición*. McGraw-Hill, México, 2008.
- [5] Budynas R.G., Nisbett J.K. *Shigley's Mechanical Engineering Design, Ninth Edition*. McGraw-Hill, USA, 2011.
- [6] <https://suministrossercoin.com/pdf/catalogo-correas-transmision-optibelt.pdf> (válido 08/5/23)
- [7] Norton R.L. *Diseño de máquinas*. Prentice Hall, México, 1999.
- [8] SKF, *Catálogo general 4000 Sp*, Torino Italia, 1989.



## PROYECTO DE MAQUINA DE ENSAYO DE FLEXIÓN DE RIELES DE FERROCARRIL COMPACTA

Ignacio Kuchen<sup>1</sup>, Rodrigo Leurino<sup>2</sup>, Ezequiel Avellaneda<sup>3</sup>

UTN - Facultad Regional Santa Fe, Departamento de Ingeniería Mecánica, Grupo GIMA.  
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina

<sup>1</sup> [kuchenignacio@gmail.com](mailto:kuchenignacio@gmail.com)

<sup>2</sup> [rleurino@frsf.utn.edu.ar](mailto:rleurino@frsf.utn.edu.ar)

<sup>3</sup> [eavellaneda@frsf.utn.edu.ar](mailto:eavellaneda@frsf.utn.edu.ar)

### RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y cálculo de una máquina diseñada para llevar a cabo ensayos de flexión en soldaduras de rieles de ferrocarril, siguiendo las normas ALAF 5-032, EN-14587 o EN-14730.

El objetivo principal de este ensayo es garantizar la calidad y seguridad de la unión entre los rieles. Consiste en colocar una probeta con una soldadura en el centro, sobre dos apoyos separados por una distancia de 1000 milímetros, y aplicar fuerza para flexionar el riel. Para aprobar el ensayo, el riel debe resistir una carga y deformación mínima.

El desarrollo de esta máquina requirió investigaciones y simulaciones para asegurarnos de que sea capaz de llevar a cabo los ensayos en los diferentes grados y formatos de rieles utilizados en la región. La máquina está equipada con sensores que miden la fuerza aplicada al riel y su deformación.

La capacidad máxima de la máquina es de 200 toneladas de fuerza, la cual se transmite a través de un cilindro hidráulico. El proyecto también incluyó el diseño del circuito hidráulico de alimentación.

La máquina fue desarrollada teniendo en cuenta la facilidad de operación, poniendo un énfasis especial en la seguridad del operador y garantizando que los resultados obtenidos sean confiables y repetibles.

Como resultado, hemos obtenido una máquina compacta que utiliza en su mayoría componentes locales y que puede llevar a cabo los ensayos de acuerdo con las normativas vigentes.

**Palabras clave:** Ensayo; Flexión; Riel; Ferrocarril.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para la construcción de las vías de ferrocarriles es necesario realizar uniones entre los tramos de rieles. Estas uniones se realizan mediante la llamada soldadura aluminotérmica, un proceso exotérmico con termita y óxido de hierro.

La soldadura compone una parte fundamental del sistema, por lo tanto, el aseguramiento de la calidad de la misma es muy importante. En caso de fallar en servicio pone en riesgo todo el material rodante, incluyendo mercadería o pasajeros.

Por esto, una vez realizada la soldadura, es necesario examinar distintos aspectos de la misma tales como la alineación, rectitud, posibles arranques de material, entre otros. Uno de los requisitos es asegurar la resistencia de la unión efectuada. Para esto ADIF SE (Administración de Infraestructuras Ferroviarias S.E) establece que cada 500 soldaduras ejecutadas (alrededor de 10 km de riel, 5 km de vía) es necesario realizar una batería de ensayos dispuestos según la norma ALAF 5-032 [1].

Dentro de estos ensayos se encuentran flexión, dureza, porosidad, estructura metalográfica, macrografía y micrografía.

En este trabajo se expondrá el proyecto de desarrollo de una máquina que tenga la capacidad de realizar los ensayos de flexión en las condiciones determinadas por la norma.

El ensayo consiste en colocar el riel con la soldadura centrada sobre dos apoyos separados por 1000mm y aplicar desde el centro una fuerza con una cuña de forma tal que esta ejerza un esfuerzo de flexión sobre la soldadura como se muestra en la Figura (1).

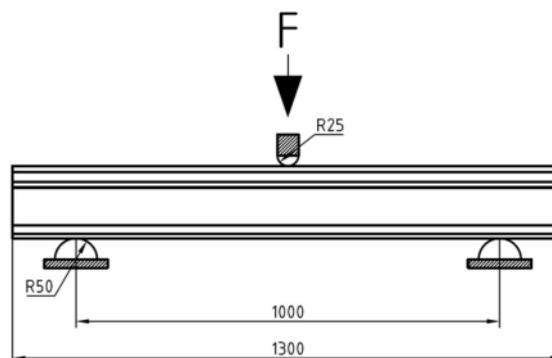


Figura 1: Esquema ensayo según ALAF 5-032

El procedimiento finaliza con la rotura de la muestra, por lo que la fuerza necesaria dependerá principalmente del tipo de riel a analizar. La condición de aprobación del ensayo es que la fuerza aplicada  $F$  sea mayor a lo estipulado en la Ecuación (1):

$$F=0,034*\sigma*W \quad (1)$$



Siendo  $\sigma$  la resistencia a la tracción del acero en (tf/cm<sup>2</sup>) y  $W$  el módulo resistente menor de la sección transversal del riel para flexión considerada en (cm<sup>3</sup>).

Para poder analizar los distintos tipos de rieles que se utilizan en la región la máquina fue diseñada para entregar una fuerza máxima de 200 tf.

También se plantea hacer la máquina tal que pueda adecuarse a las exigencias de la norma europea EN-14587 [2], que establece condiciones similares de ensayo, pero dicta mayores requisitos tales una mayor velocidad de carga y es más exigente con los resultados.

A pesar de que esta norma no es la vigente en nuestro país es más moderna y completa que el estándar que utilizamos. Es lógico pensar que en caso de una actualización la ALAF va a tomar el camino de la normativa europea.

A lo largo del informe se utilizan unidades que no corresponden al SIMELA sino a estándares internacionales y bibliografía del rubro.

## 2. ESTUDIO DE MERCADO

La idea del proyecto surge de una consulta que se realizó ante la facultad sobre la posibilidad de realizar este tipo de ensayos en las instalaciones.

El mercado para el ensayo estará vinculado al desarrollo ferroviario y a la construcción o renovación de ramales. En la actualidad la red ferroviaria argentina tiene alrededor de 18000 km operativos para transporte de carga y 4600 km para transporte de pasajeros.

Durante los últimos años en el país y a pesar de los eventuales cambios de gobierno se ha mantenido como política la reactivación del sistema ferroviario. Actualmente se encuentran en planeamiento o ejecución proyectos tales como la circunvalación a Santa Fe, renovación del Belgrano Norte, reconstrucción del San Martín, construcción del Norpatagónico, por nombrar algunos. Estos datos nos invitan a pensar que la necesidad de construir y renovar tramos se va a mantener a lo largo del tiempo, y que el mercado para la realización de ensayos sobre soldaduras va a seguir estando presente y quizás vaya creciendo.

La norma ALAF 5-032 que rige los ensayos sobre las soldaduras, además de flexión solicita otras pruebas tales como metalografía, dureza, porosidad, macrografías, entre otras que pueden también ser desarrolladas dentro de la facultad, ofreciéndole al cliente una mayor comodidad y una realización integral de los ensayos requeridos.



### 3. INVESTIGACIÓN PREVIA

Antes de comenzar con el diseño se investigaron las distintas alternativas que se utilizan en la práctica para realizar este ensayo que pueden observarse en la Figura (2). A grandes rasgos se pueden dividir en dos grupos las máquinas utilizadas, las que fueron diseñadas estrictamente para realizar este tipo de pruebas o las que son máquinas de ensayos universales adaptadas para las condiciones establecidas.



Figura 2: Diversos diseños de máquinas.

En nuestro caso seguiremos el primer camino, diseñando una máquina compacta y que se adapte a los requisitos establecidos. La mayoría de este grupo no difieren demasiado entre sí, poseen una estructura compacta, el cilindro hidráulico está ubicado en la parte superior, y el riel es colocado en su posición natural. Donde sí se ven diferencias es en el diseño de la jaula de protección y la forma de contener el riel.

### 4. DISEÑO

El diseño de la estructura parte de las condiciones impuestas por el ensayo; se requieren dos apoyos separados 1000 mm entre sí, y desde el centro se debe ejercer una fuerza. Por las magnitudes de la carga a ejercer esta debe ser aplicada a través de un cilindro hidráulico. Este cilindro estará vinculado a la parte móvil de la máquina, que puede ser tanto la cuña que produce el esfuerzo como los apoyos. Por simplicidad se decidió que los apoyos queden fijos y lo que se desplace sea la cuña ubicada en el centro, esto puede observarse en la Figura (3). También se buscó que la estructura sea lo más simple y compacta posible. Se plantearon cuatro bases, dispuestas de forma que coincidan con los apoyos del riel.



Además de las condiciones de diseño dadas por los lineamientos de la norma, el diseño va a estar limitado por el tamaño y el tipo de montaje del cilindro hidráulico, por lo que fue el primer componente seleccionado.

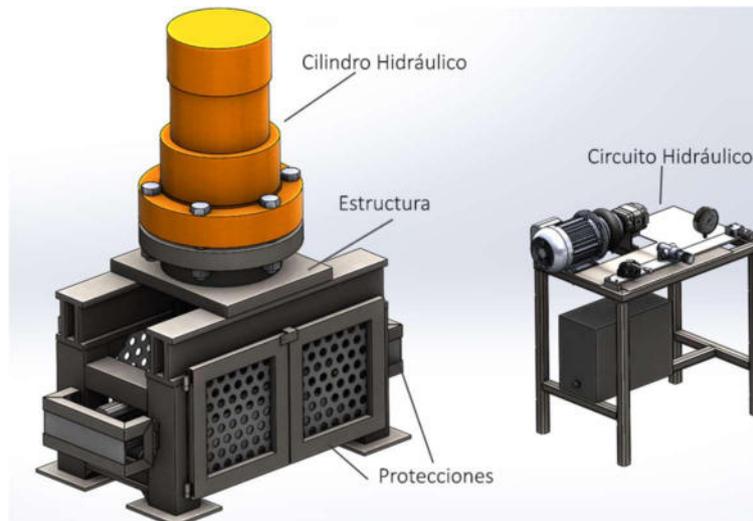


Figura 3: Diseño máquina de ensayos

#### 4.1. Cálculo de fuerza necesaria

La fuerza a ejercer sobre el riel debe ser tal que provoque la rotura. Para llevar adelante el cálculo se puede suponer el riel sin soldadura, y hallar el esfuerzo necesario para alcanzar la tensión de rotura en el centro de este.

La tensión generada por la flexión en el centro está dada por la Ecuación (2).

$$\sigma = M_f / W \quad (2)$$

Donde  $W$  es el módulo resistente a la flexión y  $M_f$  es el momento flector calculado según la Ecuación (3).

$$M_f = F * L / 4 \quad (3)$$

Donde  $F$  es la fuerza ejercida y  $L$  la distancia hasta el punto de apoyo.

Reemplazando (2) en (3) y despejando la fuerza nos queda la Ecuación (4):

$$F = 4 * \sigma * W / L \quad (4)$$

Tomamos los valores correspondientes a un perfil 60EI y la tensión de rotura corresponde a un riel de grado R260 (esta tensión es la real de una colada por lo que es mayor a la mínima establecida por la norma). Este es el grado de acero más utilizado para la fabricación de rieles. En otras regiones se utilizan materiales de mayor grado en función de la aplicación del riel.



Tomando los valores planteados y reemplazando en (4) obtenemos como fuerza necesaria:

$$F = 147337 \text{ kgf} \quad (5)$$

Sobre el valor de fuerza obtenido hay que tomar en consideración que es una aproximación, y el material de la soldadura no tiene las mismas características estructurales que el riel. De todos modos, brinda una buena aproximación.

También se puede analizar en función de los requisitos que pide la norma EN-14587. Para los grados superiores y el perfil 60E1 (de mayor dimensión) la aprobación se logra aplicando 1600 kN sin fallas en el perfil. A diferencia de ALAF esta norma no exige que se llegue hasta la rotura del perfil. Sin embargo, para poder ensayar un perfil de estas características bajo ALAF la fuerza aplicada deberá ser notablemente superior a 1600 kN que equivale a 163 tf.

Teniendo en cuenta estos puntos, también analizando las capacidades de las máquinas de este tipo que se encuentran en el mercado y considerando que ante el aumento de capacidad se incrementa notablemente la complejidad y el costo de la máquina, se planteó una capacidad máxima de diseño de 200 tf. A pesar de que se puede pensar que es un poco elevada para los ensayos que se realizan actualmente, la máquina estaría preparada para perfiles de mayor grado si es que se comienzan a utilizar y por otro lado esta capacidad extra nos brindará una mayor tranquilidad al saber que sus componentes no están trabajando al límite de diseño.

## 4.2. Selección de componentes

### 4.2.1 Cilindro hidráulico

Desde un principio se buscó que todos los componentes y materiales utilizados en el proyecto estén disponibles en el mercado local. Partiendo de esto se averiguó en distintos proveedores las opciones disponibles alrededor de 200 tf. Uno de los limitantes de la elección es el tamaño del cilindro. A mayor tamaño, mayor ancho va a tener la estructura, requiriendo mayores perfiles para soportar una misma carga y además sufrirá mayores deformaciones.

La fuerza que ejerce el cilindro viene dada por la Ecuación (6):

$$F = P \cdot A \quad (6)$$

Dónde P corresponde a la presión hidráulica y A al área del cilindro.

La mayoría de los cilindros disponibles en el mercado tienen presiones de trabajo máximas de 200 bar. Esto implica que para la fuerza requerida el equipo debería contar con dimensiones considerables. A la vez, a mayor presión de trabajo más complejo y costoso se vuelve todo el equipo. Para lograr una máquina más compacta entonces se buscó una relación de compromiso entre tamaño y complejidad del equipo.



Se escogió un equipo de un fabricante nacional que puede trabajar hasta 350 bar y puede entregar una fuerza de 215 tf a la presión máxima. Al estar la máquina diseñada para 200 tf eso indica que el cilindro nunca va a estar exigido a su límite de diseño, y en las condiciones máximas va a trabajar a alrededor de 325 bar.

A su vez, este fabricante presenta distintos tipos de montaje y carrera. Se escogió un bridado frontal. Como se puede observar en la Figura (3) esta configuración permite hacer la estructura más compacta dejando el cilindro fuera de ella.

Para el cálculo de la carrera necesaria se tuvo en cuenta el requisito de flexión dispuesto por las normativas. Se estima que con alrededor de 40 mm será suficiente para llevar a la rotura todo tipo de rieles. Además, se debe considerar los distintos tamaños de los perfiles y un cierto espacio libre para facilitar el montaje de la probeta a ensayar.

Teniendo en cuenta lo anterior y además que una mayor carrera no implica necesariamente mayores costos ni de construcción ni de operación se decidió establecer una carrera de 100 mm.

Para la conexión del extremo del vástago, se escogió una rosca interior M42x3.

#### **4.2.2 Circuito hidráulico**

Para el diseño del circuito hidráulico se parte de las características del cilindro hidráulico y la velocidad de avance de la cuña requerida. Este parámetro es fijado según las normas donde se establece que la velocidad de aplicación de carga deberá ser de entre 40 y 120 kN/s para el caso de la norma europea y 2 tf/30s para ALAF.

De la información obtenida sobre ensayos realizados se ve que el riel es deforma a razón de 0,23 mm por cada tf aplicada. Teniendo en cuenta esto y el volumen de aceite del cilindro extendido (6154 cm<sup>3</sup>) el caudal de aceite necesario es 88 cm<sup>3</sup>/s, o sea 5,28 l/min.

La presión de trabajo como se estableció en el punto 4.2.1 es de 325 bar.

Se escogió una bomba con un caudal de alrededor de 7 l/min, con velocidad de trabajo entre 600 y 3000 rpm. Para entregar esta presión requiere 4,5 kW.

Esta potencia se entregará con un motor eléctrico de 7,5 CV y 1500 rpm.

El circuito de comando se describe en la Figura (4).

Se colocó una válvula reguladora de presión como elemento de seguridad del circuito, la misma se ubica a la salida de la bomba y será regulada a una presión de 340 bar.

Uno de los parámetros establecidos por la norma que regula el ensayo es la velocidad de avance del cilindro. Para controlar esta es necesario regular el caudal de fluido que circula hacia este. La forma de hacer esto es mediante una válvula reguladora de flujo.



Se escogió una válvula de 3 vías, de las cuales una se conecta a la línea con presión que viene de la bomba, otra es la salida hacia la válvula de comando de dirección y la restante es un retorno hacia el tanque de almacenamiento.

Para el comando del cilindro, como el mismo es de doble efecto para su accionamiento será necesario una válvula de 3 posiciones (una posición para cada sentido de avance y una en reposo) y 4 vías (dos hacia el cilindro, alimentación desde la bomba y retorno al tanque). Se seleccionó un modelo con centro abierto.

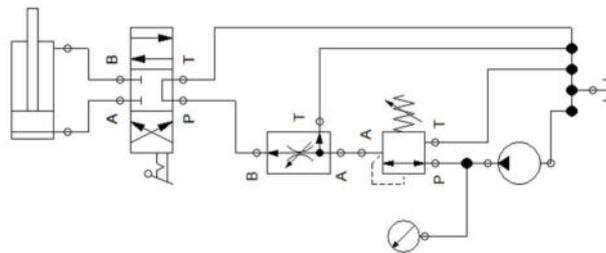


Figura 4: Diagrama circuito hidráulico.

Además, se tuvieron en cuenta los accesorios necesarios como un manómetro y un filtro para la succión de la bomba. Las conexiones entre los elementos se realizarán mediante mangueras. Para la aspiración de la bomba deberá ser de 1", la línea de presión de 1/4" y los retornos de 3/8". Para las líneas de alta presión serán mangueras tipo SAE 100 R4 y R14 para los retornos.

#### 4.2.3 Celda de carga

Para la medición de la fuerza ejercida por el cilindro se utilizará una celda de carga.

La elección se basó en principalmente dos aspectos, la facilidad de montaje y el espacio necesario. Por las características de la máquina el lugar para colocar la celda de carga será entre el vástago del cilindro y el punzón. Una celda de carga tipo botella o uniones del tipo bridas o similares harían que el largo del tramo entre el cilindro hidráulico y el riel sea mayor, provocando una mayor estructura, que estaría sometida a mayores deformaciones.

Se decidió por una celda del tipo anillo. El lugar de posicionamiento de la misma va a ser en la unión entre el vástago del cilindro hidráulico que posee una rosca interna con el punzón que actúa sobre el riel, ver Figura (5).

La ventaja de este tipo de celdas es que tienen un fácil montaje, soportan grandes esfuerzos y ocupan poco espacio. Se decidió por un modelo con una capacidad nominal de 2MN que va en orden con la capacidad máxima planteada para la máquina.

Esta celda de carga irá conectada a una PC para adquirir y registrar los datos del ensayo.

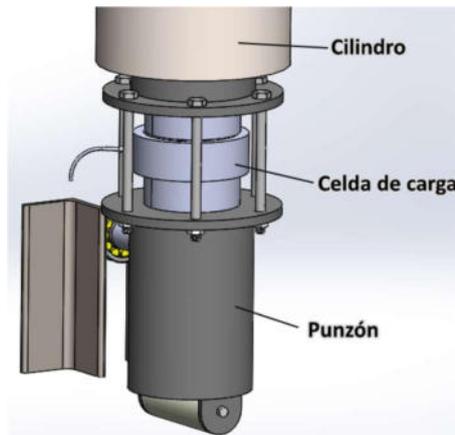


Figura 5: Celda de carga

#### 4.2.4 Medición de la deformación

Uno de los puntos requeridos es una determinada flexión del riel, para esto es necesario medir la deformación. Una de las alternativas estudiadas fue medir el desplazamiento realizado por el vástago del cilindro, pero la estructura en el tramo entre los apoyos del riel y el soporte del cilindro se ve sometida a deformaciones que, en caso de colocar el sensor en la parte superior, serán sensadas por este. Esta deformación es de alrededor del milímetro en condiciones máximas e implicaría un error más allá de lo admisible. Por esta razón se planteó tomar la medida es sobre la cara inferior del riel con un sistema de medición a distancia tipo laser.

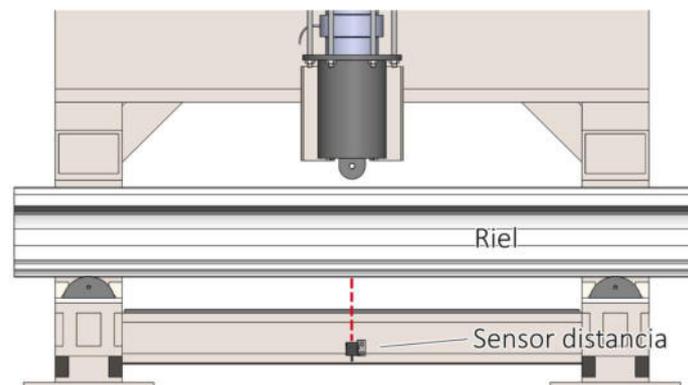


Figura 6: Medición del a deformación

El sensor se ubicará por debajo del chapón inferior el cual tendrá una perforación tal que permita el correcto funcionamiento del sensor a la vez de brindarle una protección, ver Figura (6).

### 4.3. Construcción de la estructura

Para la construcción de los perfiles de la estructura de la máquina se estudiaron dos alternativas, desarrollarlos a partir de perfiles normalizados o construir perfiles con planchuelas o chapa. La primera de esta alternativa tiene como ventaja que es más rápida su construcción y requiere menos horas de trabajo, mientras que con perfiles creados con planchuelas tenemos una mayor personalización y adaptación a los requisitos planteados.

Luego de llevar a cabo simulaciones se decidió realizar la estructura mediante perfiles personalizados, conformados a partir de chapa IRAM-IAS U500-503 [3] grado F-36 que, para los espesores utilizados, poseen un límite de fluencia mínimo de 3600 kgf/cm<sup>2</sup>. Se utilizó un factor de cálculo de 1,6 de modo que, a máxima carga, ninguna tensión en la estructura superará los 2200 kg/cm<sup>2</sup>.

Cabe aclarar que además de este factor de seguridad todos los esfuerzos fueron calculados para una carga de trabajo de 200 tf que también está sobredimensionada y en un principio nunca será aplicada. De acuerdo con las estimaciones realizadas para los perfiles de mayor tamaño y mayor grado la fuerza necesaria para su rotura es de alrededor de 160 tf. Por lo que el factor de cálculo tomado de 1,6 será considerablemente mayor para las fuerzas a la que trabajará la máquina.

Los perfiles fueron calculados mediante métodos de elementos finitos. Las geometrías de los perfiles fueron optimizadas en la medida de lo posible para aumentar su resistencia como para facilitar el montaje y para optimizar los procesos de soldadura, este diseño puede observarse en la Figura (7).

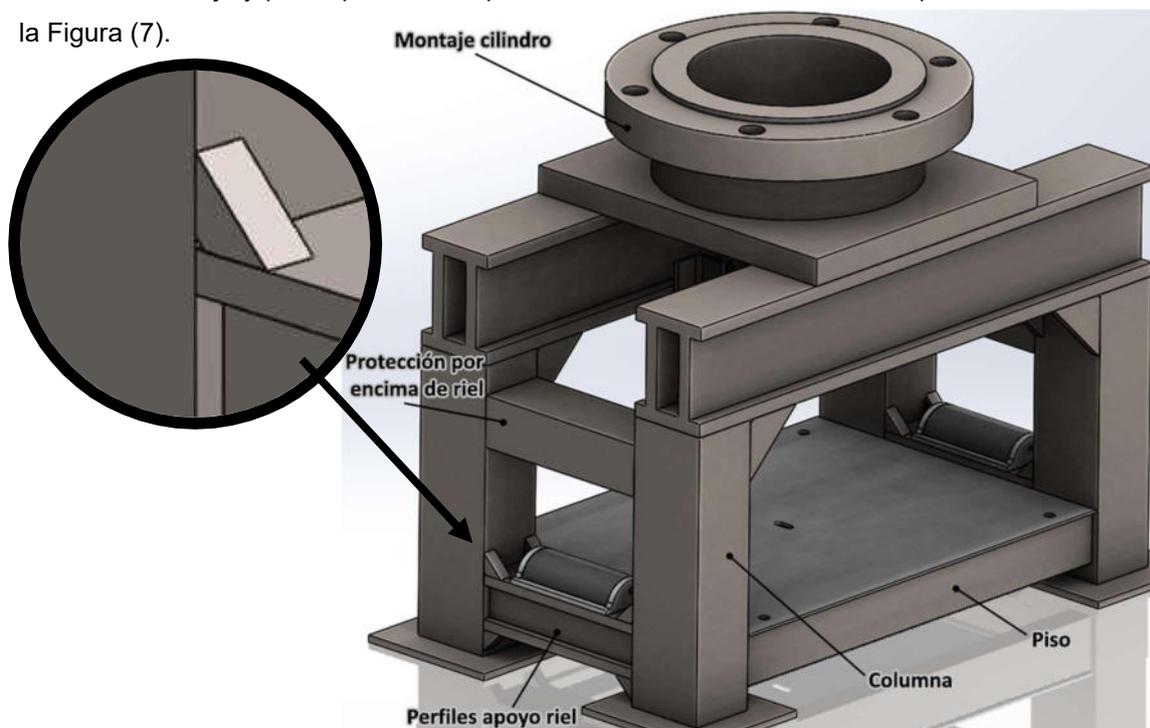


Figura 7: Estructura principal



Las vinculaciones entre los distintos tramos de la estructura se realizan mediante soldaduras. Las mismas fueron calculadas realizándolas con penetración parcial de junta [4]. Esto conlleva un mayor trabajo de mecanizado previo sobre la superficie, pero aumenta la resistencia de la junta y reduce los costos de la soldadura.

#### 4.4. Apoyo rieles

Los apoyos para los rieles son uno de los tramos más exigidos de la máquina, teniendo que soportar cada uno 100 tf para la capacidad máxima planteada. Según establece la norma los apoyos de los rieles deben ser cilíndricos y con un radio de 50 mm. El apoyo está expuesto no sólo a grandes esfuerzos, sino que también estos están sumamente localizados en un área pequeña, por lo que se buscó un material con una alta dureza para que resista el desgaste y las deformaciones puntuales que se pueden generar. Para esto se diseñó una pieza de AISI O1, que partiendo de un cilindro de diámetro 100 se mecaniza y se vincula mediante dos bulones ubicados en sus extremos, como se observa en la Figura (9). Estos irán vinculados con una pieza intermedia que estará soldada a la estructura principal de la máquina. El largo de la superficie cilíndrica del apoyo es de 170 mm, 20 mm más ancho que el riel más grande que podría utilizarse.

#### 4.5. Punzón

El punzón es la pieza que se vincula al cilindro hidráulico y transmite la fuerza hasta la soldadura del riel, donde posee una cuña de radio 25 mm. Está compuesto por dos partes que se unirán mediante bulones como se observa en la Figura (5). Esta unión se realiza dejando empaquetada la celda de carga con sus respectivos discos inductores. La parte superior de este conjunto contiene la rosca con la cual se vinculará el conjunto al vástago del cilindro hidráulico.

La parte inferior contiene el montaje para la cuña, la que es generada a partir de un cilindro de un metal duro que no es soldable, por lo tanto, se vincula mediante dos bulones en sus extremos. Esto también facilita el eventual recambio, ya que va a ser que está sometida a un gran esfuerzo.

#### 4.6. Protecciones

Debido a la rigidez del riel y al esfuerzo al que se somete, la rotura puede responder liberando energía de manera abrupta, por ello se colocarán protecciones en los laterales y en los extremos.

Son unas de las piezas que van a estar sometidas a grandes esfuerzos y eventuales roturas. Por esto, para que sean fácilmente reemplazables, se decidió montarlas a través de uniones abulonadas. Serán marcos de perfiles normalizados y chapas de espesor 1/4" como se ve en la Figura (8). En la parte inferior se colocó una chapa de 3/16" para contener los tramos de probeta luego de la ruptura y con una pequeña apertura para permitir el paso del sensor de deformación.

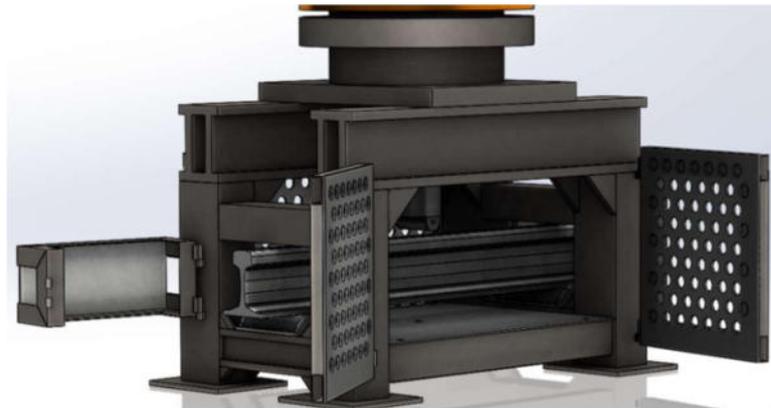


Figura 8: Conjunto con protecciones.

## 5. CONCLUSIÓN

Al ser una máquina que no está tan divulgada en el mercado y no tener tantas referencias disponibles hubo que calcular capacidades, diseñar partes desde cero y plantear valores para que pueda realizar ensayos según norma ALAF 5-032 (2002) y EN-14857-1 (2007).

Se logró una máquina que cumple con los requisitos planteados en una primera etapa, con una construcción que parte mayormente de piezas estándar para simplificar su armado.

Cabe aclarar que, al tratarse de una máquina nueva, es posible que durante su construcción y a partir de su uso surjan mejoras o modificaciones que faciliten la operación de la misma.

Por otra parte, será necesario estar atento a modificaciones o actualizaciones que puedan surgir de las normas mencionadas anteriormente, siendo la máquina diseñada para las especificaciones de las versiones vigentes en 2023. Cabe mencionar, además, que si bien se realizó un cálculo de costos al día de la fecha, esto se tendrá que rever a la hora de su fabricación.

## REFERENCIAS

- [1] ALAF 5-032. Soldadura Aluminotermica. Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles. 2002.
- [2] EN-14587. Railway applications track – Flash butt welding of rails. European Standards. 2019.
- [3] IRAM-IAS 500-503. Aceros al carbon para uso estructural. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 2012.
- [4] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mc Graw Hill, 2012.
- [5] V.M. FAIRES. *Diseño de elementos de máquinas*. Montaner y Simon S.A, Barcelona, 1998.
- [6] Robert L. Mott. *Diseño de elementos de máquinas*. Pearson, México, 2006.



## ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE PERFIL AERODINÁMICO PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO, EMPLEANDO TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA

Javier A. Puiatti <sup>1</sup>, Raúl A. Dean <sup>2</sup>, Livio S. Maglione <sup>3</sup>,

Leonel Calzolari <sup>4</sup>, Franchesco Famea<sup>5</sup>, Julio Grenon <sup>6</sup>

<sup>1,2,3</sup> Departamento Mecánica –Facultad de Ingeniería- U.N.R.C.  
G.I.A.S.A y G.I.C – Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nac. 36 - Km. 601, Río Cuarto, Argentina

correo-e: [jpuiatti@ing.unrc.edu.ar](mailto:jpuiatti@ing.unrc.edu.ar), [rdean@ing.unrc.edu.ar](mailto:rdean@ing.unrc.edu.ar), [smaglione@ing.unrc.edu.ar](mailto:smaglione@ing.unrc.edu.ar),

<sup>2,3</sup> IDAS - CONICET- UNRC

<sup>1,2,3,4,5</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto

### RESUMEN

Partiendo de un trabajo previo, se plantea el diseño estructural y determinación del procedimiento de fabricación mediante tecnología de fabricación aditiva de alas para vehículos aéreos no tripulados (UAV). Se analiza un perfil NACA, utilizado habitualmente en varios UAV del mercado, ante distintos ángulos de ataque para identificar el óptimo. Se identifican algunas ventajas comparativas de los distintos materiales y técnicas de fabricación utilizadas. Se diseña un perfil alar en software CAD que cumpla con los requerimientos preestablecidos según los prototipos ya desarrollados en el GIASA. Se propone implementar en un futuro distintas metodologías de fabricación para obtener probetas de perfiles alares a ensayar con el fin de obtener una caracterización de precisión. En el marco de esta investigación, se han obtenido varios resultados destacados. Entre ellos, se destaca la gran versatilidad que ofrecen los materiales de impresión 3D en la actualidad, aunque para la aplicación en estudio, puedan tener algún impacto negativo en cuanto al peso y resistencia mecánica, las perspectivas de obtener un prototipo de perfil aerodinámico para un UAV empleando esta tecnología como recurso auxiliar en la manufactura son muy promisorias.

**Palabras Clave:** UAV, Fabricación Aditiva, Diseño



## 1. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas la comunidad científico - tecnológica se ha concentrado en el estudio de sistemas aéreos no tripulados (UAVs) debido a sus potenciales aplicaciones. Este interés se debe principalmente al gran número de soluciones que estos sistemas podrían proveer en el contexto civil y comercial en diferentes áreas. Actualmente el Grupo de Ingeniería Aplicada a Sistemas Agroalimentarios (G.I.A.S.A.) de la Fac. de Ingeniería de la U.N.R.C., a través de diversos proyectos de investigación (PDTs, PÍODO, PPI) ha integrado un prototipo de UAV, denominado GIASA#1. A partir de las experiencias obtenidas con el mismo, surge el interés de desarrollar un segundo prototipo (GIASA#2) utilizando técnicas de fabricación que permitan replicar partes componentes de manera rápida y económica. Tomando como base un trabajo previo, que considera como problema tecnológico a resolver: "... sustituir/ integrar partes de un sistema tecnológico importado correspondiente a un UAV de ala fija.", se asocia al mismo la siguiente pregunta de investigación: *"¿Cómo desarrollar y construir una carcasa de desarrollo nacional sustituta para el UAV importado manteniendo o mejorando sus características estructurales y funcionales con materiales y procedimientos de fabricación alternativos?"* [1]. A tal fin se plantea el diseño estructural y determinación del procedimiento de fabricación mediante tecnología de fabricación aditiva de alas para vehículos aéreos no tripulados (UAV). Se analiza un perfil NACA, utilizado habitualmente en varios UAV del mercado, ante distintos ángulos de ataque para identificar el óptimo. Se identifican algunas ventajas comparativas de distintos materiales y técnicas de fabricación utilizadas. Se diseña un perfil alar en software CAD que cumpla con los requerimientos preestablecidos según un prototipo ya integrado en el GIASA. Las tecnologías principales asociadas al tema que nos ocupa son: vehículos aéreos no tripulados (UAV) (Unmanned Aerial Vehicle), la tecnología de fabricación aditiva y la de fabricación sustractiva como una tercera alternativa complementaria. De particular interés en este trabajo es la fabricación aditiva la cual se puede concretar a través de diferentes procesos. Se destaca que la impresión FDM (Fused Deposition Modeling) ofrece ventajas tales como un bajo costo de producción, solidez de las piezas impresas y facilidad de reparación. También se destaca la versatilidad que ofrecen los materiales de impresión 3D en la actualidad, aunque para la aplicación en estudio puedan tener algún impacto negativo en cuanto al peso y resistencia mecánica, y las perspectivas promisorias de obtener un prototipo de perfil alar para un UAV empleando esta tecnología como recurso auxiliar en la manufactura.

## 2. FORMA, ESTRUCTURA Y MATERIALIDAD DEL PERFIL AERODINÁMICO

Para el diseño estructural y determinación del procedimiento de fabricación de alas de un vehículo aéreo no tripulado (UAV), mediante tecnología de fabricación aditiva, se consideran las siguientes etapas u objetivos:



- 1.- Analizar distintos perfiles aerodinámicos utilizados en la fabricación de alas de UAV, considerando las misiones para las cuales fueron diseñados.
- 2.- Identificar ventajas comparativas de distintos materiales y técnicas de fabricación utilizadas.
- 3.- Diseñar un perfil alar en software CAD que cumpla con los requerimientos de misión preestablecidos según los prototipos ya desarrollados en el GIASA.
- 4.- Obtener el perfil alar de la etapa 3 implementando diferentes métodos de fabricación.

### 2.1. Análisis de distintos perfiles

La tarea comenzó con un relevamiento de un perfil alar de referencia, que se tenía a disposición. Luego de un análisis detallado de sus medidas se concluyó que el perfil relevado corresponde a un perfil NACA 2410, cuyas características principales se muestran en Figura 1. La nomenclatura “NACA” permite identificar diferencias geométricas y su valoración aerodinámica [2].

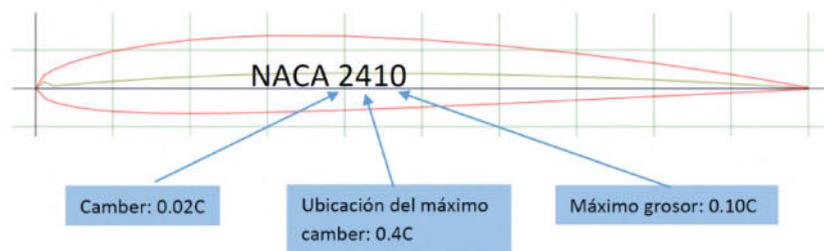


Figura 1. Características del perfil NACA 2410.

Con el conocimiento del tipo de perfil, NACA 2410, se recurre a una biblioteca donde se encuentran datos específicos de este perfil, y de esta manera se obtienen datos aproximados, pero prácticamente precisos, del desempeño aerodinámico que tendrá el perfil, sin necesidad de utilizar algún software de simulación. En particular, se hace uso de una herramienta en línea que permite encontrar características de los perfiles alares reunidas en una biblioteca: <http://airfoiltools.com>; con esta herramienta, podemos conocer los valores de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación para diferentes números de Reynolds y varios ángulos de ataque. La información obtenida de la biblioteca mencionada se resume en las gráficas de las Figuras 2 y 3.

Con los datos relevados del perfil alar del UAV disponible para la investigación, se modeló matemáticamente el contorno y la superficie del ala (Figura 4) a fin de calcular las fuerzas de arrastre y sustentación ideales que presentaban las alas originales, y obtener de esta manera una aproximación de la energía necesaria para desplazar en vuelo al UAV y de la capacidad de carga disponible con las dimensiones de las cuales dispone el mismo.

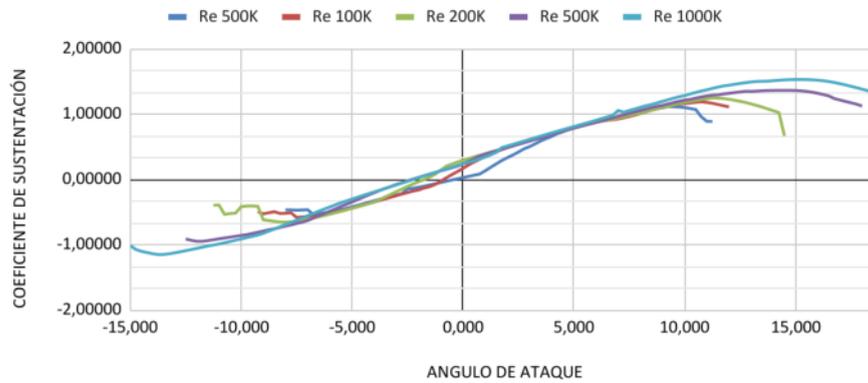


Figura 2. Coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) en función del ángulo de ataque y Reynolds ( $Re$ ).

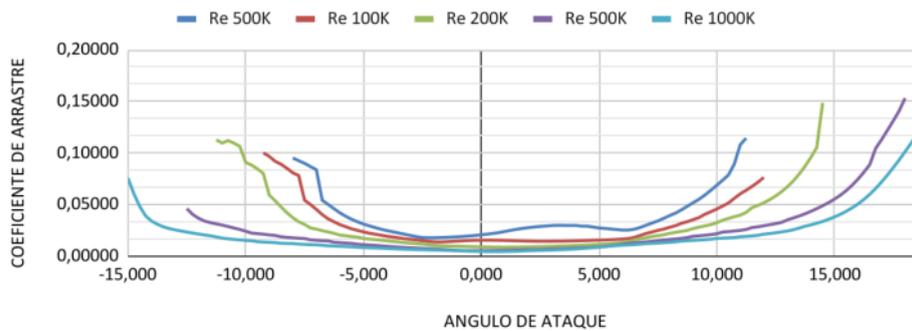


Figura 3. Coeficiente de arrastre ( $C_A$ ) en función del ángulo de ataque y Reynolds ( $Re$ )

Considerando la longitud de cuerda del ala cerca del fuselaje, y en el extremo y estableciendo una función de variación de la misma a lo largo de la longitud del ala como se muestra en la Figura 4, es posible aplicar el modelo de flujo de aire sobre placa plana, discretizando la superficie y considerando la extensión total de ambas alas, con un simple modelo de cálculo se logra obtener los valores de arrastre y sustentación.

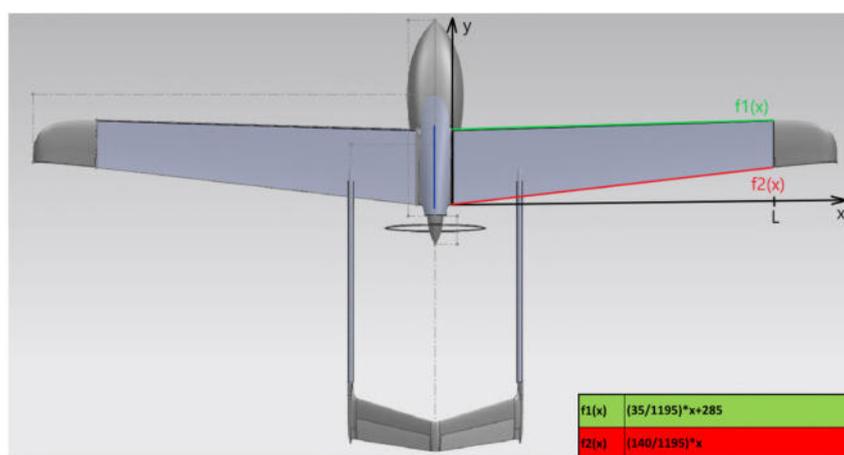


Figura 4: Vista en Planta del Prototipo UAV y caracterización geométrica del ala.



Mediante la implementación de una hoja de cálculo, variando la velocidad de movimiento, el ángulo de ataque y valores de condición ambiental, se procede a determinar las fuerzas de sustentación y de arrastre, con las ecuaciones correspondientes:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \qquad F_A = \frac{1}{2} C_A \rho A V^2 \qquad (1)$$

El cálculo de la fuerza de sustentación (teórica) se extendió para distintas velocidades de vuelo y ángulos de ataque, y los resultados se detallan en la Figura 5. Los datos de esta figura, permitieron estimar un ángulo de ataque en función de la velocidad crucero de vuelo establecida por el fabricante del modelo de UAV original. En este caso, se toma en consideración una velocidad de 68 km/h y un ángulo de ataque de 5°, en la Tabla 1, podemos ver en los resultados, una fuerza de sustentación de casi 9 Kgf, muy próxima a la del modelo de UAV de referencia, que es de 10 Kgf. De esta manera queda determinado el valor de ángulo de ataque que se utilizará en el futuro para posicionar el perfil de ala respecto al fuselaje.

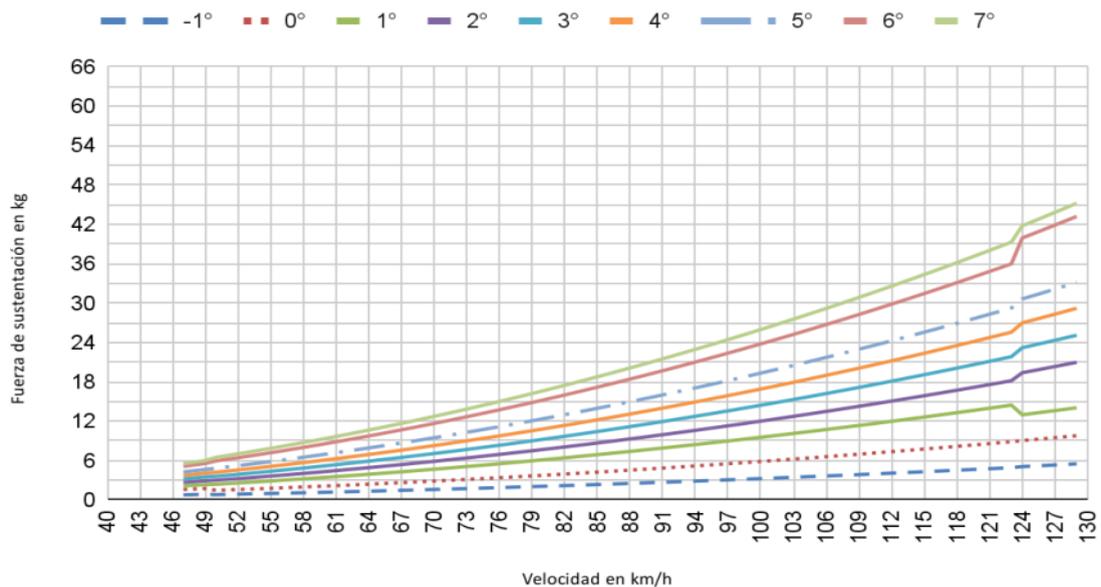


Figura 5. Fuerza de sustentación ( $F_L$ ) en función de la velocidad y ángulo de ataque (-1° a 7°)

Tabla 1. Datos y resultados del perfil alar adoptado

INGRESO DE DATOS		
Temperatura del aire	20	°C
Presión atmosférica	101325	Pa
Densidad del aire	1,125	kg/m <sup>3</sup>



Viscosidad ( $\mu$ )	0,000018	Ns/m <sup>2</sup>
Ángulo de ataque	5	°
Velocidad crucero	68	km/h
Pendiente f1(x)	0,0293	
Ordenada al origen f1(x)	0,285	m
Pendiente f2(x)	0,117	
Ordenada al origen f2(x)	0	m
Longitud de ala	1,195	m

RESULTADOS PARCIALES		
Superficie alar	0,278	m <sup>2</sup>
Coefficiente de sustentación	0,786	
CS Ponderado	0,786	
Coefficiente de arrastre	0,00927	
CA Ponderado	0,0111	
Reynolds	274479	
Ancho promedio del ala	0,233	m
CS/CA	84,80	

<b>Fuerza de sustentación</b>	<b>8,936</b>	[kg]
<b>Fuerza de arrastre</b>	<b>0,105</b>	[kg]

## 2.2. Selección de materiales y técnicas de fabricación

¿Qué material o materiales y procedimiento de fabricación será apropiado utilizar? En esta etapa se recopila información proveniente de diversas fuentes que aportan resultados de experiencia práctica, a fin de conocer diversos métodos de construcción de drones o vehículos de aeromodelismo que puedan proporcionar enfoques constructivos relevantes [3-10].

Aunque en principio el foco estuvo principalmente en los modelos de impresión 3D, también se exploraron las ventajas de otros métodos y estrategias para la construcción de vehículos aéreos, con un enfoque especial en determinar una forma constructiva óptima que logre maximizar la relación entre resistencia y peso, manteniendo un costo reducido.

En cuanto a la técnica de fabricación, se observa que existen numerosos modelos que se fabrican utilizando la tecnología de impresión FDM (Fused Deposition Modeling), la cual resulta de particular interés en este contexto. Adoptando y utilizando este método se busca reconstruir el modelo con el objetivo de obtener la mejor relación entre peso, costo y resistencia [8].

Otro aspecto crucial de la investigación se centra en los materiales utilizados para la reconstrucción del modelo de UAV. Se llevó a cabo una investigación exhaustiva para obtener información sobre las características físicas de objetos fabricados exclusivamente mediante fabricación aditiva. Se examinaron las ventajas de cada material, su resistencia al corte y tracción, y las formas de trabajo específicas de cada uno [3-6] [9,10]. En las Tablas 2 y 3 se presenta un resumen de las características proporcionadas



Tabla 2. Tabla creada a través de datos provistos por Grilon 3D [9].

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Dificultad impresión (1)	Dureza (2)	Res. térmica (3)	Res. al impacto	Res. a la intemperie	Res. a la carga	Res. a la abrasión	Absorción de humedad	Flexibilidad (4)	Post-procesamiento (5)	Sup. mate	Apto alimentos (6)	Baja emisión de humos
PLA	1.24	+	++++	50	++	+	++	+	+	+	++	NO	NO	SI
PLA BOUTIQUE	1.24	+	++++	50	++	+	++	+	+	+	++	S/N	NO	SI
PLA 850	1.25	+	++++	55	++	+	++	+	+	+	++	NO	NO	SI
PLA 870	1.22	+	++++	55	+++	++	+++	++	+	+	++++	NO	NO	SI
PLA ZETA	1.22	++	+++++	60	+	++	+	+	+	+	++	NO	NO	SI
PETG	1.27	+	+++	85	+++	+++	+++	++	++	++	++++	NO	SI (Nat)	SI
SIMPLIFLEX	1.15	++	+	85	++++	++++	+++	+++	+++	++++	++	SAT.	SI (Nat)	MED
ABS	1.05	+++	+++	95	+++	+++	+++	+++	++	+	++++	SAT-	NO	NO
HIPS	1.03	++	+++	85	+++	+++	+++	+++	++	+	++++	SI	SI (Nat)	MED
NYLON 6	1.14	++++	++	115	++++	++++	++++	++++	++++	+++	++++	NO	NO	MED
NYLON 12	1.02	+++++	+++	130	+++++	+++++	+++++	+++++	+	++	++++	NO	SI (Nat)	MED
ACETAL	1.42	+++++	++	115	+++++	+++++	+++++	+++++	+	+++	++++	NO	NO	NO
PVA	1.23	++	++	60	+	+	+	+	++++	+++	+	NO	NO	SI
PP-T	0.92	+++	++	95	++++	++++	++++	++++	+	+++	++++	SAT.	SI (Nat)	SI

**Referencias de tabla 2:**

1) (+) Fácil de imprimir, (+++++) Requerido equipo y conocimientos técnicos. 2) La dureza es una propiedad de la superficie. No describe el comportamiento mecánico de la pieza. 3) Resistencia a la temperatura, datos de la resina virgen, en °C. a 1 bar. 4) Flexibilidad: (+++++) Flexible, (+) Rígido. 5) Post-procesamiento: (+++++) posibilidad de pintarse, suavizar, lijar o pegar. 6) Materia prima aprobada FDA/UE. Resistencia a la carga: (+++++)=45-50 Mpa (+)=5-10 Mpa

Durante esta búsqueda, se han encontrado numerosos modelos construidos utilizando materiales compuestos, laminados o con estructura tipo sándwich [7]. Estos materiales incluyen principalmente fibra de carbono, fibra de vidrio y madera balsa. Además, se han identificado construcciones que emplean exclusivamente madera, como también compuestos tipo sándwich con un núcleo de madera balsa.



Tabla 3. Tabla editada y extraída desde la web de PRUSA RESEARCH [10]

Material ?		Impresión con cerramiento ?	Boquilla en- durecida necesaria ?	Temperatura de la boquilla (+10 °C) ?	Temperatura de la base (+10 °C) ?
> PVA / BVOH ⓘ (2)		No	No	195-215 °C	60 °C
> PC (Polycarbonate) ⓘ (4)		Si recomendado	No	270-275 °C	100-115 °C
> PLA ⓘ (34)		No	No	185-235 °C	50-60 °C
> PETG ⓘ (18)		No	No	215-270 °C	70-90 °C
> PA (Nylon) ⓘ (6)		Si recomendado	No	240-285 °C	70-115 °C
> PVB ⓘ (1)		No	No	215 °C	75 °C
> nGen ⓘ (1)		No	No	240 °C	90 °C
> PETG HT ⓘ (1)		No	No	270 °C	110 °C
> ASA ⓘ (5)		Si recomendado	No	220-275 °C	90-110 °C
> ABS ⓘ (10)		Si recomendado	No	230-255 °C	95-110 °C
> HIPS ⓘ (3)		No	No	225-255 °C	100-110 °C
> PP (Polypropylene) ⓘ (3)		-	No	220-245 °C	0-100 °C
> Flex ⓘ (19)		No	No	220-260 °C	40-85 °C

### 2.3. Diseño de un perfil alar

Se diseñaron algunos perfiles alares a través de un software de diseño 3D, cumpliendo con los requerimientos preestablecidos según prototipos ya desarrollados en el G.I.A.S.A. En los primeros ejemplares de diseño se consideró la opción de un perfil alar de sección variable, pero luego de considerar los procesos de fabricación posibles se decide realizar un perfil de sección constante manteniendo la geometría NACA 2410.

En ésta etapa también se realizaron diseños de estructuras esqueléticas para el perfil descrito con el fin de poder obtener mediante tecnologías CNC tipo sustractivas, como fresadoras y láser.

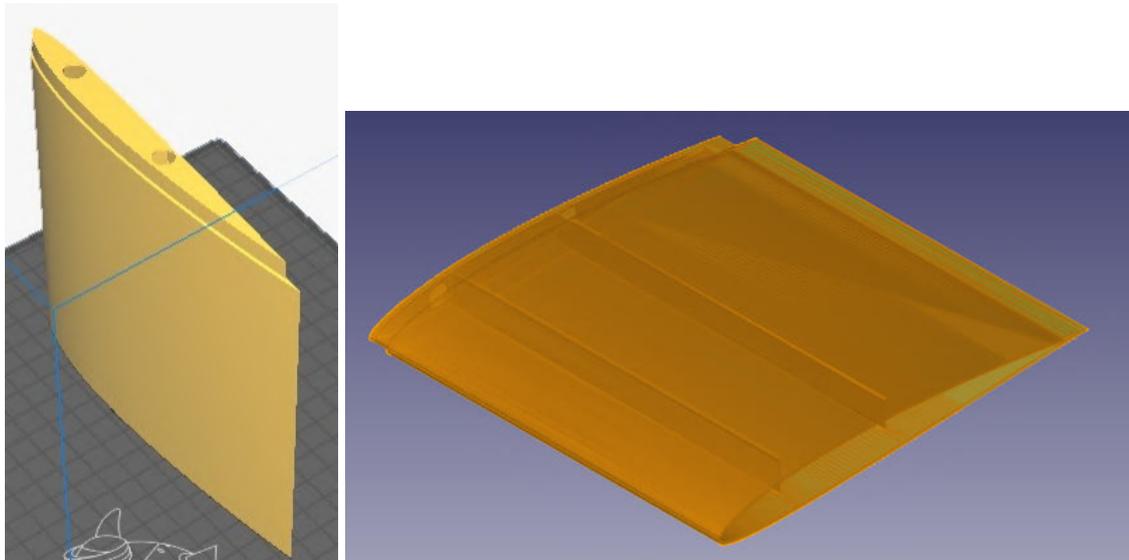


Figura 6. imágenes de algunos modelos CAD 3D desarrollados

#### 2.4. Construcción del perfil aerodinámico

El desafío de la estructura interna para el perfil seleccionado y diseñado. Se procedió a definir diferentes estructuras internas del perfil e implementar distintas técnicas de fabricación para obtener probetas de perfiles alares a fin de someterlas a ensayos estructurales en una etapa posterior y lograr una caracterización de precisión. Se implementaron las técnicas de fabricación y se construyeron las siguientes muestras diferentes del perfil diseñado:

1. *Estructura íntegra en impresión 3D*: se realizaron varios diseños de módulos impresos, uno de ellos es la referencia menos deseada, Figura 7 (b), a partir de ella surgen otros modelos con el fin de disminuir tiempos de fabricación y peso Figura 7 (a). A partir de un análisis que involucra la información expresada en tablas 2 y 3, y la posibilidad de impresión en la impresora FDM que disponemos (Hellbot Magna SE), es que definimos como material más apto al PETG, a pesar de sus puntos negativos respecto a los demás materiales (por ejemplo, como es en el caso de la densidad). Esto en una primera instancia para evaluar las características físicas y del proceso de las partes a fabricar.
2. *Estructura esquelética en madera balsa cortada mediante tecnología láser CNC*: a partir del diseño esquelético del ala mediante un software CAD 2D se obtienen dibujos de corte y se decide obtenerlos mediante tecnología láser CNC en madera balsa. Se obtiene una estructura bastante liviana y de gran precisión. A partir de dicha estructura se decide realizar ejemplares de probeta recubiertos con membranas de diferentes

materiales, como fibra de vidrio y acetato, como se muestra en Figuras 7(c) y (d) respectivamente.

3. *Estructura esquelética, costillas en material impreso en 3D y alma de madera balsa:* dado a los resultados previos de los ejemplares del punto 2, se propone realizar las costillas mediante impresión 3D, adosarlas a un alma de madera balsa y recubriendo la estructura con una membrana de PET. Figuras 7 (e) y (f)
4. *Estructura interna de polyfoam, alma de madera balsa:* es una de las técnicas que habitualmente se utilizan en el ámbito del aeromodelismo, tiene la ventaja de poderse obtener los perfiles en forma rápida mediante corte con hilo caliente a partir de una matriz de perfil.

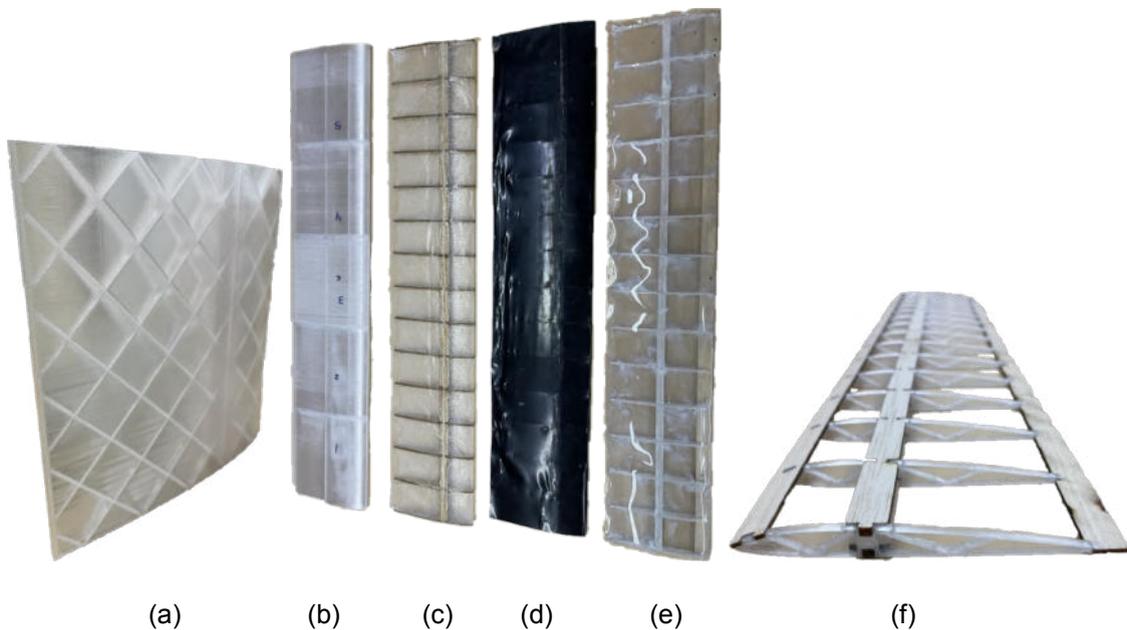


Figura 7. Diferentes muestras de probetas de perfil alar construidas en G.I.A.S.A.

La Figura 7 expone algunos segmentos de ala diseñadas y fabricadas en el Grupo G.I.A.S.A. de la Fac. de Ingeniería, U.N.R.C., probando las diferentes técnicas de fabricación ya comentadas.

Ésta etapa aún se encuentra en desarrollo a fin de definir “la mejor técnica a utilizar”. Los perfiles mostrados en la Figura 7 forman parte de un grupo de probetas que serán sometidas a un estudio más detallado, y formarán parte de otra publicación.

### 3. CONCLUSIONES

Los objetivos planteados se completaron satisfactoriamente, logrando recabar gran cantidad de información en lo que respecta a: denominación NACA, estudio de perfiles alares, materiales y métodos constructivos, principalmente ampliando sobre este punto lo que respecta a materiales



de impresión por deposición fundida o FDM. Se logró un diseño por software CAD que permite materializar un ala con el perfil adoptado y con algunos de los métodos establecidos o planteados. Se destacan como conclusiones obtenidas a partir del análisis de las diferentes fuentes de información y de las experiencias efectuadas en la fabricación de perfiles mencionados, las siguientes:

- a) la adopción de un perfil de sección constante permite construir fracciones longitudinales en el caso de querer obtener los perfiles de ala mediante impresión 3D, y facilita el proceso de fabricación en caso de querer utilizar otros métodos,
- b) la impresión FDM (Fused Deposition Modeling) ofrece ventajas como un bajo costo de producción, solidez de las piezas impresas y facilidad de reparación.
- c) los materiales de impresión 3D en la actualidad ofrecen gran versatilidad, aunque para la aplicación en estudio puedan tener algún impacto negativo en cuanto al peso y resistencia mecánica,
- d) es posible obtener un prototipo de ala con un perfil aerodinámico determinado para un UAV empleando esta técnica de fabricación aditiva como recurso principal o auxiliar en la manufactura.
- e) las efectivas posibilidades de fabricar partes estructurales o piezas de un futuro prototipo de un vehículo de las características planteadas por medio del sistema de fabricación aditiva de impresión 3D;
- f) la existencia y posibilidad de fabricar estos modelos con otros métodos muy difundidos como la utilización de materiales compuestos,
- g) la factibilidad de combinar métodos y tecnologías para la fabricación de componentes de aeronaves no tripuladas.

Actualmente se siguen generando probetas de perfiles alares combinando, probando y aprendiendo de las diversas técnicas, para dar lugar a una serie de ensayos mecánicos-estructurales que permitan caracterizarlas y ampliar el presente estudio.

### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo agradecen a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNRC por el apoyo a la gestión de los proyectos, y a los estudiantes Santiago Isgro y Genaro Gomez, de la carrera de Ingeniería Mecánica de la UNRC, por su participación como colaboradores en el proyecto del presente trabajo.



## REFERENCIAS

- [1] Puiatti J.A., Maglione L.S., Dean R.A., Calzollari L., Muschiatto G.. *Diseño de un Vehículo Aéreo no Tripulado para Búsqueda y Rescate de Personas en la Provincia de Córdoba*. VII Congreso de Ingeniería Mecánica.CAIM- CAIFE- San Nicolás. Argentina.
- [2] Pinzón Paz S. *El Perfil Alar y su Nomenclatura NACA*. Ciencia y Poder Aéreo. 2013; 8(1):26-32. [fecha de Consulta 20 de Mayo de 2023]. ISSN: 1909-7050. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=673571171005>
- [3] Relaño, P. A. A. Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida. Proyecto fin de carrera de Ingeniería industrial, Universidad Carlos III de Madrid, España. 2013)
- [4] Briceño-Martínez, B. J. *Tecnologías de impresión 3D: evaluaciones de FDM y Polyjet en la fabricación de autopartes de automóviles*. Enfoque UTE, V.10 -N.3: 13-29. 2019 <https://www.redalyc.org/journal/5722/572261719002/html/>
- [5] Ming-Hsien, H. *Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling*. *Polymers* 2021, 13(11), 1758; <https://doi.org/10.3390/polym13111758>
- [6] Deng X, Zeng Z, Peng B, Yan S, Ke W. *Mechanical Properties Optimization of Poly-Ether-Ether-Ketone via Fused Deposition Modeling*. *Materials* (Basel). 2018 Jan 30;11(2):216. doi: 10.3390/ma11020216. PMID: 29385756; PMCID: PMC5848913.
- [7] Turgut T., "Manufacturing and structural analysis of a lightweight sandwich composite UAV wing," M.S. - Master of Science, Middle East Technical University, 2007.
- [8] Pavol. P, Viliam A., Branislav K., Bugaj M. *Introduction study of design and layout of UAVs 3D printed wings in relation to optimal lightweight and load distribution*. *Transportation research procedian*, 40. 2019. 861-868. doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.121
- [9] Grilon3, sitio web: <https://grilon3.com.ar/>, accesos directos consultados: (1) Tabla comparativa - [http://grilon3.com/descargas/tabla\\_comparativa\\_descarga.pdf](http://grilon3.com/descargas/tabla_comparativa_descarga.pdf) (2) Fichas técnicas - <https://grilon3.com.ar/fichas/> [fecha de Consulta: 22 de Mayo de 2023]
- [10] Prusa Research , sitio web: <https://www.prusa3d.com/> accesos directos consultados: (1) Tabla comparativa - <https://help.prusa3d.com/es/materials> [fecha de Consulta: 22 de Mayo de 2023]



## DESARROLLO DE UN BANCO DE ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECANICAS DIVERSAS EN PIEZAS POLIMÉRICAS.

Carlos Mainetti<sup>1,2</sup>, Andrés Romero<sup>1,3</sup> y Marcelo Piovan<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada – UTN Fac. Reg. Bahía Blanca  
11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina - [mainetti@frbb.utn.edu.ar](mailto:mainetti@frbb.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento Ingeniería Eléctrica – UTN Fac. Reg. Bahía Blanca

<sup>3</sup> Departamento Ingeniería Mecánica – UTN Fac. Reg. Bahía Blanca – 11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina - [andresrom147@hotmail.com](mailto:andresrom147@hotmail.com)

<sup>4</sup> CONICET [mpiovan@frbb.utn.edu.ar](mailto:mpiovan@frbb.utn.edu.ar)

### RESUMEN

La determinación de diversas propiedades elásticas de cuerpos poliméricos impresos ha movilizó la atención de investigadores de todo el mundo en los últimos 10 años. La caracterización de la resistencia, elasticidad y rigidez ante sollicitaciones que provocan tensiones normales (flexión o tracción) es bastante bien conocida. Por otro lado la determinación de propiedades mecánicas de piezas impresas o bien plásticos compuestos bajo tensiones cortantes o de aplastamiento entre otras no se halla suficientemente evaluada como para tener datos suficientes tendientes a la adecuada elaboración de modelos constitutivos meso-estructurales. Es pues que en este trabajo se presenta el desarrollo de una máquina específica con accionamientos y sensores computarizados, para la determinación de diversas propiedades elásticas en piezas impresas (o bien plásticos inyectados o bien composites). El concepto de diseño permite efectuar ensayos de flexión directa en placa, de flexión-torsión en placa, y de aplastamiento entre otros, con el simple cambio de soportes o cabezales para montar las probetas adecuadas, siempre de pequeñas dimensiones. En efecto se pueden efectuar ensayos de las siguientes normas: 1) ASTM 790 (o ISO 178 y otros más específicos) para determinación de propiedades elásticas flexionales y módulo de elasticidad longitudinal a flexión; 2) ISO 15310 para determinación de propiedades elásticas de corte y módulo de elasticidad cortante; 3) ASTM D395 para las propiedades de compresión de gomas y polímeros flexibles; 4) ASTM D695-15 para compresión de probetas de plásticos rígidos. Se efectúan algunos estudios para la determinación de propiedades elásticas en diversos materiales, a saber isótropos (aluminio, a modo de chequeo y control), y poliméricos impresos (Poli-ácido láctico: PLA) con varias configuraciones de deposición.

**Palabras Clave:** Máquina de Ensayo. Impresión 3D Polimérica; Ensayos Estáticos; Normas ISO y ASTM



## 1. INTRODUCCIÓN

La determinación de propiedades elásticas y mecánicas en materiales de uso tecnológico siempre ha sido foco de atención en la comunidad de ingeniería mecánica. Particularmente en los últimos años, con la irrupción de la construcción aditiva (coloquialmente “Impresión 3D”), se ha visto la necesidad de contar con herramientas que permitan caracterizar ciertas propiedades elásticas para materiales de tipo polimérico. Es claro que contar con máquinas de ensayo profesionales con calidad certificada es una ventaja importante, no menos cierto es que, para laboratorios académicos o bien Pymes del país, ello involucra un costo muy importante, tanto en compra, cuanto en montaje, operación y/o acceso a servicios. A partir de una revisión sopesada de la literatura técnico-científica de los últimos 10 años con relación a las mediciones de propiedades mecánicas de piezas poliméricas (impresas o bien inyectadas) se ha observado que los ensayos de tracción en probetas ahusadas (coloquialmente llamadas dog-bone) y probetas a flexión son los más frecuentes [1-3]. Con los ensayos de tracción o flexión se puede conocer propiedades elásticas vinculadas a tales esfuerzos (e.g., límites de fluencia, rotura, módulos de elasticidad longitudinal y de flexión; siendo estos últimos dos, distintos en los casos de materiales compuestos). Sin embargo debido a la innumerable cantidad de usos y aplicaciones de la impresión 3D de tipo polimérico (que actualmente abarca alrededor del 50% del mercado mundial de productos y equipos de impresión del mundo [4]), es necesario conocer otras propiedades mecánicas de los productos impresos tales como módulo de elasticidad transversal por corte, módulo volumétrico, entre otras propiedades. Es sabido que algunos ensayos tendientes a determinar propiedades elásticas tangenciales suelen exigir el empleo de galgas extensiométricas. Lo cual implica entrenamiento específico en la manipulación y medición de las galgas en forma sincrónica con las cargas y/o desplazamientos, además de imponer dificultades en la construcción de accesorios y demoras para montar las probetas en las máquinas de ensayo [5-6].

En este artículo se presenta la concepción, construcción y operación de una máquina de ensayo portátil para efectuar la caracterización no convencional de propiedades elásticas en piezas poliméricas sean construidas por inyección o moldeo o con resinas reforzadas por fibras o con impresión 3D por deposición de polímero también llamada de Extrusión de Material Polimérico (EMP). Los objetivos principales que motivan la construcción de esta máquina de ensayo residen en que sea de fácil operatividad y que no requiera elementos complicados o costosos para su uso. A su vez, que se puedan emplear controladores computarizados para adquirir simultáneamente desplazamiento y fuerza, para luego ser analizados mediante plataformas computacionales “Ad-hoc”. En el mismo desarrollo conceptual de la máquina se ha percibido la viabilidad de construir implementos para realizar ensayos de flexión (bajo diversas normas y con finalidades múltiples) y de compresión, requiriendo pocas modificaciones y



manteniendo el mismo sistema automatizado de adquisición de datos. Con esto se tendría una muy buena base operativa para caracterizar los materiales plásticos mencionados, incluso materiales isotrópicos como planchuelas de metal.

El artículo se organiza en las seis partes que a continuación se detallan. Luego de la introducción se exponen las bases conceptuales del producto y el esquema constructivo. A continuación se presenta el diseño del sistema de control con su calibración e hipótesis que fundamentan su funcionamiento. Sigue la descripción de la metodología para los ensayos que permite realizar. Continúa con una serie de ensayos básicos de caracterización y comparativos para tener una noción de calidad, a su vez se efectúan algunos estudios sobre de Poli-ácido láctico (PLA). Termina ofreciendo un conjunto de conclusiones, donde también se adelantan algunas alternativas futuras de potenciales ensayos que ofrece la máquina.

## 2. CRITERIOS DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCION DEL BANCO DE ENSAYO

El diseño primitivo de la máquina se origina a partir de prototipos de dispositivos construidos por los autores para atender problemas particulares del laboratorio CIMTA, en primera instancia asociados a calibrar ensayos de extensometría eléctrica por flexión. La idea original conducía a replicar dispositivos de las firmas Kyowa, Pasco y GUNT Maschinen, debido a tener algunos sensores de tales marcas en los laboratorios de la institución. Sin embargo, desechadas algunas ideas (uso exclusivo para extensometría eléctrica), la planificación de los primeros dispositivos derivó en una concepción de diseño para proyectar una máquina pequeña que no esté restringida a una sola clase de ensayos. Con esta meta se fijaron algunos criterios, condiciones y objetivos para desarrollar y construir un banco de ensayos portátil:

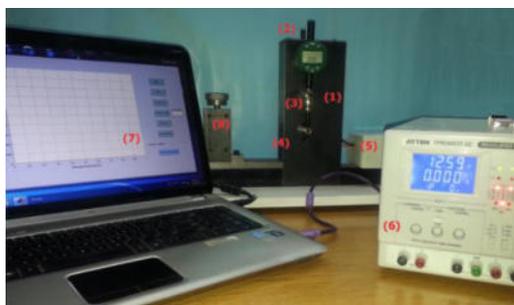
- 1) Que sea de construcción simple, robusta, de fácil operación y mantenimiento.
- 2) Que se pueda aprovechar partes mecánicas y estructurales de dispositivos en desuso.
- 3) Que sea portátil y cuente con un sistema computarizado de adquisición de datos
- 4) Que utilice sensores y/o instrumentos disponibles en el laboratorio.
- 5) Que facilite ensayos en probetas poliméricas pequeñas con diversas sollicitaciones y para obtener como mínimo módulos de elasticidad por flexión, por corte y volumétricos
- 6) Que facilite algún ensayo compresivo o de pandeo para verificación.
- 7) Que facilite otros ensayos de caracterización con solo medir desplazamiento y fuerza.

Bajo las primeras cuatro pautas se ha diseñado y construido una máquina, cuyo conjunto operativo completo se muestra en la Figura 1(a), mientras que en la Figura 1(b) se observa un despiece explosionado de la maquinaria y cadena cinemática asociada.

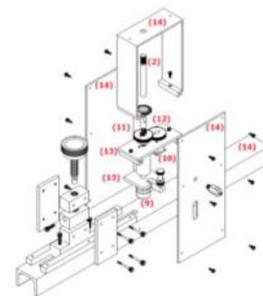
De acuerdo con las Figuras 1(a) y 1(b), la máquina consta de una torre (1) donde se aloja el sistema de transmisión de movimiento y accionamiento de carga, mismo que se haya



constituido por un motor paso-paso, una reducción y un subsistema tornillo-actuador que moviliza la barra donde se halla montada una celda de carga compresiva, como en la Figura 2(a). La aproximación manual fina se efectúa con el tornillo de ajuste (2) y en (3) se ve la fijación para comparador digital. En particular el montaje para el comparador (3) se ha empleado para el proceso de calibración del control computacional de desplazamiento (una vez calibrado su uso no es estrictamente necesario, aunque útil para constatar calibración). En el alojamiento (4) se disponen los montajes para los ensayos, los cuales son intercambiables para permitir diversos accesorios de ensayo, los cuales se explicitarán más adelante. La caja (5) contiene toda la electrónica de control del dispositivo, cuya alimentación se efectúa mediante una fuente externa regulable (6) a 12 volts. El control operativo de la medición se realiza con una aplicación MATLAB (7). La torre (8) es uno de los posibles montajes para probetas de flexión (rémora del diseño primitivo para ensayos de extensometría eléctrica) según normas ASTM o ISO o bien con otra clase de especímenes en forma de barra esbelta. La celda de carga empleada (9) es una miniatura para sollicitación compresiva marca CALT-CE DYHW-116 de 10 kg, con excitación de voltaje entre 5 y 15 volts, sensibilidad de 1.0 mV/V y rango de temperatura de -30°C a 70°C. Su taraje se considera suficiente para las piezas planas de pequeño espesor que se pretenden ensayar, mismas que se han pensado para no exceder el rango de trabajo de la máquina.



(a)



(b)

Figura 1: Descripción de la máquina de ensayo

En la Figura 2(a) se puede apreciar la cara de montaje a la barra de accionamiento y la cara de contacto con la probeta. Una de las ventajas de diseño radica en la posibilidad de intercambiar la celda de carga por una de mayor capacidad dado que la serie DYHW-116 tiene las mismas dimensiones de la superficie de anclaje hasta la tara de 200 kg. El motor paso a paso (10) es un NEMA 17 de alto torque de 62 N-cm. Los detalles de la relación de transmisión por engranajes (12) y tornillo actuador calibrado (11) se dan más adelante en el apartado de diseño del sistema de control. Los elementos móviles como ejes, tornillo-actuador, barra, engranajes, las placas conectoras y soportes internos (13) han sido construidos con acero de alta resistencia, AISI 1045, y sometidos a endurecimiento superficial para limitar desgastes por

contacto y fricción. Las partes estructurales del bastidor (14), como se aprecia en la Figura 1(b), se han hecho con planchuelas de acero de 1/8" y con un perfil estructural UPN 50.

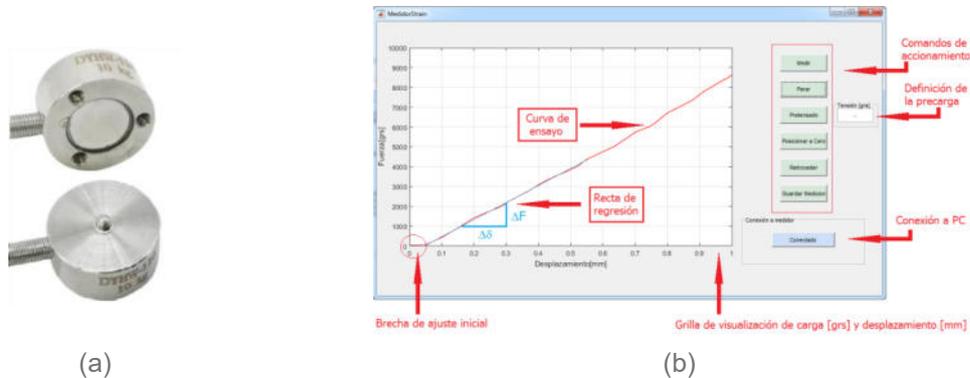


Figura 2: (a) Celda de carga botón. (b) pantalla de comandos de la aplicación MATLAB.

El control del motor paso a paso, junto con la adquisición de datos de la celda de carga, se efectúa mediante una placa microcontroladora conectada a una computadora con la aplicación programada en MATLAB, cuya pantalla de control se muestra y explica en la Figura 2(b) con un ejemplo de ensayo de placa bajo torsión. En la Figura 2(b) se muestra el gap de ajuste inicial que se elimina y ajusta a cero (recomendado por ISO o ASTM) y en azul la recta de regresión de la zona lineal con los incrementos de carga y desplazamiento a usar en las fórmulas.

### 3. SISTEMA DE CONTROL DEL EQUIPO

Los ensayos requieren el conocimiento de la fuerza aplicada a una probeta y el desplazamiento que ha sufrido la misma respecto a su estado inicial, independientemente de la prueba que se esté realizando (flexión, compresión, aplastamiento, etc.). A su vez, también es necesario fijar la velocidad de deformación durante todo el ensayo la cual está asociada a la uniformidad del proceso de deformación en el espécimen. Entonces, como se conoce la relación existente entre el desplazamiento lineal del actuador y el movimiento angular del motor, puede conocerse su desplazamiento  $d$ . Para ello, el eje de salida del motor se encuentra solidario a un encoder rotativo y a un juego de engranajes de relación 1:1, para transmitir el movimiento angular al tornillo. En la Figura 3 se muestra un esquema del sistema implementado. Así, el motor gira el tornillo que mueve el actuador verticalmente y el encoder determina su desplazamiento, que se halla como:

$$d = \frac{\alpha_{pulsos}}{R} dA \left[ \frac{mm}{pulsos} \right] \quad (1)$$

Donde  $\alpha_{pulsos}$  es la resolución del encoder por pulso generado [°/pulso],  $dA$  es el desplazamiento lineal del actuador por vuelta del tornillo [mm/360°] y  $R$  es la relación de

transmisión entre el motor y el tornillo. Por otro lado, el registro de fuerza se realiza a través de una celda de carga, del tipo de compresión, solidaria a la punta del actuador.

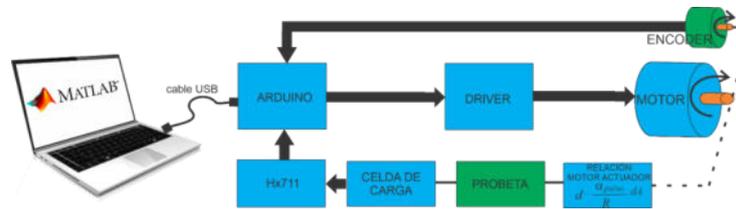


Figura 3: Esquema del sistema de control implementado.

La placa Arduino MEGA es la encargada de realizar el control del sistema de ensayo, recibe los datos de desplazamiento y fuerza, y los envía por cable USB a una computadora donde se está ejecutando la aplicación MATLAB para visualización y almacenamiento. La aplicación facilita la configuración del contexto de ensayo: definición de rangos de medición, ajustes de precarga, manipulación y registro de datos experimentales y visualización de las variables de ensayo. Dado que todo el sistema de operación está programado en MATLAB, se puede efectuar la manipulación de los datos crudos almacenados, por ejemplo: irregularidad por juego inicial (ver Figura 2(b) en el arranque del ensayo, la cual se elimina según normas ASTM, ISO o DIN), o cálculo de curvas de regresión, cálculo de estadísticas, etc., aprovechando los comandos MATLAB. A fin de minimizar el ruido existente en el sistema de medición, se establecieron diferentes mecanismos de mitigación. Entre ellos se mantuvo el cable original (compensado en temperatura) de la celda de carga, se unificaron las mallas del sistema junto con la masa de la celda, se colocó un filtro pasa bajos entre la celda y el amplificador de instrumentación (HX711), se minimizó el largo del conexionado entre la placa HX711 con la placa Arduino.

## 4. TIPOS DE ENSAYO Y ACCESORIOS

### 4.1. Ensayos de flexión en barras

En la Figura 4(a) se muestra la forma de sollicitación y dimensiones del espécimen para determinar el módulo de elasticidad por flexión de barra en voladizo.  $L$  es la distancia del empotramiento al punto de contacto de la carga  $F$ , mientras que  $b$  y  $t$  son el ancho y el espesor de la sección respectivamente. La probeta de la Figura 4(a) es un ejemplar ISO 178 (para este ensayo  $b=10\text{mm}$ ,  $t=4\text{ mm}$ ,  $L=65\text{ mm}$ ), sin embargo también se puede emplear otras dimensiones según lo sugerido en la norma ASTM D790 [7]. La Figura 4(b) muestra el accesorio para contacto puntual del botón de la celda de carga con la barra que se usa para este ensayo a fin de evitar contactos espurios de los bordes de la celda de carga con el espécimen.



Figura 4: (a) Montaje para vigas a flexión. (b) Accesorio para carga puntual.

En la Ecuación (2) se expone la fórmula de cálculo para el módulo de elasticidad por flexión (idéntico al Módulo Young en caso de materiales isótropos):

$$E = \left(\frac{\Delta F}{\Delta \delta}\right) \left(\frac{4L^3}{t^3 b}\right) \quad (2)$$

$\Delta F$  y  $\Delta \delta$  como se aprecia en la Figura 2(b) son los incrementos de fuerza y desplazamiento que permiten calcular la pendiente de la curva de ensayo. La deducción de la Ecuación (2) está asociada a la teoría clásica de flexión de vigas o teoría Bernoulli [11].

#### 4.2. Ensayos de flexión y torsión en placas

En la Figura 5 se muestran probeta y accesorios que se emplean para determinar propiedades elásticas en placas cuadradas de pequeño porte. La Figura 5(a) muestra las dimensiones de la probeta cuadrada, cuyo lado  $B = 50$  mm y espesor  $t \leq 3$  mm, mientras que  $W = 43$  mm. Los puntos (1) ubicados en la cara frontal y los puntos (2) ubicados en la cara posterior, son locaciones donde están los pines de apoyo y los pines para ejercer la carga del ensayo según la norma DIN-ISO 15310 [8], empleando el montaje de la Figura 5(b). Con este ensayo se determina el módulo de elasticidad por corte en el plano XY, mediante la Ecuación (3), siendo  $K_p$  un coeficiente dado por la Ecuación (4). La base teórica de estas expresiones se puede seguir en la literatura técnica científica internacional [9-10].

$$G_{xy} = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \left(\frac{3B^2 K_p}{4t^3}\right) \quad (3)$$

$$K_p = 3 \left(\frac{W}{B}\right)^2 - 2 \left(\frac{W}{B}\right) - 2 \left(1 - \frac{W}{B}\right)^2 \ln \left(1 - \frac{W}{B}\right) \quad (4)$$

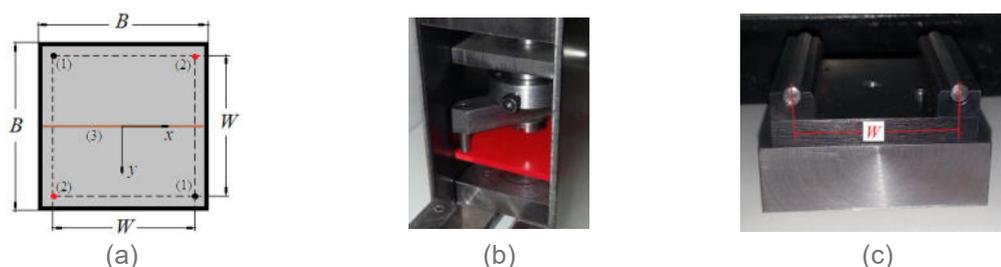


Figura 5: (a) Probeta. (b) Ensayo de torsión de placa. (c) Ensayo de flexión cilíndrica de placa

La línea (3) en la Figura 5(a) identifica el contacto de un accesorio de empuje cilíndrico que con el montaje de la Figura 5(c) (correspondiente al caso de flexión cilíndrica de una placa simplemente apoyada), permite determinar el valor del módulo de elasticidad longitudinal con la siguiente expresión:

$$E = \left(\frac{\Delta F}{\Delta \delta}\right) \left(\frac{W^3}{4t^3B}\right) \quad (5)$$

#### 4.3. Otros Posibles Ensayos

En la Figura 6(a) se muestra el montaje de ensayo para determinar el módulo volumétrico (bulk modulus)  $K_v$  de polímeros flexibles (p. ej. TPU), bajo la inspiración de la norma ASTM D395 [11-12]. La probeta es un cilindro de altura y diámetro:  $H = 15$  mm y  $D = 12.6$  mm respectivamente. El accesorio para el ensayo consta de un cilindro hueco que puede montarse y desmontarse en la placa inferior del accesorio de la Figura 5(b). El orificio del cilindro que aloja la probeta con un huelgo lateral máximo de 0.4 mm., lo cual tolera rugosidades absolutas típicas de piezas impresas. El módulo volumétrico se determina con la siguiente expresión:

$$K_v = \left(\frac{\Delta F}{\Delta \delta}\right) \left(\frac{4H}{\pi D^2}\right) \quad (6)$$



(a)



(b)

Figura 6: (a) Ensayo de módulo volumétrico. (b) Ensayo de pandeo.

En la Figura 6(b) se muestra la disposición para efectuar ensayos compresivos y de pandeo inspirados en la Norma ASTM D695-15 [11,13]. Se emplean las probetas esbeltas más pequeñas que puedan caber en el alojamiento de medición del equipo, cuyas longitudes oscilan entre 45 y 55 mm. Por razones de espacio se sugiere al lector recurrir a las referencias indicadas para mayores detalles de uso de estas normativas y ensayos asociados.

#### 5. ENSAYOS Y ESTUDIOS COMPARATIVOS

La primera actividad consistió en la determinación de módulos  $E$  y  $G_{xy}$  en un juego de planchuelas de Aluminio preparadas con las dimensiones indicadas en la Sección 4.2 y con un espesor de 1.6 mm. La razón de ello radica en corroborar la eficiencia de la máquina con un material conocido y asequible. En la Tabla 1 se muestran los resultados de 4 mediciones independientes, donde para cada espécimen se determinó el módulo  $E$  y luego el módulo  $G_{xy}$ .



A su vez se compara con otras fuentes. Nótese que los valores se hallan en consonancia con los resultados de otras fuentes y con métodos de ensayo más sofisticados, lográndose en el promedio una diferencia máxima no mayor al 8%. Siguiendo el criterio de la Norma ISO 15310 se puede calcular en forma indirecta el coeficiente de Poisson. Lo cual se ha hecho empleando los promedios calculados, obteniéndose  $\nu=0.343$  que difiere en menos del 6% respecto de datos tabulados [16].

Tabla 1. Ensayos en placas de aluminio: Resultado y comparaciones

Tipo de ensayo	Ensayo	$E$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)
Presente máquina y método	1	69.2	25.2
	2	64.9	25.1
	3	70.9	25.1
	4	64.5	24.9
	Promedio	<b>67.4</b>	<b>25.1</b>
Al 7075-T6, micro-indentador [14]	Promedio	68.7	----
Al 6061-T6, probeta estándar [15]	Promedio	67.3	----
Aleaciones de Al, Metals Handbook [16]	Rango	68.9 – 73.1	25.5 - 28.0

A continuación, se analiza una muestra de Poli-Ácido Láctico (PLA) de la marca Printalot, de origen argentino. Se emplean las probetas para el ensayo de torsión en placas como la de la Figura 5(a) para calcular el módulo de elasticidad por corte (en este ensayo  $t=2$  mm). El tramado constructivo y la dirección de construcción son factores de evaluación dentro del ensayo. También se ensayan probetas ISO 178 para determinar el módulo de elasticidad longitudinal siguiendo el criterio de la sección 4.1, y compararlo con resultados de otros estudios (bajo flexión de tres puntos y empleando la misma forma de probeta).

Tabla 2. Detalles constructivos de las probetas

Disposición constructiva	Tipo de probeta (norma)	Arreglo angular	
		$\{0/90\}_n$	$\{45/-45\}_n$
Flat	ISO178, ISO15310	$\{0/90\}_n$	$\{45/-45\}_n$
Side	ISO178, ISO15310	$\{0/90\}_n$	$\{45/-45\}_n$

En la Tabla 2 se muestra las características de tales probetas, la identificación “Flat” o “Side” se utiliza en lengua inglesa para evitar confusiones manteniendo la misma nomenclatura de la literatura internacional [2], tal disposición se puede ver en la Figura 7. Para construir las probetas se empleó una impresora Prusa MK3S con espesor de capa de 0.2 mm, “infill” al 100%, un solo perímetro lateral, pigmentación material roja y velocidad de impresión de 30



mm/s. El arreglo angular indicado en la Tabla 2 se halla alineado a la cuadrícula que se muestra en la Figura 7.

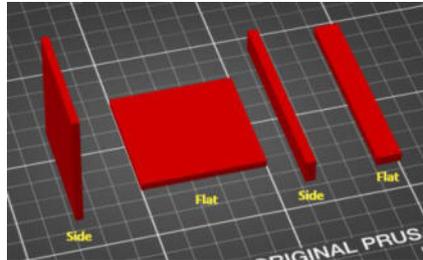


Figura 7: Disposición de las probetas en la plataforma.

En base a criterios adaptados de otros estudios [1,3] se construyeron sets de 5 ejemplares para cada configuración de probeta. En la Tabla 3 se muestran los promedios de cada juego de probetas que según corresponda se trata de módulo de elasticidad longitudinal a flexión ( $E$ ) y módulo de elasticidad por corte transversal ( $G_{xy}$ ).

Tabla 3. Módulos de elasticidad:  $E$  (MPa) y  $G_{xy}$  (MPa) del PLA

Disposición constructiva	Flexión en viga ( $E$ ) forma de ensayo			Torsión en placa ( $G_{xy}$ )
	Stechina [17]	Sección 4.1	Diferencia [%]	
Side $\{0/90\}_n$	3343,6	3102,5	7,2	1296,1
Flat $\{0/90\}_n$	3233,1	3019,9	6,6	1241,1
Side $\{45/-45\}_n$	3217,0	2999,1	6,8	1172,3
Flat $\{45/-45\}_n$	3043,4	2851,8	6,3	1067,1

En la Tabla 3 se puede observar una diferencia del orden de 7% entre los dos enfoques de ensayo sobre el mismo tipo de espécimen. Aun no se ha realizado una cantidad suficientemente extensa de ensayos entre estos enfoques y otros disponibles (propios y de la literatura internacional) como para justificar que se trate de diferencias significativas en el sentido estadístico.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la concepción, características funcionales, constructivas y operativas de una máquina de ensayo portátil para medición de propiedades elásticas, en piezas poliméricas inyectadas, de resinas reforzadas por fibras o construidas con impresión 3D por EMP. La misma se rige por cánones de robustez, simplicidad operativa y diversidad de ensayos poco comunes en una misma unidad. Planificada para ensayar probetas pequeñas y



de materiales ligeros, también se mostró solvente para efectuar ensayos particulares en planchuelas muy esbeltas de metal, que permitieron ponderar su calidad. En particular:

- Se corroboraron datos en relación a los módulos  $E$  y  $G_{xy}$  del aluminio, obteniéndose un rango de confiabilidad superior al 95% con diferencias menores al 8% respecto datos publicados. También se ha calculado el coeficiente de Poisson (en función de los promedios, con una aceptable aproximación tratándose una determinación indirecta).
- Se constató una diferencia del orden del 7% en el módulo de elasticidad a flexión del PLA (empleando la configuración en voladizo) cotejándolo con otros casos de la literatura técnica (ensayos de flexión de tres puntos) y
- Se ha realizado una evaluación del módulo de corte para el PLA, lo que escasea en la literatura técnica.

Aunque se haya presentado un escaso número de ensayos (por razones de espacio no se han mostrado los otros estudios), se desea recalcar que la máquina permitiría realizar otros ensayos que requieran únicamente la información de la fuerza y del desplazamiento. Sin embargo, ello es motivo de futuras ampliaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Tecnológica Nacional por el apoyo a través del proyecto PID 8454 TC.

## REFERENCIAS

- [1] Tymrak B., Kreiger M., Pearce J. *Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions*. Mat. Design 58, 242-246, 2014.
- [2] Chacon J., Caminero M., García-Plaza E., et al. *Additive manufacturing of PLA structures using fused depositing modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection*. Mat. Design 124(15), 143-157, 2017.
- [3] Zeleny P., Safka J., Eljina I. *The mechanical characteristics of 3D printed parts according to the build orientation*, Applied Mechanics and Materials 474, 381-386, 2014.
- [4] Caminero M., Chacón J., García-Plaza E., Núñez P., Reverté J., Becar J. *Additive Manufacturing of PLA Based composites using Fused Filament Fabrication: Effect of Graphene Nanoplatelet Reinforcement on Mechanical Properties, Dimensional Accuracy and Texture*. Polymers 11, 799-821, 2019.



- [5] Mainetti C., Romero A., Piovan M. *Development of automated testing machine for polymers used in 3D printing*. Revista Tecnología y Ciencia 38, 50-66, 2020.
- [6] ASTM D 4255/D 4255M-01. Standard Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2001.
- [7] ASTM D790-02. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2002.
- [8] DIN-EN-ISO 15310:2005. Fibre-reinforced plastic composites determination of the In-plane shear modulus by the plate twist method. German Institute of Standardization, Berlin, 2005.
- [9] Yoshihara H. *Shear Modulus and Shear Strength Evaluation of Solid Wood by a Modified ISO 15310 Square-Plate Twist Method*. DRVNA INDUSTRIJA 63(1), 51-55, 2012.
- [10] Guillen Rujano R., Avilés F., Vidal-Lesso A., Hernandez-Perez A. *Closed-Form solution and analysis of the plate twist test in sandwich and laminated composites*. Mechs of Materials 155, 103756, 2021.
- [11] Forster A. Materials testing standards for additive manufacturing of polymer materials: state of the art and standards applicability (NISTIR 8059). National Institute of Standards and Technology. US Dept of Commerce, 2015.
- [12] Aritan S. Bulk modulus. Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering. Wiley and Sons Inc. DOI:10.1002/9780471740360.ebs0206., 2006.
- [13] Virgin L. *On the flexural stiffness of 3D printer thermoplastic*. Int J Mech Eng Educ 45(1):59–75, 2017
- [14] Feng C., Kang B. *Young's Modulus Measurement Using a Simplified Transparent Indenter Measurement Technique*. Experimental Mechanics 48, 9-15, 2008.
- [15] Cho Y., Kim T. *Estimation of ultimate strength in single shear bolted connections with aluminum alloys (6061-T6)*. Thin-Walled Structures 101, 43-57, 2016.
- [16] Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th Ed. 1990
- [17] Stechina D., Mendoza S., Martín H., Maggi C., Piovan M. *Determination of elastic properties of polymeric pieces constructed by 3D printing, subjected to bending*. Revista Matéria, 25(2), 2020



## DISEÑO Y ANÁLISIS DE SOPORTE DE AMETRALLADORA MONTADO SOBRE UN VEHÍCULO

**Bernardo Scorciapino, Pablo Vilar, Elvio Heidenreich**

Facultad de Ingeniería del Ejército, Universidad de la Defensa Nacional, Av. Cabildo 15  
(C1426AAA) C.A.B.A. - República Argentina.  
bscorciapino@fie.undef.edu.ar, pvilar@fie.undef.edu.ar, elvioh@fie.undef.edu.ar.

### RESUMEN

En este trabajo se presenta la metodología para el diseño y análisis de un soporte de ametralladora calibre 7,62 mm que va montado sobre un vehículo todo terreno. Para su desarrollo se obtuvieron las cargas dinámicas, como la aceleración vertical del vehículo en distintos terrenos y condiciones, y la fuerza de retroceso de la ametralladora. Se utilizaron técnicas de diseño asistido por computadora y simulaciones numéricas con el método de elementos finitos para optimizar la geometría y verificar su resistencia a la fatiga.

Los resultados muestran que el soporte cumple con las especificaciones requeridas y presenta un buen desempeño en términos de rigidez y estabilidad. El aporte principal de este trabajo es el desarrollo de un método sistemático y riguroso para el diseño y análisis de soportes de ametralladora montados sobre vehículos, que puede contribuir a mejorar la seguridad y el desempeño de elementos que utilicen este sistema de armas en operaciones militares.

**Palabras Clave:** *Dinámica, Diseño de soporte, Fuerza de retroceso.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La industria de defensa y seguridad se caracteriza por su constante búsqueda de mejoras y avances tecnológicos para optimizar el rendimiento y la seguridad de los sistemas utilizados en los distintos equipos militares. En particular, los soportes de ametralladoras montados en vehículos desempeñan un papel crucial en operaciones militares al proporcionar una plataforma estable y segura para el despliegue de armas de fuego.

El objetivo de este proyecto de ingeniería mecánica es utilizar herramientas de diseño y análisis de elementos finitos para desarrollar un soporte mecánico eficiente y resistente para una ametralladora que va montado sobre la jaula antivuelco de un vehículo (Figura 1). Se busca abordar la necesidad de un diseño optimizado y un análisis exhaustivo que garantice la seguridad y el rendimiento de los soportes de ametralladoras montados en vehículos, teniendo en cuenta las cargas dinámicas generadas por el vehículo en movimiento en distintos terrenos, así como la fuerza de retroceso generada por la propia ametralladora.



Figura 1. Ametralladora MAG montada en el soporte mecánico sujeto a la jaula antivuelco del vehículo Polaris MRZR-4.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1 Vehículo Polaris MRZR-4

El MRZR-4 (Figura 2), es un LTATV (Tactical Light All Terrain Vehicle) que sigue un diseño convencional, con el motor ubicado en la parte delantera, el habitáculo de la tripulación en el centro y un compartimento de carga en la parte trasera. Este vehículo 4x4 ofrece una excelente capacidad para operar en terrenos difíciles y variados [1].



Figura 2. Vehículo Polaris MRZR-4.

### 2.1.2 Ametralladora MAG

La ametralladora MAG (Mitrailleuse d'Appui Général), calibre 7,62 mm NATO (Figura 3), es un arma de fuego de gran potencia y versatilidad que se ha ganado una reputación mundial como una ametralladora de propósito general confiable y efectiva [2].



Figura 3. Ametralladora MAG calibre 7,62 mm. montada en soporte diseñado

### 2.1.3 Materiales que componen el soporte

Para la fabricación del soporte, se seleccionaron los materiales más adecuados que cumplieran con los requisitos de resistencia y durabilidad necesarios. La elección principal para la estructura del soporte fue el aluminio 6061-T6, conocido por su alta resistencia y excelente capacidad de mecanizado. Este material proporciona una combinación óptima de resistencia y peso ligero, lo que resulta fundamental para mantener la estabilidad y la maniobrabilidad del sistema. Además del aluminio 6061-T6, se incorporaron componentes de acero SAE 1045 y 1020 para áreas específicas del soporte que requieren una mayor rigidez, resistencia y soldabilidad [3].



## 2.2. Métodos

La metodología empleada en este trabajo se dividió en los siguientes pasos:

- Relevamiento de dimensiones del vehículo: Se realizaron mediciones precisas de las dimensiones necesarias del vehículo.
- Determinación de aceleraciones: Se utilizaron acelerómetros triaxiales, junto con un dispositivo de adquisición de datos LABJACK para determinar las aceleraciones a las que está sometido el vehículo en distintos terrenos y condiciones.
- Medición de fuerza de retroceso: Se utilizó una celda de carga, para medir la fuerza de retroceso generada por la ametralladora durante el disparo.
- Cálculos de esfuerzos estáticos y dinámicos: Se realizaron cálculos de esfuerzos estáticos y dinámicos en el diseño inicial del soporte mecánico. Estos cálculos se validaron mediante el análisis utilizando el método de elementos finitos.
- Iteraciones de diseño y cálculo: Se llevaron a cabo varias iteraciones del proceso de diseño y cálculo, buscando lograr un equilibrio adecuado entre peso y resistencia en el soporte mecánico.

## 3. DESARROLLO

### 3.1. Relevamiento del vehículo

Para la correcta implementación del soporte mecánico, se llevaron a cabo mediciones exhaustivas de las dimensiones del vehículo, centrándose en los diámetros, espesores y ángulos de los caños que conforman su estructura, así como las dimensiones del habitáculo del apuntador. Estos datos son esenciales para el dimensionamiento y diseño adecuado del soporte, ya que se deben adaptar a las características específicas del vehículo y garantizar una integración óptima. Creando así un modelo virtual tridimensional que representa la parte de la estructura del vehículo, donde trabaja el soporte mecánico (Figura 4).

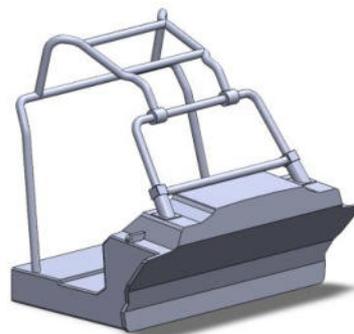


Figura 4. CAD del habitáculo del apuntado del vehículo Polaris MRZR-4.



## 3.2. Determinación de las cargas de trabajo

### 3.2.1 Fuerzas que intervienen en el dimensionamiento del soporte mecánico

Utilizando el CAD del conjunto, se llevó a cabo un análisis para determinar el centro de masa tanto de la ametralladora, como del soporte mecánico desarrollado (Figura 5). Este análisis es crucial para comprender y tener en cuenta la distribución de peso de los componentes, lo que influye en la estabilidad y el equilibrio del sistema en su conjunto.

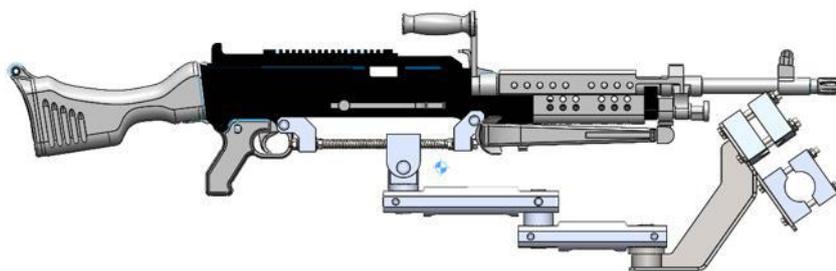


Figura 5. Ubicación del centro de masa de la ametralladora MAG y el soporte mecánico.

### 3.2.2 Cargas dinámicas.

Con el objetivo de obtener las cargas dinámicas a las que se someterá el soporte mecánico, se llevaron a cabo mediciones utilizando acelerómetros instalados en puntos específicos en el vehículo (Figura 6 y 7). Estos acelerómetros registraron las aceleraciones experimentadas en diferentes situaciones de conducción y en diversos terrenos, dando como resultado una aceleración vertical máxima de 3g (29,42 m/s<sup>2</sup>).

Las mediciones obtenidas a través de los acelerómetros brindan información precisa sobre las cargas dinámicas que afectarán al soporte mecánico. Esta información es esencial para evaluar y dimensionar adecuadamente los componentes del soporte, asegurando que puedan soportar y resistir las cargas máximas esperadas sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad del sistema.



Figura 6. Instalación del equipamiento para medir las aceleraciones en el vehículo Polaris MRZR-4.



Figura 7. Ubicación del acelerómetro durante el ensayo.

### 3.2.3 Fuerza de disparo de la Ametralladora

Se llevó a cabo un ensayo específico para determinar la fuerza de retroceso generada por la ametralladora (Figura 8). Para llevar a cabo este ensayo se utilizó una celda de carga, mediante la cual se obtuvo un valor máximo de la fuerza de retroceso de 1500 N.

La celda de carga es un dispositivo de medición que se utiliza para cuantificar la fuerza ejercida sobre él. En el caso de este ensayo, la celda de carga fue instalada de manera precisa y segura en la ametralladora (Figura 9).



Figura 8. Ensayo de la fuerza de retroceso de una ametralladora.



Figura 9. Ubicación del acelerómetro y la celda de carga durante el ensayo.

### 3.3. Cálculo analítico de componentes

Con base en los datos recopilados y el diseño inicial del soporte mecánico, se llevaron a cabo los cálculos analíticos de los esfuerzos a los que estarán expuestos los diferentes componentes. El objetivo principal fue verificar los respectivos coeficientes de seguridad (Tabla 1).

Para este propósito, se tuvieron en cuenta dos fuerzas fundamentales (Figura 10). La primera de ellas es la fuerza  $F_p$ , que representa la resultante de la suma de todas las cargas afectadas por la gravedad, donde se incluye el peso de la ametralladora más una cinta de 50 municiones calibre 7,62 mm y el peso del soporte. La suma de las masas correspondientes a estos pesos se multiplicó por la aceleración vertical determinada a partir del estudio de las cargas dinámicas



(acápito 3.2.2) que actúan sobre el vehículo. La segunda fuerza considerada fue  $F_r$ , la cual surge debido a la fuerza generada por el disparo de la ametralladora [4].

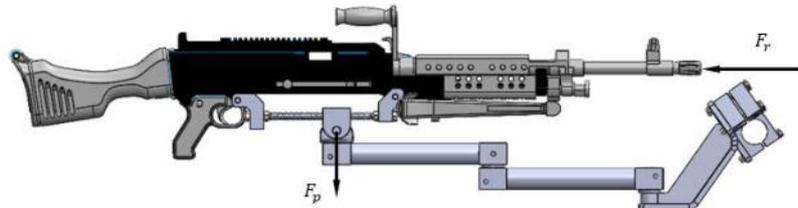


Figura 10. Fuerzas que intervienen en el análisis del soporte mecánico.

Se calculan los coeficientes de seguridad de los componentes principales a partir de la carga máxima de trabajo para cada componente y un estado nulo de carga teniendo así un valor de tensiones alternante y medio iguales en todos los casos debiendo por ello aplicar un criterio de fatiga, utilizando en nuestro caso el criterio de Soderberg [5].

Tabla 1. Resultado del cálculo analítico de los componentes

Descripción del Componente	Factor de seguridad ante una falla dinámica
Bulones	$n = 2,4$
Base principal del soporte	$n = 2,6$
Pie principal del soporte	$n = 1,5$
Cordón de soldadura del pie principal del soporte	$n = 1,7$

### 3.4. Análisis completo del soporte mecánico a través de elementos finitos por medio del software ANSYS

#### 3.4.1 Discretización geométrica

Se realizó un mallado compuesto por elementos placa y volumétricos estructurados y no estructurados (Figura 11). Los elementos tipo placa representan las piezas de poco espesor (chapas) y los elementos sólidos 3D tetragonales para el resto de las piezas.

El elemento placa se utilizan en geometrías tipo cáscara (chapas) que se caracterizan por tener una de sus dimensiones muy pequeña en comparación con las otras dos (Tabla 2). Esta característica permite durante el modelado geométrico prescindir de esta dimensión, pudiendo así representarse mediante superficies. Es preciso resaltar que la omisión de su grosor aplica



sólo en su representación gráfica y modelado geométrico; sin embargo, su magnitud es considerada para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y masas. Su aplicación radica fundamentalmente en la finalidad de reducir la cantidad de elementos sin perder calidad en los resultados numéricos.

Tabla 2. Características del mallado empleado.

Característica	Valor
Cantidad total elementos	352.334
Cantidad de nodos	556.362
Longitud promedio (mm)	1,5 mm
Calidad elementos promedio	0,82



Figura 11. Discretización geométrica y detalle de mallado.

### 3.4.2 Condiciones de contorno

El soporte se fijará en los apoyos que van sujetos a los caños de la jaula antivuelco del vehículo, utilizando para ellos una restricción en desplazamientos y giros [6] en todos los sentidos (Figura 12).

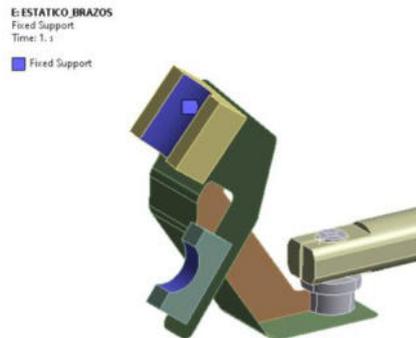


Figura 12. Fijaciones.

### 3.4.3 Hipótesis de modelado.

- Estudio elástico lineal: no se tomaron en cuenta los efectos no lineales del material.
- Material isotrópico: el material posee las mismas propiedades en todas sus direcciones.
- Los contactos entre piezas se modelan como Bonded, significa que no se permite deslizamiento o separación entre componentes.

### 3.4.4 Condiciones de carga.

Las cargas aplicadas son las utilizadas previamente en la parte analítica, se analizarán dos condiciones (Figura 13).

CASO A: considerándose una carga remota (ubicada sobre el eje de los resortes recuperadores del afuste) de 1100 N en sentido horizontal. En este caso se simula la acción del disparo con brazo extendido.

Una carga remota, es una fuerza aplicada en un punto en el espacio que tiene la capacidad de transmitir cargas y momentos sobre una geometría definida.

CASO B: considerándose una carga aplicada directamente sobre el perno de 800 N en sentido vertical. En este caso se simula el soporte extendido en su máxima longitud y su comportamiento en campo travesa (situación fuera de lo común, ya que se transportaría con brazo retraído).

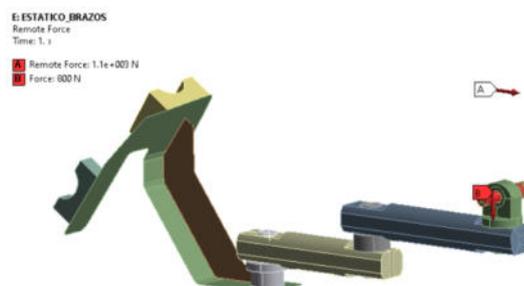


Figura 13. Cargas Aplicadas en ambos casos.



### 3.4.5 Resultados

Se muestran los valores de esfuerzos equivalentes de Von Mises para cada situación de carga (Figura 14 y 15).

#### CASO A

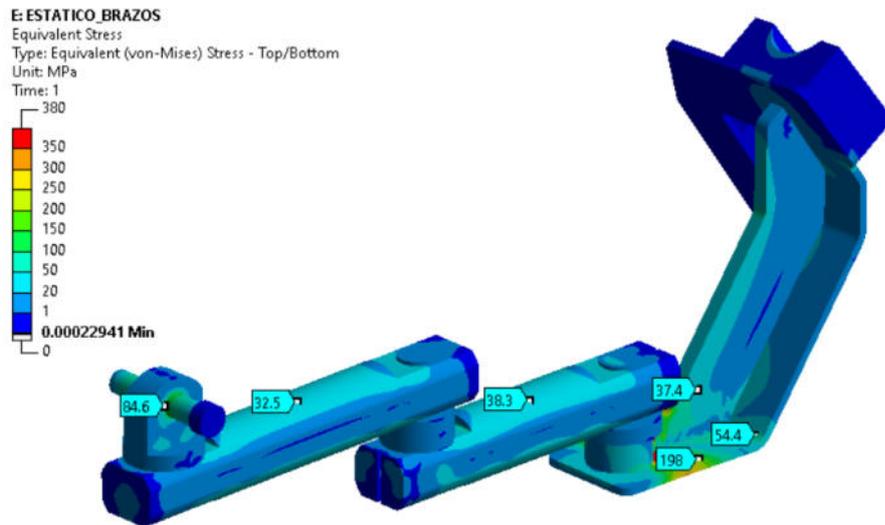


Figura 14. Tensiones Von Mises [MPa].

#### CASO B

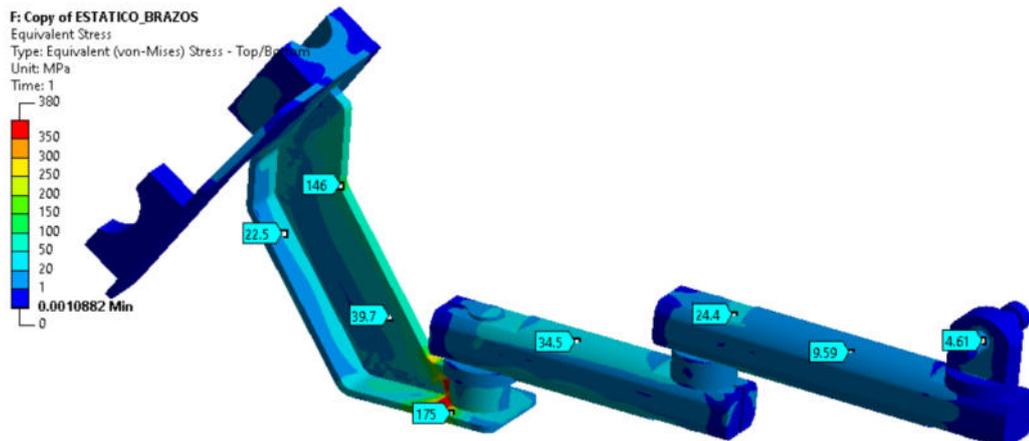


Figura 15. Tensiones Von Mises [MPa].

En las (Figuras 14 y 15) (en color rojo), se ve una concentración de esfuerzos en el canto y en el refuerzo en la unión de los elementos placa y volumétricas. Esta es una tensión elevada producto de la no conformidad de malla en parte y en parte por las aristas vivas de la geometría. Dicha



zona de tensión elevada se encuentra sectorizada y produce una deformación plástica localizada que no produce deformaciones en la estructura que afecten su integridad.

#### 4. CONCLUSIONES

Se diseñó y fabricó un soporte íntegramente en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería del Ejército valiéndose de datos de carga medidos experimentalmente sobre el arma y el vehículo.

El diseño se enfocó a que sea un conjunto fácilmente fabricable y del menor peso posible, por ese motivo se utilizó aluminio en su mayoría y chapas de acero en donde es necesaria mayor rigidez y resistencia para evitar desplazamientos que afecten el uso de este.

Dado que el soporte recibe una carga dinámica durante el disparo a una frecuencia igual a la cadencia del arma y otra carga dinámica por las cargas de aceleración vertical de magnitud y frecuencias variables el diseño fue realizado pensando en no sobrepasar una resistencia a la fatiga establecida para determinados ciclos de carga según el criterio utilizado.

#### 5. REFERENCIAS

[1] Borda Bettolli C. *Movilidad ultraligera: El Polaris MRZR-4*. Revista Zona Militar. <https://www.zona-militar.com>. 2016.

[2] PT – 21 – 92. *Ametralladora MAG Cal 7,62 mm*. Impreso en el Instituto Geográfico Militar. 1984.

[3] Askeland Donald R. y Wright Wendelin J. *Ciencia en ingeniería de materiales*. Séptima Edición, CENGAGE Learning. 2017.

[4] Goodno Barry J. y Gere James M. *Mecánica de Materiales*. Novena Edición, CENGAGE. 2019.

[5] Budynas Richard G. y Nisbett J. Keith. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Décima Edición, Mc Graw Hill. 2019.

[6] Ansys, Inc. *Mechanical User's Guide, 2023*.



## Análise de falhas de ignição automotiva a partir da técnica de análise de árvore de falhas (FTA).

Anne Karoline Cardoso Macedo<sup>1</sup>, Gustavo Lima da Silva<sup>1</sup>, Víctor Borges Rodrigues<sup>1</sup>,  
Márcio Andrade Rocha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA , Campus Jequié John Kennedy s/n Loteamento - Cidade Nova, Jequié, BA, Brasil - karolcardoso7@gmail.com; gustavolimadasilva.eng@gmail.com; vittoborges@hotmail.com; rochandrademarcio@hotmail.com.

### RESUMO

O objetivo deste estudo é aplicar técnicas de análise de falhas no componentes que formam a ignição automotiva, a fim de identificar as principais causas de falhas em seu funcionamento e propor soluções para evitar sua ocorrência.

Falhas de ignição podem causar diversos problemas nos veículos, como diminuição da eficiência do motor, aumento no consumo de combustível e até mesmo perda de controle do veículo, resultando em acidentes graves. Portanto, é essencial realizar uma análise de falhas nesse componente caso queira garantir a segurança e a confiabilidade dos veículos.

A metodologia deste estudo consiste na aplicação de técnicas de análise de falhas, a análise de árvore de falhas (FTA), com base em informações de falhas ocorridas em bobinas de ignição automotiva. Além disso, será realizada uma pesquisa para que possa embasar e validar as hipóteses levantadas na análise de falhas.

Espera-se que a análise de falhas na bobina de ignição permita identificar as principais causas de problemas nesse componente, como falhas na isolamento elétrico, problemas de dissipação de calor e desgaste de componentes internos. Com base nos resultados, serão propostas soluções para evitar a ocorrência desses problemas, como a utilização de materiais mais resistentes e aprimoramento das práticas de manutenção preventiva.

Este estudo contribui para a melhoria da segurança e confiabilidade dos veículos, além de auxiliar na redução de custos com manutenção e reparos de componentes. A aplicação das técnicas de análise de falhas também pode contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais mais duráveis e resistentes a condições adversas de uso, beneficiando toda a indústria automotiva.

**Palabras Clave:** *Ignição automotiva, Diagnóstico, Análise de árvore de falhas.*



## 1. INTRODUÇÃO

A ignição é um dos processos fundamentais nos motores de combustão interna, desempenhando um papel crucial no funcionamento adequado e eficiente dos veículos automotivos, como mostra [1] os motores de ignição por centelha utilizam a energia da centelha elétrica da vela de ignição para dar início a reação de combustão, de contrapartida os motores de ignição por compressão utilizam o aumento da temperatura devido a compressão de uma massa de ar para dar início a reação de combustão. No entanto, problemas de ignição podem levar a mau desempenho do motor, aumento do consumo de combustível e, em casos extremos, até mesmo a falhas completas do sistema. Portanto, a identificação e resolução rápida desses problemas são de extrema importância para garantir a segurança e o bom funcionamento dos veículos.

Nesse contexto, a análise de falhas de ignição automotiva desempenha um papel essencial na detecção das possíveis causas e efeitos desses problemas. Uma abordagem eficaz para realizar essa análise é a técnica de análise de árvore de falhas (FTA). Parafraseando [2] a FTA é uma ferramenta sistemática e estruturada que permite mapear os eventos, falhas e caminhos de falha de um sistema, facilitando a compreensão das inter relações entre eles, assim sendo uma ferramenta que trabalha com causas e efeitos de falha.

Ao aplicar a técnica de análise de árvore de falhas à ignição automotiva, é possível identificar os principais eventos que levam a falhas de ignição, como mau funcionamento da vela de ignição, problemas no sistema de alimentação de combustível ou defeitos no sistema de ignição eletrônica. Além disso, a FTA permite avaliar a criticidade dessas falhas e identificar medidas preventivas ou corretivas adequadas para mitigar os riscos associados.

Neste artigo, foi apresentado uma análise detalhada das falhas de ignição automotiva utilizando a técnica de análise de árvore de falhas (FTA). Sendo descrita a metodologia adotada, os principais resultados obtidos e a discussão da importância dessa abordagem para a identificação precoce e a solução efetiva de problemas de ignição. Ao compreender melhor as causas e efeitos das falhas de ignição, pode contribuir para o aprimoramento contínuo dos sistemas automotivos, visando a um desempenho mais seguro e confiável dos veículos.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

A Análise da Árvore de Falhas (FTA) é uma metodologia que nasceu na indústria aeroespacial, sendo utilizada conseqüentemente na indústria nuclear, alcançando as indústrias de processo,

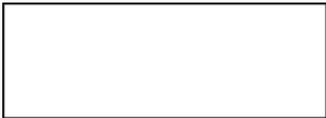
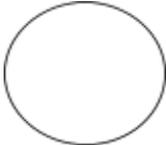


por se tratar de uma das ferramentas mais úteis para análise de risco [3]. Amplamente utilizada para avaliar a confiabilidade e a segurança de sistemas complexos. Ela permite a identificação e análise das possíveis causas e efeitos de falhas em um sistema, por meio da representação de um diagrama das relações lógicas entre os eventos e as falhas.

Os principais elementos-chave da FTA incluem:

1. **Eventos:** São as ocorrências que podem influenciar o funcionamento de um sistema. No contexto da análise de falhas de ignição automotiva, exemplos de eventos podem incluir "falha na vela de ignição" ou "perda das conexões com a bateria".
2. **Falhas:** Representam as condições indesejáveis ou avarias que podem ocorrer em um sistema. No caso da ignição automotiva, as falhas podem ser a "ausência de faísca na vela de ignição" ou "perda de potência".
3. **Nós lógicos:** São os pontos de junção ou decisão no diagrama de árvore, onde diferentes eventos e falhas são combinados. Os nós lógicos podem ser operadores "E" (AND) ou "OU" (OR), dependendo das relações entre os eventos e falhas no sistema.

**Tabela 1.** Simbologia da Árvore de Falhas [4].

Símbolo Lógico	Evento
	Eventos que são saídas de portas lógicas
	Eventos associados a falhas básicas



A utilização da técnica de análise de árvore de falhas em sistemas automotivos, com foco específico na ignição, envolve a identificação dos eventos e falhas relevantes para esse sistema. Por exemplo, podemos ter eventos como é informado na tabela 1, sendo principais ou adjacentes a ocorrência inicial como "falha na vela de ignição", "problemas com a alimentação da bateria" e "defeitos no sistema de ignição eletrônica". A partir desses eventos, constrói-se um diagrama de árvore que mapeia as relações lógicas entre eles, identificando os caminhos de falha que levam a uma falha de ignição.



**Figura 1:** Fluxograma da sequência de procedimentos da FTA [4].

A aplicação da técnica de análise de árvore de falhas (FTA) em sistemas automotivos permite aos engenheiros analisar diferentes falhas na ignição, identificar suas causas raiz e desenvolver estratégias de prevenção ou mitigação. Isso inclui a implementação de medidas de manutenção preventiva, como a substituição regular de velas de ignição e a verificação periódica dos componentes que englobam o sistema de ignição. A FTA oferece uma abordagem estruturada e lógica como na figura 1 para a análise de falhas, permitindo uma compreensão mais clara das inter-relações entre os eventos e falhas envolvidos. Essa abordagem busca aprimorar a segurança, a confiabilidade e o desempenho dos sistemas automotivos.



A figura 2 ilustra um exemplo simplificado de árvore de falhas.

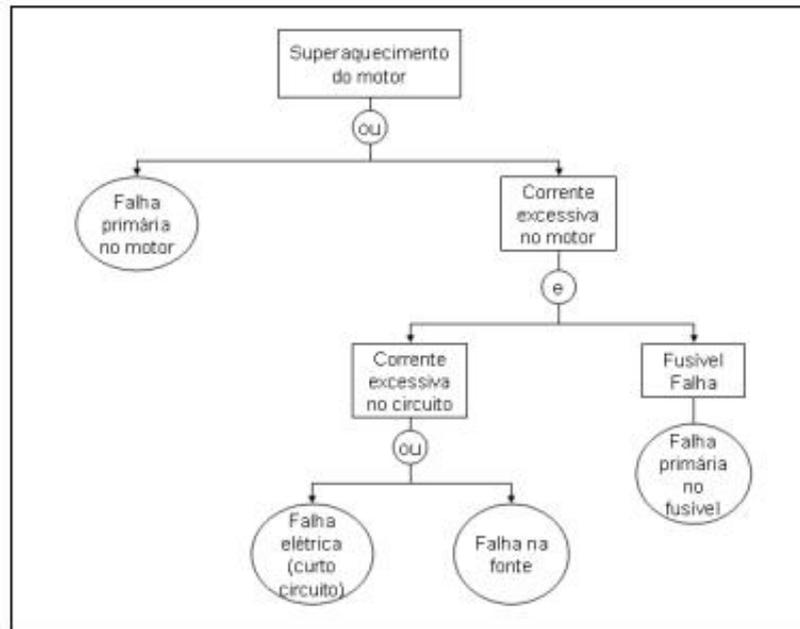


Figura 2: Diagrama de FTA do superaquecimento de motor [4].

### 3. METODOLOGÍA

A intenção deste estudo é compreender os principais problemas e suas causas raiz nos sistemas de ignição automotiva, além de explorar métodos de diagnóstico preventivo e preditivo para esses problemas. Para isto, faz-se necessário obter dados relevantes sobre esses problemas.

A coleta de dados será feita através de parcerias com oficinas mecânicas locais, onde será aplicado um processo de coleta de informações dos veículos que chegam com problemas de ignição. Esse processo inclui o preenchimento de um formulário de pesquisa pelos mecânicos responsáveis, que será realizado com a autorização prévia dos proprietários dos veículos.

O formulário de pesquisa deve ser cuidadosamente projetado para coletar informações-chave sobre os problemas de ignição. Nele, será incluso perguntas básicas, como:

- O tipo de ignição do veículo;
- Marca, modelo e ano do veículo;
- Qual foi o problema identificado;
- Qual foi a causa do problema identificado;



- Quais foram as correções e soluções aplicadas.

A precisão e a completude das informações serão asseguradas pelo preenchimento realizado pelos mecânicos responsáveis, que deverão ser devidamente instruídos antes do início da coleta.

Os autores irão acompanhar o processo de pesquisa com visitas presenciais quinzenais, dada a importância de fornecer suporte e orientações contínuas aos mecânicos responsáveis pelo preenchimento dos formulários. Estas visitas também são uma oportunidade para identificar pontos de refinamento e melhoria no formato da pesquisa.

O formulário poderá ser disponibilizado em duas formas: através de um site online ou através de material impresso, que será repostos pelos autores durante as verificações quinzenais. A escolha pelo meio de pesquisa dependerá do nível de acesso a tecnologia de cada empresa, que deve ser avaliada juntamente com os responsáveis pela oficina mecânica.

A pesquisa será conduzida até que tenhamos uma base de dados suficientemente variada. É essencial garantir que a amostra de veículos abranja diferentes tipos de ignição, modelos, anos e problemas, a fim de evitar qualquer viés na análise que será realizada posteriormente. A inclusão de uma variedade de cenários e problemas diferentes contribuirá para uma análise mais abrangente e representativa.

Com os dados, a análise de árvore de falhas (FTA) será realizada com base nas causas raiz identificadas na pesquisa. Sua aplicação se dá nas seguintes etapas:

- Definição do objetivo: Deve-se claramente definir o objetivo da análise de árvore de falhas. Neste estudo, o objetivo é identificar as causas raiz dos problemas de ignição automotiva.
- Identificação do evento indesejado: Determinar qual é o evento indesejado que deseja-se analisar. No caso da ignição automotiva, pode-se ter como evento indesejado a falha na partida do veículo, contudo, como a pesquisa abrangerá vários eventos indesejados, há margem para analisar o evento de maior ocorrência ou mais de um evento.
- Desenvolvimento do diagrama de árvore de falhas: Para construir o diagrama de árvore de falhas, inicia-se com o evento indesejado no topo da árvore e divide-o em causas básicas ou primárias. Cada causa básica será decomposta até alcançar a causa raiz.
- Identificação das causas básicas: Geralmente, são relacionadas a falhas de componentes, erros humanos, condições operacionais inadequadas, entre outros.



- Estabelecimento das relações de causa e efeito: Determinar as relações de causa e efeito entre as diferentes causas básicas identificadas. Isso significa identificar como uma causa contribui para a ocorrência de outra causa e como essas causas se relacionam com o evento indesejado.
- Avaliação das probabilidades e taxas de falha: Atribua probabilidades ou taxas de falha às diferentes causas básicas. Essas probabilidades podem ser estimadas com base em dados históricos, estatísticas, especialistas no assunto ou informações disponíveis na literatura técnica.
- Análise da árvore de falhas: Para analisar as causas raiz mais prováveis do evento indesejado, é determinado, através do cálculo das probabilidades para cada caminho na árvore, aqueles que têm maior contribuição para o evento indesejado.

Com base nas causas raiz identificadas por meio da análise de árvore de falhas, será possível explorar métodos de diagnóstico preventivo e preditivo para problemas de ignição. Isso pode incluir a revisão de práticas de manutenção recomendadas, a implementação de testes e inspeções regulares, o uso de tecnologias de diagnóstico avançadas e outros métodos de monitoramento preventivo. Essas estratégias visam identificar problemas potenciais antes que eles se tornem mais graves e afetem o desempenho do sistema de ignição.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente pesquisa buscou compreender os principais problemas e causas raiz nos sistemas de ignição automotiva, bem como explorar métodos de diagnóstico preventivo e preditivo para esses problemas. No entanto, apesar dos esforços realizados, os resultados obtidos não foram totalmente conclusivos devido à limitação na disponibilidade de dados.

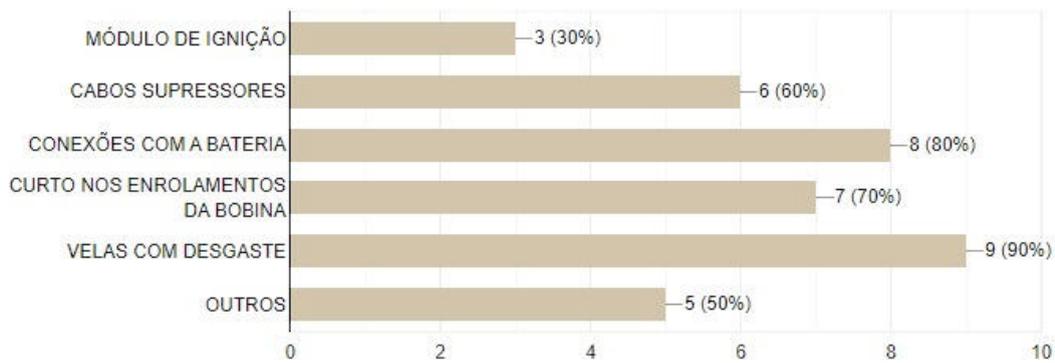
A coleta de informações por meio de parcerias com oficinas mecânicas locais foi planejada para fornecer dados relevantes sobre problemas de ignição. No entanto, a quantidade de dados obtida não foi suficiente para realizar uma análise abrangente e conclusiva.

A falta de dados, foi-se atribuída pela quantidade de oficinas mecânicas locais que atuam na resolução da falha na ignição, assim limitando os números de casos de problemas de ignição registrados.

Acompanhar presencialmente o andamento da pesquisa nas empresas, com uma maior frequência, pode ajudar na priorização do processo e reforço das boas práticas de preenchimento pelos mecânicos. Uma outra forma de contornar os fatores externos, pode ser simplificar o formulário, pensando em uma nova estrutura mais objetiva, ou tornar algumas informações opcionais.



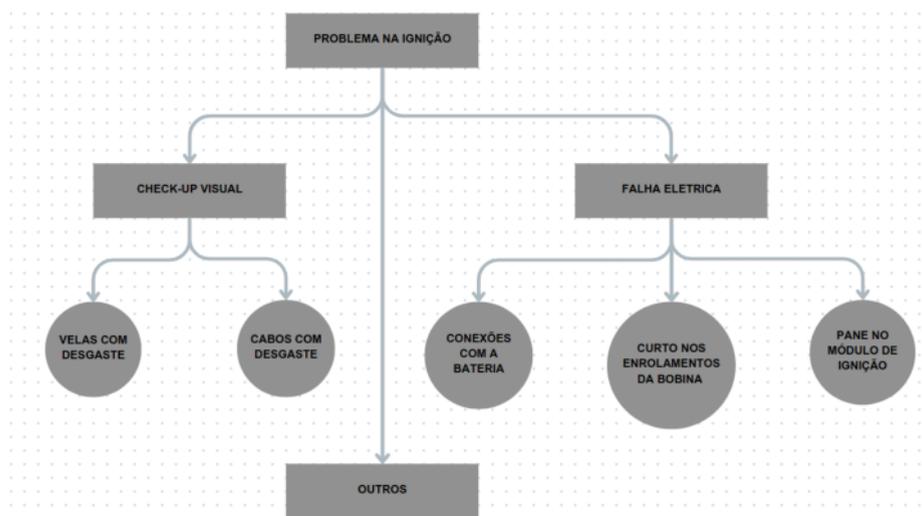
Por meio deste formulário, foi listado os problemas que são agravantes para a falha na ignição. A partir dos dados captados e computados pelas entrevistas das oficinas parceiras, foi possível demonstrar através de um gráfico quantitativo figura 3 a porcentagem dos problemas agravantes.



**Figura 3:** Gráfico dos problemas nas falhas de ignição.

Desse modo, foi observado que as velas com desgaste apresenta 90% dos casos e o módulo de ignição 30% dos casos. Ainda que tenha sido uma quantidade limitante de casos, esses dados foram utilizados para obter resoluções para os problemas nas falhas de ignição.

Isto posto, das 20 oficinas entrevistadas, apenas 10 participaram como parceiras por trabalharem com a resolução de falhas de ignição. Dito isso, foi apresentado o seguinte diagrama de FTA:



**Figura 4:** Diagrama de FTA dos problemas na ignição.



A escassez de dados impossibilitou o desenvolvimento da análise de árvores de falhas, uma vez que, a diversidade de cenários e problemas é fundamental para uma análise abrangente e fidedigna. A falta de representatividade na amostra de veículos e problemas de ignição podem ter comprometido a identificação das causas mais significativas.

Diante dessas limitações, é importante reconhecer que a generalização dos resultados do estudo é inviável. A falta de conclusões firmes ressalta a necessidade de expandir o escopo da pesquisa e aumentar a amostra de dados para uma análise desenvolvida.

Recomenda-se, portanto, que sejam estabelecidas parcerias adicionais com um maior número de oficinas mecânicas e busquem estratégias para incentivar uma participação mais abrangente. Garantindo uma base de dados mais representativa, permitindo uma análise mais precisa e conclusiva dos problemas e causas nas ignições automotivas.

## 5. CONCLUSÃO

Logo, será necessária a expansão da coleta de dados em busca de diferentes fontes de informação. Dessa forma, é fundamental a obtenção de um conjunto desenvolvido de elementos que permitirá a análise da árvore de falhas, proporcionando uma compreensão precisa das principais causas dos problemas de ignição, possibilitando também o desenvolvimento de recomendações efetivas para o diagnóstico e prevenção dessas complicações. Além disso, ampliando a amostra de dados e trabalhando em direção a resultados mais conclusivos que possam contribuir de forma significativa para o campo das ignições automotivas, em busca de soluções que possam beneficiar a indústria automobilística e os proprietários de veículos. Sendo assim, os pesquisadores estão determinados a expandir a pesquisa, colaborar com parceiros adicionais e buscar oportunidades da coleta de dados mais ampla, a fim de obter resultados conclusivos que possam contribuir de maneira tangível para a compreensão e resolução dos problemas.

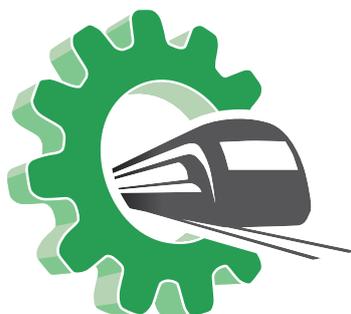


## REFERENCIAS

- [1] Carlos Varela, *Princípios de funcionamento dos motores de combustão interna*. IT - Departamento de Engenharia, 1,9,2011.
- [2] Eduardo Sakurada. *As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtor*. Repositório Institucional da UFSC. 1,145,2001.
- [3] Douglas Fornazari. *Manutenção industrial: análise e construção da árvore de falhas (FTA) de um compressor GA 75 W Atlas Copco aplicado na indústria*. Repositório Institucional da RIUT, 1,1,81,2018.
- [4] Mariana Takayama. *ANÁLISE DE FALHAS APLICADA AO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DA MANUTENÇÃO*. Universidade Federal de Juiz de Fora, 1,1,57,2008.

Área Temática

# Agroindustria





## PROTOTIPO VIRTUAL DE SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE PASTURAS PARA MAQUINA SEGADORA

Carlos H. A. García <sup>1</sup>; Germán E. Camprubí <sup>1</sup>; José L. Basterra <sup>1</sup>; Marcelo F. Larrea <sup>1</sup>; Carlos A. Derka <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste  
Las Heras 727, Resistencia, Argentina- [adriangarcia\\_98@hotmail.com](mailto:adriangarcia_98@hotmail.com);  
[german.camprubi@comunidad.unne.edu.ar](mailto:german.camprubi@comunidad.unne.edu.ar); [jbasterra@ing.unne.edu.ar](mailto:jbasterra@ing.unne.edu.ar);  
[mlarrea@unitan.net](mailto:mlarrea@unitan.net)

<sup>2</sup> INTA Las Breñas, Ruta Nacional N° 89, Km 227, Las Breñas, Argentina –  
[derka.carlos@inta.gob.ar](mailto:derka.carlos@inta.gob.ar)

### RESUMEN

El problema del bache forrajero entre los ganaderos de mediana-baja escala en la región del NEA consiste en una escasez estacional de forraje. Entre 2016 y 2020, INTA y UNNE diseñaron y fabricaron una rotoenfardadora con escalamiento comercial a cargo de una PyME metalmecánica que actualmente paga regalías al binomio institucional. Esa máquina resulta aún insuficiente para resolver el bache forrajero de invierno porque las pasturas necesitan ser cortadas y ordenadas antes del paso de la rotoenfardadora. Una segadora autopropulsada completará un kit de recolección de pasturas junto con la rotoenfardadora. El diseño de esta nueva máquina se subdividió en bloques: sistema de acondicionamiento (cilindros acondicionadores, estructura de soporte, sistema de transmisión de potencia y accesorios), mecanismo de corte (cuchillas superiores e inferiores, estructura de soporte, sistema de transmisión de potencia y accesorios), y chasis (sistema de dirección, sistema de propulsión, estructura y accesorios).

El objetivo de este trabajo es presentar el proceso de diseño y cálculo del prototipo virtual de un sistema para acondicionamiento de pasturas de una máquina segadora autopropulsada. Se aplicó una metodología de diseño y cálculo de máquinas adaptada de bibliografía especializada incorporando la vigilancia tecnológica (VT) en todas las etapas de diseño.

En la búsqueda de una mejor calidad del forraje cortado, los elementos centrales del sistema son los cilindros acondicionadores, que son dispositivos para quebrar y aplastar el forraje cortado con la consecuente disminución de los tiempos de oxidación. Se propusieron tres prototipos virtuales para el sistema, denominados v1.0, v2.0 y v3.0 que marcaron una evolución con mejoras y detalles funcionales adicionales. La versión final del sistema de acondicionamiento, v3.0 fue desarrollada básicamente con caños estructurales y chapas de acero de 8 mm de espesor con un peso estimado de 190 kg.

Queda pendiente integrar este sistema de acondicionamiento con el mecanismo de corte, el chasis y diversos elementos funcionales para alcanzar un producto virtual mínimo viable de la segadora. En el mediano plazo continuará la gestión de recursos para la construcción y validación de su prototipo físico.

La VT y los prototipos y simulaciones virtuales constituyeron puntos de palanca para proponer una tecnología situada territorialmente y asentada en relaciones interinstitucionales.

**Palabras Clave:** Bache Forrajero, Tecnología Apropriada, Segadora Acondicionadora



## 1. INTRODUCCIÓN

Las universidades han realizado durante siglos actividades tradicionales tanto de enseñanza/aprendizaje (primera misión) como de investigación académica para la generación de conocimiento tecnocientífico (segunda misión). Más recientemente se ha agregado explícitamente una nueva misión usualmente llamada "tercera misión" designando así la divulgación y compromiso para favorecer el desarrollo territorial a través de interacciones intencionales entre universidades y entornos no académicos (industriales y sociales), lo que refleja la participación cada vez mayor de la Universidad en la economía y la sociedad [1].

En la provincia del Chaco, los ganaderos de mediana-baja escala afrontan el problema del bache forrajero que se produce en invierno. La falta estacional de forraje podría solucionarse mediante una adecuada reserva de las pasturas recolectadas en contra estación. El mercado sólo ofrece máquinas de recolección y reserva de pasturas adaptadas a mayores escalas de producción.

Entre 2016 y 2020, el INTA localizado en Presidencia Roque Sáenz Peña y la Facultad de Ingeniería de la UNNE con sede en Resistencia, desarrollaron una rotoenfardadora cuya fabricación y comercialización está actualmente a cargo de una PyME metalmecánica con pago de regalías al binomio institucional. La rotoenfardadora INTA-UNNE resulta aún insuficiente para resolver el bache forrajero porque la pastura necesita ser cortada y ordenada como requisito previo al paso de la rotoenfardadora arrastrada por un tractor.

El diseño conceptual del modelo virtual de una segadora autopropulsada se basó en tres bloques fundamentales con sus elementos constitutivos y otros elementos funcionales: sistema de acondicionamiento (cilindros acondicionadores, estructura de soporte, sistema de transmisión de potencia y accesorios), mecanismo de corte (cuchillas superiores e inferiores, estructura de soporte, sistema de transmisión de potencia y accesorios), chasis (sistema de dirección, sistema de propulsión, estructura y accesorios) y otros elementos funcionales (como neumáticos y elementos de propulsión entre otros). El desarrollo virtual de la segadora se realiza en el marco de un proyecto de investigación aplicada orientado a obtener el producto virtual mínimo viable como paso previo a la fabricación y validación del prototipo físico de la máquina.

El objetivo de este trabajo es presentar el proceso de diseño y cálculo del prototipo virtual de un sistema modular para acondicionamiento de pasturas de una máquina segadora autopropulsada.



El marco conceptual está dado por las Tecnologías Apropriadas (TA) introducido inicialmente por E. F. Schumacher (1973) [2] con una visión constructivista de la tecnología y específicamente orientado al desarrollo de productos y a las ingenierías ([3], [4]).

En 2014 se relevaron antecedentes [5] sobre ciertos indicadores de idoneidad de Tecnologías Apropriadas que enfatizaron la identificación de la necesidad, el problema y la solución; la transferencia de tecnología y los mecanismos de creación de capacidades en el contexto territorial específico con un gran énfasis en la sostenibilidad [6].

## 2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

### 2.1. Aspectos generales

Se aplicó una metodología adaptada en base a bibliografía especializada en arquitectura de máquinas ([7], [8], [9]) y de prototipos en entornos virtuales ([10], [11]). La propuesta metodológica fue enriquecida con la vigilancia tecnológica (VT) [12] como una impronta distintiva de este trabajo.

Simplificadamente se cumplieron las siguientes fases: análisis de la problemática e identificación de las especificaciones cuantitativas y cualitativas para el diseño virtual de la segadora; diseño conceptual de la máquina en bloques y sus elementos constitutivos: sistema de acondicionamiento (cilindros acondicionadores, estructura de soporte, sistema de transmisión de potencia y accesorios), mecanismo de corte (cuchillas superiores e inferiores, estructura de soporte, sistema de transmisión de potencia y accesorios), chasis (sistema de dirección, sistema de propulsión, estructura y accesorios) y otros elementos funcionales (como neumáticos y elementos de propulsión entre otros); desarrollo de las partes de la segadora con cálculos asociados: diseños y cálculos a nivel de sistema y de ensamblajes y detalles ([13]; [14]; [15]; [16]) con selección de materiales [17] y la elaboración de los archivos de soporte (planos de fabricación) para la futura construcción de un prototipo físico.

### 2.2. Aspectos particulares

Los pilares para el desarrollo del sistema de acondicionamiento de pasturas fueron la rotoenfardadora INTA-UNNE existente, la vigilancia tecnológica y el prototipado virtual.

La rotoenfardadora INTA-UNNE (figura 1) fue diseñada teniendo en cuenta las necesidades de sus destinatarios finales. Sus dimensiones establecieron las condiciones cuantitativas de referencia para el diseño virtual de la segadora y por ende de las partes en que fue subdividida. Los materiales aplicados para el desarrollo de este sistema fueron una computadora con procesador AMD FX (tm)-6300 seis núcleos, memoria RAM 8GB y sistema operativo 64 bits;



Photoshop CS6; software SolidWorks Premium 2019 SP3.0; MathCad 14; bases de datos de propiedad industrial de acceso gratuito; videos de segadoras en funcionamiento a campo.



Figura 1: Rotoenfardadora UNNE-INTA  
Fuente: Metalúrgica Maipú

Tabla 1: Especificaciones Técnicas de Rotoenfardadora UNNE-INTA  
Fuente: Metalúrgica Maipú

Especificaciones Técnicas			
Rotoenfardadora		Rodado	
Alto (mm)	1085	165/70 R13 79T	
Ancho (mm)	1260	Recolector	
Largo (mm)	1800	Ancho Útil (mm)	590
Peso (kg)	320	Ancho entre dientes (mm)	65
Tamaño del Rollo		Transmisión	Correa
Ancho (mm)	565	Elevador de recolector	Manual
Diámetro (mm)	640	Atado	
Cámara de Compactación		Topo de hilo	Plástico
Ancho (mm)	565	N° de bobinas	1
Rodillos	18	Sistema	Manual
Indicador de Presión Rollo	Si	Compuerta Salida	
Transmisión	Cadena	Sistema	Hidráulico

### 3. RESULTADOS

El sistema de acondicionamiento de pasturas es un dispositivo diseñado para acelerar el proceso de degradación de los tallos de las plantas en diversos entornos. Su finalidad es impedir que las plantas consuman sus propios nutrientes promoviendo una deshidratación más rápida para obtener forrajes de mejor calidad.

La variable fundamental de diseño está vinculada con la disminución del tiempo de oxidación de las pasturas inmediatamente después que pasan por el mecanismo corte. Después de cortado, el forraje continúa respirando hasta que alcanza rangos de entre 40% y 50% de la humedad previa al corte, nivel en el que la respiración disminuye. En esos procesos de oxidación se consumen los azúcares simples y nutrientes que luego no estarán disponibles para la alimentación del ganado. A su vez, cuando se propicia la rápida deshidratación del forraje después del corte se minimiza el riesgo de que las lluvias laven los nutrientes cuando queda dispuesto en andanas sobre el terreno.

Atendiendo esa variable de diseño, los elementos centrales del sistema de acondicionamiento son sus los cilindros. Estos cilindros giran en direcciones opuestas, pero de manera coordinada



y están equipados con dientes diseñados para aplastar el forraje a continuación del corte. La potencia necesaria para el funcionamiento de los cilindros se transmite a través de una cadena.

Además, dentro del sistema se encuentra una función integrada que se encarga de capturar las pasturas, permitiendo que sean cortadas por el mecanismo de corte. A medida que avanza, va dejando las andanas de pasturas a su paso para facilitar su posterior enfardado con la rotoenfardadora.

Durante el proceso de diseño del sistema, se crearon tres versiones diferentes del prototipo virtual, cada una enfocada en abordar las complejidades específicas relacionadas con su etapa de diseño.

### 3.1. Resultados de la vigilancia tecnológica

Las actividades de vigilancia tecnológica permitieron detectar dos grandes grupos de tecnologías de corte de plantas forrajeras: hélices con rotores de cuchillas largas (desmalezadoras tipo hélice) y la de acondicionadores asociados con sistemas de cuchillas cortas. La publicación "Segadoras acondicionadoras, El secreto de la rentabilidad en el corte de alfalfa" (Tecno Forrajes. Manfredi, Córdoba – Argentina: especial corte de alfalfa, N°2, 1-20. ISSN 2545-6040) fue determinante para adoptar la segunda opción teniendo en cuenta la variable fundamental de diseño.

Este sistema tiene la función de acondicionar las plantas previamente cortadas por el mecanismo de corte cuando éstas entran por el frente de los cilindros, para luego ser expulsadas por el lado posterior como se ilustra en la figura 2. El sistema de acondicionamiento de pasturas cuenta con una tolva de salida a continuación de los cilindros cuya función es formar las andanas de forraje que posteriormente serán recolectadas por la rotoenfardadora UNNE-INTA. Entre las ventajas de una segadora con sistema acondicionador se destacan:

- Disminuye el tiempo en que la planta continúa respirando y consumiendo azúcares después de corte y así se alcanza una mayor calidad final del forraje.
- Logra un corte prolijo con el mínimo deshilachado de los tallos favoreciendo el rebrote después del corte. Así aumentará la producción anual de forraje en el predio productivo.
- Produce menores pérdidas de materiales por reducción de repicado de las pasturas. Reduce al mínimo los trozos de tallos y de hojas sueltas que quedan tirados en el lote y no son recolectados por la rotoenfardadora.

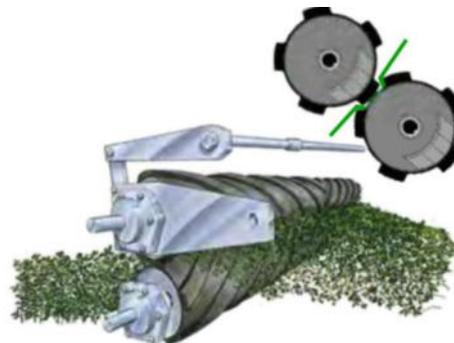


Figura 2: Esquema de sistema acondicionador de pasturas sin tolva de salida

Fuente: INTA Manfredi



## 3.2. Resultados De Prototipos Virtuales

Durante el proceso de diseño del sistema de acondicionamiento de pasturas, se consideraron múltiples variables. No obstante, en esta etapa se enfocó principalmente en la construcción de un prototipo virtual que permitiera llevar a cabo los cálculos necesarios para su redimensionamiento y posterior verificación. Durante esta fase de desarrollo virtual, se propusieron ideas relativas a la forma y el funcionamiento del sistema, lo cual condujo a la creación de diversos prototipos virtuales. Como resultado de este proceso, se lograron desarrollar tres versiones diferentes del sistema de acondicionamiento de pasturas, denominados Acondicionador V1.0, Acondicionador V2.0, Acondicionador V3.0.

### 3.2.1 Acondicionador V1.0

En este primer prototipo denominado Acondicionador v1.0 (figura 3) se utilizaron medidas aproximadas, teniendo en cuenta la información de la ficha técnica de la rotoenfardadora UNNE-INTA (Tabla 1). Así se llegó a un diseño de un par de cilindros que rotan de forma sincrónica en sentido opuesto para lograr el movimiento necesario para el ingreso de las plantas forrajeras; se propuso un par de engranajes que generan el movimiento rotatorio opuesto de los cilindros. El movimiento producido por los engranajes es transmitido a los cilindros mediante un par de cadenas y el soporte estructural del sistema forma parte del chasis de la máquina segadora.

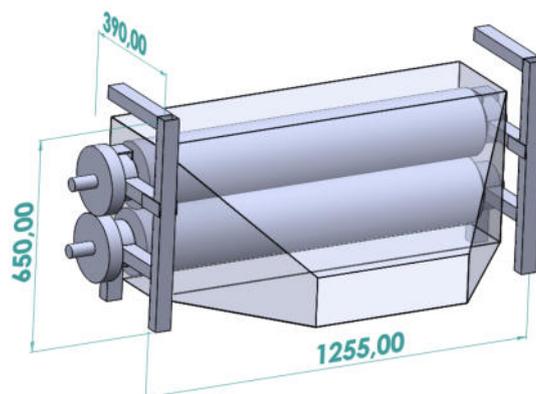


Figura 3: Acondicionador v1.0  
Fuente: elaboración propia

### 3.2.2 Acondicionador V2.0

A partir del Acondicionador v1.0, se desarrolló un nuevo prototipo llamado Acondicionador v2.0 (Figura 4). En contraste con la versión v1.0, este segundo prototipo fue concebido como un mecanismo modular de la máquina segadora, lo que llevó a un diseño con su propia estructura de soporte fabricada con chapas de acero y caños cuadrados. Se incorporaron detalles adicionales que no estaban presentes en la versión v1.0, ya que se tomó un cambio de enfoque en el diseño en las etapas iniciales del proceso.

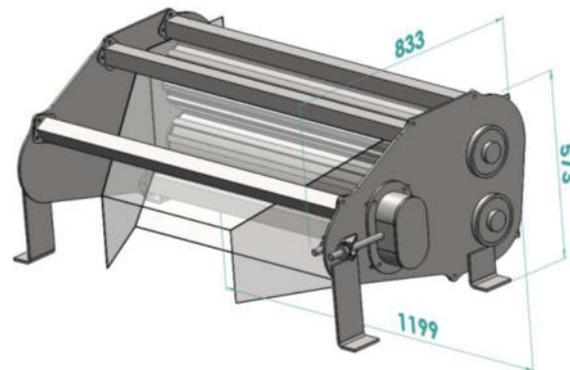


Figura 4: Acondicionadores v2.0  
Fuente: elaboración propia

### 3.2.3 Acondicionador V3.0

Si bien la versión virtual Acondicionador v2.0 (Figura 4) incorporó conceptos de eficacia para cumplir con su funcionamiento, carecía aún de otros detalles sumamente importantes para su fabricación y utilización, como ensamblado, mantenimiento de partes y tensado de cadenas, entre otros. Por lo que el siguiente paso en el diseño, desembocó en una versión denominada Acondicionador v3.0. Por otra parte, el peso total estimado de Acondicionador v2.0 fue de 260 kg aportando otro fundamento para pasar a Acondicionador v3.0.

Finalmente se obtuvo un prototipo virtual Acondicionador v3.0 (Figura 5) del sistema de acondicionamiento de pasturas. Esta versión cuenta con todos los elementos funcionales y estructurales: los cilindros, la caja de transmisión de movimiento (mediante cadenas), las chapas laterales de soporte, los caños transversales de soporte, las patas de soporte y la chapa tolva salida de las pasturas acondicionadas. El peso total estimado del Acondicionador v3.0 fue de 190 kg marcando así una mejora respecto de su anterior versión.

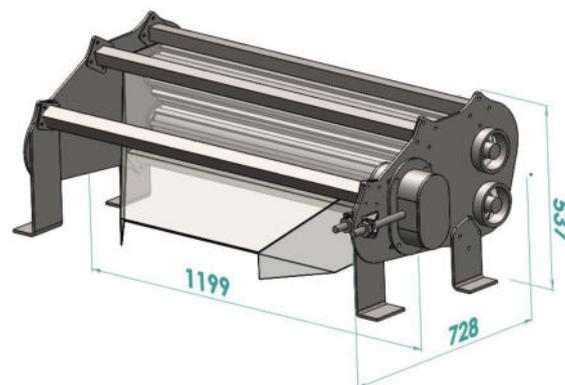


Figura 5: Acondicionadores v3.0  
Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Resultados de los cálculos realizados para el dimensionamiento

Para la transmisión de potencia hasta los cilindros acondicionadores, se diseñó una cadena cinemática que recibe la potencia de un motor hidráulico, este lo transmite por cadena a un árbol 1, este se encuentra vinculado con un árbol 2 por una relación 1:1 con engranajes (figura



6 siendo el árbol 1 de color azul y el 2 de color rojo); a su vez estos dos árboles de forma individual mueven los cilindros en sentido de rotación contrario. Se supuso un motor de 5 kW, 860 RPM y 566 kgf\*cm. En situación de atasco, las solicitaciones máximas desarrolladas en los cilindros acondicionadores hacen necesario un diámetro de 40mm del árbol para una seguridad de 3. Dicha parte se encuentra ubicado en la corona que recibe el torque, cerca de uno de los apoyos por rodamientos. Para el resto del cuerpo del sistema de acondicionamiento de pasturas se utilizó un caño hueco de 139.10mm de diámetro exterior y 4.75mm de espesor, la verificación de este dio valores sobradamente aceptables.

Para los arboles 1 y 2, los encargados de crear el movimiento en sentido contrario de los cilindros acondicionadores resultaron con un diámetro de 25mm para una seguridad de 3.

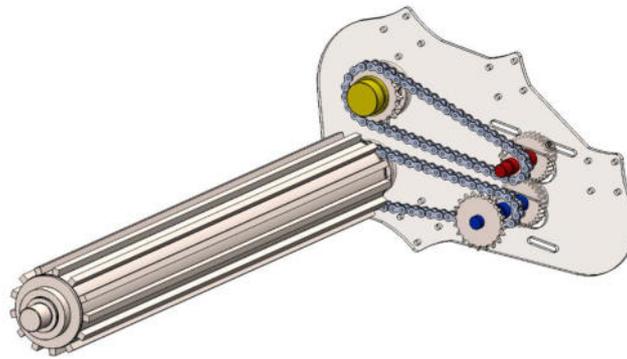


Figura 6: Vista del mecanismo de transmisión de movimiento del sistema de acondicionamiento de pasturas  
Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Resultados de las simulaciones virtuales

Los elementos simulados fueron el Árbol 1, Árbol 2, Cilindro acondicionador y Estructura de soporte. El Árbol 1 es el elemento que toma la potencia del motor hidráulico, recibiendo un torque de 566 kgf\*cm, este torque se transmite a uno de los cilindros acondicionadores y a un engranaje montado en el Árbol 2, para que a su vez sea transmitido al otro cilindro acondicionador. En toda esta situación la Estructura de soporte se encarga de sopoprtar las solicitaciones de los elementos de la cadena cinemática del sistema de acondicionamiento de pasturas.

En las simulaciones se supuso un acero AISI 1045 para el Árbol 1, el Árbol 2, y los cilindros acondicionadores, mientras que para la estructura de soporte se supuso una chapa de acero AISI 1015, ambos de la biblioteca de SolidWorks.

Como estrategia de simulación se simulo el Árbol 1, cargas externas representadas por el torque de entrada y los torques de salida hacia un cilindro acondicionador y el Árbol 2 mediante un par de engranajes; sus sujeciones representantes de sus apoyos en rodamientos. El Árbol 2 se simuló con sus cargas externas representando el torque de entrada en el engranaje y el torque de salida hacia el otro cilindro acondicionador; sus sujeciones representando a sus apoyos en rodamientos. Se simuló uno de los cilindros acondicionadores con sus cargas externas representantes del torque de entrada y su consumo total de forma localizada en el centro longitudinal del cilindro acondicionador, tomándolo como una situación desfavorable; sus sujeciones representan sus apoyos en rodamientos. La estructura de soporte fue simulada con sus cargas externas representadas por las solicitaciones producto de las reacciones en los

elementos contenidos en esta estructura; con sus sujeciones en su base, donde esta se vincula con el chasis de la máquina segadora.

El criterio de falla adoptado para este análisis fue Tensión de von Mises para materiales dúctiles. Esto resultó en elementos con seguridades y desplazamientos aceptables, como se puede ver en la figura 7.

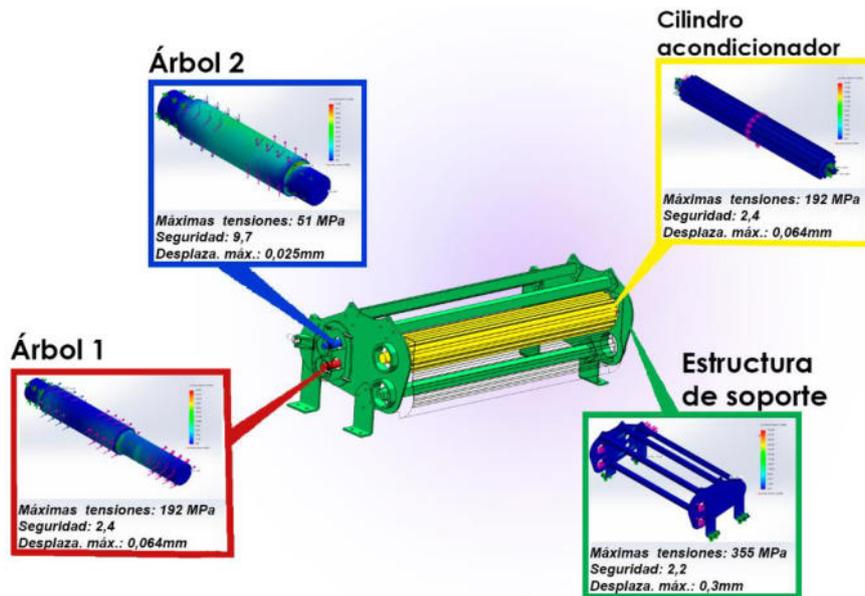


Figura 6: Resultados de simulaciones virtuales  
Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Resultados de la etapa en entorno virtual

Uno de los resultados más tangibles producidos por este trabajo fueron los planos de fabricación, generales y de detalle. Esta bitácora de fabricación está compuesta por 25 planos en los cuales se especifican los materiales, dimensiones finales de las piezas que lo componen y sus instrucciones de vinculaciones. A continuación de muestran imágenes de referencia de los mismos en las figuras 8 y 9.



Figura 7: Plano de vista explosionada de bulnería  
Fuente: elaboración propia



Figura 8: Plano de sistema de acondicionamiento de pasturas totalmente ensamblado  
Fuente: elaboración propia

#### 4. CONCLUSIONES

Las Tecnologías Apropriadas están inexorablemente vinculadas con los desarrollos de productos situados territorialmente. Con este enfoque asumimos que los conocimientos científicos de las ingenierías constituyen elementos necesarios, aunque no suficientes para mecanizar las necesidades productivas del entorno regional que adquirieron pertinencia y sentido en el marco de la resolución del bache forrajero en el norte argentino.

La vigilancia tecnológica y softwares de diseño abren grandes ventanas de oportunidad para disminuir la inversión de recursos en los diseños de productos de las ingenierías manufactureras. En nuestro caso, el prototipo de concepto de la segadora fue concebido en subproyectos de menor complejidad (sistema de acondicionamiento de pasturas, mecanismo de corte, estructura de soporte y otros elementos funcionales) que en parte se fueron desarrollando en paralelo. Así, las búsquedas pudieron ordenarse y las actividades de VT admitieron seleccionar no sólo modelos integrales (segadoras completas) sino también partes y mecanismos de diversas máquinas de corte de pasturas. También el sistema de acondicionamiento fue dividido elementos constitutivos en el marco de una estructura modular. Así, pudo obtenerse una segadora virtual mínima viable en el período de un año con una dedicación parcial de tiempo.

El sistema de acondicionamiento de pasturas obtenido en este trabajo fue el resultado de una secuencia no lineal con retroalimentación desde una versión V1.0 hasta la versión V3.0. La selección de materiales se realizó priorizando su disponibilidad comercial entre los proveedores locales y regionales. También los aspectos de fabricación fueron pensados atendiendo la funcionalidad acoplada a la rotoenfardadora UNNE-INTA y las características de las PyMES metalmeccánicas regionales. Finalmente, el sistema de acondicionamiento de pasturas quedó expresado en 25 planos generados mediante el software de diseño (18 planos de fabricación y 7 de ensamblaje).

Los resultados de las etapas de definición y desarrollo virtual del sistema de acondicionamiento de forraje presentados en este trabajo podrían optimizarse con un mayor tiempo disponible para profundizar su análisis. Además, otra de sus grandes limitantes es que todavía quedan



pendientes las etapas de evaluación y validación a campo derivadas de un prototipo físico. Tanto la velocidad de giro de los cilindros acondicionadores como la regulación de la separación entre los mismos están vinculadas con la variable fundamental del diseño del sistema y probablemente será necesario algún tipo de ajustes (podría ser el cilindro inferior fijo y el superior móvil en sentido vertical; y una variación de velocidad en el motor hidráulico supuesto de 860 RPM). De esta manera nuevos prototipos virtuales dejarían atrás al V3.0 con la consecuente modificación de los planos de fabricación y ensamblaje tanto del sistema de acondicionamiento en particular como el de la segadora en general.

En el mediano plazo, el prototipo físico de la segadora habilitará la definición de un prototipo precompetitivo previo al lanzamiento comercial en una PyME metalmecánica. Se espera alcanzar un proceso semejante al de la rotoenfardadora UNNE-INTA para que los productores de mediana y baja escala tengan la opción de seguir resolviendo sus necesidades con máquinas que actualmente no están disponibles en el mercado.

A modo de cierre, reafirmamos el rol de la VT y los prototipos y simulaciones virtuales como puntos de palanca para las TA construidas mediante relaciones interinstitucionales. Así, las TA pueden pensarse como una opción válida para el desarrollo de los distritos subnacionales aún de aquellos más alejados de la frontera tecnológica.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Compagnucci, L. & Spigarelli, F. *The Third Mission of the university: A systematic literature review on potentials and constraints*. Technological. Forecastsating and Social Change, 161, 120-284, 2020.
- [2] Schumacher, E. F. *Lo pequeño es hermoso: Economía como si la gente importara*. Harping, Londres, 1973.
- [3] Patnaik, J. & Tarei, K. P. *Analysing appropriateness in appropriate technology for achieving sustainability: A multi-sectorial examination in a developing economy*. Journal of Cleaner Production, 349, 131-204, 2022.
- [4] Muñiz, R. *Las tecnologías apropiadas ¿un cambio de paradigma o una utopía?*. Tekhné, 21 (1), 78-87, 2018.
- [5] Bauer, A. M. & Brown, A. *Quantitative Assessment of Appropriate Technology*. Procedia Engineering, 78, 345–358, 2014.
- [6] Thomas, H. *Tecnologías para incluir: ocho análisis socio-técnicos orientados al diseño estratégico de artefactos y normativas*. Lenguaje claro Editora, 2020.
- [7] Gorrostieta, E.; Soto, E.V.; Zuñiga, A. L.; Rodríguez, R. J. & Tovar, A. S. *A mechatronics methodology: 15 years in experience*. Ingeniería e Investigación, 35 (3), 107-114, 2015.



- [8] Tomiyama, T.; Gu, P., Jin, Y.; Lutters, D., Kind, C. & Kimura, F. *Design methodologies: Industrial and educational applications*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58(2), 543–565, 2009.
- [9] Ulrich, K., & Eppinger, S. D. *Diseño y desarrollo de productos*. McGraw-Hill, Boston, 2013.
- [10] Blanco Ortega, A.; Magadán Salazar, A.; Gómez Becerra, F. A.; Guzmán Valdivia, C. H. & Antúnez Leyva, E. *Diseño de sistemas mecatrónicos: prototipos virtuales*. Pistas Educativas, 40, 1421–1439, 2019.
- [11] Kim, D. Y. *A design methodology using prototyping based on the digitalphysical models in the architectural design process*. Sustainability, 11(16), 1-23, 2019.
- [12] Pavlicevic, J. S. *Diseño de un Modelo de Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Estratégica (VTelE)* [Tesis doctoral Universidad Nacional de Lomas de Zamora], 2021. <https://digital.cic.gba.gob.ar/items/75bba6d9-5824-4d46-a2f7-5ddac97a77f3>
- [13] Hibbeler, R. C. *Mecánica de materiales*. Pearson, México, 2011.
- [14] Pezzano, P. A. *Tecnología mecánica-metrología*. Librerías y Editorial Alsina, Buenos Aires, 1991.
- [15] Cosme, Héctor N. *Elementos de máquinas*. Marymar ediciones S.A, Buenos Aires, 1977.
- [16] Faires, V.M. *Diseño de elementos de máquinas*. Montaner y Simón, Barcelona, 1975.
- [17] Ashby, M.F. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, Gran Bretaña, 2011.



## IMPROVING SEED DETECTION ACCURACY WITH INFRARED SENSORS ARRAY IN PRECISION SEEDERS

Sebastián Rossi<sup>1</sup>, Ignacio Rubio Scola<sup>1,2,3</sup>, Gastón Bourges<sup>1,2</sup>, Jorge Eliach<sup>1</sup>, Egidijus Šarauskis<sup>4</sup>, Davut Karayel<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> National Institute of Industrial Technology (INTI). Ocampo y Esmeralda. 2000 Rosario, Argentina [srossi@inti.gob.ar](mailto:srossi@inti.gob.ar); [irubio@inti.gob.ar](mailto:irubio@inti.gob.ar); [gbourges@inti.gob.ar](mailto:gbourges@inti.gob.ar), [jeliach@inti.gob.ar](mailto:jeliach@inti.gob.ar).

<sup>2</sup> FCEIA - National University of Rosario (UNR). Pellegrini 250. 2000 Rosario, Argentina.

<sup>3</sup> National Scientific and Technical Research Council (CONICET), Argentina.

<sup>4</sup> Vytautas Magnus University Agriculture Academy, Faculty of Engineering, Department of Agricultural Engineering and Safety, K. Donelaičio g. 58, LT-44248 Kaunas, Lithuania. [egidijus.sarauskis@vdu.lt](mailto:egidijus.sarauskis@vdu.lt); [davut.karayel@vdu.lt](mailto:davut.karayel@vdu.lt)

<sup>5</sup> Akdeniz University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Machinery and Technologies Engineering. Antalya, Turkey. [dkarayel@akdeniz.edu.tr](mailto:dkarayel@akdeniz.edu.tr)

### ABSTRACT

Infrared sensors are widely used for seed passage detection. This paper introduces an algorithm designed specifically for seed-passage detection through a linear array of one-dimensional sensors, perpendicular to the seed passage. The proposed algorithm utilizes object detection in binary images, using run-based connected component labeling, with equivalent label set and single-pass scanning, since only area and centroid of the objects are of interest. This method is easily implementable on a microcontroller to be used in real time due to the choice of the algorithm. In addition, the use of infrared sensors implies that the method is non-invasive, low cost, robust to various hostile environments and allows to obtain a high sampling frequency. On the other hand, it has the disadvantage that measurements of the infrared sensors can be altered due to smoke, dust, reflective or very dark surfaces. To show the effectiveness of the methodology, we emulated different seeding scenarios, we conducted experiments with three kinds of seeds (corn, soybean, and sunflower), and two different seeding speeds. All experiments are carried out at Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) using a pneumatic seeder with its seed tube and a high-speed camera.

**Keywords:** *Seed detection; Seed meter evaluation; Connected component; Binary image.*



## 1. INTRODUCTION

The main objective of seeding is to place the seeds at a given distance and depth in the seedbed. To achieve this, precision seed drills place the seeds in the required locations with relative accuracy, giving each seed an adequate available surface area [1]. One of the most common methods of precise seed metering is the use of circular plates. These plates contain holes or alveoli, located at some distance from the centre of the plate and equidistant from each other, where the seeds are placed. The aim of the plate dispensers is that each hole is occupied by a single seed and, as the plate rotates, the seeds are released into the furrow from a specific sector of the mechanism. The performance of this equipment, in terms of seed distribution uniformity, is affected by a number of factors including: seeding speed, metering unit type, machine maintenance and operation, seed plate rotation rate, vacuum level in pneumatic seed drills, alveoli/hole size and shape, seed discharge height relative to the bottom of the furrow, seed tube geometry, seed surface treatments, seed uniformity and type of furrow openers [2].

Karayel et al. [3] used a high-speed camera to evaluate the uniformity of seed spacing and seed drop speed. Bourges et al. [4] carried out tests with a positive pressure pneumatic metering unit using soybean seeds. A high-speed camera was used in the tests to study the seed trajectories along the discharge tube. These data were compared with numerical models of seed trajectories. In later work, Bourges et al. [5] and Rossi et al. [6] carried out tests on a pneumatic vacuum seed meter, analyzing the seed trajectories along the discharge tube, using a high-speed camera. In Mangus et al. [7], an experiment was carried out where a data acquisition system was used to measure the rotation speed of the metering disc and seed passage with a commercial seed monitor located in discharge tubes and a high-speed camera filming the seed detachment zone. Besharati et al. [8] compared 3 optical sensor arrays for seed detection. These were light-dependent resistors, infrared and laser diode. The best results were obtained with infrared sensors. Karimi et al. [9] and Beshareti et al. [10] used infrared sensor arrays to estimate fine-grained seed flux. Fertilizers were also tested by Jiang et al. [10]. Liu et al. [11] used a linear array of infrared sensors and proposed two methods for seed flux estimation. The sensor had a scattering mechanism to spread seeds across the width of the entire sensor array and minimize seed overlap.

This study proposes a methodology wherein the infrared sensor signals are treated as an image, wherein the width of the image is determined by the number of sensors in the array (spatial axis), and the height is determined by the number of samples acquired by the data acquisition system along temporal axis. After applying a simple thresholding, a binary matrix is obtained, and all connected pixels are searched to identify each seed pass. He et al. [12] presented a review of the state-of-the-art. Different scanning and labeling algorithms were explained and tested. The memory used for each method was also compared. In He et al. [13], a run-based connected



components labeling method was presented that solved the labeling of objects in two scans of the image. In He et al. [14], an improvement to the previous method was presented, where a second pass over the whole image was not necessary to solve the final labeling. Similar studies were done by Bailey et al. [15, 16], Johnston and Bailey [17] and Zhao et al. [18] where run-based connected component recognition methods implemented on FPGAs were presented. In this paper, an adaptation of the method presented by He et al. [14] is presented, where only one scan is performed, and the areas and centroids of the objects found in the binary matrix are obtained. Seed passage detection errors are evaluated at different dosing rates with maize, soybean, and sunflower.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Equipment used.

Tests were performed on a static test bench, operating the seed meter under normal sowing conditions. The seed meter used was a vacuum-type pneumatic precision meter, powered by an electric motor. The motor has a Hall sensor whose signal was used to control its angular velocity and was recorded to corroborate the correct dosing speed. The vacuum pressure inside the meter was measured with a Kimo CP110 pressure transmitter, configured to measure from 0 to 100 mbar and with a voltage output of 0 to 10V. Similarly, at the outlet of the discharge tube, a frame with an array of 7 aligned infrared sensors was placed and, underneath, the impact plate with the piezoelectric sensor attached. The tests were filmed with a Fastec TS5-S high speed camera. For these tests, the camera was tuned at 500 frames per second, with a color depth of 8 bits and a resolution of 800x600 pixels. With this configuration, the maximum filming time was 17.146 seconds. The camera has a connector for accessing input and output signals. One of these signals is the *Sync Out* signal, which emits one pulse for each captured frame. This signal was recorded to link the camera's time base with the time base of the data acquisition system. Electrical signals were recorded with an HBM QuantumX MX1615B data acquisition unit, which has 16 channels and was configured to measure voltage. The recorded signals were those of the infrared phototransistors at the end of the seed tube, the pressure transmitter, the Hall sensor of the motor, and the "Sync Out" signal of the chamber.

Infrared sensors (phototransistor receivers) were placed equidistantly in an aluminum U shaped frame. A top view is shown in Figure 1. Separation of sensors are 4 mm. Their diameter is 3 mm. In front of them, two infrared emitters are placed with a separation of 20 mm between them. Distance between emitters and receivers are 200 mm.

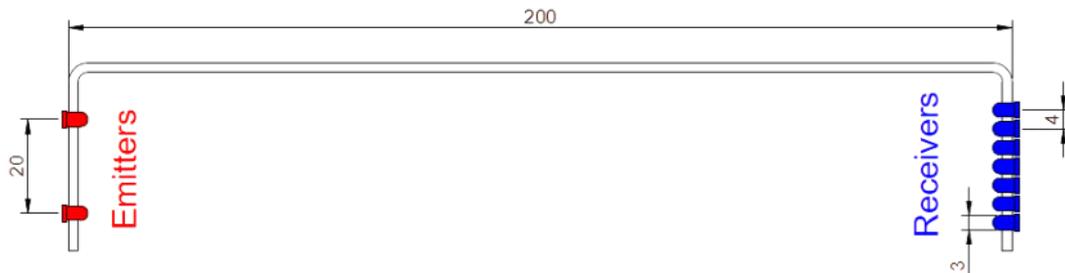


Figure 1. Sensor array main dimensions in mm.

## 2.2 Experiment

A complete randomized experiment with 3 replications for each treatment was carried out for 3 types of seeds: corn, soybean and sunflower. The factor evaluated was the seed dosage rate, considering 2 levels depending on the type of seed. Seeds were dosed at 6.5 and 13.5 seeds/s for corn and sunflower and 33.3 and 66.7 seeds/s for soybean.

### 2.2.1 Test procedure

Each treatment of the experiment consisted of running the seed meter under normal operating conditions mounted on a static test bench, for a period, so that the filming includes from the first seed dosed to the last one.

In this experiment it is intended to evaluate infrared phototransistor sensing at the end of the seed tube. Therefore, the camera was placed at approximately 1.5 m to capture the measurement area.

### 2.1.2 Software detection errors

For each trial, each software-detected shadow was compared with each manually recorded pass. Two types of error were then counted. Passes not detected by the software were calculated as MissedPasses, and we defined ND as the number of MissedPasses in normalized in Equation (1).

$$ND [\%] = 100 \frac{MissedPasses}{TR} \quad (1)$$

where TR is the number of Total Recorded Passes.

Detections that do not correspond to any pass in the manual record were computed as MultiplePasses. We defined extra detections as ED the number of MultiplePasses in normalized percentage in Equation (2).

$$ED [\%] = 100 \frac{MultiplePasses}{TR} \quad (2)$$

Finally, we defined accuracy (ACC), in normalized percentage in Equation (3).

$$ACC [\%] = 100 \frac{TR}{TR + MissedPasses + MultiplePasses} = \frac{100}{1 + \frac{ND}{100} + \frac{ED}{100}} \quad (3)$$



### 2.3 Software detection method

The presented detection method is based on image processing. The sensor array signals through time create an image where the number of sensors defines the width, and the number of samples recorded the height. The image height is the size of the test duration.

In the first step, infrared sensor signals pass through a threshold filter to obtain a binary image. The pseudo-code of function DetectShades is listed in Code 1. Each channel is scanned independently from each other. A simple hysteretic threshold is applied. When no shade is present, the median value of light signal over a  $w$  width window is calculated on each loop (ligLev). When signal is higher than ligLev plus a rising threshold (risThres) a shadow is considered to start. The level at which shadow appeared is held in a variable (risVal). During the presence of a shadow, that is when peak is equal to TRUE, the loop checks if the signal is less than risVal minus a falling threshold (falThres). When it happens, the end of shadow is considered to occur. The value of ligLev is kept during  $w$  samples after shadow end, and then is recalculated. ligLev is not just a constant value because DC component in signal presents slow deviations.

Code 1. Binary array generation from IR sensor signal array.

```
FUNCTION DetectShades(IRArray; risThres, falThres, w)
  INITIALIZATION
  (signalLen, chNumber) = SIZE(IRArray)
  ligLev = MIN(IRArray[1:w, :], dims=COLUMNWISE)
  FOR i IN 1:signalLen DO
    FOR j IN 1:chNumber DO
      IF !(peak[1, j]) && IRArray[i, j] - ligLev[j] > risThres THEN
        peak[1, j] = TRUE
        risVal[j] = IRArray[i, j]
      ELSEIF risVal[j] - IRArray[i, j] > falThres THEN
        peak[1, j] = FALSE
        peakFall[j] = i
      END IF
      IF !(peak[1, j]) && i - peakFall[j] > w THEN
        ligLev[j] = median(IRArray[i-w:i, j])
      END IF
    END FOR
    shades[i, :] = peaks
  END FOR
  RETURN shades
END FUNCTION
```

In binary array obtained, connected components are looked for to get area and centroid of each shadow. The method is based on the algorithm described in He et al. [14]. The difference with this algorithm is that representative labels are resolved just in a merge row, but not in the hole binary array since we do not need them. This avoids an unnecessary second scan. Additionally, area and centroids are cumulatively computed as described in He et al. [12]. The vertical component of centroids (time axis) affected by the sampling frequency determines the time at which each seed passes though IR array.

The pseudo-code of this function is presented in Code 2. We use the convention to append an exclamation mark (!) to names of functions that modify their arguments. The first difference with the original method presented by He et al. [14] is that 2 nested loops scan the binary array in



place of one. The reason is that with 2 nested loops is easier to calculate area and centroid of objects. The index  $i$  in He et al. [14] is related to indexes  $i$  and  $j$  in Code 2 as in Equation (4). Every time a new run is processed, area ( $A$ ), and centroid ( $X$  and  $Y$ ) vectors are updated with a cumulative sum. The indexes of both vectors correspond to the representative label of each run. When a new label is added, a new element in vectors  $A$ ,  $X$  and  $Y$  are appended. An extra parameter is received by the function ( $e$ ), and 8-connected components are considered if  $e=1$  and 4-connected if  $e=0$ . At last, when no shades are present in the row scanned, area and centroid of the last objects found are appended to a data frame ( $objDf$ ). This task is into the FOR loop because data could be sent in real time running in a microcontroller. The  $objDf$  data frame is return when the function finishes. The function `Resolve!` was also modified from He et al. [13], as it updates  $A$ ,  $X$  and  $Y$  values and we do not care which label is greater. The pseudocode of `Resolve!` is presented in Code 3.

$$i_{He\ et\ al.2010} = N(i - 1) + j \quad (4)$$

Code 2. Run based one scan connected component area and centroid determination.

```

FUNCTION He2010(p, e)
  INITIALIZATION
  FOR i IN 2:M DO
    allBackground = true
    j = 1
    WHILE j <= N DO
      IF p[i, j]
        allBackground = FALSE
        append!(run_s, N * (i-1) + j)
        run_x = j
        j += 1
        WHILE j <= N && p[i, j] DO
          run_x += j
          j += 1
        END WHILE
        append!(run_e, N * (i-1) + j - 1)
        run_a = run_e[n] - run_s[n] + 1
        run_y = run_a * i
        WHILE run_e[k] < run_s[n] - N - e DO
          k += 1
        END WHILE
        IF run_e[k] <= run_e[n] - N THEN
          append!(run, run[k])
          k += 1
          A[r_label[run[n]]] += run_a
          X[r_label[run[n]]] += run_x
          Y[r_label[run[n]]] += run_y
          WHILE run_e[k] <= run_e[n] - N DO
            Resolve!(A, X, Y, r_label, run[k], run[n])
            k += 1
          END WHILE
          IF run_s[k] <= run_e[n] - N + e THEN
            Resolve!(A, X, Y, r_label, run[k], run[n])
          END IF
        ELSEIF run_s[k] <= run_e[n] - N + e THEN
          append!(run, run[k])
          A[r_label[run[n]]] += run_a
          X[r_label[run[n]]] += run_x
          Y[r_label[run[n]]] += run_y
        ELSE
          l += 1
          append!(run, l)
          append!(r_label, l)
          append!(A, run_a)
          append!(X, run_x)
          append!(Y, run_y)
        END IF
        n += 1
      END IF
    END IF
  END FOR

```



```

        j += 1
    END WHILE
    IF allBackground && l != lastProc THEN
        FOR j IN lastProc+1:l THEN
            IF A[j] != 0
                push!(objDf, [r_label[j], X[j], Y[j], A[j]])
            END IF
        END FOR
        lastProc = l
    END IF
END FOR
RETURN objDf
END FUNCTION

```

Code 3. Resolve function for two objects merging.

```

FUNCTION Resolve!(A, X, Y, r_label, rk, rn)
    A[r_label[rk]] += A[r_label[rn]]
    A[r_label[rn]] = 0
    X[r_label[rk]] += X[r_label[rn]]
    X[r_label[rn]] = 0
    Y[r_label[rk]] += Y[r_label[rn]]
    Y[r_label[rn]] = 0
    r_label[rn] = r_label[rk]
    RETURN nothing
END FUNCTION

```

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 3.1 Errors obtained for each seed type and sowing rate

This section presents the results found by applying equations (1), (2) and (3). Figure 2 shows the ND values for each seed tested, and for each forward speed in boxplot type plots. Similarly, Figure 3 presents the ED values and Figure 4 the ACC values.

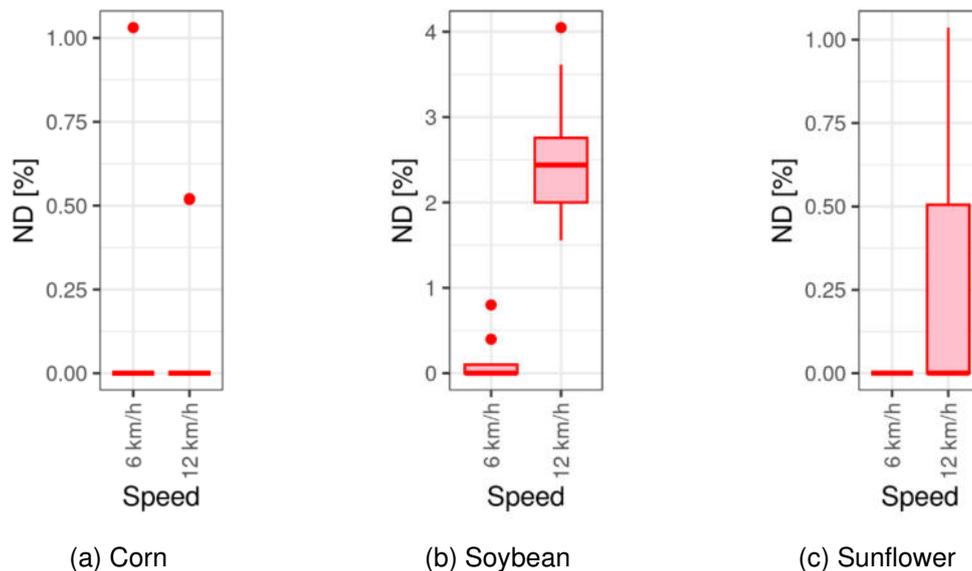


Figure 2. Not detected percentage.

Not detection errors increase for high dosing rate, that is, 66.6 seeds/s corresponding to soybean at 12 km/h. For this dosing rate, not detections were between 1.5% and 4%. In all the other cases, not detected seeds remains under 1%.

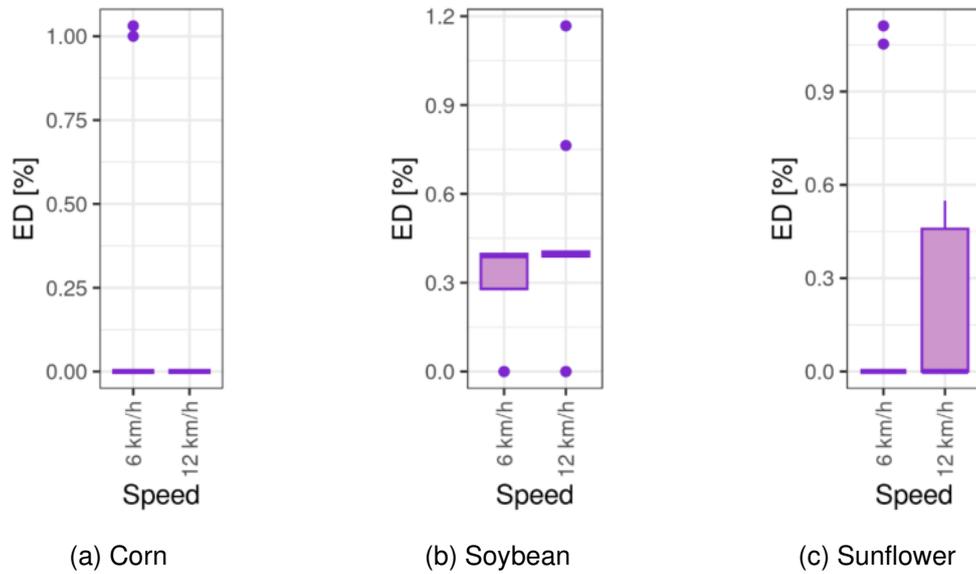


Figure 3. Extra detection percentage.

There were no extra detections in the majority of tests for corn and sunflower. Most of the extra detection errors were less than 0.5% for soybean. Only 4 tests in the hole experiment had extra detection errors of around 1%.

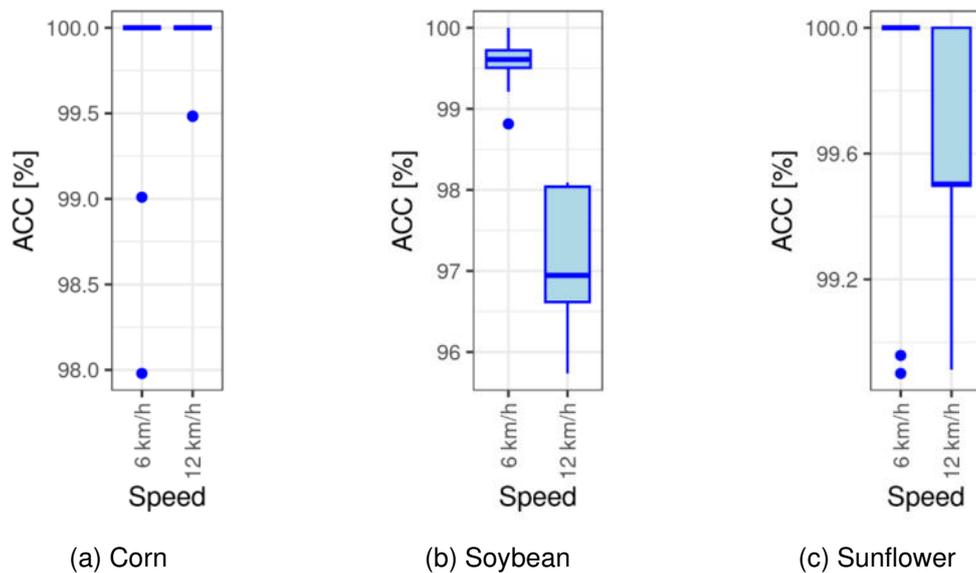


Figure 4. Accuracy percentage.

The accuracy percentage considers both types of errors. As the error of undetected seeds for soybeans at a high dosage rate was higher, a similar behavior is observed in the accuracy values: in this case, the accuracy is lower, with values between 96% and 98%. In all other cases, the accuracy is above 99%, except for isolated cases with values between 98% and 99%.

### 3.2 Differential time dependency errors

Histograms were plotted to visualize the effect of the differential time between successive passes on the ability to detect seeds. Figure 5 shows the number of well detected (upwards) and undetected (downwards) seeds. The x-axis represents the time elapsed between each pass counted as detected or undetected and the previous pass. Figure 6 shows the same data upwards and the extra detections downwards.

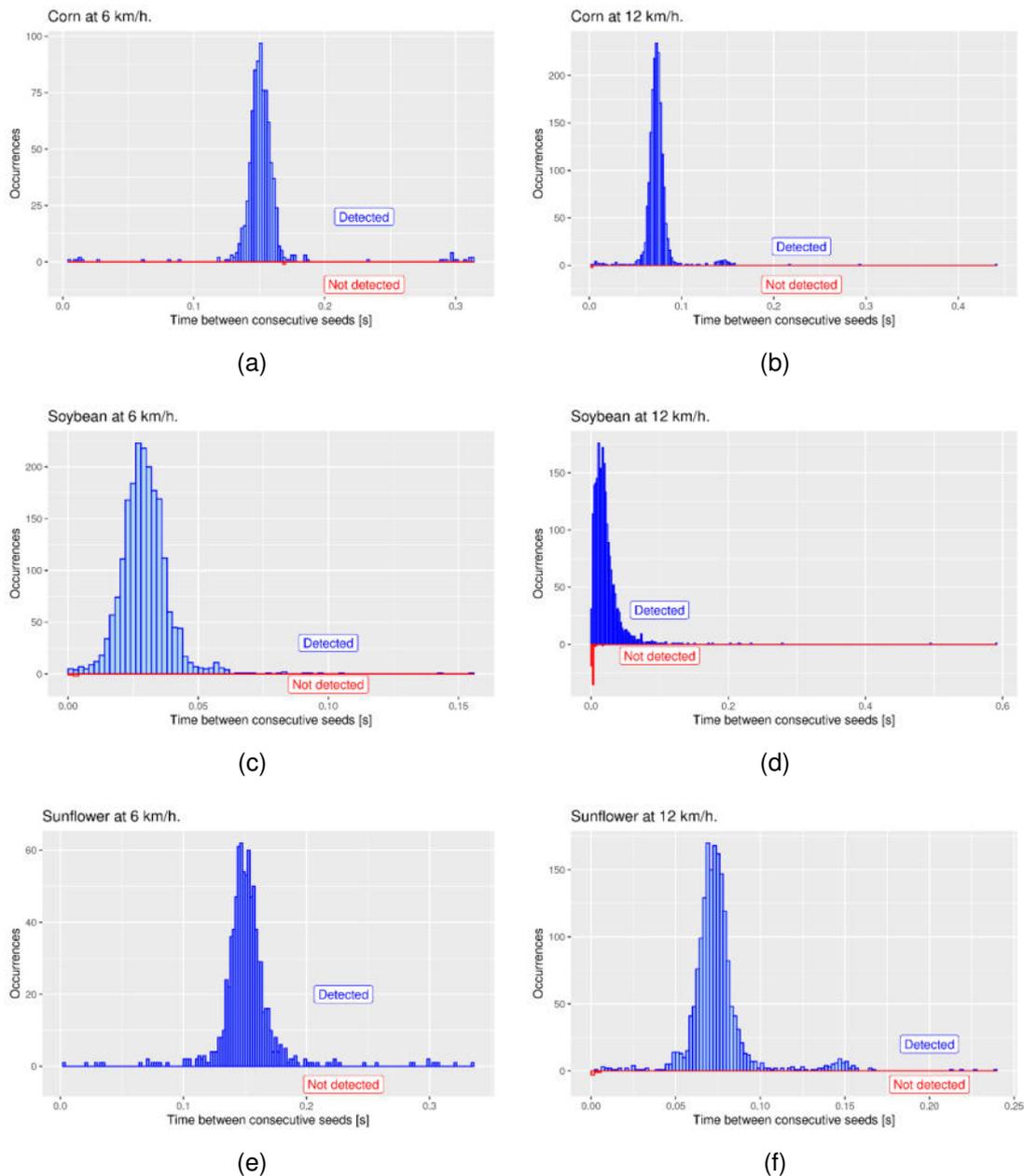


Figure 5. Histograms of differential time between consecutive seed passes. Occurrences of well detected (upward in blue) and not detected seeds (downward in red).

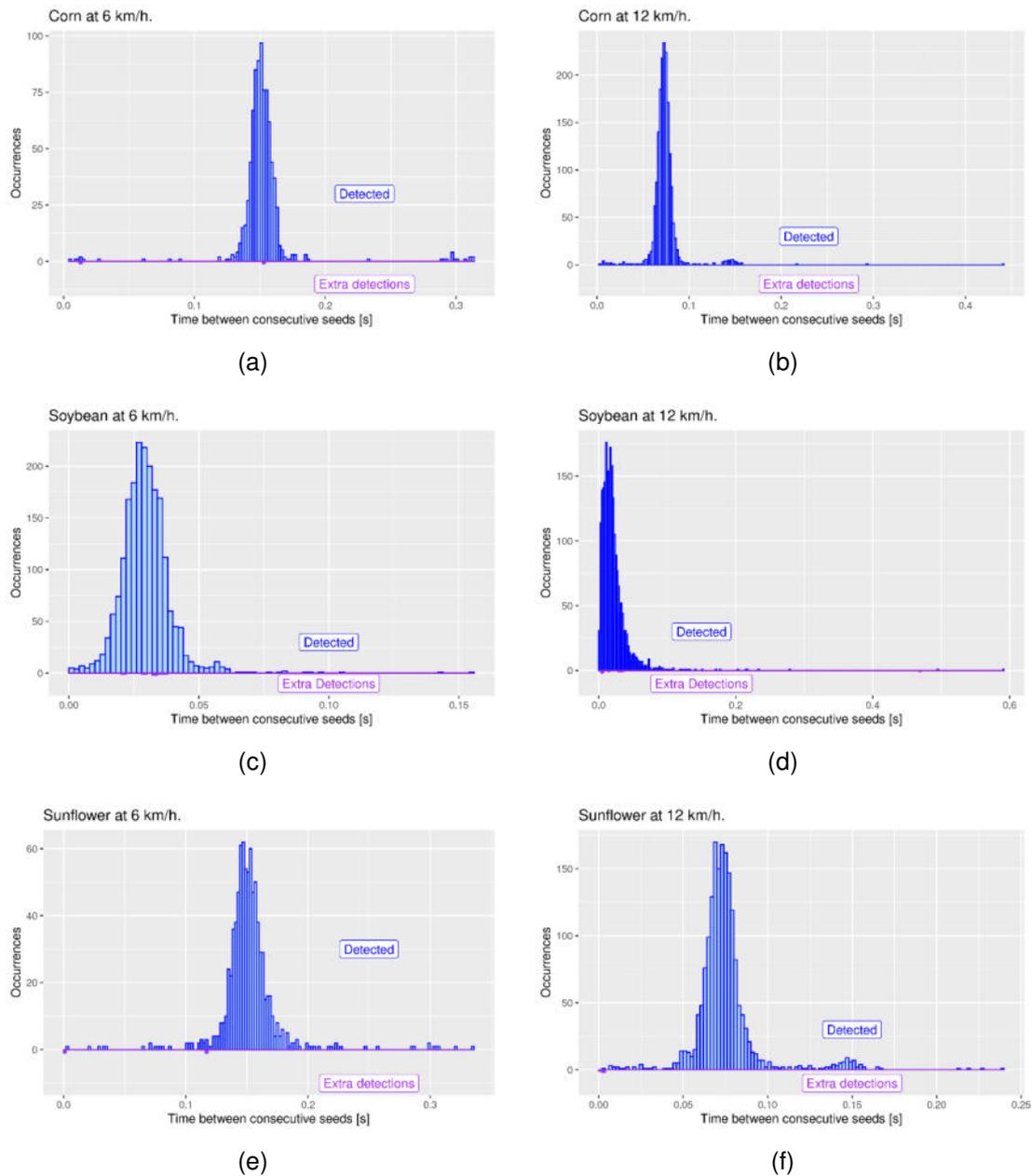


Figure 6. Histograms of differential time between consecutive seed passes. Occurrences of well detected seeds (upward in blue) and extra detections (downward in purple).

Not detected errors are concentrated in low differential times. If two or more seeds pass through the sensor array in close proximity to each other, the generated shadow is represented by a single object in the binary matrix obtained after thresholding. The presented method does not evaluate the shapes of the shadows, so in this case, only one seed is recognized. This may be one reason why undetected seed errors are concentrated at low differential times.

The extra detections, on the other hand, are spread over the whole x-axis and do not seem to be dependent on the differential time between consecutive seed passes. These detections may be



related to noise in the signal that was not filtered and to the threshold values chosen to generate the binary matrix.

### 3. CONCLUSIONS

The detection errors evaluated in the experiment presented in this study correspond to a precision seed meter operating under normal working conditions.

Although there is a lot of research carried out on seed detection using infrared sensors, the novelty of this study is the implementation of the technique of searching for objects in binary images from infrared sensor signals. The errors of the method presented in this study are comparable with the literature. However, in future work, errors may be reduced by decreasing the spacing of the phototransistors (higher spatial resolution) and using two linear arrays of sensors at 90°, thus generating a three-dimensional binary array (the third dimension on the time axis).

### BIBLIOGRAPHY

- [1] Özmerzi A., Karayel D., Topakci M. *Effect of Sowing Depth on Precision Seeder Uniformity*. Biosystems Engineering, 82(2), 227–230. 2002.
- [2] D'Amico J. P., Tesouro M. O., Romito Á., Paredes D., Roba M. A. *Desuniformidad de distribución espacial: caracterización de su impacto sobre el rendimiento de maíz (Zea mays L.)*. Revista de la Facultad de Agronomía, 110(1), 50-62. 2011.
- [3] Karayel, D., Wiesehoff, M., Özmerzi, A., Müller, J., (2006). *Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system*. Computers and electronics in agriculture, 50(2), 89-96.
- [4] Bourges, G., Nardon, G., Medina, M., 2011. *Evaluation of seed trajectories in a pneumatic dosage system*. In: XXXIV CIOSTA CIGR V Conference, BOKU, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Austria.
- [5] Bourges, G., Nardón, G., Medina, M. 2012. *Laboratory study of the operation of a monograin vacuum metering system*. CIGR- AgEng. ISBN - 10 84-615-9928-4 / 13 978-84-615-9928-8. Valencia, España. 2012.
- [6] Rossi, S., Rubio Scola, I., Eliach, J., Bourges, G., 2020. *Evaluación de desempeño de dosificador monograno mediante filmación y procesamiento de imágenes*. XII CAIM. San Nicolás de los Arroyos, Argentina.
- [7] Mangus, D. L., Sharda, A., Flippo, D., Strasser, R., Griffin T., 2017. *Development of high-speed camera hardware and software package to evaluate real-time electric seed meter accuracy*



of a variable rate planter. *Comput Electron Agric.*, 142: 314-325. doi: 10.1016/j.compag.2017.09.014.

[8] Karimi, H., Navid, H., Besharati, B., Behfar, H., & Eskandari, I. *A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection*. *Computers and electronics in agriculture*, 142, 165-172. 2017.

[9] Besharati, B., Navid, H., Karimi, H., Behfar, H., & Eskandari, I. *Development of an infrared seed-sensing system to estimate flow rates based on physical properties of seeds*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 874-881. 2019.

[10] Jiang, M., Liu, C., Du, X., Huang, R., Dai, L., & Yuan, H. *Research on continuous granular material flow detection method and sensor*. *Measurement*, 182, 109773. 2021.

[11] Liu, W., Hu, J., Zhao, X., Pan, H., Lakhari, I. A., & Wang, W. *Development and experimental analysis of an intelligent sensor for monitoring seed flow rate based on a seed flow reconstruction technique*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104899. 2019.

[12] He, L., Ren, X., Gao, Q., Zhao, X., Yao, B., & Chao, Y. *The connected-component labeling problem: A review of state-of-the-art algorithms*. *Pattern Recognition*, 70, pp. 25-43. 2017

[13] He, L., Chao, Y., & Suzuki, K. *A run-based two-scan labeling algorithm*. *IEEE transactions on image processing*, 17(5), pp. 749-756., 2008.

[14] He, L., Chao, Y., & Suzuki, K. *A run-based one-and-a-half-scan connected-component labeling algorithm*. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 24(04), pp. 557-579. 2010.

[15] Bailey, D. G., & Johnston, C. T. *Single pass connected components analysis*. In *Proceedings of image and vision computing New Zealand*, pp. 282-287, 2007.

[16] Bailey, D. G., Johnston, C. T., & Ma, N. *Connected components analysis of streamed images*. In *2008 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, pp. 679-682, IEEE. 2008

[17] Johnston, C. T., & Bailey, D. G. *FPGA implementation of a single pass connected components algorithm*. In *4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications*, pp. 228-231, IEEE. 2008

[18] Zhao, F., Zhang Lu, H., & Yong Zhang, Z. *Real-time single-pass connected components analysis algorithm*. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 1-10. 2013.

Área Temática

# Innovaciones y Desarrollos Tecnológicos Ferroviarios





## Diseño de Sistema Óptico para Medición de Deformaciones en Obras de Artes Ferroviarias

José I. Gialonardo <sup>1(\*)</sup>, Marcos Amado <sup>1</sup> y Javier Idzi <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UIDET Ingeniería Aplicada en Mecánica y Electromecánica (IAME), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 116, La Plata, Argentina,  
<sup>(\*)</sup>[joseig@ing.unlp.edu.ar](mailto:joseig@ing.unlp.edu.ar)

### RESUMEN

Es sabido que con el pasar de los años toda estructura, ya sea metálica o de hormigón, sufre un deterioro que puede comprometer la función para la cual se la ha diseñado. Este mismo efecto se verifica en las obras de arte ferroviarias, por eso, en este trabajo se muestra un método óptico mediante el cual se puede determinar el estado de la estructura, monitoreando las deformaciones de esta en algunos puntos específicos y, sometiéndola a diferentes tipos de cargas o esfuerzos para poder hacer un análisis integral de la misma.

El objetivo principal de este trabajo es mostrar una herramienta para determinar la “salud” de la obra de arte, obteniendo una métrica que indique que tan segura es la estructura y eventualmente si es necesario algún tipo de mantenimiento.

**Palabras clave:** Medición óptica; Deformación de estructuras; Monitoreo; Obras de arte.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para hacer una correcta evaluación de una estructura, por ejemplo, de un puente ferroviario, se deben realizar varios análisis. Con el método que se plantea en este trabajo estos análisis se resumen en dos pruebas, una estática y otra dinámica. Mediante estos dos ensayos se podrá determinar la deformación máxima de una obra de arte ferroviaria cuando esta sea sometida a una carga estática y luego a una dinámica. Para esta última se harán cambios en la característica dinámica de la carga con el fin de poder evaluar el comportamiento de la estructura abarcando todas o casi todas las condiciones de uso de esta.

Por lo dicho anteriormente se plantea primeramente una medición estática, donde se debe medir la deformación máxima de la estructura cuando en la misma se coloque un peso considerable, de manera tal que produzca una deformación o no, dependiendo el estado de “salud” de la estructura. Luego se realizarán los ensayos dinámicos, los cuales constan de varias pasadas de un elemento rodante a diferentes velocidades, de manera tal que produzca deformaciones y vibraciones en las diferentes situaciones de uso. Estas deformaciones son tenidas en cuenta junto con la medición estática realizada con anterioridad para determinar el coeficiente de impacto de la obra de arte.

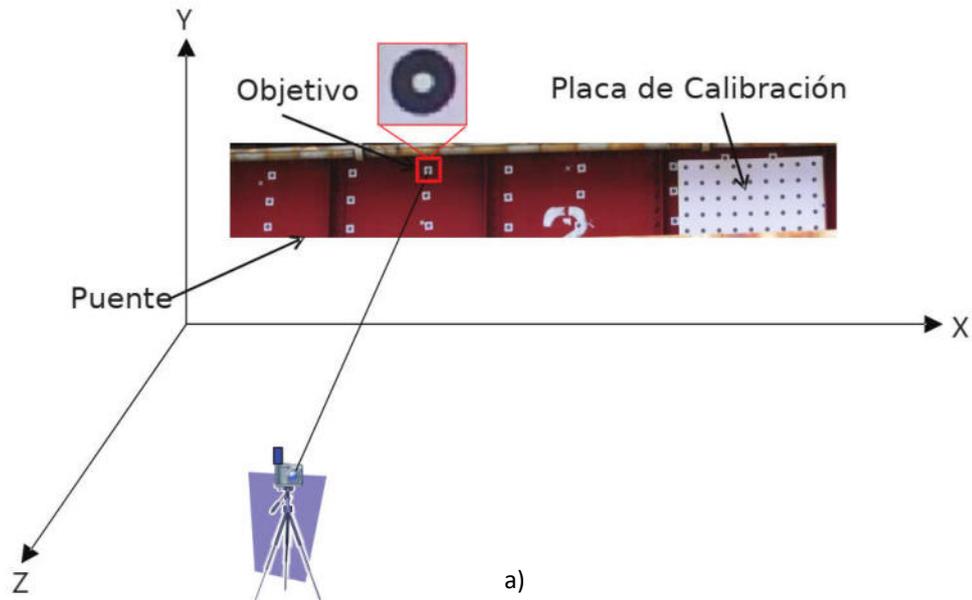
Para poder realizar los ensayos mencionados, el sistema consta de un dispositivo fotogramétrico diseñado para poder determinar deformaciones de objetos situados sobre estructuras con alta precisión, aprovechando la excelente calidad de imagen provista por una cámara de alta resolución, junto con una poderosa lente de largo alcance focal que permite observar mínimos detalles desde grandes distancias hasta decenas de metros (ver figura 1). Los objetos pueden permanecer o bien inmóviles, realizando una determinación estática de la deformación, o bien permanecer en movimiento si lo que se busca es determinar deformaciones dinámicas, vibraciones y sus frecuencias asociadas mediante un análisis espectral.



**Figura 1.** Disposición de los elementos para realizar los ensayos estáticos y dinámicos

El sistema cuenta con un software que permite realizar un tratamiento especial a la imagen obtenida de modo tal que se puede detectar en tiempo real el mínimo movimiento del objetivo seleccionado, que puede ser una marca adherida a la estructura (diana) o parte de la misma estructura dependiendo de las condiciones de accesibilidad e iluminación del momento. Como se puede visualizar en la figura 2a el “objetivo” es el elemento que seguirá la cámara para

detectar su movimiento. Por otro lado, de acuerdo con la combinación de lentes y distancias seleccionadas, se pueden medir deformaciones de menos de 1mm, dado que eso queda determinado por la resolución de la cámara utilizada, la lente y la distancia a la que esté la obra de arte a monitorear.



En la figura 2b se muestra un ejemplo de una obra de arte donde se puede aplicar el método de medición propuesto.



**Figura 2.** a) Enfoque de objetivo, b) Ejemplo de obra de arte a analizar



## 2. DESARROLLO

Antes de detallar el procedimiento de detección de la deformación y para llevar un orden cronológico de los pasos a seguir, se explicará brevemente el proceso de calibración necesario para poder realizar las mediciones correctamente, de manera tal que las mediciones sean en la escala correcta. Este procedimiento se explica a continuación.

### 2.1. Calibración

La primera etapa del proceso requiere una calibración de la imagen que se está adquiriendo en tiempo real, la cual, en el modo más simple, permite seleccionar dos puntos de esta separados por una distancia conocida e ingresar esa distancia al software para que pueda ejecutar la calibración automática del equipo. De ese modo se obtiene una relación entre el número de píxeles y la distancia medida.

De forma similar, se pueden realizar calibraciones con cuatro puntos para llevar a cabo calibraciones que permitan corregir distorsiones producidas por el ángulo de la cámara respecto del objeto a medir. Además, en el caso de tener que corregir distorsiones producidas por la lente o desalineación de la cámara, se puede recurrir a una grilla de calibración, lo cual permitirá corregir toda el área de visión de la cámara (figura 3).

### 2.2. Ajuste de Cero

Una vez realizada la calibración, se debe ajustar el cero del objeto a medir, para lo cual se debe seleccionar el objeto que se desea “seguir” con el software. Una vez posicionada la cámara y el objeto en la posición que se usará como referencia en la medición, se realizará el “Ajuste de Cero” de esa manera el software toma la posición actual como el cero de la medición, coloca todos los indicadores en cero y, a partir de ese instante, comienza a medir cualquier movimiento que se produzca desde la posición anterior.

### 2.3. Detección

Como se explicó anteriormente, se buscan determinar los coeficientes de impacto ( $f_n$ ). Los cuales se obtienen como resultado de analizar el ensayo estático y los dinámicos respectivamente. Para el caso particular del ensayo estático se coloca una locomotora encima de la obra de arte y se mide la deformación. En el caso más favorable no se detecta deformación, de lo contrario se mide una deformación determinada por cuantos milímetros se desplazó la estructura hacia abajo en la parte que mayor movimiento tiene, comúnmente denominada como flecha. Luego se procede a realizar los ensayos dinámicos que consisten en analizar varias pasadas del elemento rodante, determinando la máxima deformación y las vibraciones. Cada uno de estos ensayos se describirán con más detalle a continuación.

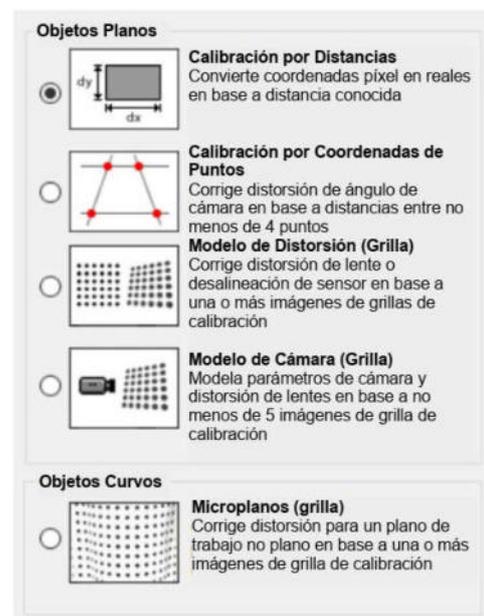


Figura 3. Métodos de calibración

Para iniciar una medición, como se mencionó antes, se debe completar la calibración y el ajuste de cero, en este punto el software queda listo para medir, debiéndose seleccionar el tipo de medición que se desea realizar: *Estática* o *Dinámica*. Esto se debe realizar desde la pantalla de configuración del software, como puede apreciarse en la figura 4.

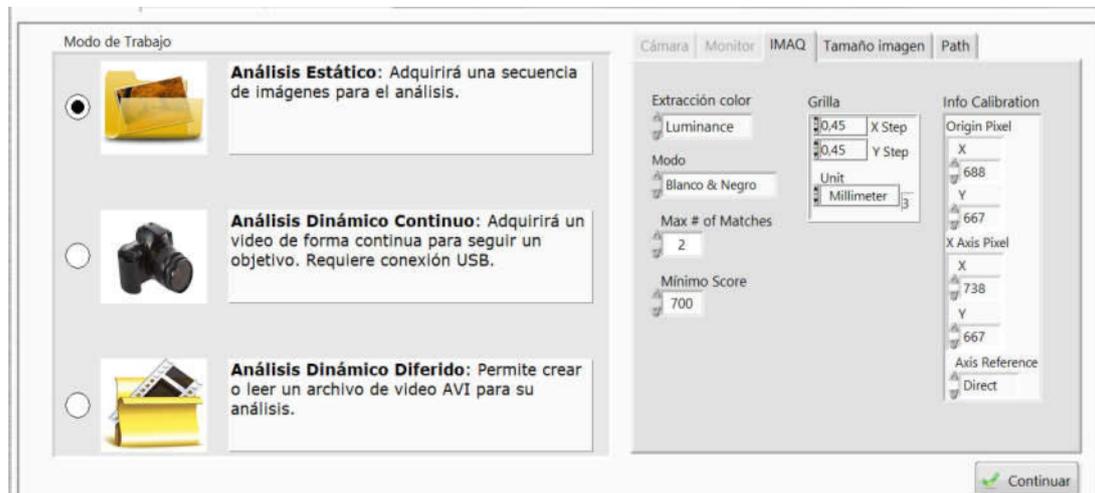


Figura 4. Pantalla para seleccionar el Modo de trabajo

Este procedimiento permitirá indicar en un gráfico y en un indicador de aguja el desplazamiento en función del tiempo del objeto seleccionado como “patrón”. De esta manera si el objeto se desplaza hacia abajo se indicará un valor negativo en milímetros, de lo contrario el valor será positivo según se ve en la figura 5.

#### Análisis Estático:

En este tipo de análisis se utiliza la cámara para sacar una secuencia de imágenes a intervalos previamente definidos, en las cuales se va “siguiendo” un patrón previamente seleccionado, este patrón podrá ser la imagen de una diana convenientemente seleccionada para el sistema.

Para iniciar la secuencia de imágenes con este método, se debe presionar el botón Continuar (mostrado en la figura 4) y, a continuación, se debe realizar la calibración del sistema, que tal como se explicó anteriormente, lo cual consiste en seleccionar una distancia conocida de la imagen adquirida e indicar manualmente a cuantos milímetros equivale. De esa forma el sistema se recalibra de manera tal que la distancia seleccionada en la imagen se corresponda a la cantidad de milímetros indicados.

Luego se da paso al material rodante, el que se colocará cubriendo la totalidad de la obra de arte por el lapso de dos minutos para posteriormente colocarse en la posición que efectúe la máxima deformación. En este momento y mediante el accionamiento inicial del operador, el sistema comenzará la medición del desplazamiento vertical de la diana anteriormente mencionada respecto a su posición inicial. Dicha medición es visible en tiempo real por el operador y es adquirida y registrada en lapsos de 5 (cinco) minutos.

Posteriormente el instrumento dará aviso cuando 2 mediciones sucesivas difieran en menos de un 3% o hayan pasado 30 minutos (lo que ocurra primero). Una vez ocurrido esto, el operador dará las indicaciones para el retiro del material rodante sobre la obra de arte, pero el sistema seguirá midiendo.

El sistema culminará las mediciones cuando se cumpla la siguiente inecuación:

$$(L_n - L_{n-1}) \leq 0.15 L_{n-1} - L_{n-2}$$

Siendo n el número de orden de las lecturas y L la lectura propiamente dicha.

El valor máximo medido de desplazamiento se almacena en un registro para una posterior consulta y para el cálculo de los coeficientes de impacto. Luego se procede con la medición dinámica.

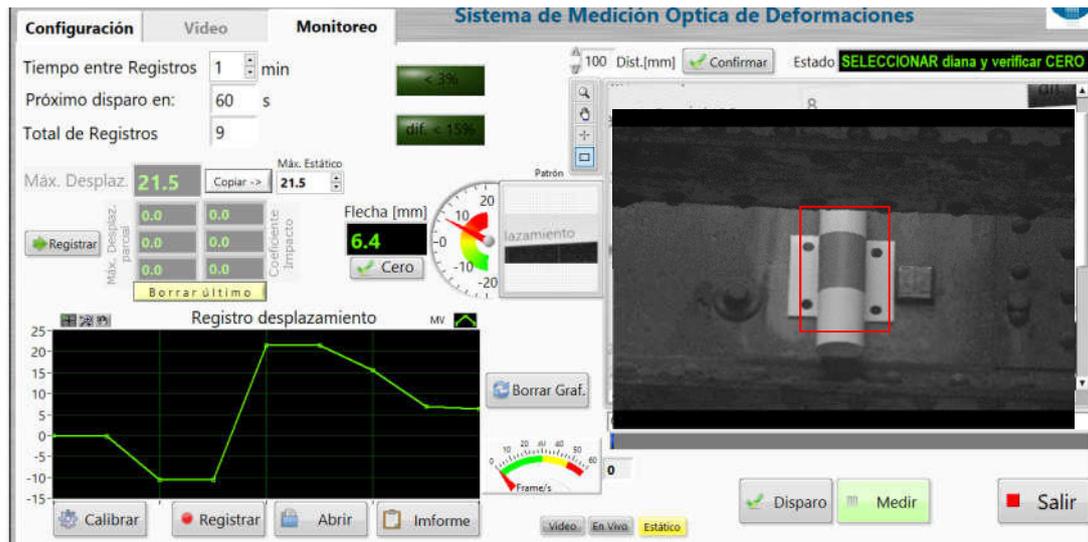


Figura 5. Ejemplo de interfaz del software de monitoreo y análisis

### Análisis Dinámico:

En este modo se adquirirá un video de forma continua siguiendo el patrón que se haya seleccionado, preferiblemente una diana.

En este modo se habilitarán las lengüetas *Cámara* y *Monitoreo* para poder seleccionar la cámara a utilizar y poder monitorear el video adquirido. Para iniciar la adquisición del video, la cámara debe estar conectada mediante un cable USB, encendida y desde la lengüeta *Cámara*

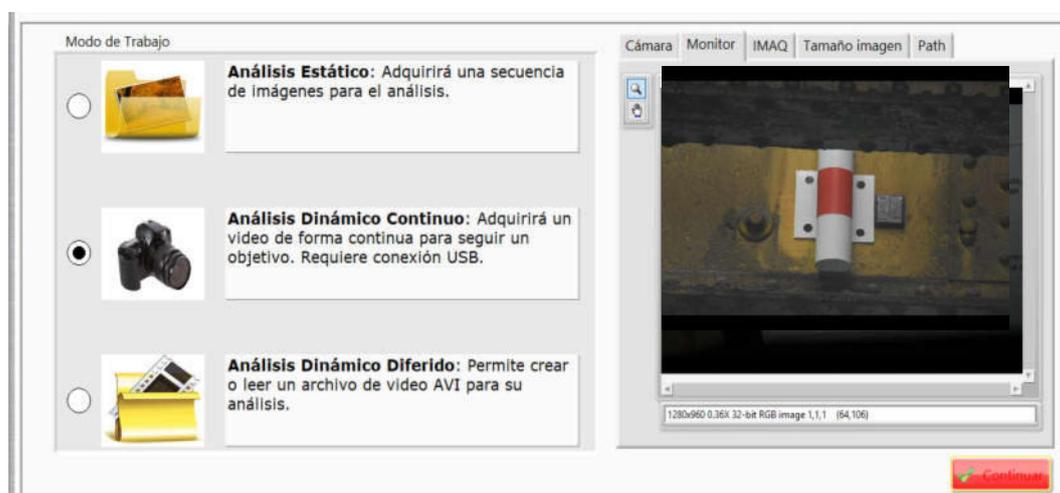


Figura 6. Selección del modo Dinámico y monitoreo de video



se debe presionar el botón para permitir ver la imagen de modo continua.

En este modo también se debe pasar por un proceso de calibración, incluso si este procedimiento ya se hubiera hecho antes, dado que en este modo cambia la resolución y será necesario recalibrar el sistema.

Como en el modo anterior, para continuar con el procedimiento de Calibración y Medición se debe presionar el botón “Continuar”.

Las velocidades de paso previstas para esta prueba son:

- 1) 20 km/h;
- 2) 40 km/h;
- 3) Velocidad normal con la cual circularán los trenes por la obra de arte (máximo 120 km/h).

El software mostrará tanto en forma gráfica como en forma de tabla los datos tiempo - deformación de cada pasada, marcando el máximo parcial y el total.

#### 2.4. Coeficiente de impacto:

El cociente entre el desplazamiento máximo obtenido de la prueba dinámica correspondiente y la prueba estática, dará como resultado el coeficiente de impacto correspondiente: **f1**, **f2** y **f3**. Donde:

$$fn = \frac{Máx Dd_n}{Máx De}$$

Siendo  $MáxDd_n$  la máxima deformación dinámica de cada pasada y,  $MáxDe$  la máxima deformación estática. Este valor es calculado y registrado por el sistema automáticamente, permitiendo tener una métrica que indica el estado de la estructura.

#### 2.5. Parámetros geométricos

A continuación, se definen los límites de los parámetros geométricos dentro de los cuales se

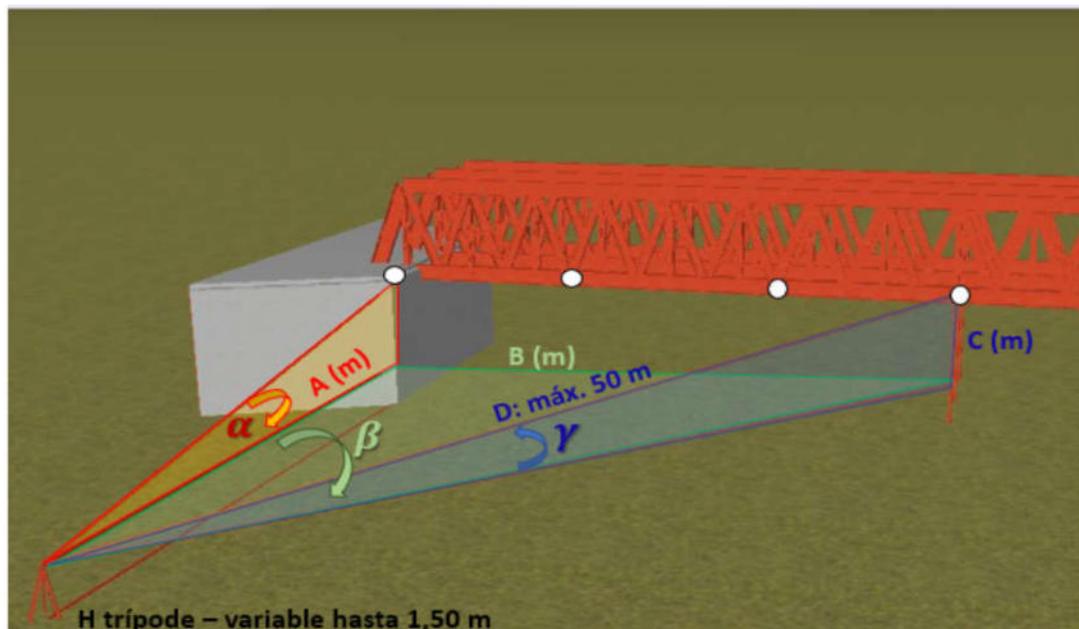


Figura 7. Parámetros geométricos a considerar en la medición

puede utilizar este procedimiento. En la figura 7 se muestran los ángulos y distancias a considerar y en la tabla 1 los límites de cada parámetro.

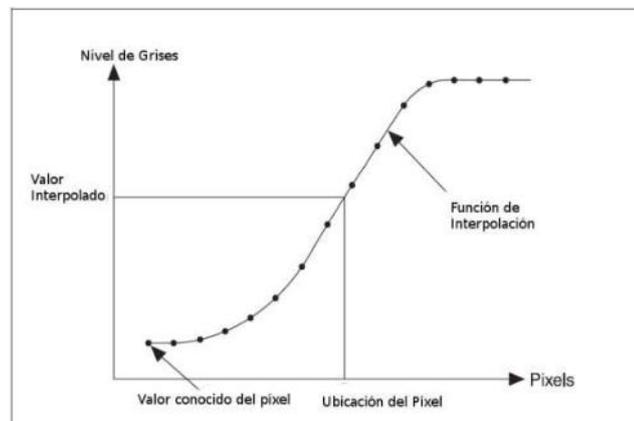
Parámetro	Máximo	Mínimo
<b>A (m)</b>	44,50	1,00
<b>B (m)</b>	25,00	1,00
<b>C (m)</b>	15,00	0,00
<b>D (m)</b>	50,00	1,00
<b><math>\alpha</math> (°)</b>	60°	0°
<b><math>\beta</math> (°)</b>	60°	0°
<b><math>\gamma</math> (°)</b>	60°	0°

**Tabla 1.** Límites de parámetros

Las pruebas realizadas se hicieron respetando estos límites expresados en la tabla, incluso tratando que los ángulos sean lo más cerca a cero. Dentro de las posibilidades que permitió el entorno donde se realizaron las mediciones.

## 2.6. Precisión de Subpíxeles

A veces es difícil obtener la resolución de imagen mínima que necesita una aplicación de visión artificial debido a los límites en el tamaño de los sensores disponibles. En estos casos, se debe encontrar las posiciones de los bordes con una precisión de subpíxeles. El análisis de subpíxeles es un método de software que estima los valores de píxeles que habría proporcionado un sistema de imágenes de mayor resolución. Para calcular la ubicación de un borde con precisión de subpíxeles, el software de detección de bordes primero ajusta una función de interpolación de orden superior, como una función cuadrática o cúbica, a los datos de intensidad de píxeles. La función de interpolación proporciona al algoritmo de detección de bordes valores de intensidad de píxeles entre los valores de píxeles originales. Luego, el software usa la información de intensidad para encontrar la ubicación del borde con una precisión de subpíxeles.



**Figura 8.** Función spline cúbica en análisis de subpíxeles

La figura 8 muestra cómo se ajusta una función spline cúbica a un conjunto de valores de píxeles. Con este ajuste, se estiman los valores en ubicaciones entre píxeles. Los algoritmos de detección de bordes utilizan estos valores para estimar la ubicación de un borde con precisión de subpíxeles.

La figura 8 muestra cómo se ajusta una función spline cúbica a un conjunto de valores de píxeles. Con este ajuste, se estiman los valores en ubicaciones entre píxeles. Los algoritmos de detección de bordes utilizan estos valores para estimar la ubicación de un borde con precisión de subpíxeles.

Con los componentes del sistema de imágenes y las herramientas de software disponibles en la actualidad, se puede estimar de manera confiable la precisión de un cuarto de subpíxeles. Sin embargo, los resultados de la estimación dependen en gran medida de la configuración de la imagen, como las condiciones de iluminación y la lente de la cámara. Por lo tanto, es

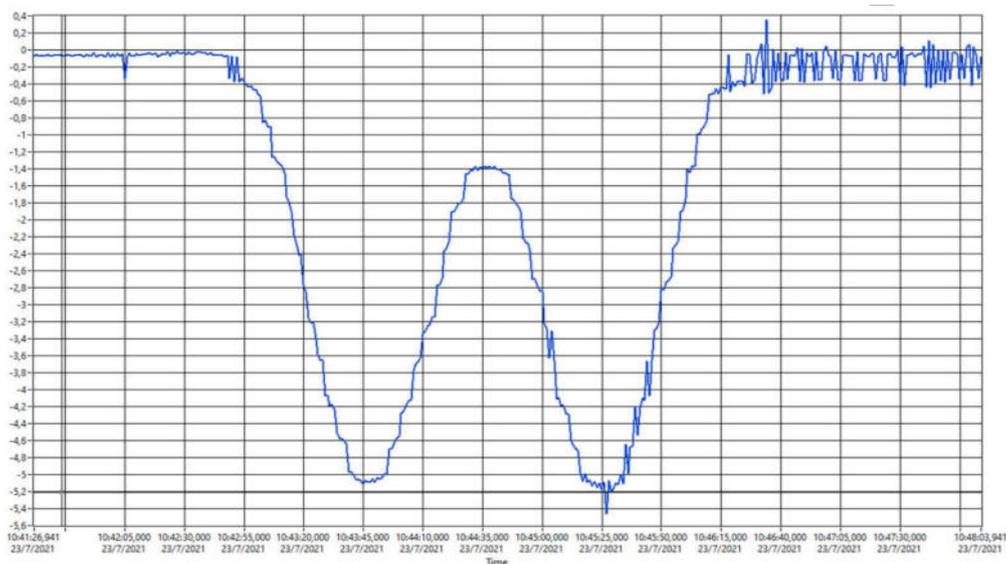


altamente recomendable que antes de recurrir a la información de subpíxeles, se intente mejorar la resolución de la imagen.

### 3. CONCLUSIONES

El sistema de medición tal como está diseñado es muy simple de utilizar ya que no requiere ningún tipo de procedimiento especial, esto es, el operador debe posicionar el equipo a una distancia compatible con la precisión que se desea obtener, apuntar al objetivo, calibrar la imagen y sólo esperar luego el movimiento estático o dinámico de dicho objetivo. Todo el análisis y resultados son automáticamente elaborados por el software, el cual cuenta con visualización en línea, registro de datos en diversos formatos (p.ej., csv y TDMS) y elaboración de el/los informe/s de resultados.

Para mencionar alguno de los ensayos que se han realizado con este método, podemos ver el la figura 9, la cual se obtuvo analizando el pasaje de una locomotora por una obra de arte. En la curva de la figura se pueden apreciar dos claros valles que se corresponden al pasaje del primer y segundo bogie de la locomotora respectivamente. Registrando una deformación máxima de 5.2mm. Esto demuestra la precisión de la medición durante esta prueba dinámica.



**Figura 9.** Registro de una medición dinámica al paso de una locomotora, donde se puede distinguir el paso de ambos bogíes. Flecha máxima = 5.2mm

También se puede concluir que esta metodología posee ventajas frente a sistemas basados en equipos topográficos o GPS, a saber:

**Precisión:** se pueden alcanzar precisiones del orden de las décimas de milímetro y no se requiere nivelación del equipo en absoluto. Con equipos GPS de doble frecuencia esa precisión no es posible de lograr aún con post-procesamiento.

**Facilidad de uso:** al contrario de equipos GPS de doble frecuencia, que requieren el uso de software especializado y costoso de post-procesamiento, este método entrega los resultados de manera inmediata y automática.

**Independencia del Operador:** al contrario de equipos topográficos donde la experiencia del operador juega un papel muy importante, este equipo funciona automáticamente para detectar el objetivo y realizar la operación, por lo que no requiere una preparación especial y es, en consecuencia, independiente del criterio del operador.



**Mediciones Dinámicas:** Con la cámara y hardware de adquisición de imágenes adecuados, el equipo permite mediciones de frecuencias de más de 20 Hz, lo cual no es alcanzable con otros equipos.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. National Instruments Corp., IMAQ Vision Concepts Manual, June 2003 Edition Part.
- [2]. José Rafael Lajara Vizcaíno, José Pelegrí Sabastiá, LabVIEW. Entorno gráfico de programación 3ªed, 25 Abril 2017 - Edición en Español.
- [3]. Edited by Natalie Baddour, Recent Advances in Vibrations Analysis, IntechOpen, ISBN 978-953-307-696-6, eBook (PDF) ISBN 978-953-51-6044-1, 2019.
- [4]. Zapateiro de la Hoz, Mauricio (editor), Pozo, Francesc (editor), Advances on Analysis and Control of Vibrations - Theory and Applications, IntechOpen, ISBN 978-953-51-0699-9, eBook (PDF) ISBN 978-953-51-6230-8, 2012.



## OPORTUNIDAD PASO A DISTINTO NIVEL EN RP2 CON FFCC GRAL. ROCA RAMAL RINGUELET-BRANDSEN

Esp. Ing. Tomás, Martiarena<sup>1</sup>, Ing. Miguel Ángel Ramón, Galache<sup>2</sup>, Mg. Ing. Sergio Martín Arocas, Amado<sup>3</sup>

<sup>1</sup> UIDET IAME - Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería U.N.L.P., calle 1 N° 732, La Plata, Argentina – [tomas.martiarena@ing.unlp.edu.ar](mailto:tomas.martiarena@ing.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> UIDET IAME - Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería U.N.L.P., calle 1 N° 732, La Plata, Argentina – [ramon.galache@ing.unlp.edu.ar](mailto:ramon.galache@ing.unlp.edu.ar)

<sup>3</sup> UIDET IAME - Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería U.N.L.P., calle 1 N° 732, La Plata, Argentina – [martin.arocas@ing.unlp.edu.ar](mailto:martin.arocas@ing.unlp.edu.ar)

### RESUMEN

Este documento presenta una propuesta alternativa para el cruce de la Ruta Provincial N° 2 (RP 2) y la Ruta Provincial N° 13 (RP 13) en la Ciudad de La Plata, preservando la infraestructura ferroviaria del ramal Ringuelet-Brandsen del Ferrocarril General Roca. La Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia de Ingeniería Aplicada a la Mecánica y Electromecánica (UIDET – IAME) de la Universidad Nacional de La Plata tiene experiencia en la temática ferroviaria y en el relevamiento de la infraestructura del ramal mencionado.

En 2018, se anunció la construcción de un nuevo cruce vial sobre las rutas mencionadas. Se consultó sobre la coordinación con los organismos nacionales encargados del ferrocarril (ADIF, AABE), ya que el cruce con el ramal Ringuelet-Brandsen se encuentra cerca. Se informó que ADIF solicitó que la rampa sobre la Av. 520 comience después del cruce con la vía. Vialidad Provincial indicó que ADIF no planeaba reactivar el ramal en ese momento y que, en caso de necesidad, la solución sería extender el terraplén para que la ruta pase por encima del ferrocarril.

Por lo tanto, se propone una solución alternativa que desplaza el cruce 506 metros, permitiendo que tanto los vehículos como el ferrocarril pasen por debajo de la RP 2 en un paso a distinto nivel. Esta alternativa incluye la creación de una vía de circunvalación al parque industrial adyacente al cruce, para dirigir el tráfico que sale de la RP 2 desde CABA, conectando también el barrio "San Martín" y mejorando la accesibilidad al parque para el transporte automotor. Esta solución de cruce a distinto nivel es similar a la utilizada en Berazategui, cerca de la estación Hudson del ramal La Plata-Buenos Aires del FCGR.

**Palabras Clave:** *Cruce De Rutas, Infraestructura Ferroviaria, Distribuidor Vial, Paso A Distinto Nivel*



## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos se han acrecentado los pronunciamientos por parte de los distintos gobiernos (nacional, provincial y municipales) y de especialistas en el tema, acerca de posibilidades de recuperación de la conectividad ferroviaria de la provincia de Buenos Aires, y en particular del puerto de La Plata, sirviendo, también, esta conexión a Berisso y Ensenada [1][2]. De acuerdo a los antecedentes en la temática de estudios ferroviarios aplicados y específicamente en temas de conectividad, de la Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia de Ingeniería Aplicada a la Mecánica y Electromecánica (UIDET – IAME) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata [3] se propone una alternativa de materialización de un cruce vial de dos rutas de la provincia de Buenos Aires, salvaguardando la traza del ramal ferroviaria de la Línea General Roca (LGR), que conecta La Plata con Brandsen, corredor que actualmente está inhabilitado para su recuperación pero que podría constituir una arteria central para la movilización de cargas contenerizada desde el puerto de La Plata hacia el interior de la provincia y viceversa, sin tener que pasar obligadamente por las zonas condensadas del AMBA, proveyendo además de una conexión ferroviaria a una zona de alta importancia para la economía regional de la Región Capital, como lo es la zona del cordón Florifruitohortícola y el Parque Industrial 1 de La Plata.

El mencionado antecedente [3] se basa en un relevamiento que permite un estudio técnico – económico para la recuperación de este ramal, listando el tipo de tareas necesarias por tramos y estimación de costos.

En febrero de 2018 se anunció, por parte del gobierno provincial, un paquete de obras que incluía la realización de un distribuidor vehicular entre la RPN2 y la RNP13 (Esta última arteria cruza la ciudad de la La Plata por la periferia y es conocida como Av. 520) [4]. A raíz de esto se concretó la toma de vista en Oficinas de Vialidad Provincial, de la documentación técnica del proyecto. Si bien la licitación aún no se materializó, se consultó por el nivel de coordinación con los organismos nacionales que administraban bienes del ferrocarril (ADIF, AABE), ya que la RP13 se encuentra a 500 metros de las vías del FFCC Gral. Roca en este cruce, como se puede observar en la Figura 1. En la Figura 2 se esquematiza la situación actual del cruce.



Figura 1: Vista aérea de la proximidad de la Av. 520 y las vías del FFCC Gral. Roca. Cortesía Google Earth

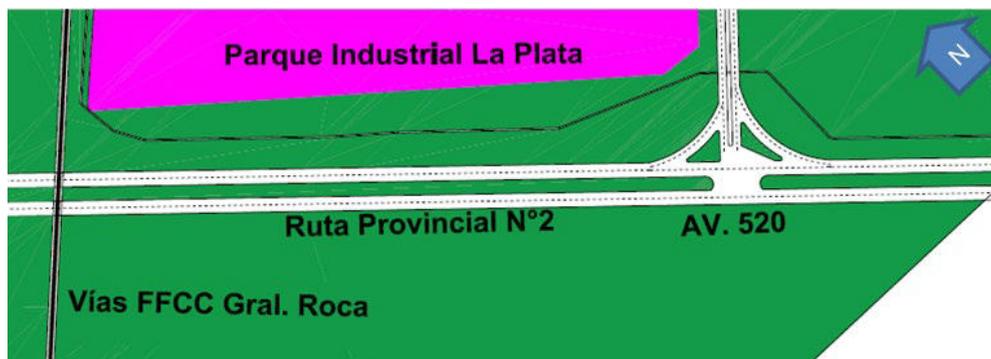


Figura 2: Situación actual.

Con respecto al grado de coordinación con ADIF, se informó que la administradora de infraestructura había solicitado que el inicio de terraplén para la materialización la rampa sobre la RP13 comience inmediatamente después de la vía en el sentido de avance de RP2 hacia Mar del Plata. Una imagen ilustrativa de cómo quedaría este cruce según lo proyectado se muestra en la Figura 3. Desde el eje del cruce propuesto y el eje de la vía del FCGR existe una distancia de aproximadamente 506 metros.



Figura 3: Vista esquemática de como quedaría el cruce según proyecto. Producción propia



Al mismo tiempo se informó que ADIF por el momento, no tenía pensado utilizar ese ramal y que, ante la eventual necesidad de realizar el paso a distinto nivel con el Ferrocarril, la solución sería extender el terraplén, abarcando la vía. Se puede pensar que una vez efectuado el cruce mostrado en la Figura 3, y con la RP 2 funcionando plenamente, será extremadamente difícil realizar esa obra, sin mencionar los costos de extender el terraplén.

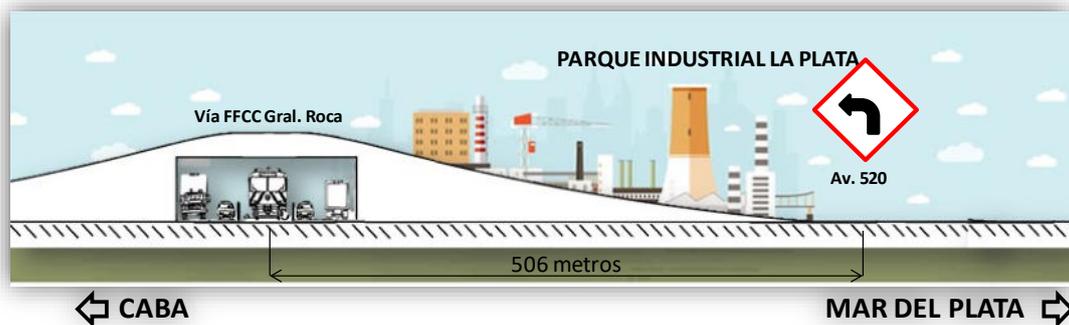


Figura 4: Vista esquemática de la modificación propuesta. Producción propia

## 1 Descripción de alternativas

A continuación, se describen dos posibilidades de cruce entre vialidades: Una La Alternativa 1 contempla el cruce se materializado en la intersección de los ejes de las trazas principales de la RP2 y RP13; y otra Alternativa 2 donde se propone la descentralización de uno de los ejes de las vialidades, con el fin de contemplar el cruce ferroviario.

### 1.1 Alternativa 1

Para esta alternativa se realiza una reconstrucción genérica a partir de la documentación mostrada como anteproyecto, de la cual no se posee antecedente por no ser aún documento licitatorio.

La misma propone la materialización del cruce entre la RPN2 y la RPN13, con un distribuidor vehicular tipo trompeta, ubicado en la intersección de los ejes proyectados de ambas rutas, de acuerdo se muestra en la Figura 5, elevando la RP2 por sobre la RP13. Este cruce se supondrá de acuerdo con los parámetros de diseño adoptados para vialidades nacionales de jerarquía [5] debido a la propia de la RP2, pero también se aplicará el mismo criterio para la RP13 debido a que el gálibo y el ancho de calzada se debe ajustar al tránsito no solo de vehículos livianos, sino también de camiones de los que un nodo de la matriz origen destino se encuentra en el Parque Industrial 1 de La Plata.



Así pues, el gálibo del puente deberá respetar los 5,1 m de altura y la calzada estará constituida por 2 manos, las cuales a su vez deberán presentar 2 carriles de 3,65 m. De esta manera cada mano tendrá un ancho de calzada de 7,3 m.

A su vez se respetará la distancia al estribo y pila del puente de 7 m, computando una luz total por mano de 21,30. Se considera, para los fines comparativos de las alternativas, que la luz total entre estribos será de 44 m.

Para las rampas se adopta una pendiente de 2%, lo que constituye un desarrollo lineal (tomando en cuenta dimensiones conservadoras para el tablero y calzada) de aproximadamente 300 m por rampa.

De esta manera, desde el inicio de la rampa ascendente hasta el final de la rampa descendente se estimará una longitud de 644 m.

En la Figura 5 se aprecia esquemáticamente la situación descrita y en la Figura 6 se detallan las características geométricas de la rampa de la Alternativa 1.

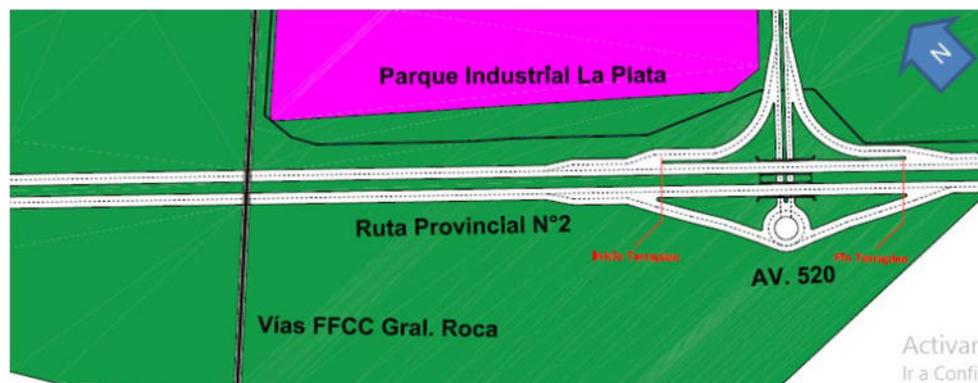


Figura 5: Esquema de la propuesta de la Alternativa 1.

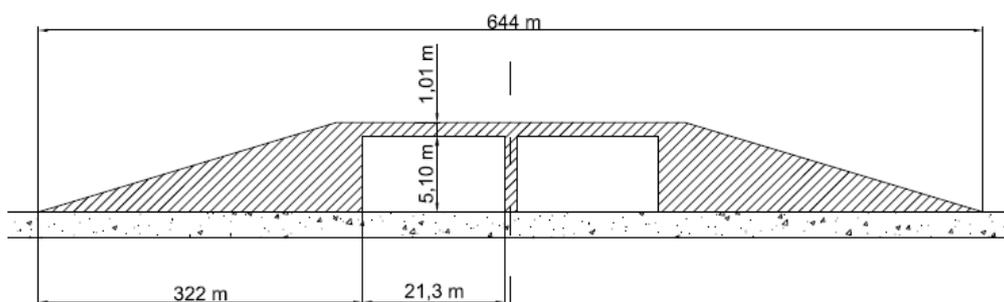


Figura 6: Características geométricas para la rampa de la Alternativa 1



### 1.1.1 Flujos vehiculares

En la Figura 7 se muestra con diferentes colores en distintos los distintos flujos vehiculares desde y hacia la RP 2. Por debajo del puente deben pasar los que ingresan sentido Mar del Plata y los que egresan desde CABA hacia la ciudad de La Plata



Figura 7: Esquema de la propuesta de vialidad para el cruce de la Rp 2 con la Av 520.

Producción propia

### 1.2 Alternativa 2

La propuesta concurrente se caracteriza por dos factores: por materializar el cruce ferroviario en conjunto con el cruce de las RP 2 y RP13. El cruce en sí mismo mantiene la tipología de la Alternativa 1, pero contempla además el cruce de la traza ferroviaria a distinto nivel y paralela a la RP13; y en segundo lugar por proveer de acceso vial al barrio San Martín que linda con el Parque Industrial 1, dotándolo de conectividad potencial con el sistema de transporte público.

Para esto es necesario descentralizar el eje de la RP 13 hacia el eje de la infraestructura ferroviaria de vía sencilla del ramal Ringuelet – Brandsen del FCGR, en aproximadamente 506 m. Si bien, por razones de las reglas del arte no es recomendable descentralizar la traza de una de las rutas, la incorporación de la traza de una vía férrea – unidireccional guiada – al paquete vial, amerita tal desplazamiento, y teniendo en cuenta además que el cruce constituirá además el punto terminal de la RP13.

De esta manera, considerando los parámetros geométricos aplicados en la Alternativa 1 [5] y considerando además el cruce de la traza ferroviaria normalizada en S.E.T.O..P 7/81[6], se propone el cruce a distinto nivel de la RP2 sobre las RP13 y la vía férrea del ramal Ringuelet – Brandsen, centrando el eje del cruce sobre el eje de esta última.

En virtud de la normativa vigente [6] se clasifica la presente propuesta como cruce rural a distinto nivel. De la Tabla 1 se determina el gálibo mínimo a contemplar en el puente;



considerando que la calzada de la RP2 es de doble mano y doble carril, teniendo en cuenta la separación mínima entre manos [5] se determina que el valor de  $a$  es de 17 m, correspondiendo para este un valor de altura  $h$  de 5,49 m.

Tabla 1: Altura de puentes vs. Ancho de puentes s/ S.E.T.O.P. 7/81

a: ancho del puente

h: altura libre mínima

a (m)	h (m)	
	Trocha ancha y media (1,676) y (1,435)	Trocha Angosta (1,000)
$a \leq 5$	5,41	5,01
$5 < a \leq 10$	5,43	5,03
$10 < a \leq 15$	5,45	5,05
$15 < a \leq 20$	5,49	5,09
$20 < a \leq 25$	5,54	5,14
$25 < a \leq 30$	5,59	5,19
$30 < a \leq 35$	5,67	5,27
$35 < a \leq 40$	5,75	5,35
$40 < a \leq 45$	5,84	5,44

De igual manera, se calcula la luz de las secciones pasantes del puente, correspondiente de acuerdo con [5] un ancho de calzada de 7,3 m por mano. La luz para el paso de la vía férrea será contemplada de acuerdo a la Ecuación 1, de acuerdo a la Figura 8 y la Tabla 2 [6]

$$L_{Luz Libre} = 2 \cdot (d_{min}) + x + 0,8 \quad (1)$$

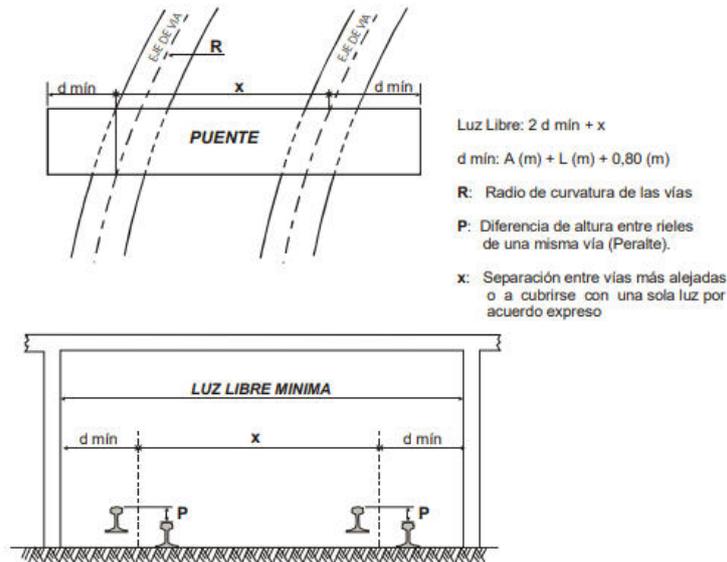


Figura 8: Luz libre bajo en distinto nivel para cruce de vialidad con vía férrea s/ S.E.T.O.P .7/81

Tabla 2: Distancias mínima de la vía a Obras de Arte s/ S.E.T.O.P 7/81

Medida "A" según radio de curvatura			Medida "L" según peralte			
A (m)	R (m)		P (mm)	L (m)		
	Trochas ancha y media (1,676) y (1,435)	Trocha angosta (1,000)		Trocha ancha (1,676)	Trocha media (1,435)	Trocha angosta (1,000)
1,90	-	R > 1.500	P = 0	0,00	0,00	0,00
1,92	-	R = 1.500	0 < P ≤ 15	0,04	0,05	0,06
1,94	-	1.500 > R ≥ 750	15 < P ≤ 30	0,08	0,10	0,12
1,96	-	750 > R ≥ 500	30 < P ≤ 45	0,12	0,14	0,19
1,98	-	500 > R ≥ 400	45 < P ≤ 60	0,16	0,19	0,25
2,00	-	400 > R ≥ 300	60 < P ≤ 75	0,20	0,24	0,31
2,05	-	300 > R ≥ 200	75 < P ≤ 90	0,24	0,28	0,37
2,10	R > 1.500	200 > R ≥ 150	90 < P ≤ 105	0,28	0,33	0,43
2,13	R = 1.500	-	105 < P ≤ 120	0,32	0,38	0,45
2,15	1.500 > R ≥ 900	-	120 < P ≤ 135	0,36	0,42	-
2,17	900 > R ≥ 650	-	135 < P ≤ 150	0,40	0,47	-
2,19	650 > R ≥ 500	-	150 < P ≤ 165	0,44	0,50	-
2,20	500 > R ≥ 450	150 > R ≥ 100	165 < P ≤ 180	0,48	-	-
2,21	450 > R ≥ 400	-	180 < P ≤ 190	0,51	-	-
2,23	400 > R ≥ 350	-				
2,25	350 > R ≥ 300	-				
2,28	300 > R ≥ 250	-				
2,32	250 > R ≥ 200	-				
2,39	200 > R ≥ 150	-				
2,54	150 > R ≥ 100	-				

Contemplando un peralte de vía nulo (P=0) y vía prácticamente recta (R>>1500 m), tomando conservadoramente un valor de A = 2 m y un valor de L= 0 m, el valor mínimo de **d** es de 2,8 m.

El valor de **x** queda determinado por el gálibo para trocha 1676 mm [7], el cual resulta de 4,2 m.

En virtud de la Ecuación (1) la luz necesaria para el paso de la línea férrea es de 10,6 m.



De esta manera se anteproyecto un puente para el paso en distinto nivel de la RP2 sobre la RP13 y la vía férrea del ramal Ringuet – Brandsen, de luz entre estribos de aproximadamente 54 m, considerando 2 pilas de apoyo intermedio para el tablero.

Para las rampas se tomará una pendiente de 2%, y teniendo en cuenta el nuevo gálibo de 5,49 m y las mismas consideraciones para el tablero de la Alternativa 1, el desarrollo lineal de cada rampa será de aproximadamente 325 m.

De esta manera, desde el inicio de la rampa ascendente hasta el final de la rampa descendente se estimará una longitud de 704 m.

En la Figura 9 se puede apreciar un esquema de lo propuesto y en la Figura 10 se detallan las características geométricas (dimensionamiento) de la alternativa 2.

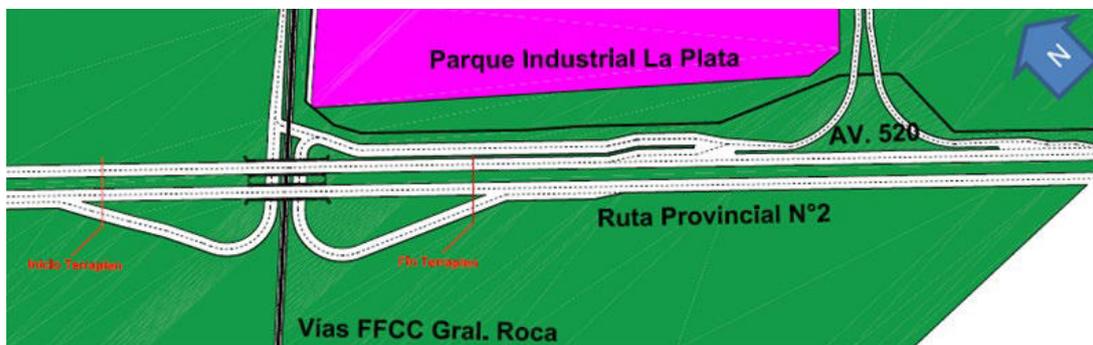


Figura 9: Esquema de la propuesta de la Alternativa 2. Producción propia

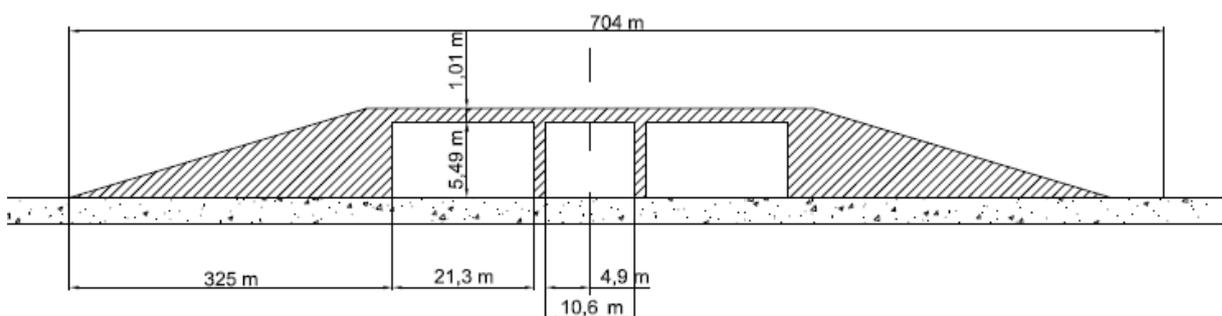


Figura 10:: Características geométricas para la rampa de la Alternativa 2

### 1.2.1 Flujos vehiculares

En la Figura 11 se muestran los distintos tipos de movimientos posibles, señalando con diversos colores los flujos vehiculares que ingresan y egresan desde la Rp 2.

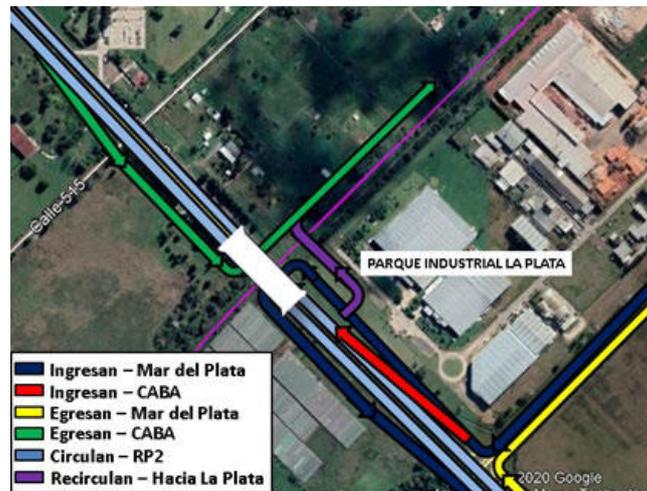


Figura 11: Esquema de la propuesta de cruce a distinto nivel para la Av. 520. Producción propia

Esta propuesta implica la creación de una vialidad de jerarquía que circunvale al parque industrial para poder canalizar los vehículos que egresan de la Rp 2 provenientes de CABA así como, dote de conectividad al barrio “San Martín” (ubicado detrás del parque industrial) [8][9] y a su vez aumente la permeabilidad del parque al transporte automotor.

### 1.3. Terraplén

Para el cálculo del terraplén se utiliza una geometría como la que se describe en la Figura 12. De este modo, se estima que por cada metro lineal de terraplén son necesarios 280 metros cúbicos de “tierra”. Se considera para el análisis que en las diferentes alternativas el terraplén utiliza tierra con iguales propiedades, resultando esta simplificación un instrumento de comparación simple y robusto entre propuestas.

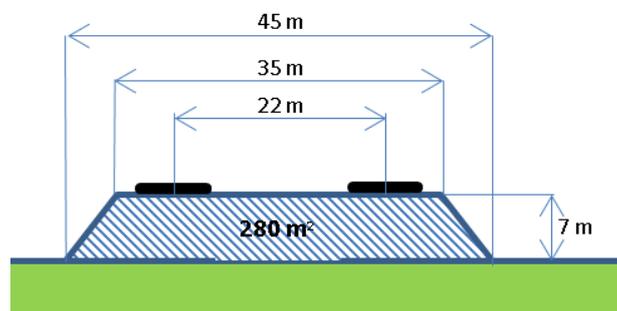


Figura 12: Geometría aproximada del terraplén necesario. Producción propia

En este momento, recordaremos que la propuesta denominada como Alternativa 1 no contempla el cruce a distinto nivel con el FFCC Gral. Roca. A la hora de la consulta por esta cuestión, la respuesta de los representantes de esta entidad fue que, en caso de reactivarse el



ramal, podrían extender el terraplén para pasar por encima de la vía. Un esquema de la propuesta, con el inicio y fin de terraplén se presenta en la Figura 13. Entre estas dos indicaciones existen aproximadamente 1153 metros. Las dimensiones del cruce a distinto nivel de la Alternativa 1 que contempla al FFCC se detallan en la Figura 12.

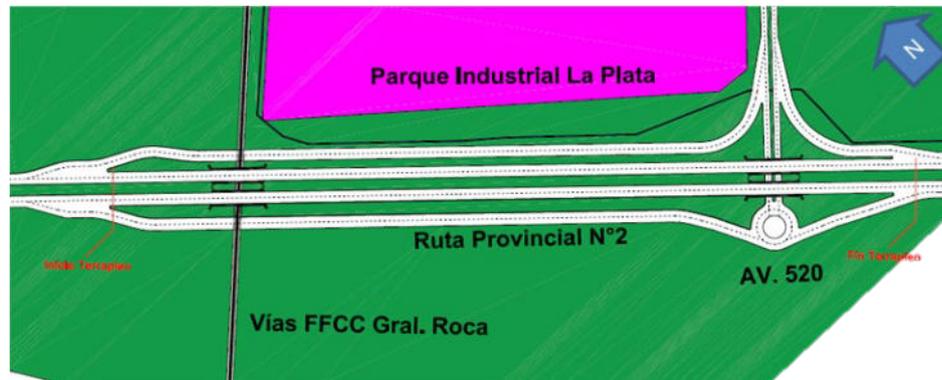


Figura 13: Propuesta de VP que contempla el paso a distinto nivel con las vías del ferrocarril.

Producción propia

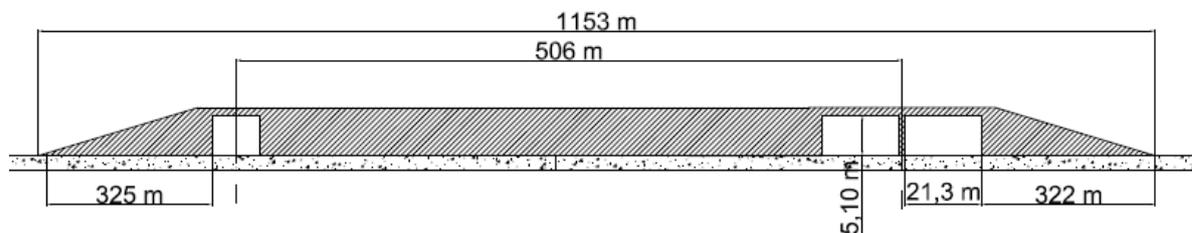


Figura 14: Dimensiones del cruce a distinto nivel de la Alternativa 1 que contempla al FFCC

Resulta útil realizar la comparación de las posibles soluciones a esta intersección multimodal. Si bien la alternativa 1 resuelve en el corto plazo la cuestión vial, insumiendo menor cantidad de recursos que la propuesta del IAME, no considera la infraestructura del FFCC. En caso de querer solucionar esta cuestión a futuro, obligaría al estado a incurrir en gastos, que a priori, duplicarían la inversión propuesta por el IAME. Esto puede imaginarse al observar la Figura 15. Los volúmenes de terraplén de las diferentes propuestas indican que si bien la propuesta del IAME (Alternativa 2) implicaría un 10% más de movimiento de suelo que la propuesta denominada Alternativa 1, solucionar tanto el problema vial como el ferroviario, ahorrando a futuro el movimiento de  $62.860 \text{ m}^3$  de "tierra", lo que representa el 69,72% del movimiento de suelo de la propuesta de la Alternativa 1.

En la Figura 15 se comparan los volúmenes de tierra necesarios para la ejecución de las diferentes obras, indicando el volumen del terraplén de las diferentes alternativas.

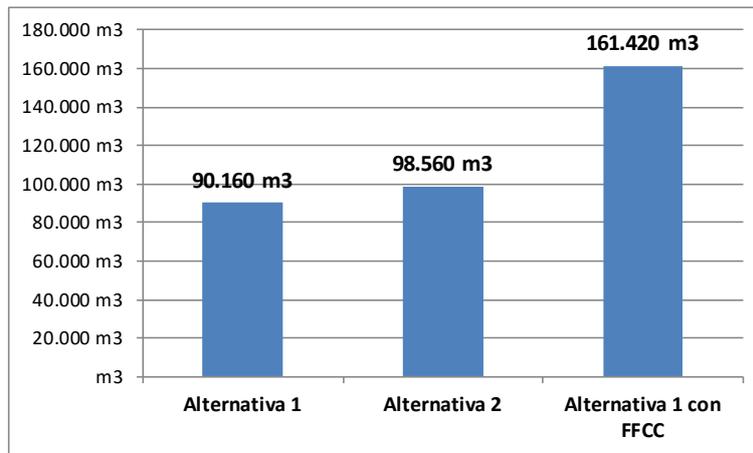


Figura 15: Comparación de volúmenes de tierra necesarios para cada propuesta. Producción propia

Este costo extra, que de otro modo sería ahorro, de solucionar el tema ferroviario podría resultar en un impositivo para la vuelta del servicio ferroviario, tanto para pasajeros como para carga entre la capital con el resto de la provincia sin pasar por CABA.

Además, si se tienen en cuenta las conclusiones del relevamiento realizado por el IAME mencionado al inicio, en donde se pondera que el costo asociado a la construcción del paso a distinto nivel en la RP2 respecto al resto de los costos necesarios para la reactivación del ramal Ringuelet-Brandsen, se podrá dimensionar la conveniencia de la propuesta de esta UIDET. En ese documento se detallan los distintos montos y se hace hincapié en que los pasos a distintos nivel sobre la RP2 y la RP6 representan en conjunto un 32% del total a ser invertido para recuperar el ramal, tal como puede observarse en la distribución de costos para la recuperación del ramal mostrado la Figura 16.

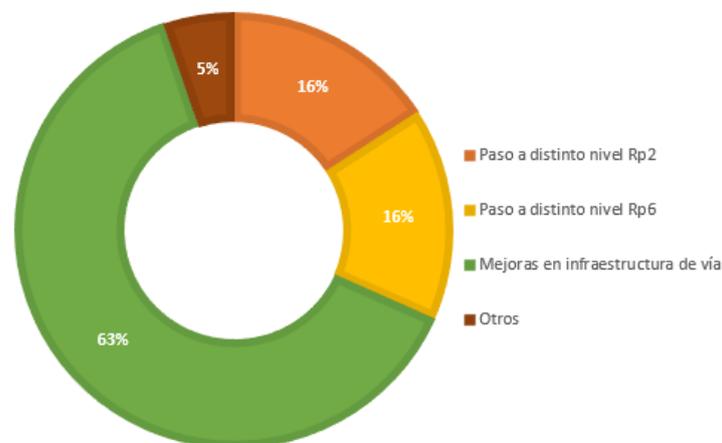


Figura 16: Proporcionalidad de costos en la recuperación del ramal La Plata – Brandsen. Producción propia



De este modo, invirtiendo de manera eficiente los fondos del gobierno provincial, resulta posible reducir el 16% el costo total de la reactivación del ramal La Plata – Brandsen.

Resulta importante observar que generar un nuevo cruce que disminuya el riesgo de accidentes en la intersección de la Av. 520 y RP2. Además y visto que ante la posibilidad de construir a diferentes niveles es apropiado considerar todas las características particulares del lugar donde se proyecta emplazar un puente. Así es que el desplazamiento de un puente puede potenciar otro modo de transporte y generar un nuevo camino para la vinculación del parque industrial La Plata, el barrio San Martín, generar la posibilidad de mantener y recuperar la conectividad desde la región capital con el interior de la Provincia de Buenos Aires.

La alternativa 2 permite mejorar el acceso al parque industrial La Plata, generando un nuevo camino terrestre que circunscribe el predio del parque industrial y reduce sustancialmente el riesgo de accidentes en el paso a nivel del FFCC Gral. Roca, así es que se considera que esta propuesta es la que mejor se adapta a las condiciones del lugar y considera otros factores de relevancia para el proyecto.

## 1. CONCLUSIONES

Las diferentes alternativas para materializar un cruce a distinto nivel generan la posibilidad de buscar la más atractiva considerando diferentes argumentos y variantes. Así resulta que la propuesta denominada Alternativa 1, solo considera la posibilidad de hacer un cruce vehicular en la intersección del RP2 y Av. 520. Mientras la Alternativa 2 considera la posibilidad de tener un modo más de transporte utilizando el mismo cruce desplazado 506 m.

En caso de realizar la alternativa 1 y luego propender a disminuir el riesgo de accidentes que se genera en el paso a nivel que se genera entre la Línea del FFCC Gral. Roca Ramal La Plata – Brandsen se requiere la construcción de un nuevo cruce a distinto nivel. Esto provoca que además de un nuevo proceso de obra en el mismo lugar se deban invertir nuevos recursos económicos en solucionar un problema persistente.

El hecho de realizar la Alternativa 2, reduce sustancialmente las erogaciones necesarias para reactivar el ramal La Plata – Brandsen, por lo que se optimizan recursos económicos y tiempo de construcción ya que no se debe cerrar la autovía dos veces para un mismo cruce.

Para esta obra resulta inevitable el movimiento de suelo, los volúmenes de terraplén de las diferentes propuestas indican que si bien la propuesta del IAME (Alternativa 2) implicaría un 10% más de movimiento de suelo que la propuesta denominada Alternativa 1, solucionaría tanto el problema vial como el ferroviario, ahorrando a futuro el movimiento de 62.860 m<sup>3</sup> de “tierra”, lo que representa el 69,72% del movimiento de suelo de la Alternativa 1



La alternativa 2 permite mejorar el acceso al parque industrial La Plata, generando un nuevo camino terrestre que circunscribe el predio del parque industrial y reduce sustancialmente el riesgo de accidentes en el paso a nivel del FFCC Gral. Roca, así es que se considera que esta propuesta es la que mejor se adapta a las condiciones del lugar y considera otros factores de relevancia para el proyecto.

## 2 REFERENCIAS

- [1] Trenes Argentinos Infraestructura. *Avanza el proyecto para que retorne el tren de carga a Berisso*. <https://www.argentina.gob.ar/noticias/avanza-el-proyecto-para-que-retorne-el-tren-de-carga-berisso>, 2020.
- [2] Velázquez M. A. *Los desafíos para una accesibilidad terrestre sustentable al Puerto de La Plata*. Revista Vial. <https://revistavial.com/los-desafios-para-una-accesibilidad-terrestre-sustentable-al-puerto-de-la-plata/>, 2021.
- [3] Arocas M., Galache M.A.R., Martiarena T., Bosc C., Bulacios E. J., Gutiérrez F., Grammatico R., Castelló M.E. *Relevamiento del estado de situación Línea General Roca ramal Ringuelet – Brandsen*. Facultad de Ingeniería, 2017.
- [4] El día. *Construirán un distribuidor vehicular en el peligroso cruce de la ruta 2 con la avenida 520*. <https://www.eldia.com/nota/2018-2-8-2-19-5-construiran-un-distribuidor-vehicular-en-el-peligroso-cruce-de-la-ruta-2-con-la-avenida-520-la-ciudad>
- [5] Vialidad Nacional. Red de autopistas y rutas seguras - Memoria descriptiva Corredores Viales Nacionales. Ministerio de Transporte de la Nación, 2018.
- [6] Resolución S.E.T.O.P.7/81. *Normas para los cruces entre caminos y vías férreas*. Ministerio de Economía – Secretaría de Estado de Transporte y Obras Públicas, 1981.
- [7] G.V.O 3234. Gálido máximo de trenes y mínimo de obras en vías comunes y electrificadas. Ferrocarriles Argentinos,
- [8] El día. *En un barrio de abasto piden construir un puente peatonal la ciudad*. <https://www.eldia.com/nota/2020-1-27-2-26-20-en-un-barrio-de-abasto-piden-construir-un-puente-peatonal-la-ciudad>
- [9] El día. *La plata se encamina una iniciativa para que los micros vuelvan a ingresar al parque industrial de abasto*. <https://www.todoprovincial.com/la-plata-se-encamina-una-iniciativa-para-que-los-micros-vuelvan-a-ingresar-al-parque-industrial-de->



## ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE LUBRICACIÓN DE PESTAÑAS DE RUEDAS FERROVIARIAS

Esp. Ing. Tomás, Martiarena<sup>1</sup>, Ing. Miguel Ángel Ramón, Galache<sup>2</sup>, Ing. Marcos Elias,  
Amado<sup>3</sup>

<sup>1</sup> UIDET IAME - Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería U.N.L.P., calle 1 N° 732,  
La Plata, Argentina – [tomas.martiarena@ing.unlp.edu.ar](mailto:tomas.martiarena@ing.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> UIDET IAME - Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería U.N.L.P., calle 1 N° 732,  
La Plata, Argentina – [ramon.galache@ing.unlp.edu.ar](mailto:ramon.galache@ing.unlp.edu.ar)

<sup>3</sup> UIDET IAME - Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería U.N.L.P., calle 1 N° 732,  
La Plata, Argentina – [marcos.amado@ing.unlp.edu.ar](mailto:marcos.amado@ing.unlp.edu.ar)

### RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio comparativo de diversas formas de lubricación de la pestaña en con el objetivo de determinar la más conveniente para su uso. Los engrasadores de bogie que utilizan pastillas son una alternativa a los engrasadores convencionales que aplican lubricante líquido en las pestañas de las ruedas de los trenes. Estos engrasadores utilizan pastillas de lubricante sólido que se colocan en una caja de engranajes montada en el bogie del tren.

Cuando la pastilla de lubricante sólido se calienta debido al rozamiento generado por la rueda, libera una fina capa de lubricante que se adhiere a la superficie de la pestaña de la rueda, reduciendo así el rozamiento y el desgaste en las pestañas y en el carril de la vía. Los engrasadores de bogie con pastillas tienen varias ventajas en comparación con los engrasadores convencionales, como la reducción de la cantidad de residuos y contaminación generados durante el proceso de lubricación, y una duración más larga de las pastillas, lo que reduce la necesidad de mantenimiento y recarga.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que los engrasadores de bogie con pastillas pueden tener limitaciones en cuanto a la velocidad y la carga que pueden soportar y pueden requerir una instalación y mantenimiento más cuidadoso y preciso. En general, los engrasadores de bogie que utilizan pastillas son una alternativa efectiva y ecológica a los engrasadores convencionales que aplican lubricante líquido en las pestañas de las ruedas de los trenes.

**Palabras Clave:** Rueda-Riel, Lubricadores De Pestaña, Gestión De La Fricción, Gestión De Vida Util De Pares Montados

## 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la gestión del perfil de rueda se ha vuelto cada vez más importante en el ámbito ferroviario. Se están tomando medidas para prolongar la vida útil de los pares montados y evitar el desgaste prematuro. Con este fin, se han diseñado sistemas de lubricación de la interfaz rueda-riel. Estos sistemas buscan reducir la fricción entre la rueda y el riel sin comprometer los esfuerzos de tracción y frenado. El objetivo es minimizar el desgaste y garantizar un funcionamiento eficiente y seguro del sistema ferroviario. En este trabajo, se analizarán los distintos modos de gestión del perfil de rueda y se examinarán diversas experiencias para clarificar el escenario y ofrecer perspectivas en esta área crucial. La implementación de estos sistemas de lubricación se presenta como una estrategia efectiva para optimizar la vida útil de los pares montados.

## 2 COMPORTAMIENTO DE BOGIE EN CURVA

Cuando un bogie entra en una curva, la fricción sobre la pestaña de la rueda aumenta debido a varios factores, incluyendo el diseño de las vías, el ángulo de ataque de las ruedas y los movimientos laterales del bogie.

El aumento de la fricción en la pestaña de la rueda al entrar en una curva se debe a varios factores. En primer lugar, el diseño de las vías, especialmente el peralte, hace que la pestaña de la rueda del lado exterior se presione con mayor fuerza contra el carril. Además, el ángulo de ataque de las ruedas provoca un contacto más estrecho entre la pestaña y el carril exterior, aumentando la fricción. Por último, los movimientos laterales del bogie debido a las fuerzas centrífugas incrementan la presión de la pestaña contra el carril. Estos factores combinados generan un mayor desgaste en la pestaña de la rueda y requieren medidas para gestionar y controlar la fricción, como el uso de lubricantes adecuados.

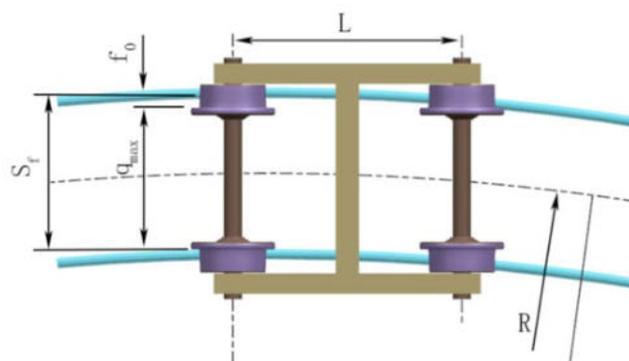


Figura 1: Bogie acomodándose en una curva



### 3 VERIFICACIÓN DEL DESGASTE DE LA RUEDA

Para verificar el estado de desgaste de una rueda en un tren, incluyendo el espesor o ancho de la pestaña:

- **Profundidad de la banda de rodadura:** Se mide la altura de la banda de rodadura de la rueda para determinar cuánto material ha sido desgastado.
- **Diámetro de la rueda:** Se verifica el diámetro de la rueda para asegurarse de que no se haya desgastado de manera irregular o excesiva.
- **Ancho de la banda de rodadura:** Se mide el ancho de la banda de rodadura de la rueda para evaluar si ha sufrido un desgaste desigual o si se ha mantenido dentro de los límites aceptables.
- **Desgaste de la pestaña:** Se verifica el desgaste de la pestaña de la rueda, que es la parte que entra en contacto con la pista. Se mide la altura y el espesor de la pestaña, y se comparan con los valores de referencia.
- **Superficie de la rueda:** Se inspecciona visualmente la superficie de la rueda en busca de grietas, fracturas u otros daños que puedan afectar su rendimiento.

Estos parámetros se miden utilizando equipos y técnicas específicas, pasando desde la inspección visual y calibres específicos hasta perfiladores laser para realizar el seguimiento de la evolución del perfil de rodadura. El objetivo es determinar si la rueda está dentro de los límites aceptables de desgaste y si necesita ser reparada o reemplazada para mantener la seguridad y el rendimiento adecuados del tren. Los calibres utilizados se pueden visualizar en la figura 2.

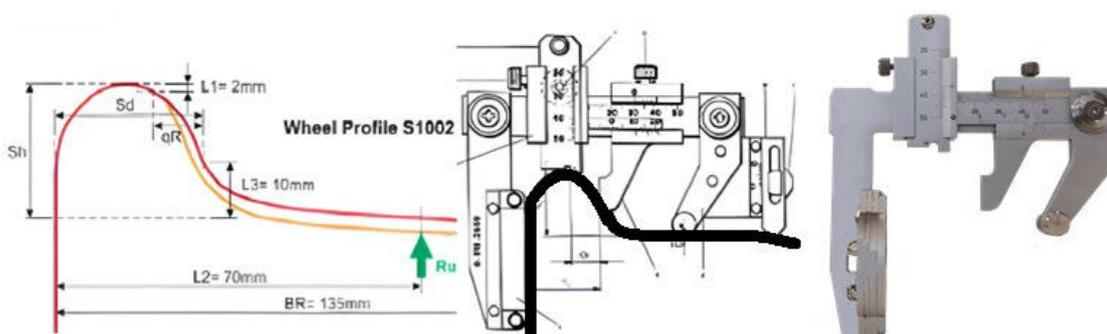


Figura 2: Calibre de rueda

#### 4 MODOS DE LUBRICACIÓN DE LA INTERFAZ RUEDA-RIEL

Existen diversas formas de lubricar la interfaz rueda-riel en sistemas ferroviarios. Estas incluyen equipos montados en los bogies de los trenes, equipos fijos instalados al costado de la vía y vehículos especializados dedicados a la lubricación de la vía. A continuación, se describen brevemente cada uno de ellos:

- 4.1 Equipos montados en los bogies de los trenes: Estos equipos están instalados directamente en los bogies de los trenes y se encargan de aplicar el lubricante en la interfaz rueda-riel mientras el tren está en movimiento. Estos sistemas pueden utilizar diferentes métodos, como la pulverización o la aplicación de lubricante líquida, en forma de grasa directamente en la pestaña del riel o a través de una pastilla de lubricante consumible apoyada sobre la pestaña de la rueda.

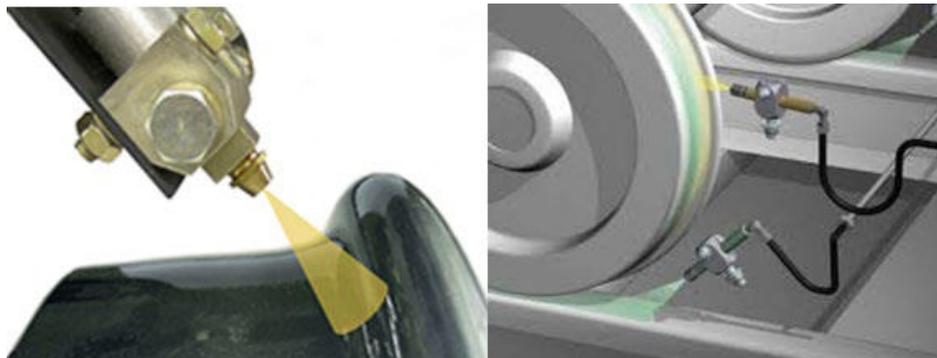


Figura 3: Pulverización de lubricante



Figura 4: Lubricación por pastilla consumible, "en seco"



- 4.2 Equipos fijos instalados al costado de la vía: Estos equipos se encuentran fijados en posiciones estratégicas a lo largo de la vía ferroviaria. Pueden consistir en lubricadores automáticos que dispensan lubricante de manera continua en la pestaña del riel o en sistemas de aplicación de película seca que recubren la pestaña con un lubricante sólido.



Figura 5: Engrase por equipos fijos al costado de la vía

- 4.3 Vehículos especializados para la lubricación de la vía: Estos vehículos están diseñados específicamente para la lubricación de la vía ferroviaria. Son equipados con sistemas de pulverización o aplicación de lubricante que permiten cubrir grandes tramos de vía de manera eficiente. Estos vehículos suelen tener depósitos de lubricante a bordo y se desplazan a lo largo de la vía aplicando el lubricante en la pestaña y en otros puntos críticos de la interfaz rueda-riel. Dentro de esta categoría se podrían colocar los sistemas de engrase que contemplan un operario recorriendo a pie la vía.



Figura 6: Vehículos específicos de lubricación de la vía

## 5 SISTEMAS DE LUBRICACIÓN

Existen dos enfoques principales en los sistemas de lubricación para la interfaz rueda-riel, estos son:

### 5.1 Lubricación periódica o constante

Estos sistemas aplican lubricante de manera regular y constante, independientemente de si hay circulación de trenes en ese momento. La lubricación periódica se lleva a cabo siguiendo un programa de mantenimiento planificado, en el que se aplican cantidades predefinidas de lubricante en intervalos regulares. Este enfoque asegura que siempre haya una capa de lubricante presente en la interfaz rueda-riel, lo que reduce la fricción y el desgaste.

Los sistemas de lubricación periódica suelen utilizar métodos como el uso de lubricantes sólidos en forma de grasa o polvo, o mediante la aplicación de aceites o líquidos lubricantes mediante boquillas o sistemas de distribución específicos. Estos sistemas son más comunes en líneas de ferrocarril de alta velocidad o de alto tráfico, donde se requiere una lubricación constante para mantener un funcionamiento eficiente.

### 5.2 Lubricación basada en la necesidad o “inteligentes”

Estos sistemas aplican lubricante solo cuando se detecta que es necesario. Utilizan sensores o sistemas de monitoreo para medir parámetros como la temperatura, la presión o la fricción en la interfaz rueda-riel. Cuando estos sensores detectan condiciones de fricción excesiva o anormal, se activa el sistema de lubricación y se aplica el lubricante específicamente en el área afectada.



Los sistemas de lubricación basada en la necesidad son más avanzados tecnológicamente y se utilizan en situaciones donde se requiere una lubricación más precisa y controlada. Pueden ofrecer beneficios como una reducción en el consumo de lubricante, un mejor monitoreo del desgaste y una mayor eficiencia en general.

Un sistema inteligente de lubricación consta de varios componentes clave que trabajan juntos para administrar y controlar de manera eficiente la lubricación en diferentes equipos y maquinarias. Estos componentes pueden variar según la aplicación y el diseño específico del sistema, pero aquí hay algunos componentes comunes en un sistema de lubricación inteligente:

- **Unidad de control:** Es el cerebro del sistema de lubricación inteligente. La unidad de control es responsable de monitorear y recopilar datos de los sensores, procesar la información y tomar decisiones sobre la cantidad y el momento de aplicar la lubricación. También puede estar equipada con interfaces de usuario para configurar y ajustar parámetros del sistema.
- **Sensores:** Los sensores son dispositivos que recopilan datos y proporcionan información sobre diversas variables relevantes para la lubricación, como la temperatura, la presión, la velocidad, la vibración, la posición, entre otros. Estos sensores pueden ser térmicos, de presión, de proximidad, de flujo, entre otros, y suelen estar conectados a la unidad de control.
- **Actuadores:** Los actuadores son los dispositivos responsables de aplicar la lubricación en los puntos deseados. Pueden ser bombas, válvulas, rociadores o cualquier otro mecanismo que permita la entrega controlada del lubricante al equipo o maquinaria. Los actuadores son activados por la unidad de control basándose en los datos y las decisiones tomadas por el sistema.
- **Lubricante:** El lubricante es el medio utilizado para reducir la fricción y el desgaste entre las superficies en movimiento. Puede ser aceite, grasa u otro tipo de lubricante específico según las necesidades de la aplicación. El sistema de lubricación inteligente puede incluir sistemas de almacenamiento, filtración y suministro de lubricante para garantizar un suministro constante y adecuado.
- **Red de comunicación:** Para lograr la inteligencia y la capacidad de control, el sistema de lubricación inteligente puede contar con una red de comunicación que conecta los diferentes componentes y permite la transmisión de datos entre ellos. Esto puede ser a través de cables, redes Ethernet, o incluso tecnologías inalámbricas.



## 6 EXPERIENCIAS EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL

### 6.1 Experiencia en la línea Tehran-Ahvaz, Irán

Se equipó un coche, en adelante el coche 705, de un tren que recorre la línea Tehran-Ahvaz con un dispositivo de lubricación tipo pastilla como la que se muestra en la figura 4. Luego se estableció un intervalo, luego del cual se iban a ir mediando las las ruedas hasta que estas no estuvieran aptas para seguir rodando. Durante el período de medición se realizaron las readecuaciones de perfil correspondientes en tornos bajo piso. Cabe aclarar que la línea en cuestión es una de las que concentra la mayor cantidad de curvas radios inferiores a los 2500 m, esto se muestra en la figura 7.



Figura 7: Línea Tehran-Ahvaz

Una vez que se alcanzó el límite de vida de las ruedas del coche que tenía equipado el sistema de pastillo, también conocido como “seco”, se analizó la cantidad de km que cada par montado de esa formación había realizado y luego se las comparo contra los pares montados del coche 705. Los resultados revelan que la vida útil promedio de la rueda del coche número 705 fue un 24% mayor que la de los coches sin dispositivo lubricador.

La prueba de campo muestra que la implementación del proyecto de lubricación en seco ayuda en gran medida a atenuar el desgaste de la pestaña de la rueda, que es un problema importante en las curvas prevalentes en rutas de tren como la línea principal sur.

### 6.2 Experiencia en el Metrolink de Manchester

Se ha llevado a cabo una prueba a largo plazo en uno de los T68 del Manchester Metrolink, demostrando que los sistemas de lubricación a bordo más "inteligentes".



Figura 8: T68 en las calles de Manchester

El uso de la lubricación inteligente de pestaña de rueda ha mejorado en un 50% la vida útil de las ruedas de un T68 LRV que opera en una red de vías de calle y ferrocarril convencional. Esta mejora del 50% es en comparación con los vehículos que utilizan lubricantes en barra de aplicación constante. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se ha demostrado que este tipo de lubricante, en comparación con los vehículos sin lubricación, ha prolongado la vida útil de las ruedas hasta cinco veces.

La aplicación de técnicas de GPS y sensores inerciales a la lubricación de pestañas ha demostrado ser rentable, basándose únicamente en los ahorros de las ruedas

El estudio ha identificado que en los T68 LRV sería beneficioso invertir la dirección del vehículo. Además, se debería considerar un esquema de torneado de ruedas basado en una cantidad reducida de torneados cada 50,000 km. Esto también reduciría la cantidad de contacto y ruido en la parte posterior de la pestaña de la rueda.

La **prueba no redujo el nivel de desgaste de la pestaña de rueda al punto en el que dejara de ser la causa principal** para el torneado de ruedas. Es posible que un tipo diferente de lubricante pueda reducir aún más el desgaste de la pestaña de rueda.

## 7 CONCLUSIONES

Podemos afirmar que existen diversas formas de lubricar la interfaz rueda-riel, así como diferentes enfoques para gestionar esta lubricación. Ya sea por necesidad, de forma periódica o constante, se han implementado métodos efectivos en sistemas de ferrocarriles internacionales. Las experiencias a nivel global han demostrado la eficacia de estos métodos, lo cual abre una perspectiva promisoriosa para su implementación en los sistemas de ferrocarriles nacionales. El seguimiento de los resultados obtenidos en estas implementaciones se presenta



como una temática relevante y de gran importancia para garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil de los pares montados en el contexto ferroviario.

## 8 REFERENCIAS

- [1] Roya Sadat Ashofteh. *“Effect of Dry Lubrication to Reduce Wheel Flange Wear of Railcars in Railway of Iran.”* - 2014
- [2] Patric Waara. *“Wear Reduction Performance of Rail Flange Lubrication”*, 2001
- [3] Rail Technology Magazine. *“Intelligent ways to extend wheel and track life”*, 2012  
<https://www.railtechnologymagazine.com/Rail-Industry-Focus-/intelligent-ways-to-extend-wheel-and-track-life>
- [4] Simon Iwnicki, Maksym Spiriyagin, Colin Cole, Tim McSweeney. *“Handbook of Railway Vehicle Dynamics”*, 2020, Segunda Edición.

Área Temática

# Operación, Seguridad y Normativa Ferroviaria





## DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN PARA RIEL FERROVIARIO UIC 54 E.1

Marcos Amado<sup>1</sup>, Javier Idzi<sup>1</sup>, Fernando Gutiérrez<sup>1</sup>, José Gialonardo<sup>1</sup> y Eduardo Becker Groth<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UIDET Ingeniería Aplicada en Mecánica y Electromecánica (IAME), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 116, La Plata, Argentina.  
[marcos.amado@ing.unlp.edu.ar](mailto:marcos.amado@ing.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BRASIL

### RESUMEN

La propagación de ondas elásticas en estructuras donde una de las dimensiones es mucho mayor que las otras dos, son llamadas ondas guiadas, es un tema vinculado a técnicas de Ensayos No Destructivos. El estudio de estas ondas es fundamental en el cálculo de las llamadas curvas de dispersión que serán específicas para cada geometría estudiada. Estas curvas de dispersión permiten describir, dada una excitación aplicada sobre la estructura en análisis, en qué modos dicha excitación se va a descomponer. En este contexto en el presente trabajo se calculan las curvas de dispersión de un Riel (UIC 54 E.1) empotrado y fijo, utilizando el modelo axisimétrico y el método de los elementos finitos (MEF). Los resultados obtenidos son discutidos y los mismos permiten entender la propagación de ondas guiadas en este tipo de geometría.

**Palabras clave:** Riel; Ondas guiadas; Curvas de dispersión; Método Axisimétrico;



## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de técnicas de detección de daño basadas en propagación de ondas en sólidos ha crecido en las últimas décadas gracias a la disponibilidad de instrumentos cada vez más sensibles y precisos. Para aprovechar este potencial es mandatorio conocer los fundamentos de la propagación de ondas en sólidos.

El estudiar la propagación de una guía de onda con geometría específica utilizando las curvas de dispersión permite entender qué frecuencias pueden propagar en que forma modal sobre la guía de ondas.

Asociar la técnica de ultrasonido con la propagación de ondas guiadas tiene una buena relación costo-beneficio debido a la simplicidad y rapidez de inspección. Esta metodología permite localizar daños en estructuras inaccesibles debido a estar sumergidas, enterradas o aisladas. Esto es porque cuando se aplica una vibración que se extenderá como una onda guiada sólo se requiere una pequeña área de acceso [1]. En este caso, es posible, con un mismo sensor emisor receptor obtener información de defectos localizados a distancias considerables (20-30 metros), en estructuras de acero de difícil acceso. Es cierto que este tipo de metodología no permite un diagnóstico preciso de la magnitud y tipo de daño identificado, pero permite realizar una localización de potenciales regiones críticas donde deberá ser realizada una intervención con otras técnicas de Ensayo No Destructivo (END). Los patrones de estas curvas dependen de la sección geométrica, debido fundamentalmente a la interacción de las mismas, con las fronteras del cuerpo. Estos patrones pueden ser analizados con las curvas de dispersión. En este contexto, se presenta en este trabajo el análisis de un riel de ferrocarril (UIC 54E.1) [2], donde serán calculadas las curvas de dispersión para dicha estructura utilizando el modelo axisimétrico [3].

## 2. DESARROLLO

En esta sección se determinan las curvas de dispersión de un riel ferroviario libre, utilizando el modelo axisimétrico [3]. Las curvas se determinaron para 3 tamaños de elementos (Figuras 4, 7 y 10).

### 2.1 Modelo axisimétrico

El modelo axisimétrico [3] para el cálculo de curvas de dispersión consiste en modelar una guía de ondas a través de un aro de gran radio (Figura 1), en la cual la sección transversal bajo estudio es la sección transversal del aro ( $R > 10L$ , siendo  $R$  el radio adoptado y  $L$  una dimensión característica de la sección transversal estudiada).

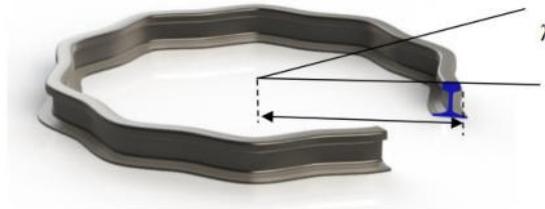


Figura 1. Esquema del método axisimétrico

Los softwares comerciales de elementos finitos, que ofrecen un análisis modal a través del modelo axisimétrico, usualmente permiten la entrada de las condiciones de contorno descritas a través de un comando. Este comando, preestablece una cantidad de longitudes de onda  $\lambda$  para las cuales el modelo está sujeto a vibrar. La cantidad de longitudes de onda son fijadas a través de un parámetro conocido como Corder. Por consiguiente, resulta de importancia determinar este parámetro, que representa el número por el cual debemos dividir a la longitud de la circunferencia del modelo axisimétrico analizado, para poder determinar la longitud de onda  $\lambda$  definida como:

$$\lambda = (2 \cdot \pi \cdot R)/\text{Corder} \quad (1)$$

$$\lambda = (2 \cdot \pi)/k \quad (2)$$

De las ecuaciones 1 y 2 es posible establecer una relación entre el parámetro Corder y el número de onda  $k$  de la siguiente manera:

$$\text{Corder} = k \cdot R \quad (3)$$

Para el cálculo de la sección, se utiliza el elemento PLANE83 (Figura 2) que permite automatizar el proceso de formación de las curvas de dispersión [4] y [5].

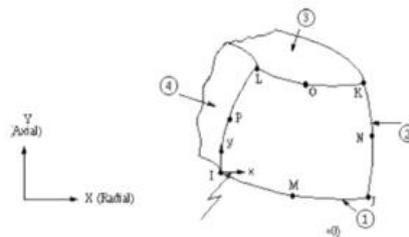


Figura 2. Elemento PLANE 83, usado en el modelo axisimétrico.

## 2.2 Cálculo de las curvas de dispersión

En la implementación del método basado en el método axisimétrico se ha dejado fijo el radio en un valor determinado por los parámetros de cálculo, para nuestro caso particular  $R=500$  m se ha hecho variar  $k$  entre un valor mínimo de  $0,01$  rad/m y un valor máximo de  $350$  rad/m, el intervalo de variación de  $k$  es de  $0,01$  rad/m. Los resultados de las frecuencias encontradas entre las frecuencias máximas y mínimas establecidas para cada valor de  $k$  son graficados en conjunto lo cual permite visualizar las curvas de dispersión.



El contorno del perfil es introducido como output de un archivo neutro, (\*.igs), de esta manera podemos, a través de este tipo de archivos, importar directamente cualquier perfil que sea requerido para su estudio.

Tabla 1 de parámetros de cálculo

Parámetro	Valor	Descripción	Unidad
E	210 e9	Módulo de young	N/m <sup>2</sup>
$\nu$	0.3	Coefficiente de poisson	--
$\rho$	7850	Densidad	Kg/m <sup>3</sup>
T1	0,006	Tamaño de elemento (1)	m
T2	0,003	Tamaño de elemento (1)	m
T3	0,009	Tamaño de elemento (1)	m
R	500	Radio de simetría	m
Modos	100	Modos	-
Kmin	0.01	Numero de onda mínimo	Rad/m
Kmax	350	Numero de onda máximo	Rad/m
Kinc	0.01	Intervalo de numero de onda	Rad/m

A partir de todos estos parámetros y características definidas previamente se construyen las Figuras de las curvas de dispersión para el caso del riel sin restricción, ó sea de cuerpo libre.

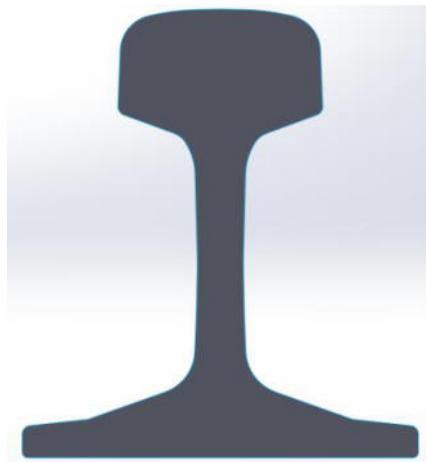


Figura 3. Sección del riel en estudio



### 2.3 Malla 1

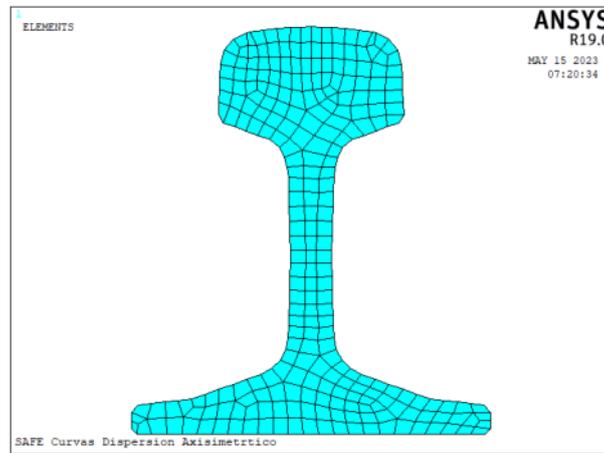


Figura 4. Riel con malla 1.

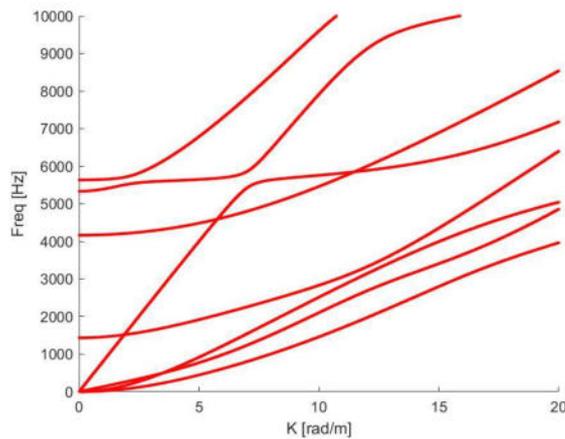


Figura 5. Curvas de dispersión graficadas en frecuencia vs número de onda

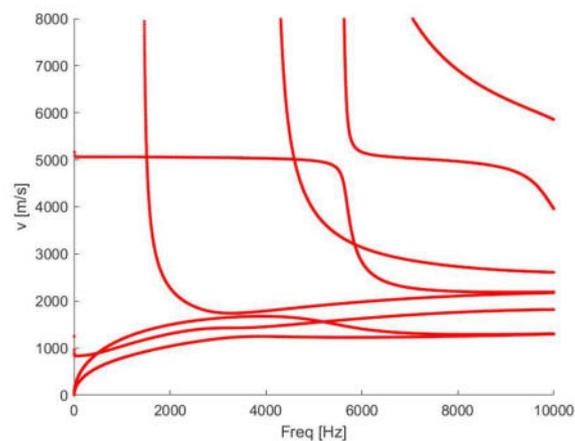


Figura 6. Curvas de dispersión graficadas en velocidad de fase vs frecuencia



## 2.4 Malla 2

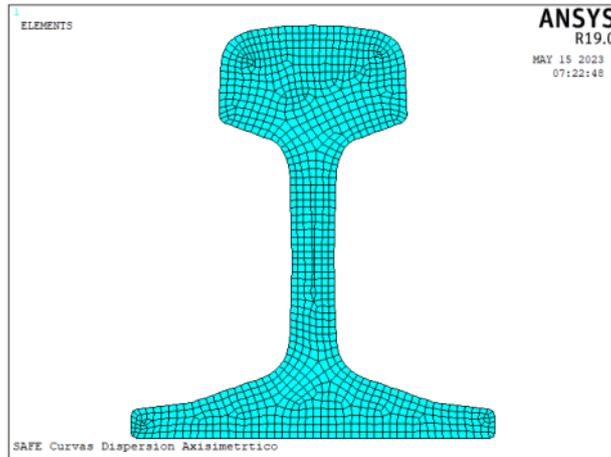


Figura 7. Riel con malla 2.

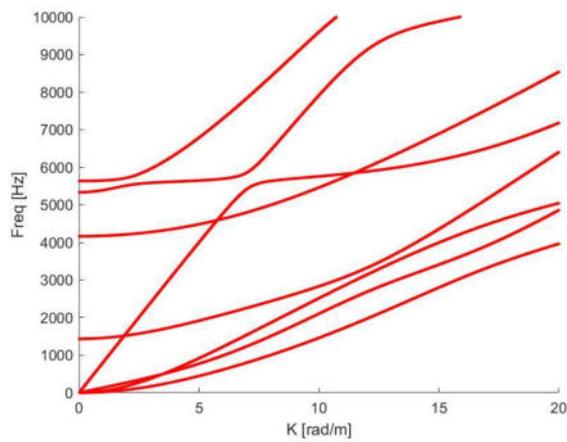


Figura 8. Curvas de dispersión graficadas en frecuencia vs número de onda

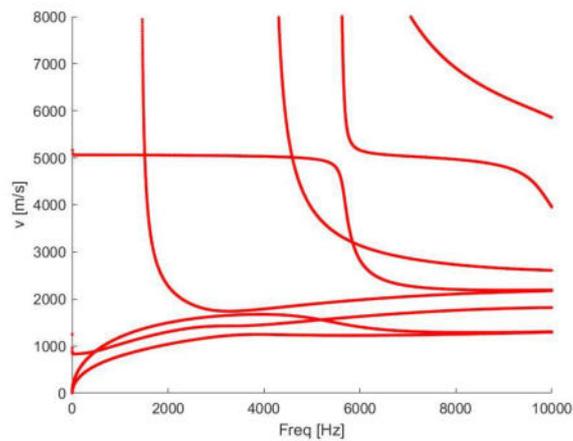


Figura 9. Curvas de dispersión graficadas en velocidad de fase vs frecuencia



## 2.5 Malla 3

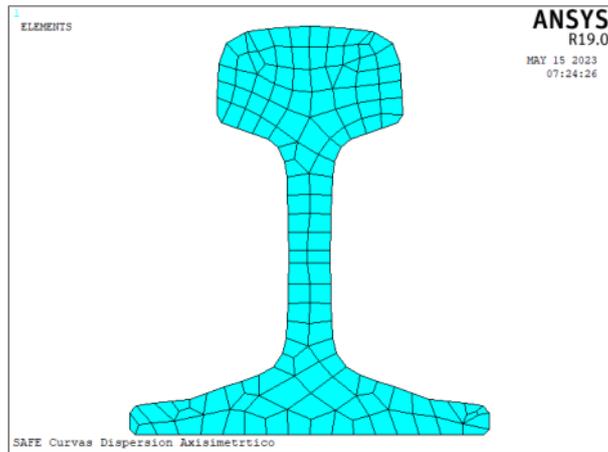


Figura 10. Riel con malla 3.

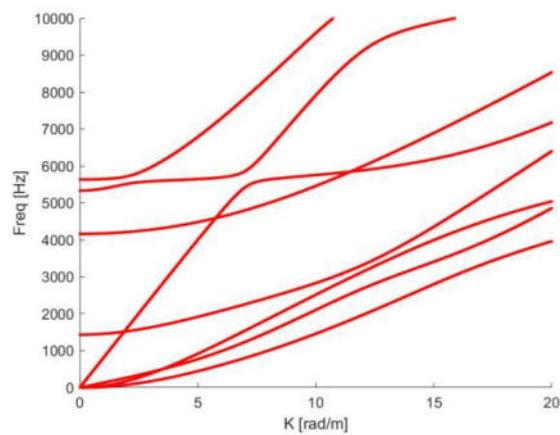


Figura 11. Curvas de dispersión graficadas en frecuencia vs número de onda

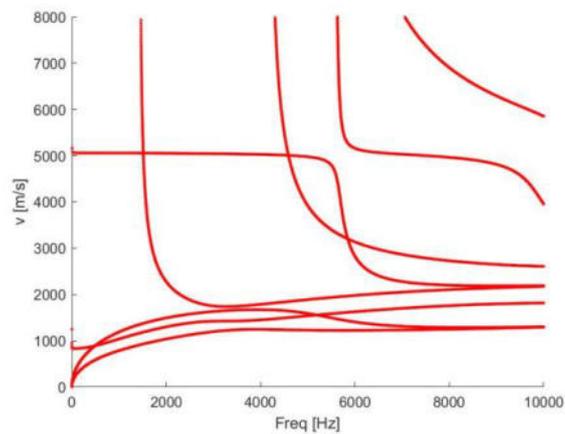


Figura 12. Curvas de dispersión graficadas en velocidad de fase vs frecuencia



## CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el estudio de la propagación de ondas guiadas en un riel ferroviario libre, del tipo UIC 54 E.1, utilizando el modelo axisimétrico. Los resultados obtenidos fueron consistentes con la bibliografía. Las conclusiones presentadas en este documento son las siguientes:

A medida que es más compleja la geometría transversal de la guía de ondas más compleja será el conjunto de curvas de dispersión generados. En el caso del riel las curvas de dispersión deben ser estudiadas en intervalos de frecuencia pequeños en la región de interés.

Como es común en otras guías de ondas que poseen una dimensión infinita, los rieles poseen 4 modos básicos de propagación, ellos son: uno axial (AX), uno torsional (T1), y dos flexionales (FLX, FLY).

El tamaño de elemento no tuvo influencia en la determinación de las curvas de dispersión.

Como trabajo futuro se plantea la posibilidad de determinar las curvas de dispersión de los rieles utilizados en el trazado de vías del país y contemplados en [5].

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Eduardo Becker Groth, Curvas De Dispersão: No Contexto Da Determinação De Defeitos Em Estruturas Laminares Utilizando Ondas Guiadas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- [2] Manual Integral de Vías, Nuevo Central Argentino, República Argentina, 2014. MathWorks. Reference Manual. The MathWorks, Inc., 2011. Normas Técnicas De Vías Y Obras. Comisión Nacional de Regulación del Transporte, República argentina.
- [3] D. Hesse and P. Cawley, Surface wave modes in rails. Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, United Kingdom, 2005.
- [4] Daniel Hesse, Rail inspection Using Ultrasonic Surface Waves. University of London, 2007. Das, B. M. Fundamentals of Soil Dynamics. Volume I. Elsevier Science publishers B. V.
- [5] Alleyne, D. and Cawley, P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. Journal of Acoustical Society of America, vol. 89, p. 1159–1168, 1991.



## IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD OPERACIONAL EN EL TRANSPORTE FERROVIARIO: PROPUESTA DE UN METODO DE IDENTIFICACION, ANALISIS Y EVALUACION DE RIESGOS GENERICOS OPERATIVOS EN EL SERVICIO FERROVIARIO URBANO

Claudio Meccia <sup>1</sup>, Andres Serrano <sup>2</sup>, Leonel Ovejero <sup>2</sup>, Pablo Moret <sup>2</sup>, Maximiliano Moreno <sup>2</sup> y Ariel Rivero <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora - [claudiomeccia@yahoo.com.ar](mailto:claudiomeccia@yahoo.com.ar).

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora - [andres.serrano.ing@gmail.com](mailto:andres.serrano.ing@gmail.com).

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora - [leonelovejero91@mail.com](mailto:leonelovejero91@mail.com).

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora - [pablomore@yahoo.com.ar](mailto:pablomore@yahoo.com.ar).

<sup>5</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora - [maximilianomoreno1987@hotmail.com](mailto:maximilianomoreno1987@hotmail.com).

<sup>6</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora - [riveroorlando200@gmail.com](mailto:riveroorlando200@gmail.com).

### RESUMEN

El Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional de toda empresa ferroviaria establece la necesidad de llevar a cabo tres actividades de manera sistemática, organizada, registrable y continua en el tiempo:

- La detección y la gestión de las Deficiencias de Seguridad ya que son precursoras de diferentes escenarios de peligro que usualmente se presentan en el ámbito operacional.
- La gestión de los Riesgos derivados de los todos los peligros que implica la prestación del servicio ferroviario. Debido al carácter de tarea en el “escenario preventivo” hablamos tanto de riesgos que cuentan con antecedentes de sucesos o eventos, como de otros que se consideran de ocurrencia factible en el servicio (aunque no hayan registrado precedentes).
- La investigación de los Accidentes e Incidentes con el objeto de ajustar las defensas puestas a los riesgos en la operación del servicio

La nueva normativa sobre la Seguridad Operacional (Primera Directiva de Seguridad Operacional Ferroviaria) requiere desarrollar un trabajo sistemático de detección análisis y valoración de los distintos riesgos operacionales, pero no se extiende en las herramientas y técnicas aplicables para encarar esta tarea de una forma eficaz.

La normativa tampoco hecha luz sobre alternativas concretas y viables para plantear medidas de reducción de riesgos (en el escenario preventivo) y mitigación de efectos (en el escenario reactivo) en el caso de que los peligros considerados en el análisis de riesgos lleguen a concretarse en accidentes.

En el presente trabajo se plantea una modalidad para la identificación y el estudio de Riesgos Genéricos en el servicio ferroviario de transporte urbano de pasajeros partiendo de un enfoque multicausal. Se seguirán formas de evaluación y tratamiento de los riesgos coherente con la normativa precitada para el servicio ferroviario.

**Palabras Clave:** Seguridad Operacional; Sistema de Gestión de Riesgos; Evaluación de Riesgos; Transporte Ferroviario.



## 1. INTRODUCCIÓN

A los fines del estudio definiremos a los Riesgos Genéricos como aquellos que se presentan en un determinado contexto o situación operacional común.

En el presente trabajo se plantea una modalidad para la identificación y el estudio de Riesgos Genéricos en el servicio ferroviario de transporte urbano de pasajeros partiendo de un enfoque multicausal. Se seguirán formas de evaluación y tratamiento de los riesgos coherente con la normativa precitada para el servicio ferroviario.

El grupo de las posibles causas de un evento o suceso se agrupan a partir de cuatro factores coexistentes en todos los marcos operacionales con algún nivel de influencia, estos son:

- El Factor Humano (desempeño del personal operativo).
- El Factor Tecnológico (desempeño del soporte físico del servicio).
- El Factor Organizacional (la forma de gestionar los recursos en el servicio).
- El Factor Externo (los desafíos que llegan desde el entorno sociogeográfico y los propios usuarios).

## 2. OBEJTIVOS

### 2.1. Objetivo General del Trabajo

Proponer un modelo de evaluación de los Riesgos Genéricos Operacionales presentes en un servicio de transporte ferroviario urbano de pasajeros.

### 2.2. Objetivos Específicos

El trabajo según el cronograma sugerido se desarrolló en cuatro etapas coincidentes con sus Objetivos Específicos.

#### 2.2.1 Primer Objetivo Específico

Reunir y analizar la normativa disponible referida a la gestión de riesgos buscando su aplicabilidad a un servicio de transporte público y verificar su adaptabilidad, clave en los sistemas de gestión de la seguridad operacional inspirados en la Primera Directiva de Seguridad Operacional Ferroviaria.

#### 2.2.2 Segundo Objetivo Específico

Identificar diferentes Riesgos Genéricos presentes en un servicio ferroviario urbano de pasajeros entre los escenarios de ocurrencia factible al solo efecto de ejemplificar el método de planteo.

#### 2.2.3 Tercer Objetivo Específico

Ejemplificar el análisis de Riesgos Genéricos utilizando el modelo de análisis causa-efecto (ISHIKAWA) a partir de la incidencia relativa de cuatro factores siempre presentes en la gestión operativa: el Factor Humano, el Factor Tecnológico, el Factor Organizacional y el Factor Externo.



### **2.2.4 Cuarto Objetivo Específico**

Proponer algunas medidas de reducción del Riesgo sobre algunos de los escenarios ya vistos en los objetivos específicos anteriores y estimar el impacto de la medida tomada en el valor resultante del Riesgo considerado para el escenario bajo estudio.

## **3. DESARROLLO**

### **3.1. Primer Objetivo Específico: ANALISIS DE LA NORMATIVA DE GESTION DE RIESGOS Y DE LA PRIMERA DIRECTIVA DE SEGURIDAD OPERACIONAL FERROVIARIA**

#### **3.1.1 El Vocabulario de la Gestión de Riesgos**

En el trabajo se recurrió a las definiciones descriptas en la Guía ISO/CEI 73 para la Gestión de Riesgos. [1]

#### **3.1.2 El Proceso de Evaluación del Riesgo**

Se consideraron conceptos tomados de la norma ISO 31000:2013 en su apartado 5. [2]

#### **3.1.3 Selección de Técnicas de Evaluación del Riesgo**

Se analizaron los textos tomados de la norma ISO 31010:2013 en su apartado 6. [3]

#### **3.1.4 Comparación de Técnicas de Evaluación del Riesgo**

Para referirnos a este se consideró lo expresado en la norma ISO 31010:2013 en su Anexo A. [3]

#### **3.1.5 Las Técnicas que se han Seleccionado para la Evaluación de Riesgos en el Presente Trabajo**

A efectos de seleccionar las técnicas se estudiaron los textos de la norma ISO 31010:2013 en su Anexo B – puntos 17 (análisis causa-efecto) y 29 (matriz consecuencia-probabilidad). [3]

#### **3.1.6 La Seguridad Operacional y su Sistema de Gestión**

En la Resolución Nro. 170/2018 de fecha 28 de febrero de 2018 publicada en el Boletín Oficial, el Ministro de Transporte de la Nación, dispuso:

*ARTÍCULO 3°. - Establézcase que, en el término de CIENTO OCHENTA (180) días corridos a partir de la publicación de la presente, todas las operadoras de ferrocarriles de pasajeros y cargas y la ADMINISTRACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS SOCIEDAD DEL ESTADO deberán contar con un área específica de nivel Gerencial que reporte y dependa directamente de las máximas autoridades de la empresa. Dicha área se encontrará dedicada a la implementación de un Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional y a verificar el cumplimiento y seguimiento de una Política de Seguridad Operacional.*

*ARTÍCULO 4°. - Establézcase que las áreas de Seguridad Operacional a las que se hace referencia en el artículo precedente, deberán elaborar e implementar un Sistema de Gestión de Seguridad Operacional, de acuerdo a los lineamientos de la primera Directiva Nacional de*



*Seguridad Operacional Ferroviaria que en forma sistémica lleve adelante un proceso continuo de Identificación de Peligros y Gestión de Riesgos, el cual deberá ser aprobado por las máximas autoridades de cada empresa antes del 31 de marzo de 2019. [4]*

La razón de ser de la Resolución 170/2018 fue definir como marco normativo a la PRIMERA DIRECTIVA DE SEGURIDAD OPERACIONAL FERROVIARIA y en lo que se refiere a Riesgos dice:

*“Todos los operadores del sistema ferroviario, las Administradoras de la Infraestructura y las Empresas Operadoras Ferroviarias deben ser plenamente responsables de la seguridad del sistema, cada uno en lo que le concierne dentro de sus competencias. Cuando resulte conveniente, deben colaborar en la aplicación de las medidas de control de riesgos”. “Para cumplir con los objetivos y política de seguridad, sus deberes y responsabilidades, las Administradoras de la Infraestructura y las Empresas Operadoras deben implementar un Sistema de Gestión de la Seguridad que cumpla los requisitos de estándares de aceptabilidad de riesgos”. [4]*

### **3.1.7 Los Requisitos Básicos para todo Sistema de Gestión de Seguridad Operacional**

- Elaborar y redactar una Política de Seguridad Operacional aprobada por la máxima autoridad ejecutiva de la organización.
- Comunicar la Política de Seguridad Operacional a toda la empresa.
- Fijar objetivos respecto al sostenimiento de los requisitos y condiciones de mejoras de la seguridad operacional.
- Elaborar Planes de Acción para alcanzar dichos objetivos.
- Establecer un soporte documental de todo documento vinculado a la gestión de la seguridad.
- Establecer la identificación de procesos básicos de la seguridad operacional y sus consecuentes procedimientos documentados.
- Establecer procedimientos para asegurar el cumplimiento normativo y otras condiciones vinculadas a la seguridad operacional.
- Establecer procedimientos particulares para llevar a cabo la evaluación y gestión de riesgos.
- Llevar adelante un proceso sistemático y estándar de Cómputo de Incidentes y Accidentes de acuerdo a la clasificación requerida.
- Establecer procedimientos particulares para el análisis e investigación interna de incidentes, cuasi accidentes y accidentes y elaboración de recomendaciones técnicas.
- Brindar asistencia en los Planes de Atención de emergencias acordados con las áreas operativas.
- Elaborar un Manual de Gestión de la Seguridad Operacional.
- Elaborar un Manual de Gestión de Crisis.

Se entiende que el objeto de la seguridad operacional es prevenir los accidentes o incidentes que puedan derivar de los riesgos de la operación. Por ello y en el escenario preventivo lo



aconsejable es profundizar en el estudio de Riesgos. “Un Riesgo es un efecto de la incertidumbre sobre la consecución de los objetivos. Con frecuencia, el riesgo se caracteriza según casos concretos de eventos ocurridos a partir de un peligro determinado, pero se lo plantea y estudia también en atención a ocurrencias potenciales y sus esperables consecuencias.

A los fines de nuestro estudio los sucesos o eventos de interés son los Accidentes y los Incidentes. Dentro del ámbito del presente trabajo se realizará un desarrollo sobre el análisis de riesgo, en el marco de las estrategias de prevención.

Según la Primera Directiva el Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional se debe actuar sobre tres escenarios diferentes: el Escenario de Prevención, el Escenario de Contención y el Escenario Reactivo [5]. En el escenario de prevención es adonde se identifican los peligros y condiciones latentes y se analizan los riesgos generados para que, a través de un proceso de mejora continua, se reduzcan dichos riesgos o se minimicen los efectos en el caso de que lleguen a concretarse en accidentes.

Otro de los conceptos importantes dentro de la Primera Directiva es el enfoque moderno de Gestión de la Seguridad Operacional, que pone foco sobre factores provenientes de cuatro direcciones distintas con acciones de gestión específicas a cada una de ellas. Estos aspectos fundamentales son [5]:

- el comportamiento individual del personal operativo (los factores humanos);
- el contexto de trabajo (el contexto operacional, usuarios, terceros y entorno);
- la organización (los factores organizacionales);
- el respeto a las normas, procedimientos y reglamentaciones (los aspectos normativos).

De esta manera tenemos dos líneas de defensa para confrontar con los riesgos:

- *La Seguridad Técnica* consistente en los aspectos duros vinculados con el hardware que participa de la operación, un fuerte cumplimiento reglamentario y aspectos derivados de obligaciones contractuales o legales, bajo la responsabilidad exclusiva de un área y basada en tareas aisladas de prevención.
- *La Seguridad Estructural* que se apoya en la interrelación de interfaces entre factores tecnológicos, humanos, organizacionales y externos.

### **3.1.8 Peligros y Condiciones Latentes. Medidas de Control y Mitigación de Riesgos**

El Peligro es un componente ineludible y existente en el contexto operacional. En términos generales, ninguna actividad humana o sistema conformado por el hombre puede decirse que se halla exento de peligros o errores operacionales. Los Peligros y Condiciones latentes implican Riesgos potenciales asociados. Sin dudas para minimizar los riesgos de accidentes o, como se plantea en la gestión de la seguridad operacional, “llevar los riesgos a valores aceptables o por debajo de los mismos” primero hay que concientizarse de que ellos existen y conocerlos. Gracias a una extensa explicación sobre “Impacto Accidentológico (Severidad)”, es que se llega a la creación de una tabla donde se explica el grado del nivel de consecuencias producto de un determinado accidente.

Para el proceso de Evaluación del Riesgos que llevaremos adelante en nuestros escenarios ferroviarios bajo estudio en el presente trabajo utilizaremos las siguientes tablas:



Tabla 1 – Severidad (Gravedad o Impacto)

<b>ACCIDENTES GRADO I:</b> 1. Accidente con mas de 5 muertes. 2. Accidente con 50 (cincuenta) heridos graves o más. 3. Accidente con 500 (quinientos) heridos leves o más. 4. Accidente con grandes daños materiales que superen 7 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 48 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Crítica. 7. Combinación de los anteriores.	40
<b>ACCIDENTES GRADO II:</b> 1. Accidente con 2 a 5 muertes. 2. Accidente con 10 (diez) heridos graves o más. 3. Accidente con 100 (cien) heridos leves o más. 4. Accidente con grandes daños materiales que superen 1.5 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 36 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Crítica. 7. Combinación de los anteriores.	25
<b>ACCIDENTES GRADO III:</b> 1. Accidente con 1 muerte 2. Accidente con 1 (un) herido grave o más. 3. Accidente con 50 (cincuenta) heridos leves o más. 4. Accidente con daños materiales importantes que superen 0.5 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 24 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Severa. 7. Combinación de los anteriores.	15
<b>ACCIDENTES GRADO IV:</b> 1. Accidente sin pérdida de vidas humanas. 2. Accidente con 1 (un) herido grave o más. 3. Accidente con 10 (diez) heridos leves o más. 4. Accidente con daños materiales importantes que superen 0.2 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 6 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Severa. 7. Combinación de los anteriores.	10
<b>ACCIDENTES GRADO V:</b> 1. Accidente sin pérdida de vidas humanas. 2. Accidente sin heridos graves. 3. Accidente con 5 (cinco) heridos leves o más. 4. Accidente con daños materiales leves que superen 0.1 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 2 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Menor. 7. Combinación de los anteriores.	5
<b>ACCIDENTES GRADO VI:</b> 1. Accidente sin pérdida de vidas humanas. 2. Accidente sin heridos graves. 3. Accidente sin heridos leves. 4. Accidente con daños materiales leves que no superen 0.1 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio menor a 2 hs. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Menor. 7. Combinación de los anteriores.	1

Tabla 2 – Probabilidad (Frecuencia)

CATEGORIA	FRECUENCIA	PONDERACION	DESCRIPCIÓN
CATEGORIA 6	FRECUENTE	6	más de 2000 casos por año
CATEGORIA 5	PROBABLE	5	entre 21 y 2000 casos por año
CATEGORIA 4	OCASIONAL	4	entre 1 y 20 casos por año
CATEGORIA 3	REMOTO	3	entre 1 caso por año y 1 caso cada 10 años
CATEGORIA 2	IMPROBABLE	2	entre 1 caso cada 10 años y 1 caso cada 100 años
CATEGORIA 1	MUY IMPROBABLE	1	1 caso cada más de 100 años

Tabla 3 – Matriz de Severidad/Probabilidad y Riesgo Resultante (Incluye Evaluación)

NIVEL DE RIESGO	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA (FRECUENCIA)						
	mas de 2000 casos por año	entre 21 y 2000 casos por año	entre 1 y 20 casos por año	entre 1 caso por año y 1 caso cada 10 años	entre 1 caso cada 10 años y 1 caso cada 100 años	1 caso cada más de 100 años	
	FRECUENTE	PROBABLE	OCASIONAL	REMOTO	IMPROBABLE	MUY IMPROBABLE	
<b>SEVERIDAD DEL EVENTO</b>	VALOR: 6	VALOR: 5	VALOR: 4	VALOR: 3	VALOR: 2	VALOR: 1	
<b>CRITICA</b> ACCIDENTES GRADO I: 1. Accidente con mas de 5 muertes. 2. Accidente con 50 (cincuenta) heridos graves o más. 3. Accidente con 500 (quinientos) heridos leves o más. 4. Accidente con grandes daños materiales que superen 7 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 48 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Crítica. 7. Combinación de los anteriores.	VALOR: 40	CRITICO	CRITICO	CRITICO	CRITICO	ALTO	TOLERABLE
<b>SIGNIFICATIVA</b> ACCIDENTES GRADO II: 1. Accidente con 2 a 5 muertes. 2. Accidente con 10 (diez) heridos graves o más. 3. Accidente con 100 (cien) heridos leves o más. 4. Accidente con grandes daños materiales que superen 1.5 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 36 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Crítica. 7. Combinación de los anteriores.	VALOR: 25	CRITICO	CRITICO	ALTO	ALTO	TOLERABLE	TOLERABLE
<b>MODERADA</b> ACCIDENTES GRADO III: 1. Accidente con 1 muerte 2. Accidente con 1 (un) herido grave o más. 3. Accidente con 50 (cincuenta) heridos leves o más. 4. Accidente con daños materiales importantes que superen 0.5 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 24 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Severa. 7. Combinación de los anteriores.	VALOR: 15	ALTO	ALTO	TOLERABLE	TOLERABLE	TOLERABLE	BAJO
<b>ADMISIBLE</b> ACCIDENTES GRADO IV: 1. Accidente sin pérdida de vidas humanas. 2. Accidente con 1 (un) herido grave o más. 3. Accidente con 10 (diez) heridos leves o más. 4. Accidente con daños materiales importantes que superen 0.2 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 6 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Severa. 7. Combinación de los anteriores.	VALOR: 10	TOLERABLE	TOLERABLE	TOLERABLE	TOLERABLE	BAJO	BAJO
<b>BASICA</b> ACCIDENTES GRADO V: 1. Accidente sin pérdida de vidas humanas. 2. Accidente sin heridos graves. 3. Accidente con 5 (cinco) heridos leves o más. 4. Accidente con daños materiales leves que superen 0.1 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio por 2 hs o más. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Menor. 7. Combinación de los anteriores.	VALOR: 5	TOLERABLE	TOLERABLE	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO
<b>MEJOR</b> ACCIDENTES GRADO VI: 1. Accidente sin pérdida de vidas humanas. 2. Accidente sin heridos graves. 3. Accidente sin heridos leves. 4. Accidente con daños materiales leves que no superen 0.1 mills de UTM. 5. Accidente con interrupción del servicio menor a 2 hs. 6. Accidente donde se detecte una No Conformidad de Seguridad Menor. 7. Combinación de los anteriores.	VALOR: 1	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO



Tabla 4 – Niveles y Evaluación de Riesgos

TIPO	PONDERACION	DESCRIPCIÓN
CRÍTICO	>120	RIESGO INACEPTABLE - DEBE ELIMINARSE Y GESTIONARSE INMEDIATAMENTE.
ALTO	DE 61 A 120	RIESGO NO DESEABLE - SOLO SE PODRÁ ACEPTAR CUANDO LA MITIGACIÓN DEL MISMO SEA IMPRACTICABLE Y CON EL DEBIDO ACUERDO DEL ORGANISMO DE CONTROL.
TOLERABLE	DE 21 A 60	RIESGO ACEPTABLE - SE PUEDE CONVIVIR CON EL MISMO CON EL ACUERDO DEL ORGANISMO DE CONTROL.
BAJO	DE 1 A 20	RIESGO INSIGNIFICANTE - SE PUEDE CONVIVIR CON EL MISMO SIN EL ACUERDO CON EL ORGANISMO DE CONTROL.

## 3.2. Segundo Objetivo Específico: PLANTEO DE ESCENARIOS DE RIESGOS GENERICOS

### 3.2.1 Que Entendemos por Riesgos de Tipo Genérico

A los fines del presente trabajo se ha entendido que los RIESGOS GENERICOS son aquellos que están presentes en la operación, pero no están asociados a un lugar específico de la línea, sino que están referidos a situaciones y contextos comunes de ocurrencia factible en el transporte ferroviario de pasajeros (por ejemplo, comunes a todas las estaciones, a todos los trenes en movimiento, a todos los pasos a nivel). Su lista, como vemos, podría ser tan extensa como sea nuestro empeño y minuciosidad en detectarlos. En términos matemáticos, se resume que todo Riesgo es el producto entre el valor de la severidad de los daños esperables del peligro genérico considerado se concrete en accidente y el de valor relacionado a la probabilidad o frecuencia (registrada o esperable) con la que dicho peligro se puede manifestar en el servicio. La probabilidad se expresa en cantidad de casos por trenes-kilómetros recorridos, pero puede resultar más cómodo expresarla en casos de eventos por unidad de tiempo.

### 3.2.2 Parámetros Que Definen a los Riesgos Genéricos

Los parámetros más importantes para definir los peligros y estudiar los riesgos, son: la situación o contexto estudiado, la condición latente, el peligro genérico considerado, la tipificación de causas dominantes, la forma de concreción, las consecuencias de la concreción, severidad del evento y la probabilidad frecuencia esperable en que puede ocurrir el evento.

- *Situación o contexto estudiado:* se refiere a la condición o contexto en la que puede ocurrir el peligro genérico considerado.
- *Condición latente:* se trata de uno o más eslabones débiles identificados en la cadena de defensas que tiene el sistema operativo para anteponer o neutralizar al peligro genérico considerado.
- *Peligro genérico considerado:* es la posibilidad de que se concrete un accidente durante la operación ferroviaria con consecuencias para la integridad física de los usuarios, los trabajadores, los terceros y/o afectación de los bienes ferroviarios.
- *Tipificación de causa dominante del peligro genérico considerado:* para que un peligro genérico se concrete en accidente deberán aparecer causas en relación agrupadas en cuatro factores los cuales son:
  - *El factor externo:* aquí se considera el entorno socio cultural, los perfiles de los usuarios y sus patrones de conducta a la hora de interactuar en cualquier forma con el sistema operativo ferroviario.



- *El factor humano*: se refiere a la actuación, la idoneidad y la competencia del personal ferroviario en el desempeño de una función operativa con incidencia en la seguridad del servicio.
- *El factor tecnológico*: se refiere al estado y funcionalidad segura del sistema tecnológico con el que se presta el servicio (los trenes, la infraestructura ferroviaria constituida por los subsistemas de vía: señalamiento, energía, estaciones, obras fijas y equipamiento físico de apoyo al servicio).
- *El factor organizacional*: se refiere al funcionamiento de la empresa ferroviaria, a la equilibrada pero suficiente asignación de recursos físicos y humanos, a su planificación operativa y de mantenimiento, al cumplimiento de lo programado y a la adecuada supervisión de los procesos operativos.
- *Forma de concreción del peligro genérico considerado*: es la mecánica en la que el peligro podría manifestarse en un accidente de determinado nivel de gravedad.
- *Consecuencias de la concreción del peligro genérico considerado en evento o suceso*: se define como el saldo (expresado en víctimas fatales, heridos, daños materiales) esperable si el peligro genérico considerado en un escenario dado se concreta en el evento definido en el punto anterior. Los datos pueden ser fruto de antecedentes similares incluso de otros ferrocarriles.
- *Severidad del evento suceso*: se trata de un valor numérico relacionado con la gravedad en materia de daños humanos y materiales ocurrido en el evento. En el apéndice B de la Primera Directiva de Seguridad Operacional Ferroviaria se define a la severidad también como “Impacto accidentológico”. Se define como tal al grado del nivel de consecuencias producidas por un accidente. Este impacto será ponderado en función del grado de los daños humanos, de los daños por afectación del servicio, por lucros cesantes, por daño medioambiental o incluso el daño a la imagen de la Empresa. Su valor surge de la tabla de severidad establecida en el sistema de gestión de la seguridad operaciones de la empresa ferroviaria. [6]
- *Probabilidad (frecuencia) en la que podría ocurrir el evento o suceso*: se trata de otro valor numérico asociado a la cantidad de eventos similares por unidad de tiempo (efectivamente registrados o en su defecto una estimación esperable). Naturalmente se basa en los antecedentes estadísticos de accidentología de eventos registrados. cuando no existen se asume en atención a una probabilidad estimada en la que este podría ocurrir. Su valor surge de la tabla de probabilidad establecida en el sistema de gestión de la seguridad.

### 3.2.3 La Matriz de Riesgos Genéricos

Considerando distintas situaciones de escenario común se comienzan a plantear las situaciones que pueden llegar a concretarse durante la prestación del servicio.

El caso bajo estudio es el de un ferrocarril NN dedicado al transporte urbano local de pasajeros en un recorrido de 50 km y que mueve unos 100.000 pasajeros diarios. Sus trenes están formados por una locomotora diésel eléctrica con más de 40 años en servicio y seis coches remolcados que promedian 50 años en servicio. Los andenes de las estaciones están elevados pero las formaciones están compuestas por coches que no cuentan con puertas de apertura y cierre centralizado con lazo de tracción, que haría imposible que un tren estuviese en movimiento



con alguna puerta abierta. Las puertas de los coches no están dotadas de enclavamiento de seguridad tal que impediría su apertura forzada cuando los trenes estuviesen en movimiento.

Un servicio de estas características presenta escenarios de riesgo que podrían agruparse según el contexto común. En este punto se planteó una lista completa de los riesgos genéricos operacionales más significativos a los que está sometido el ferrocarril que fue materia de estudio.

Para dar cumplimiento al Segundo Objetivo Específico incluimos aquí para su visualización la matriz de riesgos genéricos del ferrocarril analizado.

Tabla 5 – Matriz de Riesgos Genéricos (No Asociados a Un Lugar Específico de la Línea)

MATRIZ RIESGOS GENERICOS (AQUELLOS NO ASOCIADOS A UN LUGAR ESPECIFICO DE LA LINEA)										
COD.	SITUACION O CONTEXTO	CONDICION LATENTE	PELIGRO CONSIDERADO	TIPIFICACION DE CAUSAS PRIMARIAS	MODO DE CONCRECION DEL PELIGRO EN INCIDENTE O ACCIDENTE	CONSECUENCIAS DEL RIESGO CONCRETADO EN INCIDENTE O ACCIDENTE	SEVERIDAD	PROBABILIDAD	VALOR DE RIESGO PRIMARIO	NIVEL DE RIESGO PRIMARIO
001	TREN CIRCULANDO	DEFICIENCIAS DE ACTUACION EN PROCEDIMIENTO RUTINARIO	POSIBILIDAD DE REBASAMIENTO DE SEÑALES POR DISTRACCION, NEGLIGENCIA Y/O IMPERICIA	FALLA HUMANA	CHOQUE ENTRE TRENES	POSIBLES MUERTOS Y/O HERIDOS - DAÑOS AL MATERIAL RODANTE	25	2	50	TOLERABLE
002	TREN CIRCULANDO	DEFICIENCIAS EN EL SISTEMA DE SEÑALAMIENTO	POSIBILIDAD DE REBASAMIENTO DE SEÑALES POR FALLA DEL SISTEMA DE SEÑALAMIENTO	FALLA TECNICA	CHOQUE ENTRE TRENES	POSIBLES MUERTOS Y/O HERIDOS - DAÑOS AL MATERIAL RODANTE	25	2	50	TOLERABLE
003	TREN CIRCULANDO	DEFICIENCIAS EN EL SISTEMA DE FRENO O DEFICIENCIAS MECANICAS	POSIBILIDAD DE REBASAMIENTO DE SEÑALES POR FALLA DE SISTEMA DE FRENO O FALLA MECÁNICA DEL MATERIAL RODANTE	FALLA TECNICA	CHOQUE ENTRE TRENES	POSIBLES MUERTOS Y/O HERIDOS - DAÑOS AL MATERIAL RODANTE	25	2	50	TOLERABLE
004	TREN CIRCULANDO	DEFICIENCIAS EN LA APLICACION DEL PROCEDIMIENTO DE CALZADO	POSIBILIDAD DE VEHICULO EN TRAYECTO POR FALTA DE CALZA A VEHICULO DETENIDO EN PENDIENTE	FALLA HUMANA	CHOQUE ENTRE TRENES	POSIBLES MUERTOS Y/O HERIDOS - DAÑOS GRAVES AL MATERIAL RODANTE	25	2	50	TOLERABLE
005	TREN CIRCULANDO	DEFICIENCIAS DE ACTUACION EN PROCEDIMIENTO RUTINARIO	POSIBILIDAD DE REBASAMIENTO DE SEÑALES INTENCIONAL O BIEN POR DISTRACCION, NEGLIGENCIA O IMPERICIA DEL PERSONAL DE CONDUCCION	FALLA HUMANA	FRENADA BRUSCA DE LA FORMACION	POSIBLES HERIDOS	10	3	30	TOLERABLE
006	TREN CIRCULANDO	DEFICIENCIAS DE ACTUACION EN PROCEDIMIENTO RUTINARIO	POSIBILIDAD DE EMBESTIMIENTO ARROLLAMIENTO PERSONAL DE CUADRILLA PROPIA	FALLA HUMANA	EMBESTIMIENTO O ARROLLAMIENTO DE TRABAJADORES	POSIBLES MUERTES Y/O HERIDOS GRAVES	15	2	30	TOLERABLE
007	TREN CIRCULANDO	DEFICIENCIAS DE ACTUACION EN PROCEDIMIENTO RUTINARIO	POSIBILIDAD DE EMBESTIMIENTO ARROLLAMIENTO PERSONAL DE CUADRILLA CONTRATISTA	FALLA HUMANA	EMBESTIMIENTO O ARROLLAMIENTO DE TRABAJADORES	POSIBLES MUERTES Y/O HERIDOS GRAVES	15	2	30	TOLERABLE
008	TREN CIRCULANDO	CONDICIONES CIVILES DE DISEÑO DEL CRUCE	POSIBILIDAD DE VEHICULO INVADIENDO GALIBO DINAMICO DEL TREN POR ALGUN ACCIDENTE VIAL EN RUTAS O CALLES ALEJADAS	FALLO OCASIONADO POR TERCEROS	VEHICULO IMPACTA CONTRA FORMACION	POSIBLES MUERTES Y/O HERIDOS GRAVES EN EL VEHICULO O POSIBLES HERIDOS EN LA FORMACION - DAÑOS EN EL MATERIAL RODANTE	15	2	30	TOLERABLE

### 3.3. Tercer Objetivo Específico: ANALISIS POR EL METODO CAUSA-EFECTO DE LOS ESCENARIOS DE RIESGO GENERICO

Las generalidades de estas herramientas y/o conceptos extraídos de la norma ISO 31010:2013 en su Anexo B – puntos 17 y 29 y ya fueron abordadas en el Primer Objetivo Específico.

#### 3.3.1 Lo Que Presentamos en los Diagramas Causa Efecto

Totalmente emparentados con la técnica llamada “Tormenta de Ideas”, los diagramas “Causa-Efecto”, “Espina de pescado” o “Diagramas de Ishikawa” son los que los autores hemos utilizado para graficar todas las rutas por los que las distintas hipótesis o fuentes de causas pueden llegar a desembocar en un Accidente a partir de un escenario de Riesgo Genérico. Normalmente se convoca a un grupo de expertos en los distintos servicios operacionales para que aporten, en función de sus experiencias y datos objetivos, su visión profesional para el planteo de lo que consideren en el día a día como Riesgos Genéricos presentes en el sistema operativo.

El conjunto de las posibles causas a su vez será organizado por el especialista de Evaluación de Riesgos dividiendo a las mismas en cuatro Factores de Causas:

- Factor Humano,
- Factor Organizacional,



- Factor Tecnológico
- Factor Externo.

Primeramente, se debe listar todas las posibles causas y agruparlas en relación a los cuatro Factores de Causas.

No resultara inicialmente relevante cuales de dichas causas sean las que se presentan mayoritariamente en los eventos concretados para cada escenario.

En el siguiente paso del análisis debemos asignarle a cada causa un peso relacionado naturalmente, a la frecuencia en que dicha causa podría resultar la que haya propiciado la ocurrencia de un accidente.

Denominaremos como “Causas Primarias” a las más mencionadas como importantes en el proceso de Tormenta de Ideas (o dominantes) para cada escenario de Riesgo considerado. Todas aquellas que no revistan ese carácter, pero estén mencionadas en el ejercicio de análisis serán “Causas Alternativas” y serán ordenadas según su peso relativo en términos de probabilidad o frecuencia.

Cuando no existan antecedentes en el ferrocarril que esté bajo análisis será necesario que nos planteemos igualmente el ejercicio de estimar la probabilidad de un accidente a partir de la causa considerada (sea principal o concurrente) en función a los antecedentes conocidos en otras líneas ferroviarias del país, la región y el mundo.

A los fines de no complejizar los cálculos de riesgo, hemos admitido que la causa principal y alguna concurrente puedan darse simultáneamente para converger en un mismo evento. En ese caso, la probabilidad de ocurrencia de ambas causas en simultáneo sería un producto de probabilidades de valor menor que la menor de las probabilidades de cada causa tomada individualmente. Para evitarnos este proceso simplificaremos definiendo que la probabilidad o frecuencia adoptada para ese riesgo (haya éste provenido de cualquiera de las causas), será la de la ocurrencia del evento accidental a partir de la causa principal.

Más allá de lo visto en el párrafo anterior quedará el compromiso de ir atacando todas las posibles otras causas con alguna acción correctiva, en el marco de la mejora continua en la gestión de riesgos. De allí la importancia de lograr el detalle más completo posible de las causas.

### **3.3.2 Como Interpretar las Flechas en el Diagrama Causa-Efecto**

Para poner de relevancia al factor causal y a las propias causas relevantes haremos que las flechas que representan las causas en el diagrama causa-efecto tengan un grosor proporcional a su grado de frecuencia o probabilidad establecido en el proceso de “tormenta de ideas”.

Los trazos más gruesos nos indicarán que se está ante las causas más frecuentes, mientras que los trazos entrefinos y finos estarán asociados a las causas alternativas.

Cuando un factor de causalidad de los cuatro no pueda registrar ninguna causa se pondrá a la línea del factor en punteado y se colocará la frase “SIN IMPORTANCIA SIGNIFICATIVA”.

### **3.3.3 Ejemplos de Diagramas Causa-Efecto**

A los fines de dar cumplimiento al Tercer Objetivo Específico se agrupan a continuación Fichas de Riesgo Genérico elaboradas para el ferrocarril que fue puesto bajo estudio las que, a su vez, contienen sus respectivos Diagramas Causa-Efecto.



Figura 1: Diagramas Causa-Efecto.

### 3.4. Cuarto Objetivo Específico: MODELO O EJEMPLO DE PLANTEO DE MEDIDAS DE REDUCCION DE RIESGOS GENERICOS

#### 3.4.1 ¿Qué es una Medida de Reducción de Riesgos?

Se trata de una medida o acción diseñada y destinada a adoptarse con el fin de reducir el valor del Riesgo en un escenario bajo estudio. Dado que el Riesgo se expresa como el producto matemático entre la Severidad del evento y su Probabilidad o frecuencia en la que llega a manifestarse, los mecanismos disponibles para la reducción se limitan a dos opciones o a una combinación de ambas:

- Reducir el valor de la probabilidad de ocurrencia del evento.
- Mitigar de alguna manera las consecuencias primariamente estimadas para el evento.

Las formas de reducción de los riesgos operacionales genéricos pueden incluir medidas de monitoreo de las tareas involucradas en el escenario de riesgo considerado, emisión de ajustes en los procedimientos, instructivos y métodos de trabajo destinados a potenciar la labor del personal operativo. En otras circunstancias una mejora significativa para moderar un riesgo solamente resulta viable y significativa cuando por vía inversión presupuestaria se incluye alguna forma de asistencia tecnológica de respaldo capaz de reducir significativamente la probabilidad de ocurrencia de un evento accidental.

#### 3.4.2 Las Medidas de Reducción de Riesgos

A menudo las medidas de mitigación de riesgos son tomadas después de comparar la reducción de costos de la No Seguridad (por ejemplo, al estudiar y computar los daños de accidentes ocurridos frente a un determinado escenario de Riesgo Genérico).

Una buena estimación de la reducción del riesgo cobra particular importancia al ser comparada la inversión que requeriría implantar en el sistema una solución tecnológica con el costo de la no seguridad determinado por asumir el nivel actual de riesgo.

Claramente podemos concluir que no actuar en el plano tecnológico nos llevará a obtener solamente reducciones modestas del riesgo obtenidas por vías procedimentales.



### 3.4.3 Ejemplos de Visualización del Impacto de una Medida

#### Caso A posibilidad de “REBASAMIENTO DE SEÑALES”

Consideremos el caso de una ficha de Riesgo genérico en donde el escenario planteado es el rebasamiento de una señal a peligro. Los parámetros del escenario son los siguientes:

CONDICION LATENTE: Deficiencias de actuación en procedimiento rutinario.

SITUACION O CONTEXTO: Tren circulando.

PELIGRO CONSIDERADO: Posibilidad de rebasamiento de señales por distracción, negligencia y/o impericia.

ATRIBUIBLE EN PRINCIPIO A: Falla humana.

CONCRECION DEL PELIGRO: Choque entre trenes.

CONSECUENCIA DEL PELIGRO: Posibles muertos y/o heridos – daños al material rodante.

Debido a que se trata el análisis de un ferrocarril que, al momento del análisis, no contaba con ningún sistema tecnológico activo de protección automática del tren supervisando la conducción al pasar por las señales existía una fuerte presión sobre el factor humano en la conducción.

*La valoración original del riesgo es: Severidad 25 – Probabilidad 2 – Valor de Riesgo 50 – Nivel de Riesgo Tolerable.*

Proponiendo como medida de reducción de riesgo la colocación de un sistema A.T.S. (Automatic Train Stop), la probabilidad baja al mínimo es decir un valor de 1 (o prácticamente nula) pero de este modo el valor de Riesgo sólo desciende a 25, que pese a resultar aún de nivel tolerable es una reducción muy significativa.

Siguiendo un criterio conservador se asumió que este riesgo no podría ser directamente eliminado asignándole un valor de cero a la Probabilidad ya que, por múltiples razones, el accidente aún podría ocurrir, por ejemplo, en un caso de exclusión temporal del ATS por falla técnica en la baliza o en el equipo embarcado.

En esa “condición degradada” la operación se continuaría gestionando a través de los procedimientos y reglamentos de circulación volviendo a incrementarse la probabilidad a la condición original (sin ATS).

#### Caso B posibilidad de “CAIDA DE USUARIOS EN EL ASCENSO A LOS TRENES Y EN EL DESCENSO DESDE LOS MISMOS CON TRENES EN MOVIMIENTO”

Consideremos el caso de una ficha de Riesgo genérico en donde el escenario planteado es el de posible caída de usuarios a los trenes en movimiento y en el proceso de ascenso o bien caídas al andén al bajar de los coches en movimiento. Los parámetros de este riesgo son:

CONDICION LATENTE: Deficiencia inherente a las características diseño del material rodante.

SITUACION O CONTEXTO: Usuarios ascendiendo/descendiendo en movimiento tren detenido.

PELIGRO CONSIDERADO: Posibilidad de caída sobre andén (o tren) en el ascenso o descenso con tren detenido sin puerta automática y sin enclavamiento sobre andenes elevados.

ATRIBUIBLE EN PRINCIPIO A: Características del material rodante y actitud del usuario.

CONCRECION DEL PELIGRO: Pasajero caído sobre el andén o dentro del tren al subir o bajar del tren.

CONSECUENCIA DEL PELIGRO: Lesiones leves.



*La valoración original del riesgo es: Severidad 5 – Probabilidad 4 – Valor de Riesgo 20 – Nivel de Riesgo Tolerable.*

Este es un tipo de riesgo que resultaría prácticamente eliminado simplemente con dotar a los coches de un sistema de puertas automáticas. Pero esto, por sí sólo, tampoco resultaría suficiente para la resolución del tema ya que la colocación de puertas con cierre automático determinaría la necesidad de acondicionar el aire en los salones de pasajeros con equipos muy costosos. Dado que todas las reformas resultarían en una obra que requeriría una inversión significativa (y quizás hasta injustificada) para coches que promedian 50 años. Por lo tanto, una solución definitiva sería la de directamente renovar todo el material rodante afectado al servicio con vehículos que tengan esas funcionalidades, pues en un servicio así este riesgo resultaría prácticamente nulo.

En un plano no tan condicionado a la inversión sería posible plantear medidas de reducción basadas en un mayor control (con personal) sobre los trenes y en los andenes, lo cual no garantizaría en modo alguno una reducción significativa y eficaz. La existencia de campañas orientadas a los usuarios de carácter masivo por vías gráficas y audios puede influir en los mismos para que no se expongan a un riesgo de caída ascendiendo o descendiendo con los trenes en movimiento. Otra posible reducción del riesgo podría lograrse con una campaña de reinducción del personal de guardatrenes y conductores para reforzar en los aspectos vinculados a las necesarias precauciones relativas al despacho de trenes.

#### **4. CONCLUSIONES**

El trabajo de evaluación de riesgos es el más importante dentro del Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional. Se trata de una tarea continua de revisión de situaciones y escenarios posibles bajo los cuatro aspectos básicos que interactúan en el ámbito operacional ferroviario.

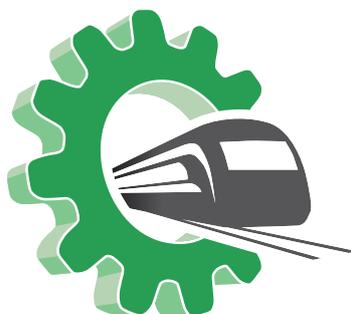
El método propuesto resulta suficiente para un análisis básico de los escenarios de riesgo genérico ya que sin recurrir a complejos estudios de probabilidad se focaliza en profundizar la detección minuciosa de las posibles causas y elaborar una suerte de árbol de causas de forma clara y simple, mientras a la vez también abre la puerta al planteo de medidas de reducción de riesgo actuando sobre las causas, además de estimar el impacto de su adopción en el nivel de riesgo resultante.

#### **5. REFERENCIAS**

- [1] ISO GUIA ISO/CEI 73 - GESTION DE RIESGOS - TERMINOLOGIA - LINEAS DIRECTRICES PARA EL USO DE LAS NORMAS.
- [2] NORMA UNE - ISO 31000 - GESTION DEL RIESGO - PRINCIPIOS Y DIRECTRICES.
- [3] NORMA UNE - ISO 31010 - GESTION DEL RIESGO - TECNICAS DE APRECIACION DEL RIESGO.
- [4] Resolución 170/2018 del Ministerio de Transporte.
- [5] Cuerpo de la Primera Directiva de Seguridad Operacional Ferroviaria.
- [6] "Apéndice B – Definiciones y Clasificaciones de Incidentes y Accidentes". Primera Directiva.

Área Temática

# Misceláneas





## ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO DE CATEGORÍA L6 (b)

**Gustavo Cazzola, Horacio Mirassou, Juan Dusau, José Santelli**

Departamento Académico de Mecánica - UTN Facultad Regional General Pacheco  
Hipólito Yrigoyen 288, General Pacheco, Buenos Aires, Argentina

gcazzola@docentes.frgp.utn.edu.ar  
hmirassou@docentes.frgp.utn.edu.ar  
jdusau@docentes.frgp.utn.edu.ar  
jsantelli@docentes.frgp.utn.edu.ar

### RESUMEN

Este estudio presenta una investigación teórica y experimental sobre la dinámica longitudinal de un vehículo urbano liviano de cuatro ruedas puramente eléctrico categoría L6 (b), el cual ofrece una solución de movilidad sostenible para las grandes ciudades. El móvil prototipo utilizado fue sometido a mediciones de velocidad en función del tiempo durante procesos de aceleración y frenado, utilizando un sistema GPS. Además, se llevaron a cabo mediciones físicas directas de la distancia entre ejes, la masa total y el radio de las ruedas, y se realizaron cálculos adicionales para estimar parámetros claves del vehículo, como el área frontal, el coeficiente de resistencia a la rodadura, la ubicación del centro de gravedad y los momentos de inercia del rotor del motor propulsor, las ruedas y los engranajes de la transmisión de potencia. La velocidad máxima del móvil prototipo utilizado no supera 40 km/h, por eso la resistencia aerodinámica es pequeña, se estimó el coeficiente aerodinámico  $C_D$  de la carrocería para completar los cálculos. A partir de esos datos, se determinaron los diferentes tramos que forman parte de la curva de torque instantáneo del motor eléctrico en función de su frecuencia de giro, expresada en r.p.m. Este estudio permitió una comprensión más profunda de la dinámica longitudinal y su tren de potencia en esta categoría de vehículo eléctrico. Además, se proporcionó información clave para avanzar en futuras simulaciones de Matlab/Simulink, que facilitarán la determinación de: la velocidad máxima del móvil, los tiempos de aceleración, el consumo y la eficiencia energética. En definitiva, este trabajo contribuye al avance de la tecnología de vehículos eléctricos y puede ser de gran interés para la industria automotriz regional.

**Palabras Clave:** *Vehículo Eléctrico, Dinámica Longitudinal.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En UTN FRGP a fines de 2019 se inició la gestión para adquirir un vehículo eléctrico de fabricación nacional de categoría L6 (b), para realizar con él trabajos de investigación sobre movilidad eléctrica. Fue recibido en UTN FRGP a mediados de 2020, durante la cuarentena, y permaneció guardado hasta 2022. Se lo muestra en la Figura 1a. Con el retorno a la presencialidad se iniciaron las mediciones y ensayos. En la Figura 1b se muestra una etapa del ensayo para encontrar la ubicación vertical del baricentro del vehículo. En la Figura 2 se representan las fuerzas principales que actúan sobre el automóvil, con tracción en las ruedas traseras, cuando se desplaza longitudinalmente.



Figura 1: (a) Vehículo estudiado; (b) Ensayo para encontrar la ubicación vertical del baricentro

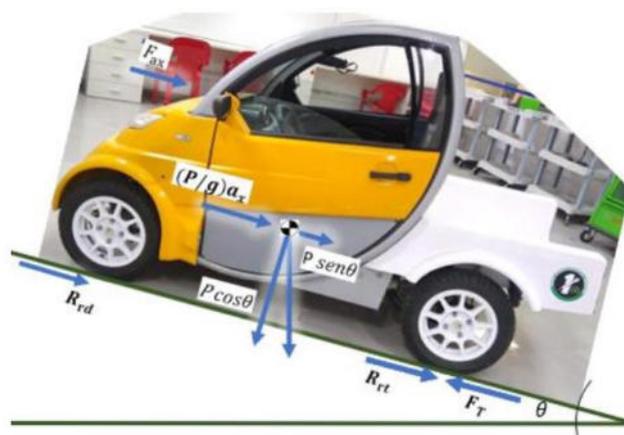


Figura 2: Fuerzas principales que actúan sobre el automóvil al desplazarse longitudinalmente

En la Figura 2 se denomina  $P$  al peso del vehículo (que debe incluir al peso del conductor, pasajero y carga si los hubiere),  $a_x$  es la aceleración longitudinal,  $F_{ax}$  es la resistencia aerodinámica,  $R_{rd}$  y  $R_{rt}$  son las resistencias por rodadura en las ruedas delanteras y traseras respectivamente,  $\theta$  es el ángulo de la pendiente en ascenso,  $F_T$  es la fuerza impulsora en las ruedas traseras. Pero en los cálculos de la Sección 2 se adopta la notación utilizada en [1].

## 2. MEDICIONES Y ENSAYOS REALIZADOS AL VEHÍCULO ELÉCTRICO CATEGORÍA L6 (b)

Se midieron las dimensiones principales (para verificar los datos publicados en el catálogo): distancia entre ejes, trocha, longitud máxima, altura, área máxima de la sección transversal, diámetro y radio bajo carga de las ruedas, dimensiones de llanta y cubierta y sus masas (para luego calcular sus momentos de inercia respecto del eje de giro), masa total del vehículo y distribución de pesos en cada rueda con el vehículo en posiciones horizontal e inclinada (Figura 1b), para luego calcular la posición del baricentro del vehículo. Se realizaron cálculos adicionales para estimar parámetros claves, como el coeficiente de resistencia a la rodadura, y los momentos de inercia del rotor del motor propulsor, las ruedas y los engranajes de la transmisión de potencia, respecto de los ejes de giro de cada uno. También se estimó el coeficiente aerodinámico  $C_D$  de la carrocería, para calcular la pequeña resistencia aerodinámica (velocidad menor a 40 km/h).

## 3. MÉTODO PARA CALCULAR EL TORQUE EN EL EJE DEL MOTOR

### 3.1 Ecuaciones según el autor Gillespie

En la Figura 3 (tomada de [1] pág. 11) se muestra un esquema de las fuerzas principales que actúan sobre un automóvil típico con tracción en las 4 ruedas, cuando se desplaza longitudinalmente.  $F_{xf}$  y  $F_{xr}$  son las fuerzas impulsoras en los ejes delantero y trasero.

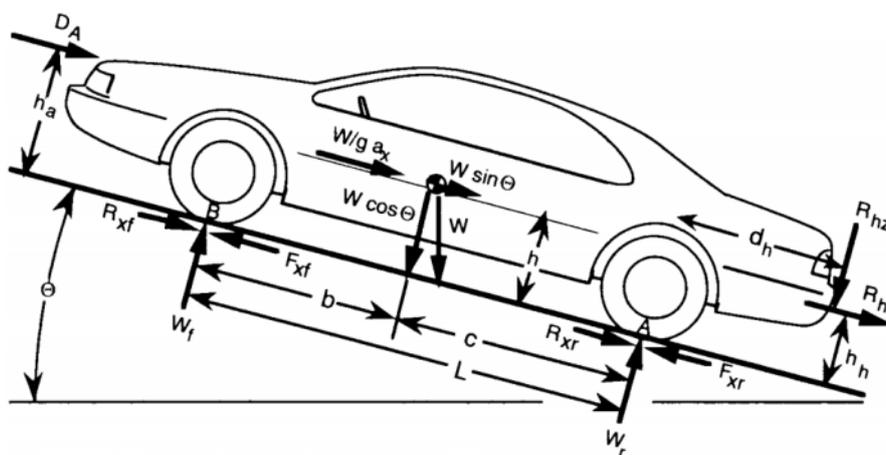


Figura 3: Fuerzas principales que actúan sobre un automóvil al desplazarse longitudinalmente



La fuerza impulsora total  $F_x$ , que actúa entre las ruedas motrices y el suelo, puede calcularse con la Ecuación (1), que es la ecuación (2-9b) de [1] pág. 26. Se utiliza la notación de [1], pero en este texto se adaptó la ecuación para el caso del vehículo eléctrico con tracción en las ruedas traseras. En la Sección 4 se describe cómo se determinaron algunos datos presentados abajo.

$$F_x = (T_e N_{tf} \eta_{tf} / r) - [(I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_d N_f^2 + I_w] a_x / r^2 \quad (1)$$

Donde:

$T_e$  = torque en el eje del motor eléctrico

$N_{tf}$  = relación de reducción total de la caja reductora de velocidad

$\eta_{tf}$  = coeficiente de rendimiento total del sistema mecánico de transmisión de potencia

$r$  = radio bajo carga de una rueda motriz

$I_e$  = momento de inercia del rotor del motor eléctrico con su árbol

$I_t$  = momento de inercia de elementos directamente vinculados al eje del motor eléctrico

$I_d$  = momento de inercia de elementos ubicados en el eje intermedio de la caja reductora

$N_f$  = relación de reducción entre el eje de las ruedas y el eje intermedio de la caja reductora

$I_w$  = momento de inercia de las 4 ruedas con sus palieres y elementos directamente vinculados

$a_x$  = aceleración del automóvil en la dirección de avance

Algunos de los valores de estas variables, en el automóvil ensayado, se conocen con mayor exactitud (como  $r$  y  $N_{tf}$ ), los otros valores se han calculado (en base a mediciones de los componentes, como  $I_w$ ) o estimado en base a datos aproximados (en el resto de los casos).

$T_e$  = (torque a ser calculado en función de las otras variables, en esta etapa de investigación)

$N_{tf} = 12,3$  (valor dato de la caja reductora del automóvil ensayado)

$\eta_{tf} = 0,96 = 0,98^2$  (valor posible según [2] pág. 12.1 considerando 2 etapas de reducción)

$r = 0,255$  [m] (valor medido en ruedas del automóvil ensayado)

$(I_e + I_t) = 0,006$  [kg.m<sup>2</sup>] (valor estimado con datos de catálogo de motor semejante marca Weg)

$I_d = 0,00195$  [kg.m<sup>2</sup>] (valor para ruedas dentadas y árbol de dimensiones estimadas)

$N_f = 3,9375$  (valor para ruedas dentadas con dimensiones estimadas)

$I_w = 1,236$  [kg.m<sup>2</sup>] (valor calculado con dimensiones y masas de ruedas y accesorios)

$a_x$  = (se calculó con datos de curvas de ensayos con GPS de velocidad en función del tiempo)

Reemplazando estos datos en la ecuación (1) se obtiene:

$$F_x = (T_e 12,3 \times 0,96 / 0,255 \text{ [m]}) - (0,006 \times 12,3^2 + 0,00195 \times 3,9375^2 + 1,236) \text{ [kg.m}^2\text{]} a_x / (0,255 \text{ [m]})^2$$

$$F_x = (46,3 T_e / \text{[m]}) - (0,90774 + 0,0302 + 1,236) \text{ [kg]} a_x / (0,255^2)$$

$$F_x = (46,3 T_e / \text{[m]}) - 33,432 \text{ [kg]} a_x \quad (2)$$

En la Ecuación (2) se obtiene  $F_x$  en la unidad [N] cuando se introducen  $T_e$  en [Nm] y  $a_x$  en [m/s<sup>2</sup>].

Pero en esta etapa de la investigación se busca calcular  $T_e$  en función de las otras variables.

Para eso se debe utilizar también la Ecuación (3), que es la ecuación (2-10) de [1] pág. 26.

$$M a_x = F_x - R_x - D_A - R_{hx} - W \text{ sen } \theta \quad (3)$$

De la Ecuación (3) se deduce la Ecuación (4):



$$F_x = M a_x + R_x + D_A + R_{hx} + W \text{sen } \theta \quad (4)$$

Donde:

$M$  = masa del automóvil con sus ocupantes = 665 [kg] (se midió en el automóvil ensayado)

$g$  = aceleración de la gravedad convencional = 9,80665 [m/s<sup>2</sup>]

$W$  = peso del automóvil con sus ocupantes =  $M g$  = 6521 [N]

$f_r$  = coeficiente de rozamiento por rodadura

$f_r = 0,01 (1 + V / 100)$  es la ecuación (4-14) de [1] pág.117 para la unidad: [V] = [mph]

$f_r = 0,01 (1 + V / (44,7 \text{ [m/s]}))$  es la ecuación anterior adaptada para la unidad: [V] = [m/s]

$R_x$  = fuerza de rozamiento por efecto de rodadura =  $W f_r$  (ecuación (4-12) de [1] pág.111)

$R_x = 6521 \text{ [N]} f_r = 65,21 \text{ [N]} (1 + V / (44,7 \text{ [m/s]}))$

$\theta$  = ángulo de inclinación del camino, respecto a una recta horizontal

$D_A$  = fuerza resistencia del aire =  $(\rho/2) V^2 A C_D$  (ecuación (4-2) de [1] pág.97)

$\rho$  = densidad del aire = 1,22 [kg/m<sup>3</sup>] a 16°C y  $p_{\text{atm}}$  (según ecuación (4-3b) de [1] pág.98)

$A$  = área de sección transversal del automóvil = 1,8 [m<sup>2</sup>] (calculada con dimensiones medidas)

$C_D$  = coeficiente resistencia aerodinámica = 0,36 (estimado según carrocerías semejantes)

$V$  = velocidad de avance en [m/s] (rango estudiado entre 0 y 10,83 [m/s] = 39 [km/h])

$D_A = (1,22 / 2) \text{ [kg/m}^3\text{]} V^2 (1,8 \text{ [m}^2\text{]} \times 0,36) = 0,4 \text{ [kg/m]} V^2$  (en el automóvil ensayado)

$(V = 23 \text{ [km/h]} = 6,388 \text{ [m/s]}) \Rightarrow D_A = 16,3 \text{ [N]} ; (V = 39 \text{ [km/h]} = 10,833 \text{ [m/s]}) \Rightarrow D_A = 47 \text{ [N]}$

$R_{hx}$  = fuerza antagonista por acoplado remolcado = 0 (en el automóvil ensayado no existe  $R_{hx}$ )

Con este valor de  $R_{hx}$  en la Ecuación (4) se obtiene la Ecuación (5).

$$F_x = M a_x + R_x + D_A + W \text{sen } \theta \quad (5)$$

Igualando las Ecuaciones (2) y (5) se obtiene la Ecuación (6).

$$(46,3 T_e / \text{[m]}) - 33,432 \text{ [kg]} a_x = M a_x + R_x + D_A + W \text{sen } \theta \quad (6)$$

Reemplazando los datos disponibles y estimados en la Ecuación (6) se obtiene:

$$(46,3 T_e / \text{[m]}) - 33,432 \text{ [kg]} a_x = 665 \text{ [kg]} a_x + 6521 \text{ [N]} f_r + 0,4 \text{ [kg/m]} V^2 + 6521 \text{ [N]} \text{sen } \theta$$

$$(46,3 T_e / \text{[m]}) = 698,432 \text{ [kg]} a_x + 65,21 \text{ [N]} (1 + V / (44,7 \text{ [m/s]})) + 0,4 \text{ [kg/m]} V^2 + 6521 \text{ [N]} \text{sen } \theta$$

$$T_e = 15,085 \text{ [kg.m]} a_x + 1,41 \text{ [Nm]} (1 + V / (44,7 \text{ [m/s]})) + (1/116) \text{ [kg]} V^2 + 140,84 \text{ [Nm]} \text{sen } \theta \quad (7)$$

En la Ecuación (7) se obtiene  $T_e$  en [Nm] si se introduce  $a_x$  en [m/s<sup>2</sup>] y  $V$  en [m/s].

En un camino plano es:  $\theta = 0 \Rightarrow \text{sen } \theta = 0 \Rightarrow$  reemplazando en (7) se obtiene:

$$T_e = 15,085 \text{ [kg.m]} a_x + 1,41 \text{ [Nm]} (1 + V / (44,7 \text{ [m/s]})) + (1/116) \text{ [kg]} V^2 \quad (8)$$

De la Ecuación (8) se obtiene  $T_e$  en [Nm] con  $a_x$  en [m/s<sup>2</sup>] y  $V$  en [m/s] para un camino plano.

Los valores de  $a_x$  en función de  $V$  se definen en la siguiente Subsección 3.2.

Es necesario también relacionar  $V$  con la frecuencia de giro  $n$  del motor expresada en r.p.m., para obtener  $T_e$  en función de  $n$ , y trazar la curva correspondiente.  $n_r$  = frecuencia de giro rueda

En una rueda motriz se cumple:

$$V = \pi 2 r n_r / 60 = \pi r (n / N_f) / 30 = \pi (0,255 \text{ [m]}) (n / 12,3) / 30 = n / 460,613 \quad (9)$$

En la Ecuación (9) se relaciona  $V$  en [m/s] con  $n$  en [r.p.m.].

### 3.2 Obtención del torque del motor $T_e$ aproximado en función de los datos disponibles

En la Figura 4 se muestra uno de los registros obtenidos con el sistema GPS, en ensayos de aceleración y frenado del vehículo en un camino plano, de la velocidad instantánea en [km/h] en función del tiempo en [s]. En la Figura 5 se muestra una parte de esa curva en un intervalo de  $t$ . A su izquierda se muestra un trazado de segmentos de recta (con extremos denominados A, B, C, D, E, F, G) que discretiza aproximadamente a la curva generada con el sistema GPS.



Figura 4: Velocidad instantánea en [km/h] en función del tiempo en [s] obtenida con sistema GPS

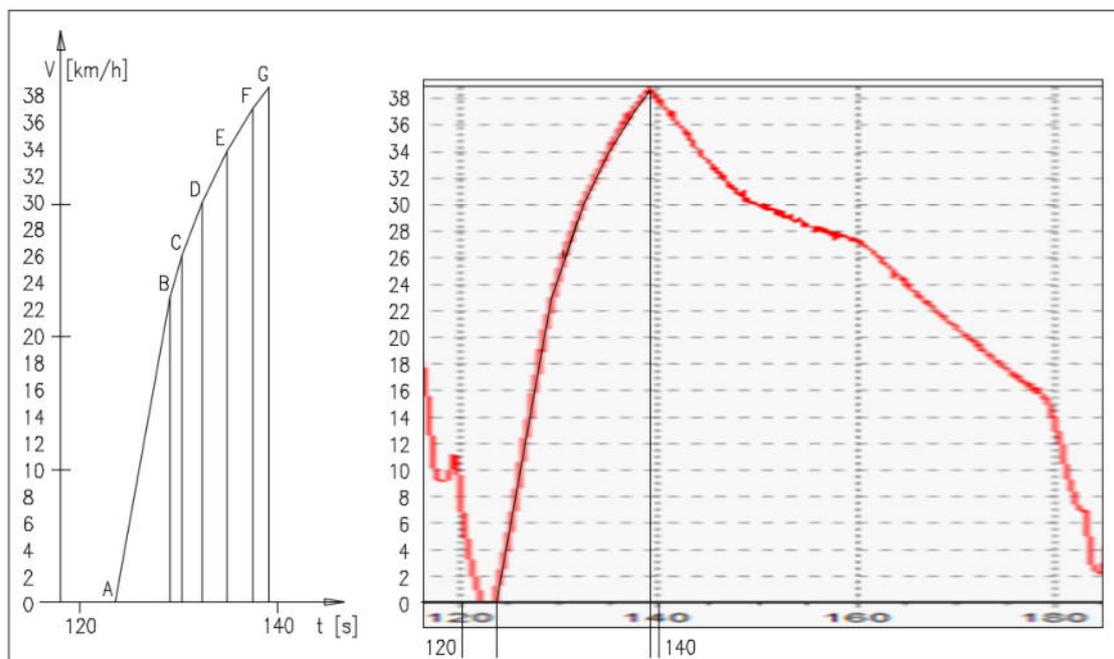


Figura 5: Discretización aproximada de velocidad instantánea función del tiempo en un intervalo



Se utilizó un programa CAD para trazar los segmentos sobre esa parte de la curva generada con el sistema GPS. Para la Figura 5 se copió ese trazado a la izquierda de la curva original. Con el programa CAD se midió la velocidad y el tiempo correspondientes a los puntos A, B, C, D, E, F, G, y los incrementos  $\Delta V$  y  $\Delta t$  de cada segmento, para calcular una aceleración  $a_x$  media con el cociente  $\Delta V/\Delta t$  en cada segmento. Datos registrados en Tablas 1 y 2. Se consideró  $t_A = 0$ .

Tabla 1. Datos obtenidos de la discretización de la Figura 5

Punto	V [km/h]	V [m/s]	t [s]
A	0	0	0
B	23.0122229	6.39228415	5.5803117
C	26.0994146	7.2498374	6.7980011
D	30.1240894	8.36780262	8.8001247
E	34.0024987	9.44513852	11.3152292
F	37.1711879	10.32533	13.9881722
G	38.8040558	10.7789044	15.6143418

Tabla 2. Datos obtenidos de la discretización de la Figura 5 y con cálculos adicionales

Segmento	delta V	delta t	ax media	V media	Te [Nm]	n [rpm]	P [kW]
AB	6.392284	5.580312	1.145507	3.196142	18.87885	1472.185	2.910491
BC	0.857553	1.217689	0.704246	6.821061	12.64981	3141.869	4.161986
CD	1.117965	2.002124	0.55839	7.80882	10.6053	3596.844	3.994596
DE	1.077336	2.515105	0.428346	8.906471	8.836386	4102.436	3.796164
EF	0.880191	2.672943	0.329297	9.885234	7.531653	4553.267	3.591219
FG	0.453574	1.62617	0.278922	10.55212	6.910279	4860.442	3.517223

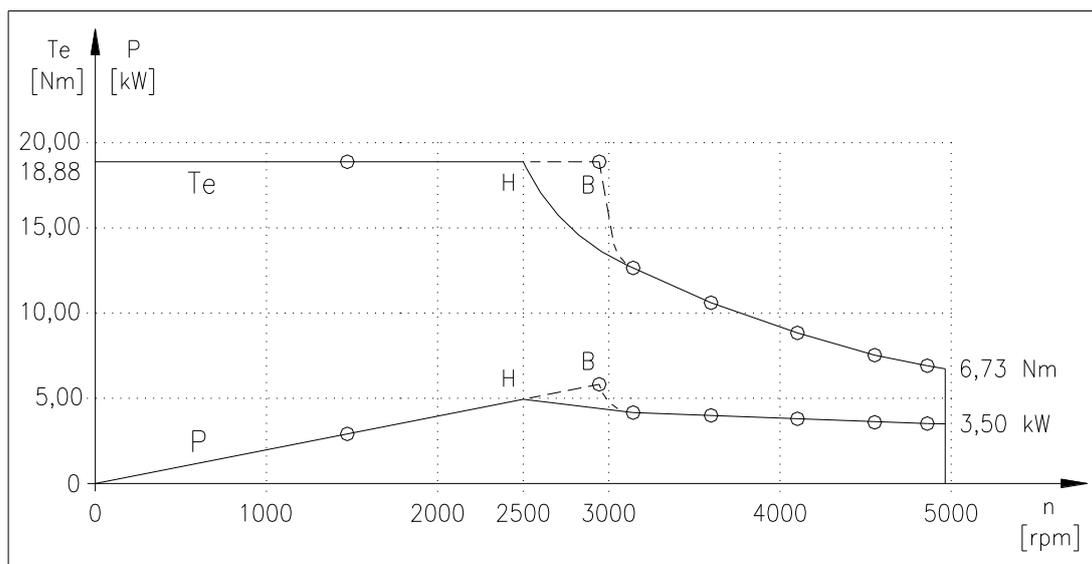


Figura 6: Torque del motor  $T_e$  y potencia  $P$  en función de la frecuencia de giro  $n$



Se calculó la velocidad media en cada segmento, sus valores se dan en la columna  $V$  media de la Tabla 2. Con la Ecuación (8), transcrita abajo, se calculó un valor de  $T_e$  aproximadamente medio en cada segmento, en función de  $a_x$  y  $V$  medias. Con la Ecuación (8) se obtiene  $T_e$  en [Nm] con  $a_x$  en [m/s<sup>2</sup>] y  $V$  en [m/s] para un camino plano, eso se dedujo en la quinta página de este artículo.

$$T_e = 15,085 \text{ [kg.m]} a_x + 1,41 \text{ [Nm]} (1 + V / (44,7 \text{ [m/s]})) + (1/116) \text{ [kg]} V^2 \quad (8)$$

De la Ecuación (9) se deduce la Ecuación (10), para calcular  $n$  [r.p.m.] en función de  $V$  [m/s].

$$n = 460,613 V \quad (10)$$

La potencia instantánea  $P$  en [kW] se puede calcular con la Ecuación (11), que es una expresión clásica, ingresando  $n$  en [r.p.m.] y  $T_e$  en [Nm]. El divisor permite compatibilizar las unidades.

$$P = n \cdot T_e / 9549,3 \quad (11)$$

Los valores de  $n$ ,  $T_e$  y  $P$  obtenidos se presentan en la Tabla 2, y se utilizaron para trazar las curvas de  $T_e$  y  $P$  en función de  $n$  de la Figura 6, en la cual los 6 pares de datos ( $T_e$ ,  $n$ ) y los 6 pares de datos ( $P$ ,  $n$ ) tomados de la Tabla 2 están representados con círculos pequeños. Para el trazado de las curvas se tuvo en cuenta que esos valores de  $n$ ,  $T_e$  y  $P$  son los promedios correspondientes a cada segmento de la discretización. Entonces se trazaron segmentos de recta cuyos extremos son los 5 puntos de  $T_e$  y los 5 puntos de  $P$  correspondientes a  $n$  mayor a 3000 r.p.m., estos segmentos representan aproximadamente las curvas de  $T_e$  y  $P$  que pasan por esos puntos. El máximo valor de  $n$  se obtuvo de la Ecuación (10) con la velocidad máxima alcanzada ( $V_G = 10,7789$  m/s) dada en la Tabla 1, resulta:  $n_G = 4965$  r.p.m.

De la Tabla 1 se obtiene:  $V_B = 6,39228415$  m/s, introduciendo ese valor en la Ecuación (10) resulta:  $n_B = 2944$  r.p.m., eso corresponde al punto B de la Figura 5. En esta explicación del proceso realizado para trazar las curvas de  $T_e$  y  $P$  en función de  $n$  en la Figura 6, falta describir el criterio utilizado para completar las curvas en el intervalo de  $n$  entre 0 y 3000 r.p.m., eso se hace a continuación. En la Figura 6, para completar la representación de  $T_e$ , inicialmente se trazó un segmento de recta horizontal que pasa por el primer punto (18,88 Nm, 1472 r.p.m.) obtenido de la Tabla 2, desde ( $n_A = 0$ ) hasta ( $n_B = 2944$  r.p.m.). Eso se hizo considerando que esta clase de motores de inducción suelen presentar curvas de  $T_e$  con esta característica: torque constante en un intervalo de  $n$  variando entre 0 y un valor ubicado entre un cuarto y la mitad de  $n$  máxima. Según la Ecuación (11), con  $T_e$  constante,  $P$  resulta ser directamente proporcional a  $n$ .  $P_B$  se calculó para ( $n_B = 2944$  r.p.m.) y ( $T_e = 18,88$  Nm), resulta:  $P_B = 5,82$  kW. En la Figura 6 se representó al punto B de la curva de  $P$  con coordenadas (5,82 kW, 2944 r.p.m.). Inicialmente se trazó un segmento de recta que pasa por ese punto y el origen de coordenadas (0, 0), segmento que también pasa por el primer punto de la Tabla 2, con coordenadas (2,91 kW, 1472 r.p.m.).



El fabricante del motor eléctrico no suministra estas curvas de  $T_e$  y  $P$  en función de  $n$ , pero declara una potencia máxima, disponible en el eje del motor, de 5 kW. Entonces de la Ecuación (11), con el torque constante considerado, se obtiene  $n = 2529$  r.p.m. ; redondeando en 2500 r.p.m. le corresponde una potencia de 4,95 kW, con la Ecuación (11) y el mismo torque constante. En la Figura 6 el punto H en la curva de  $P$  tiene coordenadas (4,95 kW, 2500 r.p.m.), y en la curva de  $T_e$  su punto H tiene coordenadas (18,88 Nm, 2500 r.p.m.), con esto se completaron ambas curvas, que de ese modo presentan un aspecto semejante a las de otros motores de inducción.

En líneas de trazos se muestran los tramos descartados de las curvas trazadas inicialmente, que llegaban hasta los puntos B de ambas curvas. Esas diferencias, relativamente pequeñas, pueden ser causadas por una combinación de errores: el camino utilizado no era perfectamente plano, las mediciones y trazados de las curvas originales del sistema GPS no son lo suficientemente exactas, en el trazado en CAD para la discretización de la curva original se consideró una aceleración  $a_x$  constante en el tramo AB, trazando un segmento de recta entre esos dos puntos.

Con una hipótesis de torque constante ( $T_e = 18,88$  Nm) en el intervalo de  $n$  entre 0 y 2500 r.p.m. se puede recalculer la aceleración  $a_x$  para los extremos de ese intervalo. Con las Ecuaciones (8) y (10), y con los correspondientes valores de  $V$ , resulta:  $n_H = 2500$  r.p.m.  $\Rightarrow V_H = 5,42755$  m/s  $V_H = 5,42755$  m/s  $\Rightarrow a_{xH} = 1,1299$  m/s<sup>2</sup> (1,36 % menor a  $a_x$  media del segmento AB Tabla 2)  $n_A = 0$ ,  $V_A = 0$   $\Rightarrow a_{xA} = 1,1581$  m/s<sup>2</sup> (1,10 % mayor a  $a_x$  media del segmento AB Tabla 2) Estas pequeñas diferencias no se perciben fácilmente con la precisión que se dispone en las curvas originales que entrega el sistema GPS, como se muestran en las Figuras 4 y 5. En la Figura 7 (tomada de [3]) se muestran las curvas de  $T_e$  y  $P$  en función de  $n$  de otro motor eléctrico de inducción, que se puede utilizar para propulsar un vehículo, como ejemplo para compararlas con las curvas de la Figura 6. Se detecta cierta semejanza en las formas de ambos casos.

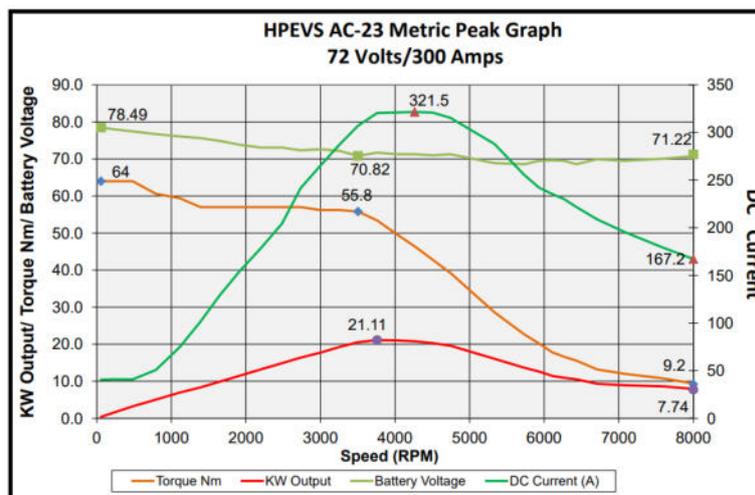


Figura 7: Ejemplo de otro motor. Torque  $T_e$  y potencia  $P$  en función de su frecuencia de giro  $n$



Se repitió todo el proceso de cálculo para otro intervalo de tiempo de los registros, obtenidos con el sistema GPS, de la velocidad instantánea en función del tiempo. Se obtuvo otro par de curvas de  $T_e$  y  $P$  en función de  $n$  semejantes a las de la Figura 6. Las pequeñas diferencias pueden deberse a las imperfecciones en la planitud del camino.

#### 4. MEDICIONES REALIZADAS A PARTES DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO CATEGORÍA L6 (b)

En la Ecuación (1) se deben introducir los momentos de inercia:  $(I_e + I_t)$ ,  $I_d$ ,  $I_w$ . Para estimar la influencia de sus valores, si se los supone nulos, en la Ecuación (8) se obtiene al coeficiente que multiplica  $a_x$  reducido en 4,8% con respecto al valor actual, con los otros términos de la Ecuación (8) sin cambios. Eso indica que la exactitud del valor de la masa total (del vehículo con ocupantes) es más importante. Pero se estimaron  $(I_e + I_t)$ ,  $I_d$ ,  $I_w$ , con una buena aproximación.

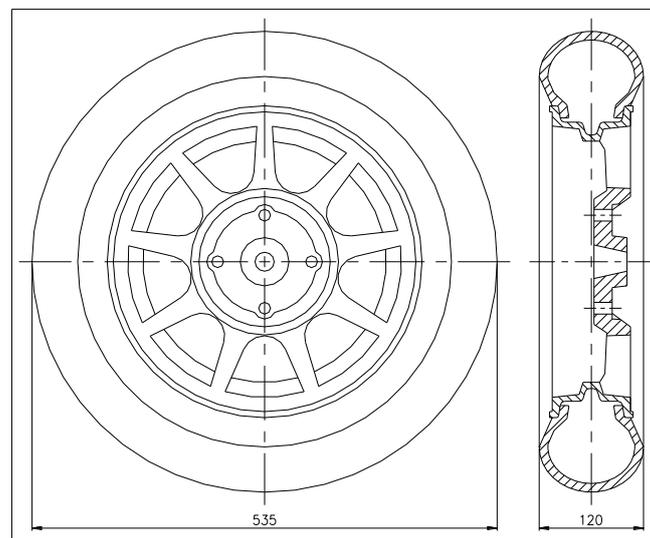


Figura 8: Relevamiento de una rueda para calcular su momento de inercia

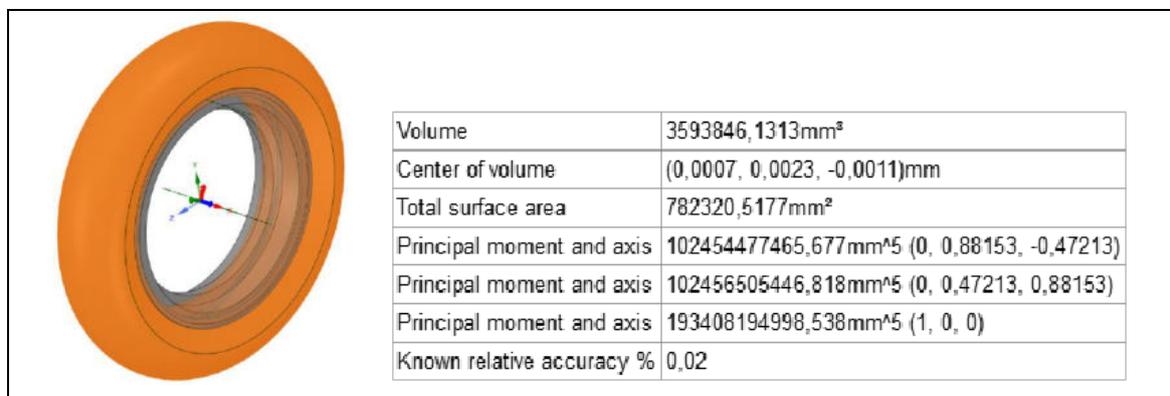


Figura 9: Modelado de cubierta y aro llanta con CAD 3D para calcular sus momentos de inercia

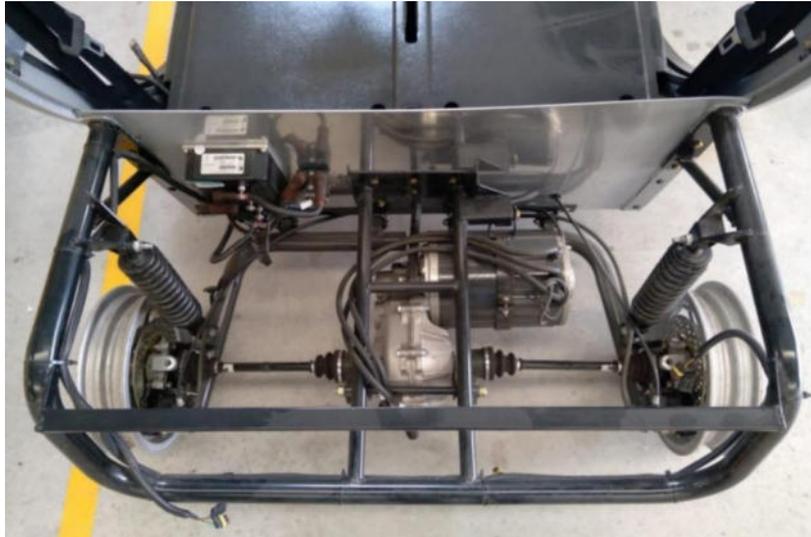


Figura 10: Fotografía del tren trasero de un vehículo semejante al ensayado

En la Figura (8) se muestra la representación de una rueda, trazada según las mediciones realizadas a una llanta y una cubierta, que también fueron pesadas por separado. Con el trazado detallado (con CAD 2D y luego 3D) se calculó el volumen de llanta y cubierta, y con sus masas se calcularon sus densidades (en la llanta de aluminio resultó el valor habitual  $2,7 \text{ kg/dm}^3$ ). Luego se calcularon los momentos de inercia de llanta y cubierta respecto de su eje de giro, inicialmente utilizando las ecuaciones de textos clásicos como [4] (descomponiendo llanta y cubierta en cuerpos simples), y luego con un programa CAD 3D, como se muestra en la Figura 9 para la cubierta (se hizo otro cálculo semejante para la llanta). Sumando ambos valores resulta el momento de inercia de una rueda. Valores medidos: masa rueda = 9,85 kg, masa cubierta = 4,24 kg, masa llanta = 5,61 kg,  $I_{\text{cubierta}} = 0,212 \text{ kg.m}^2$ ,  $I_{\text{rueda}} = 0,304 \text{ kg.m}^2$ , esto es para una rueda, y considerando palieres con ruedas dentadas asociadas, resulta para 4 ruedas:  $I_w = 1,236 \text{ kg.m}^2$ . Se puede ver que los momentos de inercia de los palieres y sus ruedas dentadas asociadas son pequeños, en comparación con las ruedas, porque en los momentos de inercia los radios se elevan al cuadrado. La Figura 10 muestra el tren trasero de un vehículo semejante al ensayado, se pueden ver los palieres, la caja reductora de velocidad y el motor eléctrico (unido a la caja con tornillos). En el interior de la caja, un pequeño piñón está montado en el árbol del motor. Ese piñón acciona una corona con otro piñón coaxial, ambos integrados al árbol intermedio. Este piñón acciona a la última corona, en cuyo cuerpo se aloja el sistema diferencial, que acciona a los palieres. Con las distancias entre ejes y dimensiones exteriores de la caja se estimaron las dimensiones de las ruedas dentadas, considerando los conceptos dados en [5-7] y [2], sabiendo que sus materiales son aceros, para calcular aproximadamente sus momentos de inercia. No se desarmó la caja para evitar dificultades. El fabricante del vehículo no dispone de datos exactos de las ruedas dentadas, porque recibe esas cajas, armadas, de un proveedor europeo.



En [8] pág. 23 se explica un método para determinar  $C_D$  y el coeficiente de rodadura con dos pruebas, con un vehículo en un camino plano y sin viento. Eso generalmente es aplicable para automóviles con velocidades mayores, se intentó hacer con el vehículo de esta investigación pero no se obtuvo un resultado válido, por eso se estimó  $C_D$  consultando [1] pág. 98.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los datos ingresados en los cálculos de las páginas cuarta y quinta de este artículo han sido revisados muchas veces, se puede ver que es importante la exactitud en el valor de la masa del automóvil con sus ocupantes. Para determinar si el trazado definitivo de la Figura 6 es una aproximación aceptable a las curvas reales del motor eléctrico, éstas se deberían obtener en un ensayo de laboratorio del motor, para efectuar la comparación. Eso se podrá realizar en una próxima etapa de este proyecto de investigación.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, al CIDIV y al Departamento de Ingeniería Mecánica de UTN FRGP por el apoyo brindado para realizarlo.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Gillespie T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE Inc., USA, 1992.
- [2] Townsend D.P. *Dudley's Gear Handbook, Second Edition*. McGraw Hill, USA, 1992.
- [3] <https://www.dikho.com.ar/producto/motor-kit-hpevs-27-kw-72v/> (consultado 20/4/2023)  
(opción en la parte inferior de la página del sitio: AC20 7-volts-450-amp-Medicion es-pico)
- [4] Beer F.P., Johnston E.R., Cornwell P.J. *Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica, Novena Edición*. McGraw Hill, México, 2010.
- [5] Norton R.L. *Diseño de máquinas*. Prentice Hall, México, 1999.
- [6] Budynas R.G., Nisbett J.K. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, Octava Edición*. McGraw-Hill, México, 2008.
- [7] Mirassou H.M. *Aplicaciones del método de cálculo para dimensionar dentados de engranajes del autor Trier y prestaciones obtenidas*. Séptimo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica VII CAIM 2021, ISBN 978-950-42-0210-3, 15 a 17 de Septiembre de 2021, San Nicolás de los Arroyos, Buenos Aires.
- [8] Cascajosa M. *Ingeniería de vehículos, Sistemas y cálculos, Segunda edición*. Alfaomega, México, 2005.



## ANÁLISIS NUMÉRICO SOBRE LA EFECTIVIDAD DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA BASADO EN FRICCIÓN PARA CONTROLAR LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Joaquín Lage Tejo<sup>1</sup>, Juan Sibecas<sup>2</sup>, Oscar Curadelli<sup>3</sup>, Marta Amani<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Estudiante, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Parque Gral. San Martín, Mendoza, Argentina- [lagejoaquin@gmail.com](mailto:lagejoaquin@gmail.com)

<sup>2</sup>Estudiante, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Parque Gral. San Martín, Mendoza, Argentina- [juan.sibecas@gmail.com](mailto:juan.sibecas@gmail.com)

<sup>3</sup>Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Parque Gral. San Martín, Mendoza, Argentina- [oscar.curadelli@ingeneiria.uncuyo.edu.ar](mailto:oscar.curadelli@ingeneiria.uncuyo.edu.ar)

<sup>4</sup>Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Parque Gral. San Martín, Mendoza, Argentina- [marta.amani@ingeneiria.uncuyo.edu.ar](mailto:marta.amani@ingeneiria.uncuyo.edu.ar)

### RESUMEN

Para mejorar el desempeño de estructuras bajo excitación sísmica es común el uso de sistemas de disipación de energía. El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de un disipador de energía, de dos etapas, eficiente, de bajo costo y confiable basado en fricción factible de instalarse en estructuras bajo excitación sísmica y de viento.

El trabajo presenta el estudio numérico en el cual se analiza el comportamiento del disipador de fricción de dos etapas instalado en un pórtico de dos pisos utilizado como prototipo bajo excitación sísmica. Los resultados del estudio demuestran la efectividad del dispositivo para controlar la respuesta estructural.

**Palabras Clave:** *Disipación de energía, Disipador de fricción, Control de respuesta estructural.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Para mejorar el comportamiento sísmico y reducir el daño o aún el colapso de estructuras aporticadas se han llevado a cabo durante las dos últimas décadas numerosos estudios numérico-experimentales a partir de los cuales surgieron dos importantes alternativas [1,2]: Aislación sísmica y disipación de energía externa. Ambas tecnologías han sido incorporadas en el diseño y construcción de edificios localizados en áreas de alta sismicidad en todo el mundo. Ciertamente, aislación sísmica es la protección más efectiva contra cargas sísmicas, sin embargo, en algunos casos especialmente en estructuras ya construidas el refuerzo mediante disipadores externos es una solución viable y más económica. Particularmente, disipadores basados en fricción son usualmente usados porque son robustos, ofrecen una alta disipación de energía por ciclo con bajo costo y mantenimiento. [3] desarrollan un amortiguador de fricción conocido como amortiguador friccional de Pall (PFD) que se instala sobre riostras y pueden deslizar en ambos sentidos. [4] presentan dos nuevos tipos de dispositivos friccionales de traslación y rotación que producen amplios y estables ciclos de histéresis. El disipador propuesto por [5] utiliza un diseño complejo en el cual resortes internos precomprimidos ejercen fuerzas laterales sobre sellos que generan fricción dentro de un cilindro.[6] desarrollan y ensayan un dispositivo llamado Disipador de Energía Restringido (EDR) que utiliza sellos bronce que rozan sobre un cilindro de acero. [7] proponen un dispositivo de fricción que consiste de una placa central y dos laterales entre las cuales se ubican discos de fricción, todo el conjunto se conecta a un pórtico mediante articulaciones. [8] estudian un dispositivo de fricción para mejorar el comportamiento sísmico de estructuras de acero que se instalan en riostras con forma de X. Los estudios mostraron que los desplazamientos laterales y el corte en la base de un edificio se redujeron significativamente y una gran cantidad de energía fue disipada. [9] muestran el concepto de un disipador de fricción que activa sendas etapas con terremotos de moderada y severa intensidad. Para controlar la respuesta de pórticos de hormigón armado bajo carga sísmica [10, 11] presentan el uso de un disipador de fricción que se incorpora en el nudo viga-columna. Un trabajo similar, pero sobre pórticos metálicos es presentado por [12-14]. [15] proponen un nuevo dispositivo de fricción que no necesita riostras para su instalación. El mismo se instala en las columnas de la estructura.

El comportamiento mecánico y diseño de un innovador disipador de fricción autocentrante es propuesto por [16]. [17,18] presentan el estudio numérico y experimental de un dispositivo de fricción en el cual la fuerza normal es aplicada a través de una leva con perfil predefinido. El trabajo de [19] investiga el desempeño de un disipador con dos fuerzas de fricción para controlar la respuesta de pórticos bajo terremotos de moderada y alta intensidad. Un nuevo absorbedor de impacto basado en fricción es propuesto por [20]. [21] desarrollan un nuevo disipador de fricción rotacional autocentrante. [22] estudian numérica y experimentalmente un



disipador histerético basado en fricción y deformación plástica de metal. Para la rehabilitación de edificios aporricados de hormigón armado [23] presentan un nuevo disipador de fricción basado en plomo confinado. [24] desarrollan un ensayo a escala natural de un pórtico arriostrado provisto de un disipador de fricción. La validación experimental del comportamiento de un disipador autocentrante de fricción es desarrollado por [25].

Con relación a los procedimientos de diseño de sistemas de disipación de energía friccionales se pueden mencionar los siguientes trabajos. [26] desarrollan dos metodologías de diseño para determinar la cantidad y fuerza total de fricción para edificios con comportamiento elástico. Un procedimiento robusto y eficiente de diseño para definir óptimamente la capacidad de disipadores no lineales (histeréticos) sobre edificios de múltiples pisos es propuesto por [27]. Un estudio similar sobre disipadores friccionales rotacionales es llevado a cabo por [28]. [29] presentan un proceso de optimización para dimensionar disipadores de fricción basado en confiabilidad. Mediante un modelo con elementos discretos y teniendo en cuenta la traslación y rotación de la estructura, [30] define la capacidad de los dispositivos de fricción. Otro procedimiento para dimensionar dispositivos de fricción que maximizan la energía disipada es presentado por [31].

Como se demuestra en los trabajos citados, el sistema de disipación de energía de una estructura se dimensiona para reducir la demanda generada por una determinada intensidad sísmica. Con el objetivo de evitar el colapso estructural, normalmente los códigos de diseño definen como intensidad sísmica de diseño (medida por la aceleración pico o bien la aceleración espectral del registro sísmico) aquella que tiene un periodo de retorno de 475 años (con 10% de probabilidad de ocurrir en 50 años). Consecuentemente el sistema de disipación de energía funciona adecuadamente para ese nivel de excitación pero no disipa la energía suficiente durante terremotos de baja o mediana intensidad. De esta manera se presentan problemas en instalaciones que contienen equipamientos sensibles a vibraciones. Con el propósito de satisfacer diferentes requerimientos de demanda este trabajo presenta el estudio de un Disipador de Dos Etapas de Fricción (DDF) cuyo objetivo principal es determinar, mediante un análisis numérico paramétrico, su eficacia para controlar la respuesta estructural bajo diferentes niveles de excitación. La respuesta del sistema se evalúa en términos de desplazamiento y aceleración para tres casos del sistema provisto con disipador de energía bajo diferentes intensidades de la excitación. En particular se analiza el sistema provisto con un disipador de energía en tres casos diferentes como se describe a continuación:

- a) Disipador de energía con fuerza de fricción óptima,  $ff_1$ , para intensidad de excitación baja (Aceleración pico del terremoto igual a  $PGA=1.0 \text{ m/s}^2$ ).
- b) Disipador de energía con fuerza de fricción óptima,  $ff_2$ , para intensidad de excitación alta (Aceleración pico del terremoto que conduce a un desplazamiento espectral



relativo igual a  $u_e = 1\%$  coincidente con el límite elástico de las rótulas localizadas en el pie y cabeza de columnas con el fin de evitar daño estructural)

- c) Disipador de energía de dos etapas (DDF) en la cual las fuerzas de fricción en cada etapa son las fuerzas de fricción óptimas definidas en los puntos a) y b).

Para obtener estimadores robustos, en el análisis se usan cuatro (4) registros reales de aceleración del suelo escalados con características diferentes.

## 2. DISIPADOR MULTIETAPA DE FRICCIÓN

### 2.1. Descripción

El disipador propuesto consiste de un conjunto de elementos de fricción, núcleo y dos patines en forma de “C” enfrentados como muestra la Figura 1a y 1b. La fuerza normal requerida sobre los patines se ajusta mediante la precompresión de resortes. Así cuando ambos patines se desplazan respecto al núcleo, se generan fuerzas de fricción sobre las superficies en contacto resistiendo al movimiento y disipando energía. En una primera etapa, bajo un desplazamiento axial positivo (Figura 2a) comienza a deslizar el patín calibrado con la menor fuerza de fricción, agotada su carrera máxima (o mínima si el desplazamiento es negativo), desliza el segundo patín calibrado con una mayor fuerza de fricción. Si el proceso se repite en ambos sentidos (Figura 2a), se desarrolla un ciclo de histéresis tal como muestra la Figura 2b.

En Figura 3 se presenta el sistema dinámico de dos grados de libertad utilizado como prototipo en el estudio paramétrico. Para mayor eficacia en el control de la respuesta estructural [27], el disipador se instala entre el soporte y el primer grado de libertad. La frecuencia fundamental del sistema es de 1.0 Hz y el amortiguamiento propio estimado es igual a 1.0% del crítico.

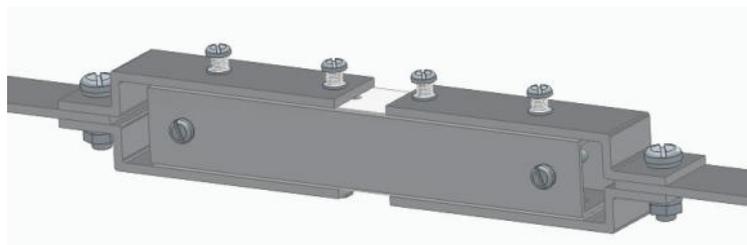




Figura 1a: Esquema en perspectiva del dissipador

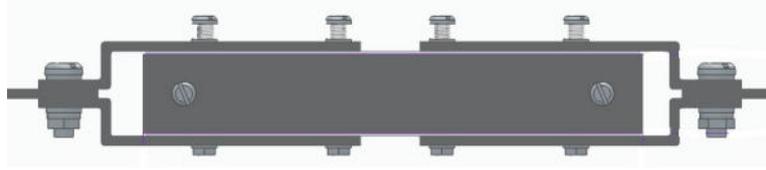


Figura 1b: Esquema vista lateral del dissipador

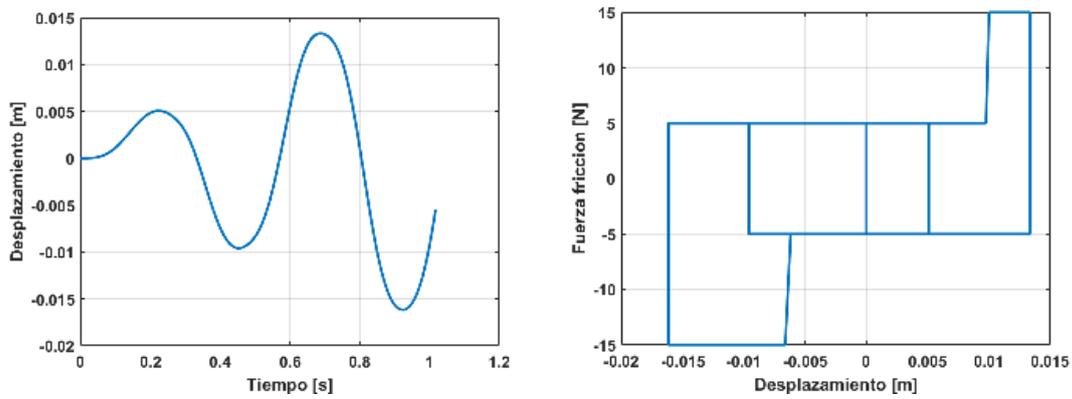


Figura 2: a) Desplazamiento relativo entre extremos del dissipador, b) Relación fuerza-desplazamiento del dissipador.

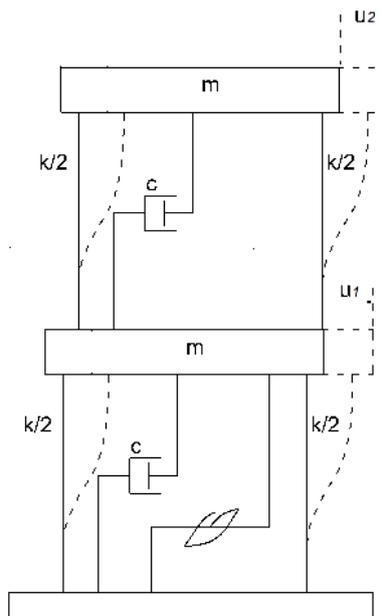


Figura 3: Sistema prototipo de dos grados de libertad.



### 2.3 Modelo numérico

La ecuación de movimiento del sistema de 2 grados de libertad (2gdl) mostrado en Fig.3 se puede escribir como:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + R(u(t), z(t), t) = F(t) \quad (1)$$

en el cual  $u$  es el vector desplazamiento del sistema;  $m$  y  $c$  son las matrices de masa y amortiguamiento, respectivamente;  $F(t)$  es el vector que representa la fuerza excitadora en este caso como se trata de una excitación sísmica del suelo es  $F(t) = -m1\ddot{x}_g$  siendo 1 vector de unos y  $\ddot{x}_g$  la aceleración del suelo;  $R(u,z,t)$  es el vector que representa la fuerza no lineal de disipación provista por el dispositivo y la fuerza de restitución provista por los elementos elásticos del sistema dada por:

$$R(u(t), z(t), t) = ku + \mu_{ef} N z \quad (2)$$

en el cual  $k$  es la matriz de rigidez del sistema y  $\mu_{ef}$  es el coeficiente efectivo de fricción del DDF,  $N_1$  o  $N_2$  son las fuerzas normales aplicadas sobre cada patín del dispositivo y  $z$  es una variable interna que define el valor de la fuerza de fricción de acuerdo a la relación fuerza-desplazamiento del disipador. Teniendo en cuenta la Ec. (2), la Ec. (1) puede escribirse:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) + \mu_{ef} N z(t) = -m1\ddot{x}_g \quad (3)$$

Los valores del coeficiente efectivo de fricción,  $\mu_{ef}$ , y fuerza normal,  $N$ , fueron ajustados de tal manera que la fuerza de fricción resultante en cada caso sea óptima. En el primer caso, para un nivel de intensidad sísmica baja con una aceleración pico igual a  $PGA = 1 \text{ m/s}^2$  condujo a una fuerza de fricción  $ff1 = 0.05 W$  (5% del peso,  $W$ , del sistema) y un segundo caso, un nivel de intensidad sísmica alta correspondiente a un valor de aceleración pico que conduce a un desplazamiento espectral relativo igual a  $u_e = 1\%$  coincidente con el límite elástico de las rótulas localizadas en el pie y cabeza de columnas (con el objetivo de evitar daño estructural) condujo a una fuerza de fricción en el intervalo  $ff2 = 0.25 - 0.35 W$  (25 % – 35 % del peso,  $W$ , del sistema) según el registro sísmico utilizado.

El desplazamiento mínimo para que ocurra el deslizamiento del patín de fricción de cada disipador fue admitido igual a,  $x_{y,} = 1 \text{ mm}$ .

### 3. EXCITACIÓN SÍSMICA

Para arribar a conclusiones robustas sobre el comportamiento del modelo experimental bajo excitación sísmica y evitar daño estructural permanente se eligió un conjunto de cuatro (4) registros de aceleración del suelo diferentes con la premisa que, como se mencionó anteriormente, su desplazamiento espectral relativo a la frecuencia natural fundamental de 1.0



Hz sea próximo al desplazamiento máximo admitido de  $u_e = 1\%$ . En Tabla 1 se muestra información de cada registro de aceleración real seleccionado.

Tabla 1. Registros de aceleración del suelo seleccionados

Terremoto	Estación	Componente	Fecha
Taft, CA, USA	Kern County	N21E	1952
Loma Prieta, SF, USA	Halls Valley	000	1989
Imperial Valley, CA, USA	El Centro	000	1979
Kobe, Japón	JMA	N	1995

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El resultado del análisis paramétrico se resume en la Figura 4, Figura 5, Figura 6 y Figura 7 las cuales muestran para cada registro sísmico, la respuesta máxima en términos de desplazamiento del primer piso (primer grado de libertad) y aceleración del segundo piso (segundo grado de libertad) para cada una de las dos fuerzas de fricción óptimas adoptadas en el dissipador versus el valor pico de aceleración de cada registro.

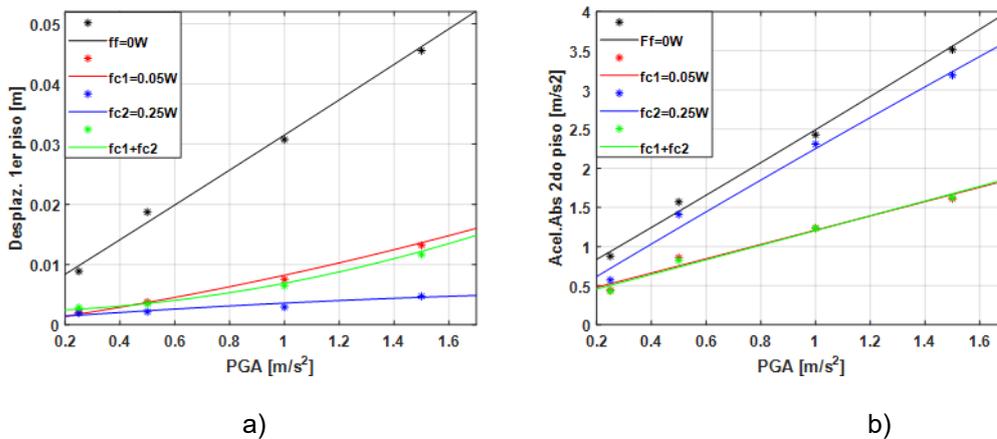


Figura 4. a) Desplazamiento máx. 1er gdl. b) Aceleración max. 2do grado de libertad. Sismo: Taft.

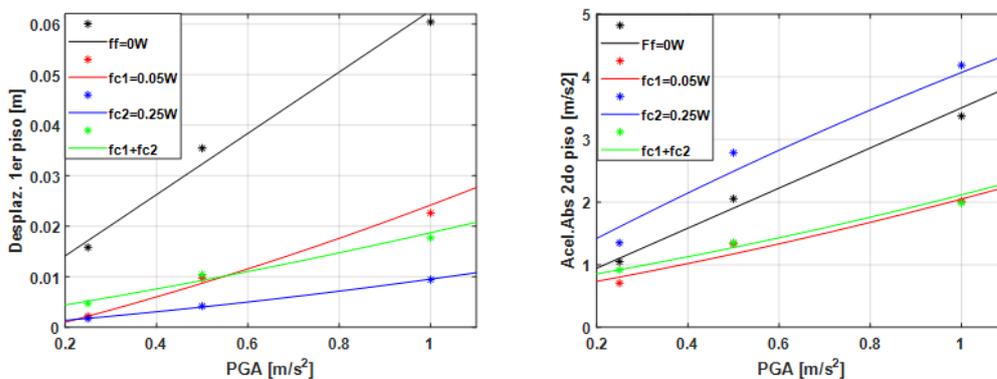


Figura 5. a) Desplazamiento máx. 1er gdl. b) Aceleración max. 2do grado de libertad.  
Sismo: LomaPrieta.

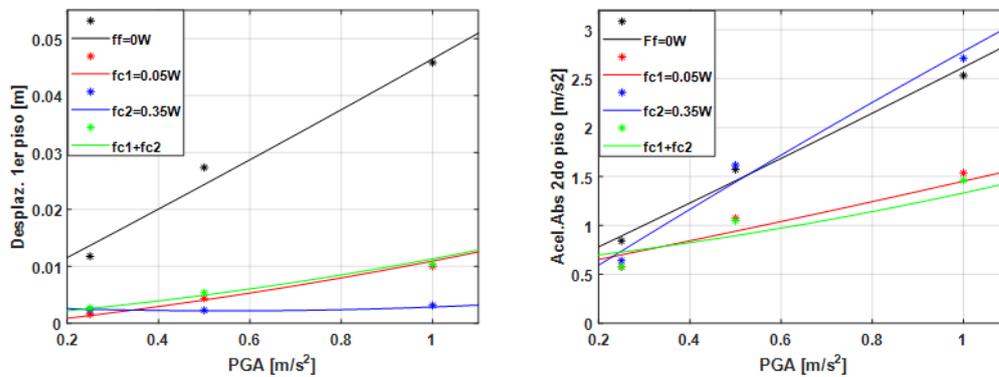


Figura 6. a) Desplazamiento máx. 1er gdl. b) Aceleración max. 2do grado de libertad.  
Sismo: Imperial Valley.

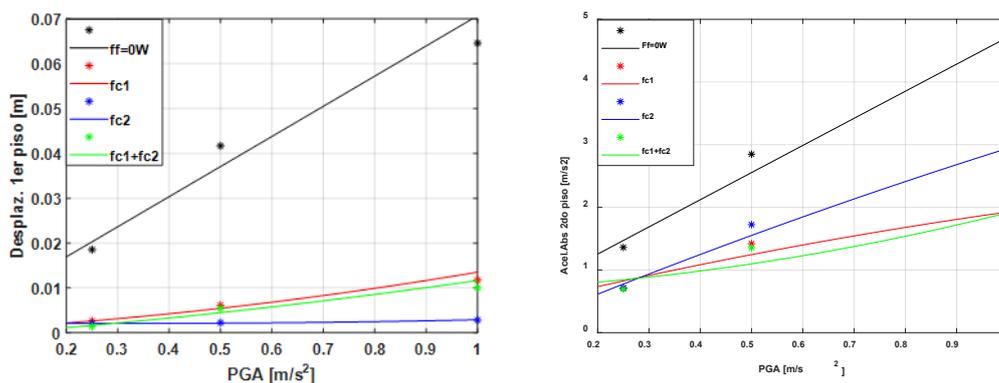


Figura 7. a) Desplazamiento máx. 1er gdl. b) Aceleración max. 2do grado de libertad.  
Sismo: Kobe.

A partir de las Figuras 4, 5, 6 y 7 se puede observar las siguientes consideraciones:

- Los mayores desplazamientos máximos del primer piso y prácticamente las mayores aceleraciones máximas del segundo piso se alcanzan con el sistema sin control ( $ff = 0$  W) para todo el intervalo de intensidad sísmica considerado.
- Con el sistema provisto con la menor fuerza de fricción,  $fc1 = 0.05$  W en cada caso se alcanza niveles intermedios de desplazamiento del primer piso y los menores niveles de aceleración en el segundo piso.
- Como era de esperar, los menores desplazamientos del primer piso se alcanzan con el sistema provisto con la mayor fuerza de fricción,  $fc2 = 0.25 - 0.35$  W. Sin embargo, los



niveles de aceleración en el segundo piso son muy altos, similares al caso no controlado o bien mayores.

- d) Con el sistema provisto con el disipador de dos etapas,  $fc1$  ó  $fc2$ , se alcanzan niveles de desplazamiento intermedios entre los casos con  $fc1$  y  $fc2$  y niveles bajos de aceleración similares al caso con  $fc1$ .

## 5. CONCLUSIONES

El trabajo presenta un estudio paramétrico en el cual se evalúa la eficacia de un Disipador de Dos Etapas de Fricción (DDF) para controlar la respuesta estructural. El estudio claramente demuestra que el DDF constituye una alternativa efectiva y confiable para mejorar el comportamiento bajo carga sísmica de sistemas estructurales similares al estudiado. El análisis mostró que la respuesta en términos de desplazamientos máximos puede reducirse en el orden de tres (3) veces o más, mientras que en términos de aceleraciones máximas la reducción puede alcanzar dos (2) veces. En resumen, para todo el intervalo de intensidad sísmica analizado, se logra una reducción marcada en términos de aceleración máxima y una reducción en términos de desplazamiento máximo suavemente mayor al caso con menor fuerza de fricción (sin alcanzar el valor mínimo alcanzado con la mayor fuerza de fricción). Actualmente se trabaja en el diseño y construcción de un prototipo experimental del disipador presentado y el análisis numérico de una estructura real provista con el mismo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Nacional de Cuyo por el apoyo económico recibido a través del proyecto de investigación código 06/B041- T1.

Adicionalmente, se agradece la colaboración del Bioingeniero Gabriel Hourri personal de apoyo a la investigación de CONICET.

## REFERENCIAS

- [1] Soong TT, Dargush GF. *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley & Sons; 1st ed. New York. 1997.
- [2] Kelly JM. Aseismic base isolation: Review and Bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(4), 202-216, 1986.
- [3] Pall AS, Marsh C. Response of friction damped braced frames. *J Struct Div ASCE*, 108,1313–23, 1982.



- [4] Anagnostides G, Hargreaves AC, Wyatt TA. Development and Applications of Energy Absorption Devices Based on Friction. *J. Constr. Steel Res.*, 13,317-36, 1989.
- [5] Aiken I, Kelly S. *Earthquake simulator testing and analytical studies of two energy absorbing systems for multi-storey structures*. Report No. UCB/EERC-90/03, EERC, Berkeley, 1990.
- [6] Nims DK, Richter PJ, Bachman RE. The use of the energy dissipation restraint for seismic hazard mitigation. *Earthquake Spectra, EERI*, 9, 3,467–87, 1993.
- [7] Mualla IH, Belev B. Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. *Eng Struct*, 24,365-71, 2002.
- [8] Monir HS, Zeynali K. A modified friction damper for diagonal bracing of structures. *J Steel Constr Res*, 87,17-30, 2013.
- [9] Chien C-S C., Lu L-Y., Tsai Y-L. Analysis of single-degree-of-freedom systems containing multifunctional friction damper. *Procedia Engineering*, 79, 500 – 505, 2014.
- [10] Song L-L., Guo T., Cao Z-L. Seismic response of self-centering prestressed concrete moment Resisting frames with web friction devices. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 71, 151–162, 2015.
- [11] Moon K. H., Han S.W., Lee C.S., Seismic retrofit design method using friction damping systems for old low- and mid-rise regular reinforced concrete buildings. *Engineering Structures*, 146, 105–117, 2017.
- [12] Latour M., Piluso V., Rizzano G. Experimental analysis of beam-to-column joints equipped with sprayed aluminium friction dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 146, 33–48, 2018.
- [13] Saberi V., Gerami M., Kheyroddin A. Seismic rehabilitation of bolted end plate connections using post-tensioned tendons. *Engineering Structures*, 129, 18–30, 2016.
- [14] Latour M., Rizzano G., Santiago A., Simões da Silva L. Experimental response of a low-yielding, self-centering, rocking column base joint with friction dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 580–592, 2019.
- [15] Martínez C., Curadelli O. Testing and performance of a new friction damper for seismic vibration control. *Journal of Sound and Vibration*, 399, 60–74, 2017.
- [16] B. Westenenk B., Edwards J.J., de la Llera J.C., Jünemann R. Self-Centering Frictional Damper (SCFD). *Engineering Structures*, 197, 109425, 2019.
- [17] Downey, A., Theisen, C., Murphy, H., Anastasi, N., Laflamme, S. Cam-based passive variable friction device for structural control. *Engineering Structures*, 188, 430–439, 2019.



- [18] Barzegar, V., Laflamme, S., Downey, A., Lie, M., Hub, C. Numerical evaluation of a novel passive variable friction damper for vibration mitigation. *Engineering Structures*, 220, 110920, 2020.
- [19] Ghorbani, H. R., Rofooei, F.R. A novel double slip loads friction damper to control the seismic response of Structures. *Engineering Structures*, 225, 111273, 2020.
- [20] Maureira-Carsalade, N., Villagrán-Valenzuela, M., Sanzana-Jara, D., Roco-Videla, A. Proof of concept of a novel frictional shock absorber; analytical model and experimental analysis. *Engineering Structures*, 230, 111657, 2021.
- [21] Veismoradi, S., Mahdi, Yousef-beik, S.M.M., Zarnani, P, Quenneville, P. Development and parametric study of a new self-centering rotational friction damper. *Engineering Structures*, 235, 112097, 2021.
- [22] Lu, Y., Liu, Y. Qi Ge, Qingfang Lv, Wang, Z. Experimental and numerical studies on hysteretic behavior of friction-strip coupled damper. *Engineering Structures*, 265, 114519, 2022.
- [23] Bruschi, E., Quaglini, V. Assessment of a novel hysteretic friction damper for the seismic retrofit of reinforced concrete frame structures. *Structures*, 46, 793–811, 2022.
- [24] Couch, L., Tehrani, F.M., Naghshineh, A., Frazao, R. Shake Table response of a dual system with inline friction damper. *Engineering Structures*, 281, 115776, 2023.
- [25] Yang, T.Y., Zuo, X., Rodgers, G.W., Bagatini-Cachuço, F. Mechanism development and experimental validation of self-centering nonlinear friction damper. *Engineering Structures*, 287, 116093, 2023.
- [26] Lee SH, Park JH, Lee SK, Min KW. Allocation and slip load of friction dampers for a seismically excited building structure based on storey shear force distribution. *Eng Struct*, 30, 930–40, 2008.
- [27] Martinez CA, Curadelli O, Compagnoni ME. Optimal placement of nonlinear hysteretic dampers on planar structures under seismic excitation. *Eng Struct*, 65:89-98, 2014.
- [28] Shirkhani A, Mualla IH, Shabakhty N, Mousavi SR. Behavior of steel frames with rotational friction dampers by endurance time method. *J Steel Constr Res*, 107:211-22, 2015.
- [29] Ontiveros-Pérez S. P., Fleck Fadel Miguel L., Riera J.D. Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions. *Engineering Structures*, 190, 276–284, 2019.
- [30] Shirai, K., Horii, J., Fujimori, T. Optimal sliding force characteristics of friction dampers for seismic response control of building structures considering sway-rocking motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 149, 106892, 2021.



[31] Artar, M., Carbas, S. Optimum sizing design of steel frame structures through maximum energy dissipation of friction dampers under seismic excitations. Structures, 44, 1928–1944, 2022.



## CONFECCIÓN DEL INFORME TÉCNICO PARA LA EMISIÓN DE CERTIFICADOS DE SEGURIDAD VEHICULAR EMITIDOS POR LA AGENCIA NACIONAL DE SEGURIDAD VIAL

Ing. Inti Manuel Smith<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Comisión de Transporte del Colegio de Ingenieros Especialistas de Córdoba, C.I.E.C.  
Calle: Jujuy 441, Ciudad de Córdoba, Argentina.  
[comisiondetransporte.ciec@gmail.com](mailto:comisiondetransporte.ciec@gmail.com)

### RESUMEN

En la República Argentina todo vehículo, acoplado y semiacoplado, fabricado en el país o importado que circule por la vía pública debe contar con una autorización emitida por la Secretaria de Industria de la Nación, dicha autorización se denomina "LCM" Licencia de Configuración de Modelo y verifica que el vehículo atiende todos los requerimientos de seguridad activa y pasiva, emisiones contaminantes y ruidos vehiculares de acuerdo a lo establecido en la Ley N° 24.449 y su Reglamentación. Paradójicamente la única excepción a este requerimiento, fue dado por la Disposición 1136/96 de la DNRPA, la cual planteó las condiciones en que debían cumplir los acoplados, remolques y tráilers destinados al traslado de equipajes, pequeñas embarcaciones deportivas o elementos de recreación familiar, aún no inscriptos que deban ser remolcados por automotores de uso particular, que simplemente consistía en la colocación de una placa confeccionada por el usuario con el prefijo 101 antepuesto al dominio del vehículo tractor, sin ningún requerimiento técnico previo a la habilitación para circular. Esta normativa continuaría vigente hasta noviembre del 2021 fecha en la cual finalizaría el plazo otorgado por la Disp. 323/2019 y prorrogado por la Disp. 195/2020 para la adecuación de los tráilers categoría O1 que circulen actualmente con la patente 101. Dicha adecuación en aquellos tráilers categoría O1 que carezcan de LCM, consiste en una inspección técnica realizada por un Ingeniero Mecánico matriculado, que certifique los requerimientos mínimos de seguridad activa y pasiva planteados por la ANSV, autoridad competente para emitir el Certificado de Seguridad Vehicular (CSV) correspondiente y posterior patentamiento por parte de la DNRPA. El objetivo de esta presentación es exponer los puntos claves de la inspección técnica y posterior confección de Informe Técnico requeridos por la ANSV para la emisión del CSV por parte de la ANSV.

**Palabras Clave:** *Tráilers O1, Homologación de Vehículos, Patentamiento de Tráilers, Homologación de Vehículos, Acoplados.*



## 1. INTRODUCCION

La reglamentación Argentina clasifica los distintos tipos de vehículos cuanto a las características técnicas de cada categoría, a saber<sup>1</sup>:

- L: Motocicletas, Triciclos y Cuatriciclos
- M: Vehículos para transporte de pasajeros
- N: Vehículos de Carga
- O: Tráilers y Acoplados

Cada una de esas categorías tiene una subclasificación dependiendo el porte de cada vehículo, capacidad de carga y demás características destacadas de su clasificación.

Por otra parte, para poder ser librados al tránsito público y autorizarse su comercialización, todos los vehículos automotores, acoplados y semiacoplados, de producción seriada y CERO KILOMETRO (0 KM), ya sean fabricados en el país o que se importen, deben contar con la respectiva Licencia de Configuración de Modelo (LCM) y la Licencia de Configuración Ambiental (LCA) para los aspectos de emisiones contaminantes, ruidos vehiculares y radiaciones parásitas; emitidos por las respectivas autoridades competentes.<sup>2</sup> Para obtener dicha Licencia de Configuración de Modelo (LCM), los fabricantes e importadores de vehículos CERO KILÓMETRO (0 km) de producción seriada deben cumplir los procesos de ensayos de cada clasificación de vehículo, como se establece en el ANEXO B del decreto 779/95, dichos parámetros garantizan un nivel mínimo de seguridad activa y pasiva para los vehículos que circulen en la República Argentina.

Ahora bien, un caso muy particular son los Tráilers de la categoría O1 definidos de la siguiente forma:

Categoría O1: remolques cuyo peso máximo es menor o igual a SETECIENTOS CINCUENTA KILOGRAMOS (750 kg)

La Disp. 1136/96 DNRPA del 11/12/1996 indica que para ser liberados al tránsito los acoplados, remolques, y tráilers, destinados al traslado de equipajes, pequeñas embarcaciones deportivas o elementos de recreación familiar aún no inscriptos a la fecha de la presente, que deban ser remolcados por automotores de uso particular a los que con motivo de su inscripción inicial o de la Convocatoria al Parque Automotor se les deba colocar placas metálicas del nuevo modelo, deberán circular: a) exhibiendo en su parte posterior la placa metálica trasera del automotor remolcador, a cuyo efecto colocarán ésta en dichos rodados cada vez que sean remolcados, o

---

<sup>1</sup> Decreto 779/95 – ANEXO A – Pto. 2

<sup>2</sup> Decreto 779/95 – ANEXO 1 – Art. 28



b) con una placa de metal con letras y números blancos sobre fondo negro, que se ajusten a las características y dimensiones de la que figura como Anexo de la presente, **y que confeccionará libremente el interesado**. Esta placa llevará en primer lugar la sigla 101 y a continuación el número de dominio del vehículo que lo remolca (v.g. 101 AAA 000).

En esta normativa no mediaba ningún tipo de control técnico sobre dichos vehículos.

Recién en 2018 la Disp. 125 DNRPA (Inscripción de Vehículos sin LCM/LCA (Licencia de Modelo y Ambiental)) indica que para patentar tráilers O1 que carezcan de LCM bastaría con el informe de Ingeniero Mecánico Matriculado visado por colegio profesional, pero esta norma **nunca entrará en vigencia completamente**, y entre los puntos que nunca se aplicaron está el procedimiento de patentamiento de tráilers.

A su vez, en el artículo 9 del Decreto N° 32/18 sustituyó el inciso d) del artículo 33, del Título V del ANEXO 1 del Decreto Reglamentario N° 779/95, estableciendo en su párrafo octavo que los acoplados, remolques y trailers destinados al traslado de equipaje, pequeñas embarcaciones deportivas o elementos de recreación familiar, comprendidos en la categoría O1, remolcados por vehículos automotores de uso particular, deberán presentar ante la DIRECCIÓN NACIONAL DE LOS REGISTROS NACIONALES DE LA PROPIEDAD AUTOMOTOR Y DE CRÉDITOS PRENDARIOS, la certificación de seguridad vehicular que por normas complementarias se establezca.

En 2019 la Disp. 323 de la DNRPA indica que para el patentamiento de tráilers O1 solo se puede proceder con LCM o con un Certificado de Seguridad Vehicular (CSV) emitido por la ANSV.

## 2. CERTIFICADO DE SEGURIDAD VEHICULAR - CSV

El 28 de noviembre de 2018, la Agencia Nacional de Seguridad Vial, mediante Disposición DI-2018-540-APN-ANSV#MTR creó el Certificado de Seguridad Vehicular, a los fines de acreditar el cumplimiento de las condiciones de seguridad activas y pasivas y de emisión de contaminantes por parte de los vehículos de uso particular, incluyendo los vehículos de categoría O1, de conformidad con el inciso d) del artículo 33 del Título V del ANEXO 1 del Decreto Reglamentario N° 779/95, reglamentario de la Ley N° 24.449 el cual debe ser emitido considerando un análisis técnico previo, cuyos resultados deben ser volcados en un informe técnico.

A los fines prácticos, el CSV es un elemento que permite patentar determinados vehículos que carezcan de LCM siendo un instrumento válido para acreditar el cumplimiento de las condiciones de seguridad activas y pasivas y de emisión de contaminantes, de conformidad la reglamentación Argentina.

El Certificado de Seguridad Vehicular permite continuar con el trámite determinado por la DIRECCION NACIONAL DE LOS REGISTROS NACIONALES DE PROPIEDAD AUTOMOTOR Y CRÉDITOS PRENDARIOS para la inscripción inicial en los casos previstos en el inciso d) del artículo



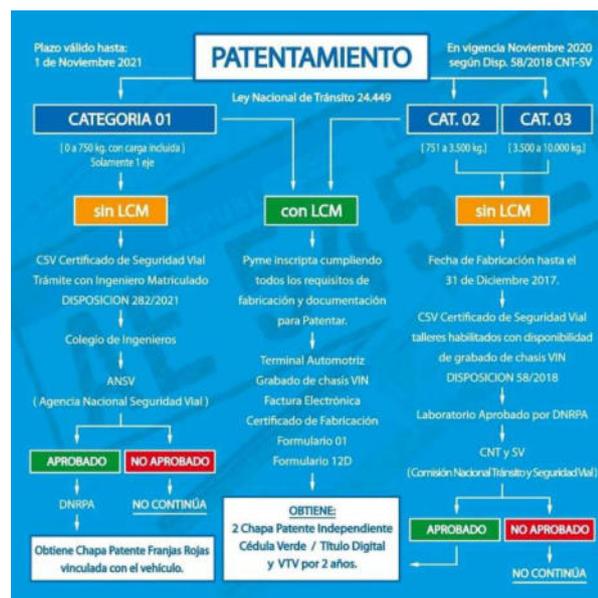
33° del Título V del ANEXO 1 del Decreto Reglamentario N° 779/95, reglamentario de la Ley N° 24.449.

## 2.1. INFORME TÉCNICO PARA EMISIÓN DE CSV – TRAILERS O1

El Informe Técnico para la emisión del Certificado de Seguridad Vehicular consiste en la verificación por parte del profesional firmante de que el tráiler inspeccionado cumple con todas las especificaciones técnicas dispuestas por la normativa vigente.

El Art. 9 del Decreto 32/2018 del Ministerio de Transporte indica que “los acoplados, remolques y trailers destinados al traslado de equipaje, pequeñas embarcaciones deportivas o elementos de recreación familiar, comprendidos en la categoría O1, remolcados por vehículos automotores de uso particular deberán presentar ante la DIRECCIÓN NACIONAL DE LOS REGISTROS NACIONALES DE LA PROPIEDAD AUTOMOTOR Y DE CRÉDITOS PRENDARIOS, la certificación de seguridad vehicular que por normas complementarias se establezca” y como se expuso anteriormente, la autoridad de aplicación responsable de emitir y controlar a certificación de seguridad vehicular para vehículos de uso particular que carezcan de LCM, es la Agencia Nacional de Seguridad Vial y a tal efecto el 25 de marzo de 2021, emitió la Disp. 282/2021 ANSV, La cual indica y define el formato de informe técnico requerido para la emisión del certificado de seguridad vehicular necesario para el patentamiento de tráilers O1, según lo indicado en la disposición 323/2019 DNRPA y 125/2018 DNRPA. Dicho informe técnico se encuentra anexo a la disposición indicada con la denominación de ANEXO 1<sup>3</sup>

Dicho informe técnico consta con una primera parte en la cual se debe indicar el número de registro del automotor dónde está radicado el vehículo tractor del tráiler. Es importante aclarar que debido a la naturaleza de este trámite cada vehículo que remolque el tráiler en cuestión deberá poseer una chapa patente propia para poder remolcarlo, tal como ocurría con las antiguas patentes 101.



<sup>3</sup> DI-2021-282-APN-ANSV#MTR



Seguidamente se requiere colocar los datos del titular del vehículo tractor, en este punto se debe destacar que los tráilers enmarcados en este procedimiento, son de uso particular/familiar y no encuadrarían tráilers de uso comercial/industrial.

<b>DESCRIPCIÓN GENERAL:</b> Datos del titular/comitente:		
<b>Nombre:</b> .....		
<b>Apellido:</b> .....		
<b>CUIT o DNI:</b> .....		
<b>Domicilio:</b> .....		
<b>Barrio</b> .....	<b>Localidad</b> .....	<b>CP:</b> .....
<b>Provincia:</b> .....		
<b>Teléfono:</b> .....		
<b>e-mail:</b> .....		

A continuación se deben colocar los datos, si los hubiera, del tráiler en cuestión. Dado que la mayoría de los tráilers O1 circulantes en la actualidad son de origen artesanal, y no se tengan datos de su fabricación, podrá indicarse como "N/A" (No Aplica), en aquellos puntos donde no se tenga información.

En cuanto al Vehículo tractor, además de ser de uso particular, deben verificarse 2 factores importantes:

- Que el vehículo tenga capacidad de remolque sin freno, en tal caso, el ingeniero debe cerciorarse si existe un limite de remolque sin freno menor a 750kg, en cuyo caso se deberá limitar el PBT a este valor.
- Además, es importante certificar que el vehículo tractor cuente con la Revisión Técnica Obligatoria vigente, independientemente si la jurisdicción donde este radicado lo requiera o no.

<b>Datos del Trailer. Completar N/A donde no aplique. Según información provista por el comitente:</b>	
<b>Marca:</b> .....	<b>Modelo:</b> .....
<b>N° de Serie:</b> .....	<b>Fabricante:</b> .....
<b>Año de fabricación:</b> .....	<b>Tipo:</b> .....
<b>Categoría: O1</b>	
<b>Datos del vehículo tractor (VT). Según información provista por el comitente.</b>	
<b>Marca:</b> .....	<b>Modelo:</b> .....
<b>Año:</b> .....	<b>N° de chasis:</b> .....
<b>N° de motor:</b> .....	<b>Dominio:</b> .....
<b>Vigencia de RTO:</b> .....	

Seguidamente en el informe se exponen una serie de definiciones:



## 1 DEFINICIONES:

### a. Unidades sin LCM (Licencia de Configuración de Modelo):

Trailers objeto del presente procedimiento.

### b. Peso Máximo (Peso Bruto Total):

peso del tráiler en vacío (tara) más su correspondiente carga. El mismo, por tratarse de la categoría "O1" debe ser menor o igual a 750 Kgrs.

### c. Trailers (para categoría O1):

remolques con un solo eje central, de enganche rígido. El trailer para carga también se denomina batán.

En cuanto a la definición de tráiler O1 que se expone en el ANEXO 1 de la Dsip. 282/2021 ANSV, el requerimiento de que el vehículo sea de un solo eje central es un requerimiento propio de la ANSV, ya que esa limitación no se indica en el Decreto 32/2018, que al actualizar la definición de tráiler O1 del decreto 779/95 omite la limitación de 1 solo eje. Pero en este marco, el autor hace referencia a que, en cuanto a la capacidad de carga de la categoría, limitada a 750kg, existe gran cantidad de ejes simples que puedan soportar dicha carga máxima, sin necesidad de sumar un segundo eje.

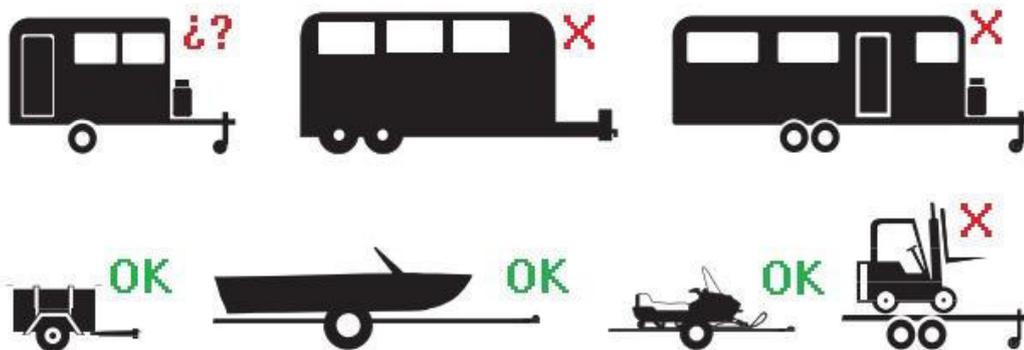
A continuación, se debe especificar la definición técnica del tráiler sometido a inspección, en este punto es importante destacar nuevamente que los tráilers alcanzados por la disp. 282/2021 ANSV, a la fecha solo son los destinados a uso familiar, para uso recreativo y no tráilers de uso industrial o comercial. Un modelo muy particular son las casillas rodantes tipo tráiler, las cuales según la legislación vigente estarían en la órbita de la CNSTySV, pero se está evaluando al momento del desarrollo del presente trabajo, la posibilidad de que las que encuadren por su PBT en la categoría O1, puedan ser homologadas por la ANSV mediante una inspección específica.

## 2 INFORME TÉCNICO:

### a. Descripción técnica de la unidad.

#### Especificar uno de los siguientes ejemplos:

- Batán caja de carga de madera (especificar sin tapa o con tapa y material de la tapa)
- Batán caja de carga metálica (especificar sin tapa o con tapa y material de la tapa)
- Batán caja de carga fibra de vidrio (especificar sin tapa o con tapa y material de la tapa)
- Trailer porta moto/motos.
- Trailer porta bicicleta/s.
- Trailer porta moto de agua.
- Trailer porta triciclo/s/cuatriciclo/s.
- Trailer porta gomón/semirrigido.
- Trailer porta equipaje familiar.
- Trailer playo (equipaje familiar).
- Trailer porta planeador
- Otros.



Posteriormente se debe relevar las dimensiones y el peso en vacío y cargado del tráiler:

**b. Dimensiones y pesos, a saber:**

**DIMENSIONES:**

El Profesional firmante deberá adoptar las medidas necesarias para realizar mediciones del tráiler en cuestión.

Dimensión	Ancho <small>(no debe ser mayor que el ancho del vehículo tractor)</small>	Alto	Largo
Medida (mm)			

**PESOS:**

El Profesional firmante deberá adoptar las medidas necesarias para realizar el pesaje del tráiler vacío y con su carga correspondiente (Peso Bruto Total)

Configuración de ejes	Tara	Peso Bruto Total
Central		DI-2021-26653130-APN-ANSV#MTR

Una excepción respecto al ancho, el cual no debe exceder el ancho del vehículo tractor (distancia entre los planos laterales exteriores derecho e izquierdo, sin contar los espejos), es en lo referente a tráilers que transporten material náutico, en los cuales puede aceptarse que el material transportado exceda el ancho del vehículo tractor, siempre que se mantenga la visibilidad mediante los espejos retrovisores y seguridad vehicular del conjunto.

Luego se debe definir si la unidad posee o no restricciones de dimensiones y pesos para la circulación según la normativa de tránsito (longitud, peso etc.):

Siempre se deberá consignar una de las siguientes leyendas:

- La unidad controlada NO presenta restricciones de Dimensiones y Pesos.
- La unidad controlada SI presenta restricciones de Dimensiones y Pesos. (especificar)



Seguidamente, el informe requiere el Registro Fotográfico, es de vital importancia que las fotos sean tomadas en forma perpendicular a la vista requerida y no con perspectiva o inclinación.

**c. Seis fotografías con las siguientes vistas: Las mismas deben ser adjuntas en el presente documento en un archivo anexo en formato jpg (tamaño sugerido: 1920 x 1080 píxeles. Las imágenes deben poder apreciarse con facilidad). El tamaño sugerido puede ser aproximado.**

**-Vista trasera** (donde se observe claramente sistema de luces, luces de patente, paragolpes, bandas perimetrales retrorreflectantes y los adhesivos de velocidad máxima).

**-Vista lateral izquierda ó derecha** (donde se observe claramente bandas perimetrales retrorreflectantes).

**-Vista frontal** (donde se observe claramente bandas perimetrales retrorreflectantes).

-Imagen donde se pueda apreciar claramente el **dispositivo de enganche mecánico, cadenas y dispositivo de conexión eléctrica del trailer.**

-Imagen donde se pueda apreciar claramente el **dispositivo de enganche mecánico, el dispositivo de conexión eléctrica y el dominio del vehículo particular que transportará el trailer.**

**-Imagen lateral** donde se pueda apreciar claramente todo el conjunto "enganchado", es decir el vehículo particular y el trailer en cuestión cargado.

El paso siguiente es el más importante, ya que se realiza la inspección técnica básica para constatar que la unidad inspeccionada cumple con las medidas de seguridad activas y pasivas, regidas por la ley 24449 y decretos reglamentarios. Todos los casos todos los puntos inspeccionados deben ser aprobados satisfactoriamente caso contrario el informe no será aceptado.

**d. Verificar que los Sistemas de Seguridad Activa y Pasiva (detallados en cuadro adjunto) cumplen con las reglamentaciones vigentes y se encuentran en condiciones operativas. En caso de detectarse falencias operativas y o reglamentarias, el propietario de la unidad deberá subsanar la falla y re-verificar el ítem en cuestión, a fin de emitir el Informe Técnico final "sin observaciones".**

**NOTA: La presente evaluación solo será aceptada si todos los ítems fueron evaluados satisfactoriamente.**

En cuanto a la integridad estructural del tráiler, la disp. 282/2021 ANSV no requiere memoria de calculo pero deja a criterio y responsabilidad del profesional la aprobación de la misma, en cuanto a perfilería y construcción. En la práctica, algunas puestos de control de Prefectura solicitan que los tráilers de uso náutico sean de perfilería estructural tipo UPN y no del tipo caño estructural para evitar degradación por corrosión en el interior de los caños, pero esto no es un requerimiento legal, sino más bien podría considerarse como una buena práctica.

Verificación de estabilidad:



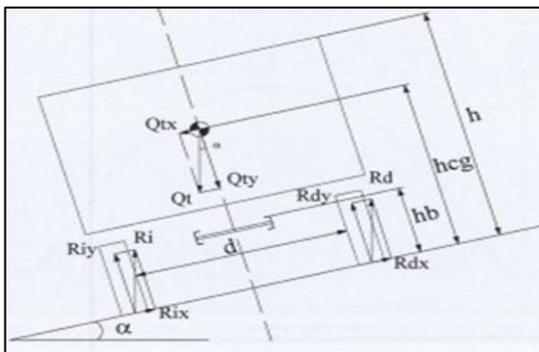
<p>Estabilidad (solo se evaluará si el profesional firmante lo considera necesario)</p>	<p>-Por cálculo o en forma práctica, se verifica que no se producirá el vuelco del tráiler con su carga máxima si este alcanza los 28° de inclinación respecto a la horizontal. Se debe verificar con la carga colocada/montada sobre el tráiler. (bicicletas, motocicleta/s, triciclo, cuatriciclo, moto de agua, gomón, semirrígido, equipajes, etc.). Se debe verificar con el trailer desenganchado del vehículo tractor.</p>	<p>DI-2021-26653130-APN-ANSV#MTR</p>
---	---	--------------------------------------

3

Página 3 de 6

El Anexo 1 plantea que si el profesional lo dispone se ensaye o se calcule la verificación de estabilidad lateral del tráiler, en la práctica el ensayo es complicado de realizar ya que requiere que el tráiler este cargado y desenganchado del vehículo tractor, lo cual en muchos casos es impracticable.

En cuanto al cálculo, se utiliza el siguiente modelo.



$$\alpha = \arctang\left(\frac{d}{2 \cdot hcg}\right) \quad hcu = hb + \frac{h - hb}{2}$$

$$hcg = \frac{hb \cdot Tara + hcu \cdot Qútil}{MMA}$$

Donde:

- **d**: es la dist. Interior entre las ruedas en mm
- **hcg**: es la altura del centro de gravedad en mm
- **hb**: es la altura del suelo plano al bastidor en mm
- **Qútil**: el valor de la carga útil en (kg)
- **hcu**: es la altura del centro de gravedad de la carga útil, en mm, y se calcula según la expresión

De las ecuaciones se despeja el valor de  $\alpha$  el cual debe ser mayor a 28° para los valores dados.

En cuanto a la transmisión de carga al enganche:

Ítem a evaluar	Descripción	Satisface SI / NO
Distribución de carga	<p>-Transmite carga al vehículo tractor (carga vertical sobre el dispositivo de enganche mecánico).</p> <p>-Por cálculo o forma práctica (mediante pesaje), se verifica la transmisión de carga al vehículo tractor. Este valor, no podrá ser mayor a un 10 % del Peso Bruto Total del trailer o responderá al valor especificado por el fabricante del vehículo tractor (si lo tuviere).</p>	



Refiriéndose al sistema de suspensión:

Sistema de Suspensión	-Se encuentra en correcto estado de conservación.	
	-Correcta fijación de abrazaderas de elásticos.	
	-Correcto estado de bujes / ojos de elásticos.	
	-Correcto estado de hojas de elásticos (no quebrados, no soldados) y correcta alineación.	
	-Correcta fijación de amortiguadores, sin pérdidas de líquido hidráulico. (si los tuviere)	

En este punto, la Comisión de Transporte del CIEC, concuerda en que en los casos de resortes del tipo ballesta, la fricción entre las placas disipa la energía de forma tal que no sería necesario colocar amortiguadores, no así resortes del tipo espiral, en donde si se solicitaría la colocación de amortiguadores, no por cuestiones de confort sino por seguridad en cuanto a la estabilidad de la carga.

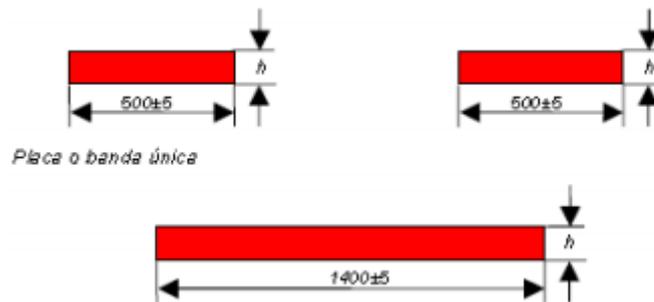
En cuanto a iluminación, en base al ANEXO I - SISTEMAS DE ILUMINACION Y SEÑALIZACION PARA LOS VEHICULOS AUTOMOTORES – Del decreto 779/95, actualizado.

- Indicadores de Giro – ámbar
- Posición – rojo
- Luz de patente
- Luces de Freno – rojo
- Faros intermitentes de advertencia – ámbar
- Retroreflectores – rojo – cant 2
- Faro de Retroceso – blanco – Opcional
- Faro antiniebla trasero - rojo – Opcional

En cuanto a las bandas reflectivas Decreto 779/95 - Artículos 29 y 30, Resolución ST 492/2004, Norma IRAM 3952/84.

Las bandas traseras deben ser Rojas y las laterales/delanteras deben ser blancas o amarillas. Se deberán colocar a una altura respecto del piso de entre 500mm y 1500mm.

El ancho h de las bandas traseras será de entre 75mm y 150mm, dependiendo del su grado de reflectividad. La banda trasera será de 1400mm o en su defecto dos bandas de 500mm.



Para los vehículos categoría O, las bandas laterales deberán colocarse cubriendo un mínimo del TREINTA Y TRES CON TRES POR CIENTO (33,3%) de la longitud, sobre ambos laterales. Las bandas deberán comenzar en los extremos delantero y posterior del vehículo y deberán distribuirse lo más equitativamente posible debiendo ubicarse de forma tal de mantener una línea continua respecto del eje longitudinal de las bandas colocadas sobre los vehículos motrices.

El ancho de estas bandas será de 100mm o 50mm, dependiendo del su grado de reflectividad.

Respecto a los retroreflectores rojos, en la practica se acostumbra a que sean del tipo triangular, pero esto no esta limitado en la normativa.

En cuanto a Paragolpes y pintura del tráiler se debe tener en cuenta:

Paragolpes	-Dispone de paragolpes.	
	-Es sólido y se encuentra en correcto estado de conservación. Nota: Para trailers náuticos se admite paragolpes extensibles y/o "quita y pon".	
	-La altura de la sección transversal del paragolpes tiene un mínimo de 100 mm.	
	-La altura del paragolpes (distancia del piso al borde inferior) no debe ser mayor que 450 mm.	
Pintura y protección anticorrosión	-Es adecuada (apreciación cualitativa)	DI-2021-26653130-APN-ANSV#MTR

Por ultimo se solicita la firma del certificado por parte del Ingeniero y del Comitente



### **3. TRAMITACION DEL INFORME TECNICO EN EL COLEGIO PROFESIONAL.**

Una vez finalizada la inspección, el Ingeniero debe presentar el informe en su colegio profesional, quien verificará las incumbencias del profesional y la vigencia de su matrícula.

Una vez recibido el informe en la ANSV, en el caso que esté todo confeccionado adecuadamente, posterior al pago por parte del titular del tráiler de una tasa correspondiente al trámite, la ANSV emite el CSV de la unidad en cuestión. Luego la ANSV notifica al registro seccional que la unidad posee CSV y habilita a emitir la patente de este.

### **4. REFERENCIAS**

Ley Nacional 24449 – Ley de Transito

Decreto Reglamentario 779/5 y ANEXOS del Ministerio de Transporte de la Nación

Decreto Reglamentario 32/2018 del Ministerio de Transporte de la Nación

Disposición 282/2021 de la ANSV

Disposición 125/2018 y 323/2019 de la DNRPA



## MOUSE INALÁMBRICO PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA

Martín Alejandro Torres <sup>1</sup>, Gerardo Bravo <sup>2</sup>, Fernando Flores <sup>3</sup>, Eduardo Cirera <sup>4</sup>, Jorge Omar Marighetti <sup>5</sup>, Mario Eduardo De Bórtoli <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste – [elepotunne@gmail.com](mailto:elepotunne@gmail.com).

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste – [gbravo@ing.unne.edu.ar](mailto:gbravo@ing.unne.edu.ar).

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste -  
[floresfernando422@gmail.com](mailto:floresfernando422@gmail.com).

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste – [ecirera@ing.unne.edu.ar](mailto:ecirera@ing.unne.edu.ar).

<sup>5</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste – [jomaringha@gmail.com](mailto:jomaringha@gmail.com).

<sup>6</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste –  
[m\\_debortoli@yahoo.com.ar](mailto:m_debortoli@yahoo.com.ar).

### RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un dispositivo auxiliar tipo mouse para personas con movilidad limitada o sin movilidad en miembros superiores. El mismo es una continuación del desarrollado en ediciones anteriores, presentando una mejora significativa respecto del sistema cableado inicial, puesto que se ha elaborado una comunicación de tipo inalámbrica.

Se ha desarrollado un dispositivo digital que permite el movimiento del puntero del Mouse de una PC o notebook mediante el movimiento de la cabeza o una parte del cuerpo de la persona.

La particularidad respecto de otros sistemas similares reside en la capacidad de hacer clic mediante soplidos de intensidad configurable. Los soplidos son detectados mediante un sensor de presión con un ADC incorporado. El movimiento es detectado por medio de un acelerómetro con salida digital. Ambas informaciones son procesadas por un microcontrolador.

El sistema se comunica mediante el protocolo Bluetooth, y consta de un equipo transmisor (maestro), con sensores, alimentado por baterías, y otro receptor (esclavo) conectado a la PC.

Este dispositivo es utilizado como mouse, pero con la ayuda de un teclado emergente virtual es posible reemplazar al teclado tradicional.

La electrónica fue desarrollada con herramientas Open Hardware y se tomaron de referencia fuentes de código Open Source.

Actualmente, el prototipo está siendo evaluado por personas con la problemática que se intenta atender. Como conclusión, en el marco de tareas de extensión, se ha logrado realizar un aporte social con gran potencial de crecimiento.

**Palabras clave:** *Headmouse; Emulador de ratón; Mouse inalámbrico; Accesibilidad.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto, mouse para personas con movilidad reducida inalámbrico, tiene como base el desarrollo presentado en la edición CAIM 2020 [1], presentando como novedad el agregado de la tecnología bluetooth, lo que brinda un mayor confort al momento del uso del dispositivo al prescindir de los cables de conexión entre mouse y PC. El proyecto persigue el objetivo de facilitar el acceso a personas con movilidad reducida, a dispositivos en los cuales se requiera el uso de un mouse. El dispositivo desarrollado reemplaza al mouse en toda su funcionalidad, y permite desplazar el puntero del ratón con movimientos suaves de la cabeza, así como realizar los clics, izquierdo y derecho, con soplidos de intensidad variable, ajustados por el usuario.

El mouse usa en su totalidad elementos de fácil adquisición y económicos, así como librerías de alto nivel en el código, buscando que el producto final sea de simple acceso y reproducción para cualquier persona que lo necesite. También, cuenta con un software que permite ajustar la intensidad del soplo para el accionamiento de los clics, así como deja al usuario deshabilitar estos últimos. Por otro lado, el dispositivo es complementario con otras herramientas de accesibilidad, las cuales poseen todos los sistemas operativos, como el teclado virtual.

Es importante destacar que además de la cabeza, es posible instalar el dispositivo en cualquier parte del cuerpo en la cual la persona disponga de movilidad, permitiendo mayor alcance de utilidad.

## 2. FUNCIONAMIENTO Y COMPONENTES

El funcionamiento de un mouse convencional es reemplazado por movimientos suaves de la cabeza que mueven en sentido de x e y el puntero. Además, soplidos de intensidad ajustable reemplazan las acciones de los clics, derecho e izquierdo.

Para este objetivo, se dispuso de una serie de componentes, hardware, firmware y software, descriptos a continuación.

### 2.1 Hardware

Como unidad de procesamiento del sistema propuesto se utiliza el microcontrolador Atmega32u4 de 8 bits [2], que presenta como característica principal soporte para la interfaz USB embebida en el mismo, por lo tanto, se usa la plaqueta Arduino Micro, basada en este microcontrolador, de esta manera se pudo utilizar librerías de alto nivel y con gran soporte en la programación.

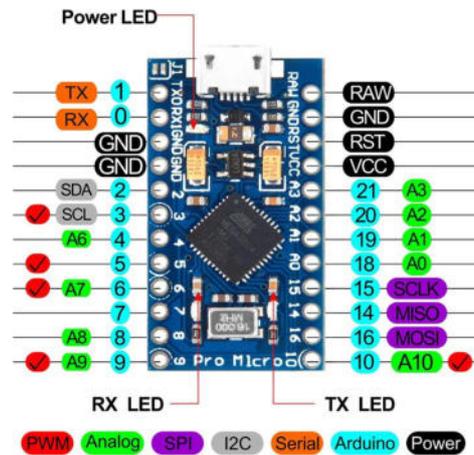


Figura 1: Pinout Arduino Micro.

Para traducir los movimientos de la cabeza en movimientos del puntero se dispone de un giroscopio, de esta manera se logra cuantificar los movimientos en función de la velocidad angular de los mismos. Para esto se utiliza el módulo MPU6050 [3], que cuenta con giroscopio y acelerómetro incorporado, siendo su protocolo de comunicación el I2C.

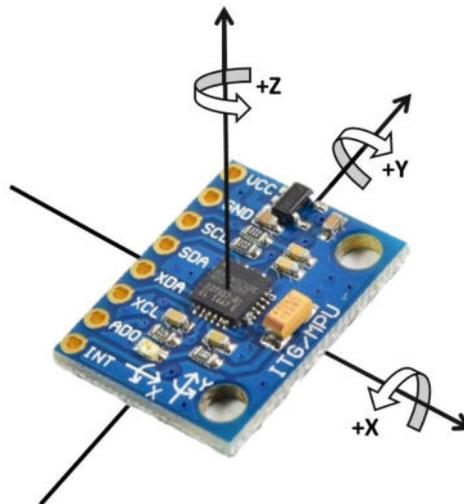


Figura 2: MPU6050 y los ejes de rotación el giroscopio.

Los clics son realizados por medio de una diferencia de presión estática generada con el soplido. Para lograr la traducción de este proceso a magnitudes eléctricas se utiliza un módulo



de presión compuesto por un integrado ADC (Analog to Digital Converter) con amplificador de señal HX710 [4], y el sensor de presión Mps20n0040d-s.

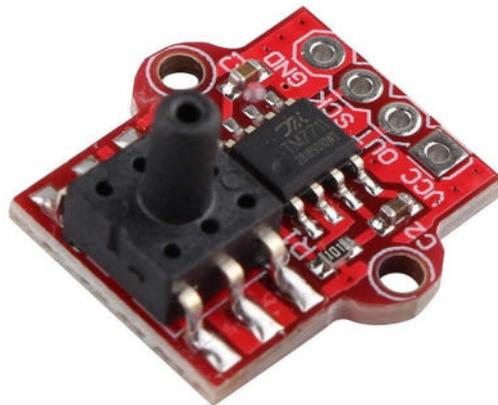


Figura 3: Módulo de presión con ADC de 24 bits.

La vinculación inalámbrica se realiza mediante el protocolo de comunicaciones bluetooth. Se utilizan dos módulos bluetooth HC-06 [5], configurados como emisor y receptor. El emisor se ubica con los demás sensores en la vincha que se usa para el movimiento, y el módulo receptor se ubica en la carcasa que se conecta a la PC.

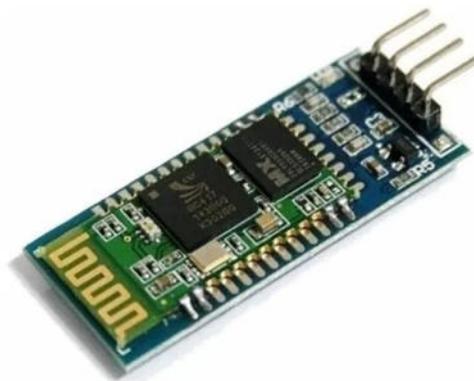


Figura 4: Módulo bluetooth HC-06.

La sujeción y contención de los componentes se realizó por medio de la adaptación de una vincha comercial, la cual puede brindar protección a la electrónica y comodidad al usuario. En ella se ubican el microcontrolador, el sensor de presión, el acelerómetro, y el módulo bluetooth. La ficha de alimentación posee una conexión en serie, es decir, recibe 7 V de las baterías.



Figura 5: Vincha adaptada para la sujeción de componentes.

El módulo bluetooth receptor, con el microcontrolador conectado a la PC, se encuentran en una caja impresa en 3D, como se muestra en la Figura 6.

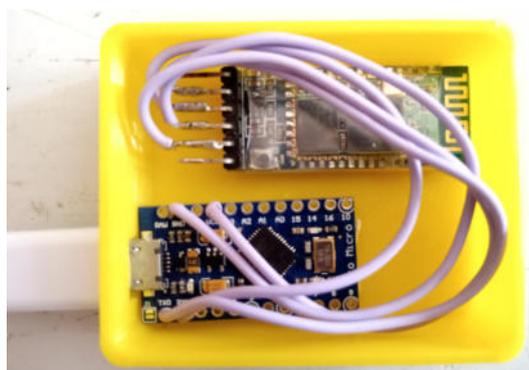


Figura 6: Sistema receptor.

Las baterías son contenidas en la caja impresa en 3D mostrada en la Figura 7.



Figura 7: Baterías de alimentación.

A su vez, el circuito cargador de las baterías se ubica en la siguiente caja. En este caso la ficha posee una conexión que permite la carga en paralelo de las baterías.



Figura 8: Circuito de carga de las baterías.

## 2.2 Conexiones

El esquema del conexionado entre los sensores, el microcontrolador y el módulo bluetooth se muestra en la Figura 9.

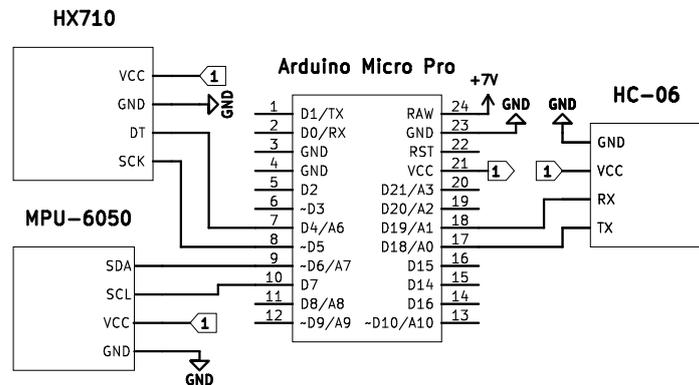


Figura 9: Conexiones entre los sensores, el Arduino y módulo bluetooth.

La vinculación entre todos los componentes del sistema se ve en el diagrama de bloques de la Figura 10.

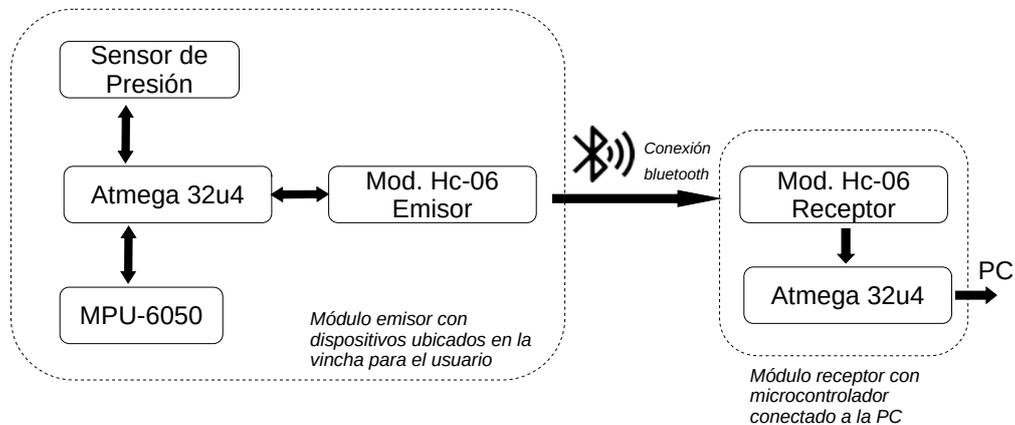


Figura 10: Diagrama de bloques de todos los componentes del sistema.

### 2.3 Alimentación

El microcontrolador, al igual que los sensores, y el módulo bluetooth son alimentados mediante dos baterías de 3,5 V conectadas en serie. El cable de alimentación es de tipo helicoidal, lo que permite ubicar la caja con las baterías donde resulte conveniente para el usuario.



La carga de las baterías se realiza con el circuito mostrado en la Figura 8.

El mismo carga ambas baterías conectadas en paralelo.

La conexión en serie y paralelo de las baterías se realiza en la ficha que alimenta cada circuito, es decir, en la ficha de alimentación del microcontrolador se realiza la conexión en serie, así como la conexión en paralelo se realizó en la ficha del circuito de carga.

## 2.4 Firmware y software

El dispositivo contiene un firmware de control, así como un software de configuración de valores, sobre los mismos se hablará en las siguientes subsecciones.

### 2.4.1 Firmware

Al ser el microcontrolador el Atmega32u4, este permite utilizar librerías de alto nivel que posee Arduino, incluyendo la librería Arduino en sí misma.

Para el manejo del MPU6050 se utilizó la librería MPU6050 de Jeff Rowberg [6], que a su vez necesita de las librerías I2Cdev [7], del mismo autor, y Wire de Arduino [8]. Con ellas se pueden obtener los valores del giroscopio del MPU6050, cada intervalos regulares de tiempo  $t$ , a los cuales se les aplica un ajuste de ganancia y corrección de offset. De esta manera, se relacionan los movimientos de rotación sobre dos ejes del giroscopio con coordenadas  $x$  e  $y$  que serán las del puntero del ratón.

La gestión del clic se llevó a cabo por medio de un módulo que incluye un sensor de presión y el integrado HX710, y de este último se obtienen los valores por medio de la librería [Q2HX711 de Scott Russell](#) [9]. Esta librería permite obtener los valores directos, sin procesar, del sensor de presión, entonces, en cada iteración del microcontrolador se realiza una comparación con el estado anterior de este sensor -usando de esta manera valores relativos- y es por ello que cuando el usuario genera una diferencia de presión, la misma se traduce en valores numéricos proporcionales a la intensidad del soplido a nivel de código. Los mismos poseen variables umbrales, lo que permite poder controlar cuando se activa uno u otro y a su vez evitan que se solapen las funciones.

Por otra parte, los gestos soportados al día de hoy, son el clic izquierdo para soplos leves, y para soplos de mayor intensidad el clic derecho

La comunicación inalámbrica se realiza mediante el protocolo bluetooth. El microcontrolador atmega32u4 posee dos puertos seriales, por lo tanto, uno de ellos se destina a la comunicación



entre dispositivos bluetooth. El módulo HC06 ubicado con los sensores, denominado emisor, envía los datos medidos al módulo HC06 receptor conectado a la PC, luego espera por 50 milisegundos y continúa con la obtención de datos de los sensores.

El acceso al ratón de la PC, notebook, netbook, etc, se realiza por medio de la librería Mouse de Arduino. El microcontrolador receptor, es decir, quien recibe los datos medidos del sensor es el encargado de implementar la librería antes mencionada. En este microcontrolador, se implementó el uso de la librería EEPROM de Arduino [10] para guardar los valores de las variables umbral de accionamiento de los clics izquierdo y derecho, permitiendo reescribirlos cuando el usuario los modifica.

El funcionamiento del firmware es el siguiente.

El microcontrolador emisor se inicia y pone en funcionamiento las comunicaciones necesarias, dejando un tiempo para que se establezcan los valores provenientes de los sensores. Luego, en el período de bucle continuo, el firmware consulta en cada iteración los valores al giroscopio y al sensor de presión. Luego, estos valores son procesados a fin de realizar correcciones de offset en el caso del giroscopio, y se reduce la escala en el caso del sensor de presión. Los valores son almacenados en un vector de 3 enteros cuya longitud es de 16bits, los cuales son enviados por medio del enlace bluetooth al microcontrolador receptor.

El dispositivo receptor recibe las coordenadas de movimiento para utilizarlas de forma directa, y el valor del sensor de presión debe ser procesado; al valor de presión actual, se le resta su resultado anterior, para evitar errores por deriva, y luego, dependiendo del valor final, producirá un clic derecho, izquierdo, o ninguna acción.

Por último, al firmware se lo presenta como una clase de C++ y su respectivo header para mayor orden, escalabilidad, y facilidades en las correcciones.

#### **2.4.2 Software**

Para la calibración de la intensidad umbral de los clics, y bloqueo del mouse, se proporciona un software creado en Java 8. El mismo posee una interfaz gráfica la cual se programó haciendo uso de la librería [Swing](#) de Java [9], la comunicación con el Arduino se logra mediante la librería [PanamaHitek\\_Arduino](#) de Antony García González [11], y el bloqueo del ratón se logra con el uso de la clase [Robot](#) de Java [12].



Figura 11: Interfaz gráfica

El microcontrolador conectado a la PC es quien recibe los datos. Luego estos valores son mostrados en la interfaz gráfica y quedan a disposición del usuario para ser modificados. Cuando el usuario decide modificarlos sólo debe hacer clic sobre los botones, y los valores cambiarán, actualizando los mismos en el Arduino.

Los valores varían, en el clic simple desde 5 hasta 30, y en el clic derecho desde 40 hasta 80.

El programa también permite la opción de bloquear completamente los clics, para ello el usuario deberá pasar el puntero del mouse por el bloque verde inferior y cuando este cambie a rojo los clics estarán inhabilitados, hasta que vuelva a pasar el puntero sobre el bloque rojo, cuando este cambie a verde los clics estarán habilitados. De esta manera, si el usuario decide utilizar una sensibilidad de clics tal que se active incluso cuando habla, puede bloquearlos y evitar que los mismos se activen.

### 3. CONCLUSIONES

El dispositivo reemplaza eficazmente el uso de un mouse convencional. Esto fue probado con 2 personas hasta el momento. Sería importante probarlo con más casos de personas con movilidad reducida y obtener opiniones de profesionales en la medicina para evaluar su uso.

Los elementos utilizados para realizar la comunicación inalámbrica, son económicos y de fácil acceso. La comodidad de un dispositivo inalámbrico brinda al usuario mayor confort. Se



eliminaron los problemas surgidos en la versión cableada, en el cual se conectaba de forma directa a la PC.

También, es válido destacar que se reemplazó el uso del sensor de presión utilizado en[1], por un sensor de presión integrado con el integrado HX710. Esto resulta en mayor practicidad en el armado además que también son más económicos y de mayor disponibilidad en el mercado, manteniendo la calidad en la respuesta de los clics.

Se entiende, que se ha logrado un dispositivo de mucha utilidad, que es susceptible de mejoras tanto en estabilidad, como en integración electrónica a fin de obtener un producto comercial más pequeño y ergonómico.

#### 4. REFERENCIAS

[1] Eduardo Cirera, Gerardo A. Bravo, Martín Torres, Fernando Flores, MOUSE PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA, CAIM-CAIFE, Año 2020.

[2] Atmel®, ATmega16U4/ATmega32U4, 8-bit Microcontroller with 16/32K bytes of ISP Flash and USB Controller, Atmel-7766J-USB-ATmega16U4/32U4-Datasheet\_04/2016, 2016.

[3] InvenSense®, MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4, datasheet. PS-MPU-6000A-00. Revision: 3.4, 2013.

[4] AVIA SEMICONDUCTOR, 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales.

[5] Guangzhou HC Information Technology Co., Ltd, HC06 Bluetooth.

[6] Jeff Rowberg, MPU6050, <https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/tree/master/Arduino/MPU6050>, I2Cdev device library code is placed under the MIT license. Copyright (c) 2012 Jeff Rowberg.

[7] Jeff Rowberg, I2Cdev, <https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/tree/master/Arduino/I2Cdev>, I2Cdev device library code is placed under the MIT license. Copyright (c) 2013 Jeff Rowberg. Copyright (c) 2014 Marton Sebok. Copyright (c) 2015 Grégoire Surrel.

[8] Arduino®, Wire, <https://github.com/arduino/ArduinoCore-avr/tree/master/libraries/Wire>.

[9] Scott Russell, <https://github.com/queuetue/Q2-HX711-Arduino-Library>.

[8] Arduino®, <https://github.com/arduino/ArduinoCore-avr/tree/master/libraries/EEPROM>.

[10] Oracle, <https://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/javafx/swing/package-summary.html>.



[11] Antony García González, Librería PanamaHitek\_Arduino. Versión 3.2.0,  
[https://github.com/PanamaHitek/PanamaHitek\\_Arduino](https://github.com/PanamaHitek/PanamaHitek_Arduino).

[12] Oracle, <https://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/java/awt/Robot.html>.



## ACEPTABILIDAD DEL RIESGO: DEFINICIÓN Y TOMA DE DECISIONES MEDIANTE LÓGICA BORROSA

Mario Daniel de la Canal<sup>1</sup>, Lautaro Daniel Vela<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería – UNCo – Neuquén [dmdlcanal@yahoo.com.ar](mailto:dmdlcanal@yahoo.com.ar)

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería – UNCo – Neuquén [lautarovela99@gmail.com](mailto:lautarovela99@gmail.com)

### RESUMEN

En el ámbito de la ingeniería, el análisis del riesgo (AR), describe la seguridad y buen funcionamiento de los productos, permitiendo simultáneamente la toma de decisiones para mantener el riesgo en valores aceptables. No todas las incertidumbres involucradas en el AR pueden ser tratadas de manera adecuada con la teoría de probabilidades. Lógicas multivalentes, tales como la borrosa LB, pueden representar y agregar a los algoritmos incertidumbres no aleatorias, llamadas epistémicas.

Utilizando LB es posible representar y operar con conceptos vagos o imprecisos, característicos del factor humano (FH) inmerso en un contexto social, económico, financiero, político, cultural, ...etc. Las modelizaciones que surgen de la aplicación de LB abordan con mayor amplitud la complejidad que maneja la ingeniería. Las gradualidades incorporadas al análisis mejoran la comprensión del riesgo y brindan eficacia al proceso de toma de decisiones.

En la actualidad el uso de inteligencia artificial con base en este tipo de lógicas alternativas permite tomar decisiones en situaciones de incertidumbre, combinando toda la información disponible y ajustando el modelo formal a la realidad. Finalmente el uso de LB en AR en ingeniería conduce a concepciones integrales y direcciona con eficacia el proceso de toma de decisiones.

Se propone un enfoque holístico utilizando LB en el AR centrado en una gestión dinámica y continua del FH, lo que conducirá a la aceptabilidad del riesgo. Este tratamiento alternativo, a los enfoques tradicionales, proporciona información valiosa para el proceso de toma de decisiones.

**Palabras Claves:** Riesgo; Aceptabilidad; Lógica Borrosa; Toma de decisiones



## 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de riesgo es una consecuencia natural de las incertidumbres y hace referencia al futuro, a la ocurrencia incierta de eventos desfavorables y sus consecuencias.

El análisis de riesgo AR, involucra información objetiva de considerable rigurosidad y precisión junto al llamado factor humano, de calificación lingüística con alta subjetividad. La ingeniería es una actividad técnica, enmarcada en organizaciones muy dependientes del contexto cultural, sociopolítico y económico financiero. Las incertidumbres asociadas a cada una de las distintas variables que definen el buen funcionamiento de sus productos no son en su mayoría aleatorias.

Por otro lado, se concibe al riesgo como la resultante de la convolución de la probabilidad de falla frente a escenarios adversos y las consecuencias que provocarían estos. Es una operación matemática que transforma dos funciones: fallas y consecuencias, en una tercera función que en cierto sentido representa la magnitud en la que se superponen las fallas y una versión trasladada e invertida de las consecuencias. Si bien la Teoría de Probabilidades es una herramienta útil para cuantificar este algoritmo, los valores de estas funciones son muy difícil de estimar y agregar.

Los factores técnicos son analizados en la práctica tradicional a través de árboles de eventos o fallas utilizando planteos probabilísticos. Los factores no técnicos por sus inherentes características requieren herramientas alternativas, tales como las lógicas multivalentes. Las incertidumbres presentes en el AR, tienen distinta naturaleza: aleatoria o epistémica.

Si bien los procesos de automatización están entre nosotros y se avizora su avance en el mundo de la ingeniería, es importante tener presente que es inevitable la presencia activa del factor humano, ya sea controlando, colaborando, accionando,....etc.

El AR es un proceso que puede conectarse con la toma de decisiones, permitiendo establecer planes de trabajo y/o actividades para mantener o mejorar los valores obtenidos, según sea el caso. Se mide con la intención de cuantificar o calificar el valor de una variable, pero también se busca información para saber dónde, cómo y con qué frecuencia accionar.

En este trabajo se toma como premisa de partida la complejidad de la problemática del AR, donde intervienen variedad en cantidad y calidad de información. Se presenta una definición operacional de la aceptabilidad del riesgo mediante un algoritmo borroso, cuyo resultado se conecta al proceso de toma de decisiones, buscando mantener el nivel de riesgo en valores predeterminados, calificados como aceptables.

## 2. SEGURIDAD → RIESGO

En el ámbito de la ingeniería, la seguridad es de vital importancia, y el AR fundamenta esta calificación. El riesgo se convierte en el antagonista de la seguridad, y su adecuada evaluación



es esencial para prevenir accidentes y asegurar la protección de las personas y los activos involucrados. La ingeniería, no solo aborda aspectos físicos del producto final, conjuntamente organiza y controla el factor humano, en el que está inmersa la construcción, mantenimiento y funcionamiento de sus productos [1].

Las incertidumbres son inherentes a cualquier proyecto y pueden surgir de diversos factores, como la falta de datos precisos, la variabilidad en los procesos o la imprevisibilidad de los eventos externos. Estas incertidumbres afectan tanto la probabilidad de ocurrencia de eventos no deseados como las consecuencias asociadas a los mismos. En este contexto, para garantizar la seguridad surge la necesidad de incorporar en los algoritmos todas las incertidumbres utilizando herramientas formales adecuadas, Figura 1.

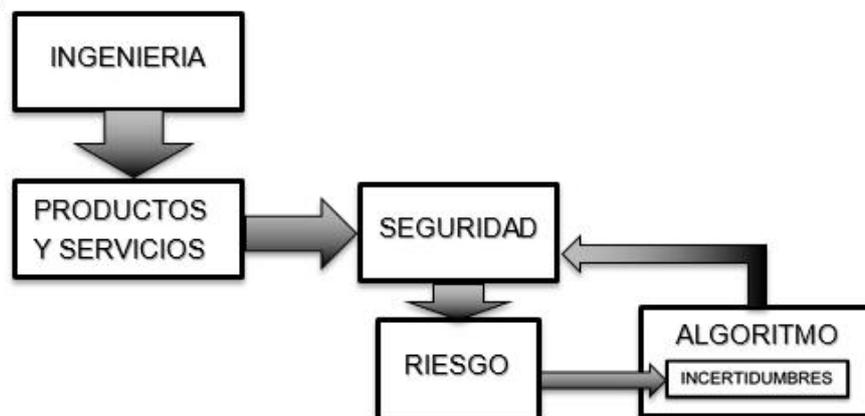


Figura 1: Seguridad y Riesgo en Ingeniería: Incertidumbres

### 3. RIESGO → INCERTIDUMBRES

#### 3.1 tipos de incertidumbres

El riesgo está directamente vinculado a las incertidumbres, en ingeniería se clasifican en dos categorías básicas: aleatorias y epistémicas.

Las aleatorias, se refieren a las fluctuaciones impredecibles y naturales de los eventos. Si bien no hay certeza absoluta de los valores específicos de un evento aleatorio, con datos estadísticos se puede representar su probabilidad de ocurrencia.

Las incertidumbres epistémicas se refieren a la falta de conocimiento o información incompleta que afecta nuestra comprensión y capacidad para predecir eventos o fenómenos. Esta incertidumbre no es de naturaleza aleatoria, está asociada al grado de intensidad con el cual el evento se materializará. En otras palabras, existe una combinación de aleatoriedad y ambigüedad en la ocurrencia futura de un evento. La incertidumbre del modelo es epistémica,



estas concepciones pueden aproximarse en gran medida a la realidad pero nunca pueden capturar toda su complejidad. La representación de este tipo de incertidumbres mediante la teoría de probabilidades resulta forzado y no se ajusta a la realidad, aquí es necesario recurrir a planteos alternativos, lógicas más blandas que permitan no solo representar estas incertidumbres sino que agregarlas a los algoritmos de cálculo junto a las aleatorias.

### 3.2 Incertidumbres en la definición de la aceptabilidad del riesgo

En el proceso de definición y evaluación de la aceptabilidad del riesgo, se pueden reconocer tres niveles de incertidumbres, Figura 2:

- I. **Definición de la aceptabilidad**: se expresa mediante el lenguaje coloquial, lo que se entiende por aceptación del riesgo: que variables y/o parámetros intervienen en esta aceptación y como interaccionan entre sí. Se pone en evidencia la lógica que los explica y vincula. Se busca una definición operacional de la característica. En este caso se eligieron un grupo de índices que participan de un algoritmo borroso. La elección de estos índices, depende del producto o servicio y del contexto en estudio. Aquí aparece el primer nivel de incertidumbre: elegir un modelo matemático que represente y se ajuste a la definición de un aspecto de una realidad.
- II. **Evaluación de la aceptabilidad**: selección de una estructura jerárquica que describa (explique) cada uno de los índices elegidos para definir a la aceptabilidad. Se evalúan las estructuras jerárquicas utilizando evidencias disponibles o de fácil determinación. En esta etapa, el poder de expresión gana a la precisión de la información. Toda información disponible puede y debe ser incorporada racionalmente en este proceso. En esta etapa coexisten incertidumbres aleatorias y epistémicas. La lógica borrosa permite mezclar estos dos tipos de valores. En este nivel las incertidumbres son propias del valor de cada variable.
- III. **Conexión del valor de la aceptabilidad con la toma de decisiones**: una vez determinado el valor de la aceptabilidad comienza un proceso de acciones que buscan mejorar aspectos mensurados del proceso. Es una etapa tendiente a calibrar, ajustar, acomodar parámetros para evaluar la capacidad de reacción del algoritmo elegido en la medición de la aceptabilidad. Esta incertidumbre hace referencia al grado de representación del algoritmo diseñado a la realidad en estudio: llamada incertidumbre del modelo.

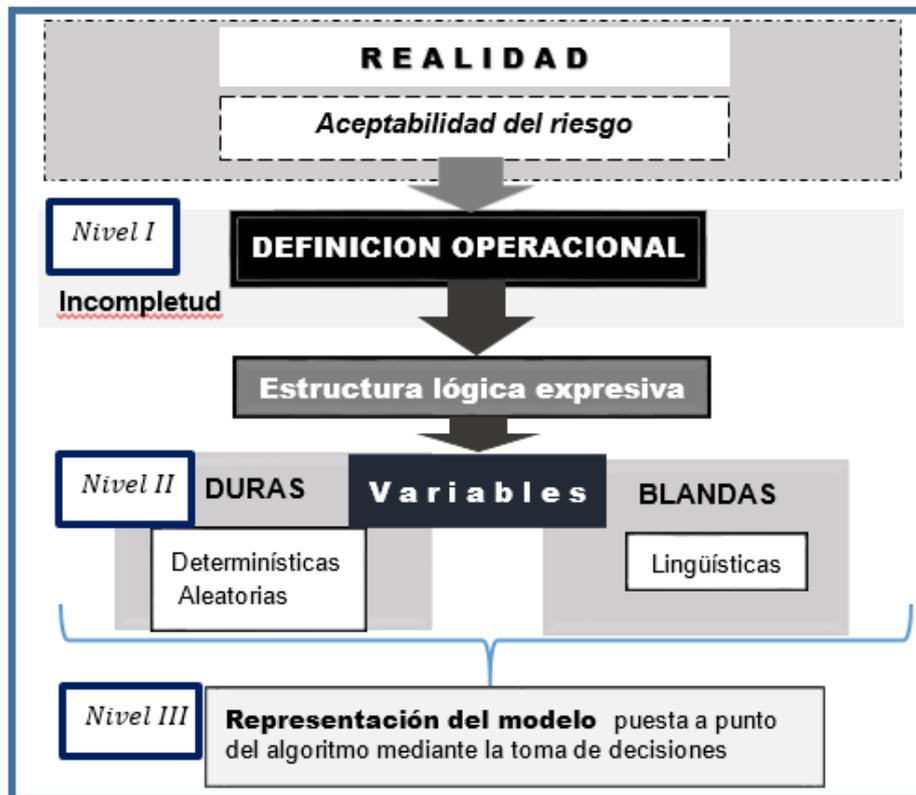


Figura 2: Niveles de Incertidumbres

#### 4. EVALUACION DEL RIESGO → ACEPTABILIDAD

En la evaluación del riesgo, se descarta el valor nulo, luego hay que minimizarlo mediante un enfoque equilibrado considerando beneficios y consecuencias adversas, definiendo así un rango "aceptable" del mismo.

En la ingeniería tradicional, se aborda el concepto de aceptabilidad del riesgo desde una perspectiva de balance económico. Esto implica determinar si los costos de implementar medidas de mitigación superan los beneficios esperados, o si los costos de posibles daños y pérdidas superan los beneficios económicos. Sin embargo, la aceptabilidad del riesgo no se basa únicamente en consideraciones técnicas y científicas, sino que también se ve influenciada por factores sociales, culturales y económicos.

Otro aspecto a considerar es la percepción del riesgo, que puede variar significativamente entre diferentes culturas y sociedades. Los valores, creencias y experiencias individuales y colectivas desempeñan un papel crucial en la evaluación y tolerancia del riesgo. Por ejemplo, una sociedad que valora la preservación del medio ambiente puede establecer criterios más



estrictos para la aceptabilidad del riesgo ambiental, mientras que una sociedad más enfocada en el desarrollo económico podría tener una mayor tolerancia al riesgo en determinadas áreas.

Es importante destacar que la aceptabilidad del riesgo no es un concepto estático, evoluciona en el tiempo a medida que la sociedad cambia, se adquiere nueva información científica y se desarrollan nuevas tecnologías. Los avances en la comprensión de los riesgos y en la capacidad de gestionarlos también pueden influir en los criterios de aceptabilidad del riesgo.

Esto desemboca en la necesidad de definir de manera cuantitativa la aceptabilidad del riesgo. En esta evaluación participan expertos y las partes interesadas.

#### 4.1 Modelos de aceptabilidad

Dependiendo del ámbito, existen distintos modelos para evaluar y definir la aceptabilidad del riesgo. Dos de estos modelos ampliamente reconocidos y utilizados son el modelo de Tolerancia al Riesgo ToR, [2] y el modelo del Semáforo. Estos modelos son utilizados por distintos organismos [3] y se pudo observar uno de ellos durante la reciente emergencia sanitaria, covid-19:

Ambos modelos establecen criterios y proporcionan herramientas para determinar si el nivel de riesgo en una situación específica es considerado aceptable o no. Sin embargo, estos modelos reconocen que la evaluación de riesgos no es un proceso binario. Más bien, permiten evaluar y comunicar la posición relativa del riesgo dentro de un rango de tolerancia, presentando la información de manera accesible, de modo que los usuarios puedan comprender rápidamente el nivel de riesgo para luego tomar medidas de mitigación y gestión según corresponda, Figura 3.

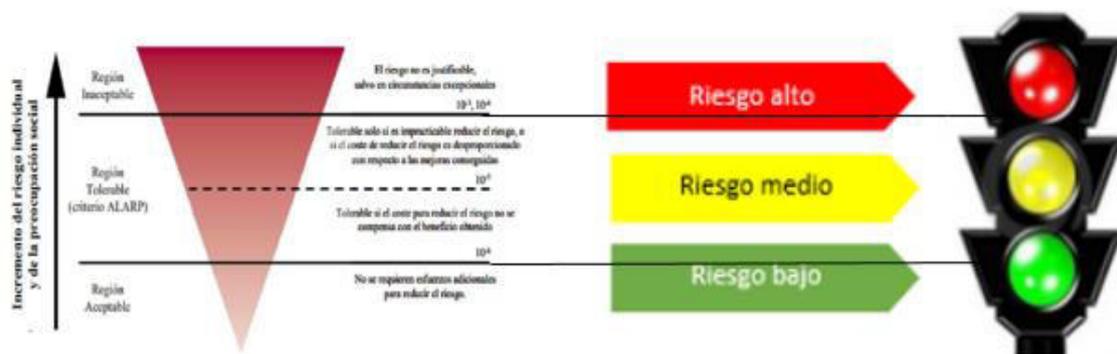


Figura 3: Modelos de Evaluación de Riesgo: Tolerancia al Riesgo (ToR) y Semáforo

La zona intermedia en estos modelos representa la tolerancia al riesgo, situación esta que las sociedades están dispuestas a transitar, a fin de asegurar beneficios, confiando en que:



- la naturaleza y el nivel del riesgo se evalúen convenientemente y los resultados se utilicen para dictar medidas de control;
- los riesgos residuales no sean excesivamente altos y se mantengan tan bajos como sea razonablemente posible
- los riesgos se revisen periódicamente para garantizar que siguen cumpliendo los criterios.

## 5. ACEPTABILIDAD → Variable Lingüística de Valor Borroso

El concepto de aceptabilidad del riesgo no se ajusta a una definición precisa y nítida, presenta una zona intermedia de tolerancia que separa lo que se considera aceptable (A) de su complemento, lo inaceptable ( $\bar{A}$ ). Esta franja intermedia se define como lo tolerable y representa un rango donde coexisten en diferentes grados la propiedad y su complemento, Figura 4.

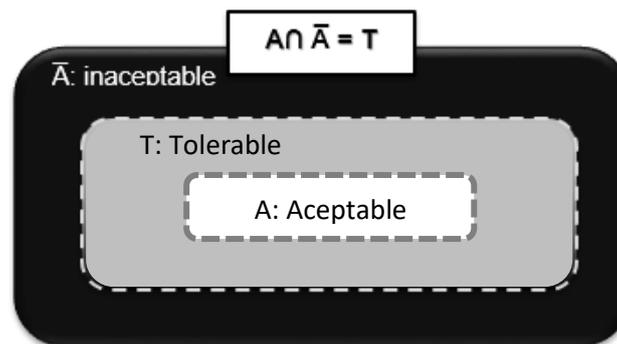


Figura 4: Aceptabilidad (A) – Tolerancia (T) - Inaceptabilidad ( $\bar{A}$ )

A diferencia de la lógica clásica, donde el principio del tercero excluido es aplicable, en el contexto de la aceptabilidad del riesgo, no se puede establecer una frontera claramente definida, existe un cambio gradual que depende de una variedad de factores que deben ser evaluados y controlados de manera adecuada.

Todo esto nos lleva a concluir que la aceptabilidad del riesgo es una variable lingüística de valor borroso, donde lo aceptable, lo tolerable y lo inaceptable representan diferentes grados. Tolerar un riesgo implica mantenerlo bajo revisión y reducirlo hasta su aceptabilidad, es decir estar preparados para asumir y gestionar el riesgo como tal, a través de la voluntad, el control, los beneficios, la revisión y su reducción, Figura 5.

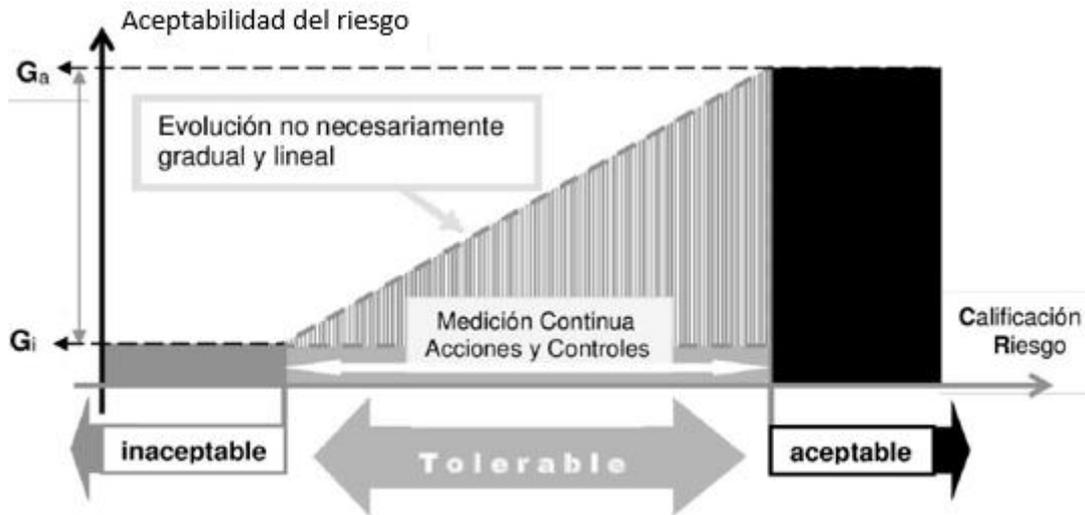


Figura 5: Aceptabilidad del Riesgo: Aceptable, Inaceptable y Tolerable

Como herramienta formal para representar la aceptabilidad del riesgo, se pueden definir indicadores que, basados en evidencias objetivas, guíen la selección del plan de acciones adecuado. Mediante un proceso dinámico de evaluación y mejora, es posible transformar la tolerancia en aceptabilidad, avanzando hacia una gestión más efectiva del riesgo.

## 6. DEFINICION DE LA ACEPTABILIDAD DEL RIESGO

### 6.1 Propuesta desde la perspectiva de la Lógica Borrosa

Teniendo en cuenta lo descrito en los anteriores párrafos, se propone una metodología para el análisis y evaluación del riesgo, la cual también permite definir su aceptabilidad. La metodología utilizada, se basa en dos principios:

- I. Se utiliza una visión integral del riesgo, teniendo en cuenta no solo los aspectos probabilísticos de costos y beneficios, sino también el contexto social, cultural, económico y financiero. Esto implica trabajar con incertidumbres tanto aleatorias como epistémicas, considerando la complejidad y diversidad de factores que intervienen en esta problemática.
- II. Se reconoce la existencia de un estadio intermedio entre la aceptabilidad y la inaceptabilidad, conocido como tolerancia. La problemática en análisis es multivalente, fundamentando esto la utilización de la lógica borrosa. La variable aceptabilidad es lingüística y de valor borroso.



## 6.2 Mecanismo de trabajo:

Se define la aceptabilidad mediante un algoritmo borroso, el cual no solo permite evaluar, sino que también sirve de guía para controlar las acciones y los estados.

Síntesis de los pasos para la definición de la aceptabilidad del riesgo:

1. Definición conceptual del Riesgo Aceptable: Se establece la comprensión y los criterios para determinar qué se considera un riesgo aceptable en el contexto específico. Esto se lleva a cabo mediante la definición de índices que abordan aspectos directamente vinculados o sensibles a la aceptación del riesgo.
2. Análisis de las variables que definen los índices y el algoritmo de cálculo a utilizar: Se examinan las variables relevantes que afectan el riesgo y se determina cómo se incorporarán en el cálculo.
3. Diseño y desarrollo del árbol jerárquico que permitirá definir los índices: Se crea una estructura jerárquica que desglosa las diferentes dimensiones del riesgo y establece relaciones entre ellas.
4. Cuantificación de los índices utilizando operaciones básicas de la aritmética borrosa.
5. Filtrado de los índices para calcular el grado de aceptabilidad
6. Conexión del grado de aceptabilidad con un plan de acción: Se establece una relación entre el grado de aceptabilidad y un plan de acción, que implica analizar las variables y sus valores para tomar decisiones y medidas adecuadas en relación al riesgo identificado.

A modo de ejemplo, se podría definir la aceptabilidad del riesgo utilizando tres variables básicas:

- Información Técnica disponible: IT
- Mecanismos de Comunicación: MC
- Sistemas de Control: SC

El detalle de esta metodología sigue los pasos y algoritmos presentados en [4-6] y utiliza operaciones básicas de la aritmética borrosa [7]. Son las partes involucradas, las que determinarán el contenido expresivo y la cantidad de índices a utilizar. El control de la subjetividad se realiza mediante operaciones de filtrado. Los filtros borrosos a utilizar surgen de acuerdos y consensos para calificar la información disponible. Todas estas operaciones permiten que los valores pueden variar en el tiempo ajustándose a la realidad en estudio.

El proceso de medición se repite con frecuencias que dependen de la problemática y van desde una rutina tradicional a cambios e incorporaciones en el algoritmo para su calibración.

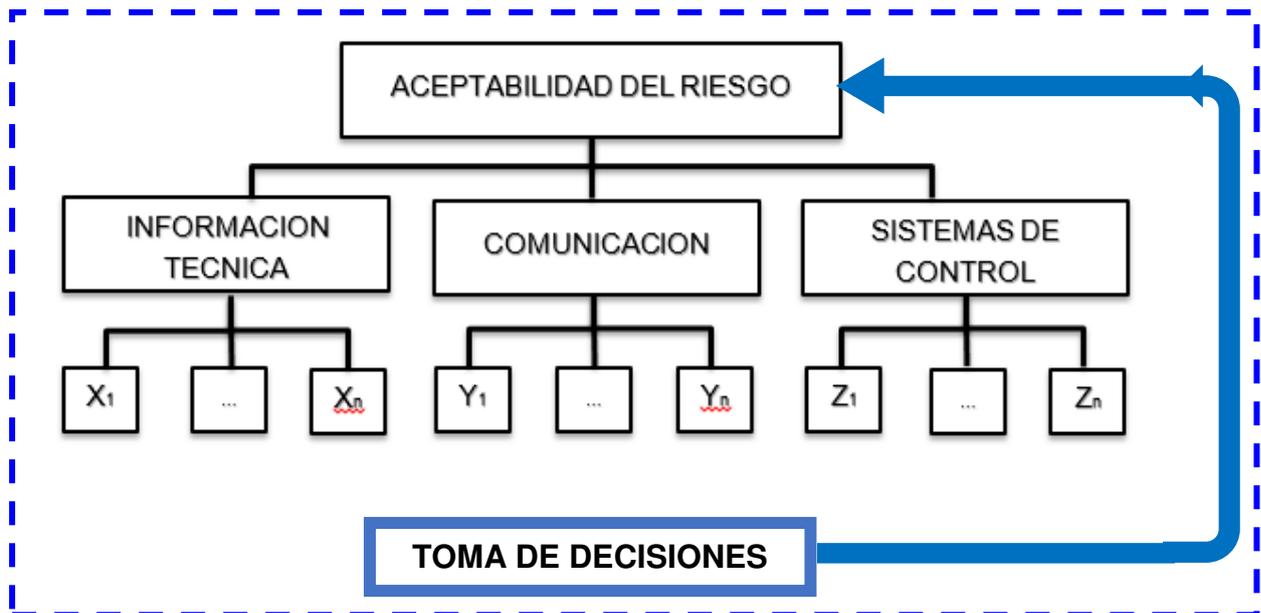


Figura 5: Aceptabilidad del Riesgo: definición dinámica e interactiva.

La metodología presentada pone en evidencia, muestra la lógica y los parámetros elegidos para la definición de la **ACR**. Además, no solo define la aceptabilidad, sino que también muestra como modificarla ya que está conectada a un proceso de toma de decisiones y también es una herramienta para guiar el debate de representantes y expertos involucrados en la definición. Se pueden agregar o quitar índices, se pueden modificar también las estructuras que definen el valor de los índices y también se pueden mejorar las metodologías de recolección de evidencias para valorar estos índices.

## 7. APORTES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Uno de los beneficios clave de la inteligencia artificial (i.a.) es su capacidad para procesar grandes cantidades de datos de manera rápida y automatizada. En el contexto planteado en este trabajo, ajustar el modelo a la realidad implicaría incluir más variables, desglosar en mayor cantidad el árbol jerárquico y por consiguiente una mayor cantidad de información disponible para evaluar. El aprendizaje automático de las i.a. para analizar una amplia variedad de fuentes de datos, incluidos informes técnicos, estudios de casos, datos históricos, información meteorológica, entre otros, sumado a la capacidad de monitorear continuamente datos en tiempo real, como sensores y dispositivos conectados, podría permitir un análisis más preciso y exhaustivo del algoritmo presentado [8].



Otra cualidad de las i.a. es que mediante el uso de modelos y algoritmos de aprendizaje automático, es posible realizar simulaciones avanzadas que permitan evaluar el impacto de diferentes variables y tomar decisiones informadas [9]. Por ejemplo, se pueden simular condiciones climáticas extremas, fallos en sistemas o posibles escenarios de accidentes para evaluar cómo afectarían a la seguridad y la aceptabilidad del riesgo. Esto puede ayudar a identificar medidas de mitigación efectivas y optimizar los recursos disponibles.

Es importante destacar que si bien la inteligencia artificial puede facilitar y agilizar el proceso de evaluación y simulación de riesgos, no reemplaza el papel del analista de riesgo. La experiencia y el conocimiento humano siguen siendo fundamentales para interpretar los resultados, tomar decisiones estratégicas y garantizar que se consideren todos los aspectos relevantes. La inteligencia artificial se presenta como una herramienta complementaria que amplía las capacidades del analista, permitiéndole tener una visión más completa, dinámica y detallada de los riesgos y su aceptabilidad.

## 8. CONCLUSIONES

El AR es una herramienta de amplia utilización en la ingeniería. Los planteos tradicionales tienen bases probabilísticas o semi-probabilísticas. Sin embargo no todas las incertidumbres de los eventos que se analizan son aleatorias, las variables referidas al factor humano son epistémicas. También en muchas situaciones no existe suficiente y adecuada información estadística para representar las variables aleatorias. En la práctica el AR es una combinación de rigor científico y juicio subjetivo, un enfoque formal y consistente para evaluar probabilidades de un evento no deseado y sus consecuencias.

Las lógicas multivalentes, tal es caso de la lógica borrosa, tienen mayor poder expresivo y permiten agregar (mezclar) variables aleatorias, determinísticas y borrosas. El contexto socio cultural en el que están sumidos los productos o procesos de la ingeniería influyen significativamente en la percepción del riesgo y condicionan su aceptabilidad. Una definición completa e integral de la aceptabilidad tiene que ser interdisciplinar e incorporar toda la información disponible incluyendo sus incertidumbres asociadas. Herramientas formales blandas pueden representar y operar con este tipo de valores previo a la toma de decisiones.

La aceptabilidad de un riesgo no se define en la mayoría de las situaciones como un concepto nítido, se reconoce la existencia de una frontera intermedia llamada tolerancia. Es en esta zona donde la ingeniería puede trabajar para acercarse a la aceptabilidad. En este trabajo presentamos a la aceptabilidad del riesgo como una variable lingüística de valor borroso.

A modo de ejemplo, se proponen tres índices para describir la aceptabilidad del riesgo. Se presentan pasos generales para controlar sus valores representativos utilizando aritmética



borrosa en un esquema jerárquico. El resultado es un mapa que permite intervenir en las diferentes partes, si es necesario, para mejorar cuestiones organizativas o individuales.

## 9. REFERENCIAS

- [1] Douglas Mary, "La aceptabilidad del riesgo según las ciencias sociales", Paidós Studio, Barcelona, 1996.
- [2] HSE, ALARP. <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarp.htm>, 2013.
- [3] Bulletin 130, Risk Assessment in Dam Safety Management, - ICOLD, 2005.
- [4] de la Canal, Ferraris, Labriola y Bertani, "Bajo del Gualicho, Argentina: Evaluación de la Aceptabilidad del Proyecto". 1<sup>er</sup> Congreso Latinoamericano de Ingeniería. Entre Ríos, Argentina, septiembre, 2017.
- [5] de la Canal, Ferraris, "Evaluación y control del factor Humano en Sistemas Tecnológicos Frente a escenarios de Riesgo". SIGEF 2005, Argentina, 2006.
- [6] Ferraris, de la Canal, "Risk Analysis in Engineering Facilities – A Holistic Approach", 1st International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modelling, Brazil, 2012
- [7] Ross, T., Fuzzy logic with engineering applications. (2da. Ed.). New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [8] Afzal, F. & Yunfei, S., "A review of AI-based risk assessment methods for complexity-risk interdependencies." Journal of Construction Management and Economics, School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China, 2019.
- [9] Schwarz, J., Sandoval-Wong, J.A., & Sánchez, P.M., "Implementation of AI in risk management for construction projects." Construction Management Journal, Universität der Bundeswehr München, Germany and California Department of Transportation, San Diego, USA, 2019.



## EVALUACIÓN DE MEDICIONES DE PRESIONES FLUCTUANTES SOBRE PERFIL ALAR NACA 4412 PARA FLUJOS TURBULENTOS.

Lucrecia M. Trullet<sup>1</sup>, Gisela M. Alvarez y Alvarez<sup>1</sup>, Marcelo I. Adotti<sup>2</sup>, Juan M. Rodriguez<sup>2</sup>,  
Mario E. De Bortoli<sup>1</sup>, Beatriz A. Iturri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste,  
Resistencia, Chaco, Argentina - [lucreciatrullet@gmail.com](mailto:lucreciatrullet@gmail.com) -  
[giselaalvarezyalvarez@yahoo.com.ar](mailto:giselaalvarezyalvarez@yahoo.com.ar) - [m\\_debortoli@yahoo.com.ar](mailto:m_debortoli@yahoo.com.ar)

<sup>2</sup> Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica IMIT (CONICET - Universidad Nacional del  
Nordeste), Resistencia, Chaco, Argentina - [italoadotti@gmail.com](mailto:italoadotti@gmail.com) - [juakcho@gmail.com](mailto:juakcho@gmail.com) -  
[iturribeatriz@gmail.com](mailto:iturribeatriz@gmail.com)

---

### RESUMEN

Los fenómenos relacionados con la Aerodinámica, en general, se desarrollan en condiciones de flujos turbulentos y requieren ser analizados en términos de valores medios y fluctuantes. Es decir, la evaluación experimental en aerodinámica, además de velocidades y presiones medias, requiere instrumental que permita registrar valores cuasi-instantáneos. Complementariamente, es necesario desarrollar o disponer de software para el procesamiento de los registros temporales.

En este trabajo se analizan presiones fluctuantes medidas sobre un perfil alar NACA 4412 ensayado en el túnel de viento TV2 del laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. La experiencia se lleva a cabo para un ángulo de ataque de 0° empleando un sistema Scanivalve conectado a transductores Honeywell. Los registros se obtienen con una alta frecuencia de adquisición y tienen una duración de 60 segundos en cada toma de presión.

A partir de las mediciones obtenidas, se realiza un análisis de registros de valores medios de presión, valores RMS de las presiones fluctuantes, picos mínimos y máximos. En algunos puntos específicos se analiza el comportamiento en el dominio de frecuencias a través de la densidad espectral. Finalmente, se calculan las fuerzas de arrastre y sustentación, para determinar los coeficientes aerodinámicos globales.

**Palabras Clave:** *Fluctuaciones de presiones; Turbulencia; Túnel de viento.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la turbulencia de los fluidos se produce en la mayoría de las situaciones de circulación de fluidos a velocidades relativamente altas. No existe una definición precisa de la turbulencia, no obstante, hay una serie de características que permiten describirla [1]: difusividad, altos números de Reynolds, tridimensionalidad de la vorticidad y que es una propiedad de los escurrimientos. La turbulencia se caracteriza por una variación aleatoria de diversas magnitudes como velocidad y presión.

Gran parte del estudio de la turbulencia se basa en el análisis estadístico de datos empíricos para caracterizar la naturaleza de la misma. Por ello, los fenómenos relacionados con la aerodinámica, en general, se desarrollan en condiciones de flujos turbulentos y requieren ser analizados en términos de valores medios y fluctuantes. Es decir, la evaluación experimental en aerodinámica, además de velocidades y presiones medias, requiere instrumental que permita registrar valores cuasi-instantáneos.

La resultante de las fuerzas debidas al viento que actúa sobre un modelo se designa por el nombre de fuerza global  $F_g$ . Esta fuerza se puede descomponer en una componente vertical y en una componente horizontal. La componente vertical se conoce como fuerza de sustentación o simplemente sustentación  $F_l$ . La componente de la fuerza horizontal en la dirección del viento recibe el nombre de fuerza de arrastre o simplemente de arrastre  $F_d$ . Estas componentes de las fuerzas debidas al viento permiten definir los coeficientes de fuerza o coeficientes aerodinámicos [2].

Como las fuerzas dependen de diferentes parámetros como la densidad del fluido, la velocidad media de flujo, y el tamaño, forma y orientación del cuerpo, y no resulta práctico hacer una lista de estas fuerzas para una diversidad de situaciones, es conveniente trabajar con parámetros adimensionales adecuados que representen las características de arrastre y sustentación del cuerpo. Estos parámetros son el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación.

En este trabajo se realiza un ensayo aerodinámico en túnel de viento de un modelo de escala reducida de un perfil alar NACA 4412, con vientos estacionarios, uniformes y suaves. Se miden presiones medias y fluctuantes para la obtención de fuerzas de sustentación y arrastre. El perfil alar es ensayado estáticamente en el canal de aire para un ángulo de ataque. A partir de las mediciones obtenidas, se analizan los datos por medio de distintos parámetros estadísticos.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS



Como hipótesis general para realizar este trabajo se considera la validez del análisis dimensional, y se utilizan las leyes de semejanza y las condiciones cinemáticas y dinámicas del perfil NACA 4412.

Por otro lado, se considera que los fenómenos aerodinámicos analizados tienen carácter aleatorio, dado que están asociados a la turbulencia del viento, y como tales son analizados con herramientas estadísticas. El perfil NACA 4412 se dispuso en la sección de ensayo 1 del túnel de viento TV2 de la Facultad de Ingeniería de la UNNE como se observa en la Figura 1.

El túnel de viento TV2, de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, Figura 1, es de circuito abierto cuya longitud total es de 7.50 m, su cámara de ensayos consiste en un conducto de sección cuadrada de 0.48 m de lado y de 4.45 m de longitud. La máxima velocidad del flujo en el canal vacío es aproximadamente 18 m/s y emplea un ventilador centrífugo accionado por un motor trifásico de 1450 rpm y 10 CV de potencia [3].



Figura 1: Perfil NACA 4412 y túnel de viento TV2.

### **2.1 Modelo del perfil alar**

El modelo empleado del perfil NACA 4412 Figura 1, fue diseñado y construido siguiendo las leyes de semejanza, y posee una cuerda  $c$  de 0,150 m, 0,32 m de envergadura, 0,155 m de perímetro superior y 0,152 m de perímetro inferior. Se dispusieron veintiséis tomas de presión estática en la parte media de la envergadura, en posiciones consecutivas sobre todo el perímetro del perfil en la sección central. Como se observa en la Figura 2, 14 tomas de presión estática se ubicaron en el extradós y 12 tomas de presión estática en el intradós.

### **2.2. Esquema de las conexiones**

En la Figura 3 se muestra un esquema representativo del circuito de obtención de datos en el ensayo.

En las 26 tomas de presión estáticas ubicadas sobre la superficie del perfil alar, se miden presiones medias y fluctuantes con sensores de presión electrónicos Honeywell® 160PC, conectados por sondas de 1,5 mm de diámetro a una válvula secuencial Scanivalve de 48 canales y controlador solenoide CTRLR2/s2-s6. La adquisición de datos se realiza a través de una plaqueta PCI-DAS1602/16 Measurement Computing®, controlada y calibrada con software InstaCal®. Los datos son almacenados en una PC y procesados en tiempo real con el programa de cálculo NACA 25 desarrollado en trabajos anteriores [4].

La presión dinámica de referencia, medida en el flujo no perturbado, es obtenida con un tubo de Pitot-Prandtl conectado a un sensor de presión electrónico Honeywell PC 160.

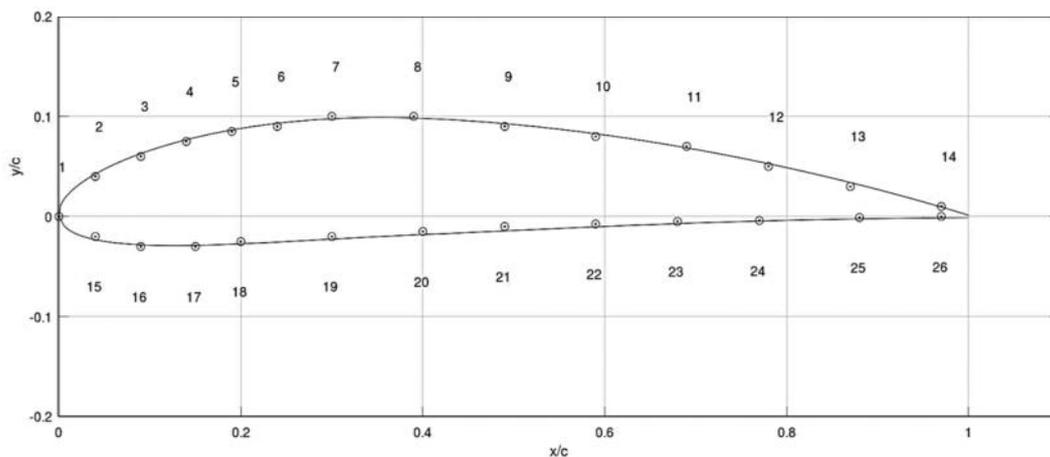


Figura 2: Ubicación de las tomas de presión estáticas en el perfil aerodinámico NACA 4412.

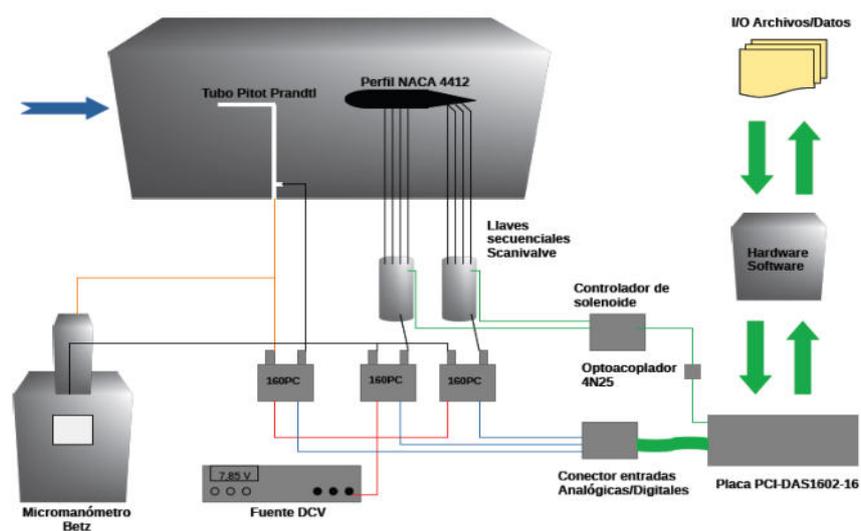


Figura 3: Esquema de las conexiones.



### 2.3. Condiciones de ensayo

Los valores de presión atmosférica y temperatura se miden al inicio del ensayo y permiten realizar el ajuste de la densidad del aire. Estos valores se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Condiciones al inicio del ensayo

Temperatura (°K)	288.15
Presión atmosférica (Pa)	101725
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1.23
Presión dinámica (Pa)	≈140
Número de Reynolds	1.57×10 <sup>5</sup>

El ensayo se realiza para un ángulo de ataque de 0°, en régimen estacionario. El tiempo de medición por toma es de 60 s, con una frecuencia de adquisición del orden del kHz, lo que supera ampliamente la respuesta en frecuencias del transductor de presión. Para que se comience el ensayo y se registren los datos de presiones sobre el perfil alar con el programa NACA25, como primer paso se debe tomar la medición de temperatura y presión ambiente, además de registrar la hora de inicio del ensayo. Se enciende el ventilador de túnel de viento abierto TV2 y se espera unos minutos para asegurar el régimen estacionario antes de dar corrida al programa que registra los datos mediante el transductor de presiones. Una vez iniciado el registro de presiones se debe tomar nota de la presión dinámica mostrada en el micro-manómetro que sirve de referencia para verificar los valores obtenidos. Por cada toma de presión se obtiene un archivo con los datos de tiempo, presión efectiva y presión dinámica, 122901 valores para 60 s por toma.

### 3. CÁLCULOS DE COEFICIENTES DE SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE

Las fuerzas resultantes originadas sobre el perfil alar fueron descompuestas en dirección paralela y perpendicular a la dirección del viento incidente. La fuerza de sustentación y arrastre neta en un perfil es dada por integración de las presiones en sus áreas tributarias. El método de cálculo por distribución de presiones, para la obtención de los coeficientes de sustentación y arrastre en un cuerpo sometido a un flujo unidireccional, es utilizado por la consistencia numérica observada en los ensayos.

A cada toma se le asigna el área tributaria  $A_i$ , obtenida como la distancia media entre puntos de toma sucesivos y un ancho unitario  $L$ , Ecuación 1.

$$A_i = \left( \frac{d_{i-1}}{2} + \frac{d_{i+1}}{2} \right) L \quad (1)$$



En la Tabla 2 se detallan las áreas tributarias asociadas a cada toma de presión estática y los ángulos que forman cada superficie medida con respecto a la cuerda del perfil.

Tabla 2: Ángulos de la superficie relativos a la cuerda y área tributaria asignada a cada toma.

Tomas (Extradós)	$A_i$ Área (mm <sup>2</sup> )	Ángulo (rad)	Tomas (Intradós)	$A_i$ Área (mm <sup>2</sup> )	Ángulo (rad)
1	96	1.570796	15	96	-0.14263
2	96	0.50385	16	96	-0.01855
3	96	0.34962	17	96	0.02286
4	96	0.25600	18	96	0.04045
5	96	0.18174	19	138	0.04708
6	96	0.11731	20	180	0.03716
7	138	0.05946	21	174	0.04127
8	180	-0.03545	22	168	0.03954
9	180	-0.08566	23	168	0.03419
10	174	-0.12722	24	168	0.02693
11	168	-0.16136	25	180	0.01834
12	168	-0.19280	26	180	0.01222
13	180	-0.22297			
14	144	-0.25718			

Se realiza el cálculo de las fuerzas actuantes por toma  $F_{pi}$ , como la presión en esa toma por su correspondiente área, luego se descomponen estas según los ejes coordenados “x e y” para que se puedan calcular las fuerzas de arrastre y sustentación como la sumatoria total según los ejes respectivamente, Ecuación (2).

$$F_{pi} = P_i A_i \quad (2)$$

Con estas fuerzas se pueden obtener los coeficientes de arrastre  $C_D$  y sustentación  $C_L$ , teniendo en cuenta la densidad del aire, la velocidad de fondo y el área de referencia  $A_r$ .

En las Ecuaciones (3) y (4) se muestra el cálculo del coeficiente de arrastre y sustentación respectivamente:

$$C_D = \frac{2 F_d}{\rho V^2 A_r} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{2 F_l}{\rho V^2 A_r} \quad (4)$$

Donde:  $F_d$  es la fuerza de arrastre,  $F_l$  la Fuerza de sustentación,  $\rho$  la densidad del aire,  $V$  la velocidad del viento incidente y  $A_r$  el área de referencia, que se obtiene a partir del producto de la cuerda  $c$  y el ancho unitario  $L$ .

## 4. EVALUACIÓN DE LAS PRESIONES MEDIAS Y FLUCTUANTES SOBRE PERFIL ALAR NACA 4412

### 4.1. Coeficientes de arrastre y sustentación

A partir de las mediciones obtenidas, se realizó un análisis de registros de valores medios y fluctuantes de los coeficientes de arrastre ( $C_D$ ), y sustentación ( $C_L$ ) empleando un código desarrollado con el software libre Octave. En la Figura 3 se presentan los coeficientes de arrastre ( $C_D$ ), y sustentación ( $C_L$ ) obtenidos a partir de las mediciones de las presiones fluctuantes sobre el perfil alar. Se aprecia en color rojo las fluctuaciones de los coeficientes aerodinámicos, debidas a las fluctuaciones de las presiones efectivas sobre las tomas de aire del perfil, y en color azul los valores medios calculados para ambos gráficos. Se verifica valores mayores de  $C_L$  que los de  $C_D$ . En la Tabla 3 se observan los resultados del análisis estadístico del registro de las fluctuaciones de los coeficientes aerodinámicos.

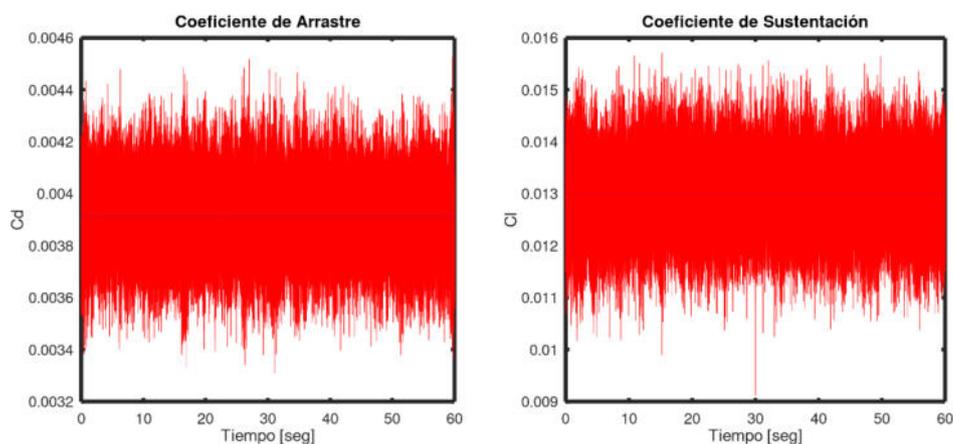


Figura 3: Gráfico de los valores fluctuantes y medios del  $C_D$  y del  $C_L$ .

Tabla 3. Parámetros estadísticos obtenidos para el  $C_D$  y el  $C_L$ .

	media	mediana	varianza	desvío estándar
$C_D$	0.0039112	0.0039114	1.9378e-08	1.3921e-04
$C_L$	0.012979	0.012979	4.7812e-07	1.3921e-04

Además de las mediciones de los valores de presiones fluctuantes en cada toma de presión, se registraron los coeficientes de presión instantáneos. Con los mismos se calcula un coeficiente de presión medio  $C_p$  para cada toma y se representa en la Figura 4. Las curvas en color rojo y



verde son los valores de  $C_p$  para las tomas pertenecientes al extradós e intradós respectivamente.

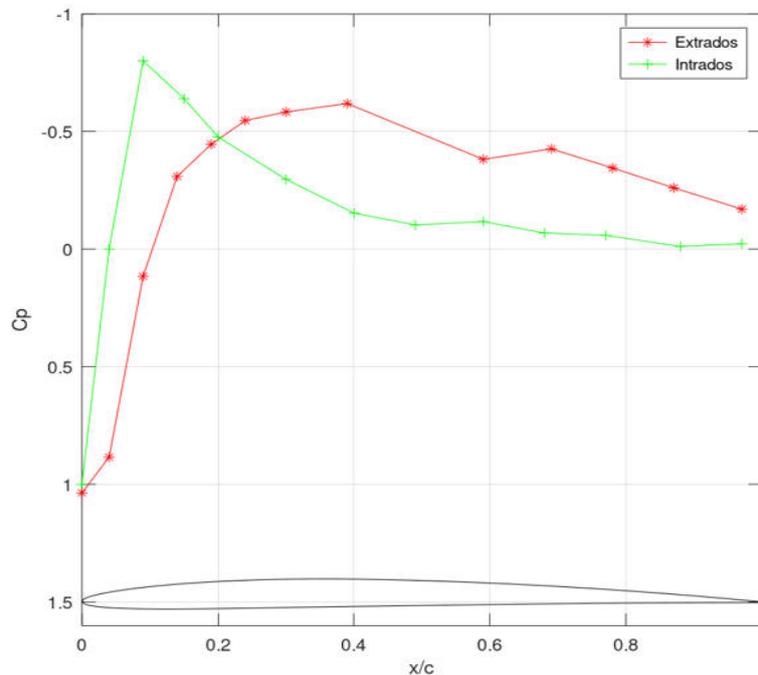


Figura 4: Distribución del coeficiente de presión  $C_p$  sobre el intradós y extradós del perfil.

#### 4.2. Análisis de las fluctuaciones de presiones

Se seleccionan cuatro puntos específicos para realizar el análisis de las fluctuaciones de presiones. Los puntos de análisis son: la toma de presión 1, próxima al borde de ataque, la toma de presión 4 en el extradós, la toma de presión 14 cercana al punto de fuga y la toma de presión 18 del intradós. En la Figura 5 se representa la distribución de presiones instantáneas medidas durante el tiempo de observación. Los valores de presión están representados en el eje horizontal y en el vertical la frecuencia de los mismos. Se puede apreciar una distribución similar en los cuatro casos, en cuanto a simetría y dispersión, descartando la presencia de tendencias diferentes a la central y con picos espurios distribuidos simétricamente respecto a la media. La principal diferencia radica en el rango de valores presentes y el valor medio de cada serie.

En estos mismos puntos se realiza el procesamiento de la señal adquirida empleando la transformada rápida de Fourier y el análisis del comportamiento en el dominio de frecuencias a través de la densidad espectral de las fluctuaciones de presiones que se observa en la Figura 6 para los registros de presiones de las tomas de presiones 1 y 4, y en la Figura 7 para las tomas de presiones 14 y 18. Si bien, en general, se aprecia un comportamiento similar de los espectros en todos los casos, es posible verificar que la real definición de contenidos de energía en



frecuencia está circunscripta a los valores entre 3 y 20 Hz, pero existe una pequeña diferencia entre el caso correspondiente a la toma 1 (presión positiva) y las tomas 4, 14 y 18 (presiones negativas). En el primer caso, el pico espectral máximo se produce para frecuencias ligeramente superiores a los 10 Hz. En los tres casos restantes, el pico se produce entre las frecuencias de 5 y 8 Hz.

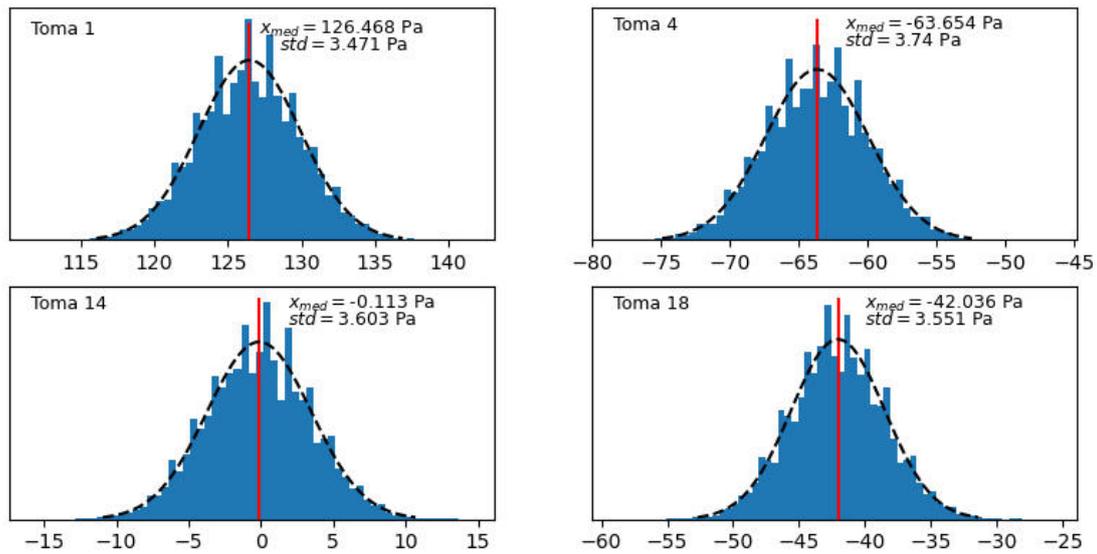


Figura 5: Histograma de presiones para las tomas de presiones 1, 4, 14 y 18.

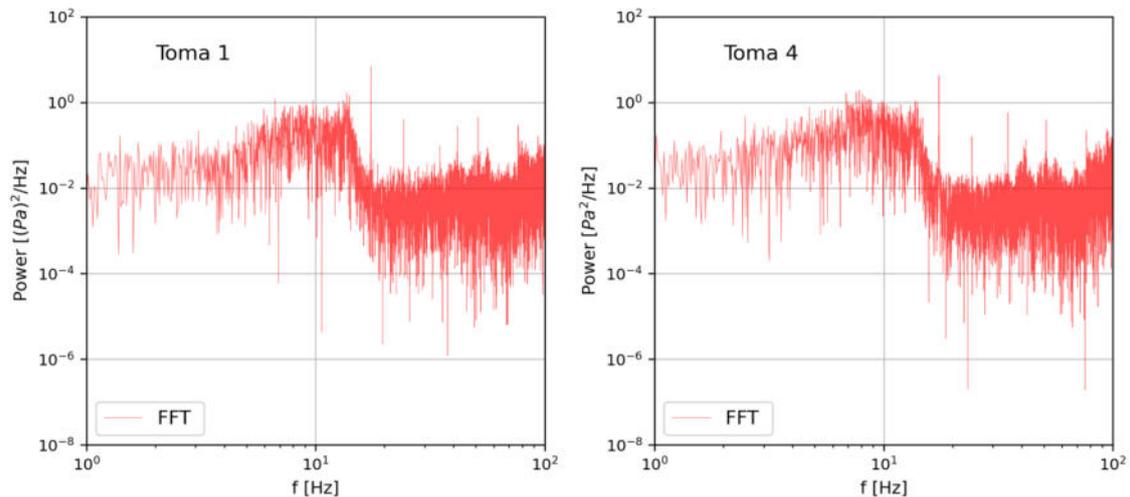


Figura 6: Función de densidad espectral para las tomas de presiones 1 y 4.

## 5. CONSIDERACIONES FINALES



Se presentan resultados preliminares correspondientes a la evaluación de flujos turbulentos a través de la medición de presiones fluctuantes sobre perfil alar NACA 4412.

Las fluctuaciones en el transcurso del tiempo en torno a un valor medio indican que se puede considerar un proceso estacionario durante la medición. Pero las irregularidades de las fluctuaciones no permiten un análisis determinístico, sino que se debe recurrir a la probabilidad y la estadística.

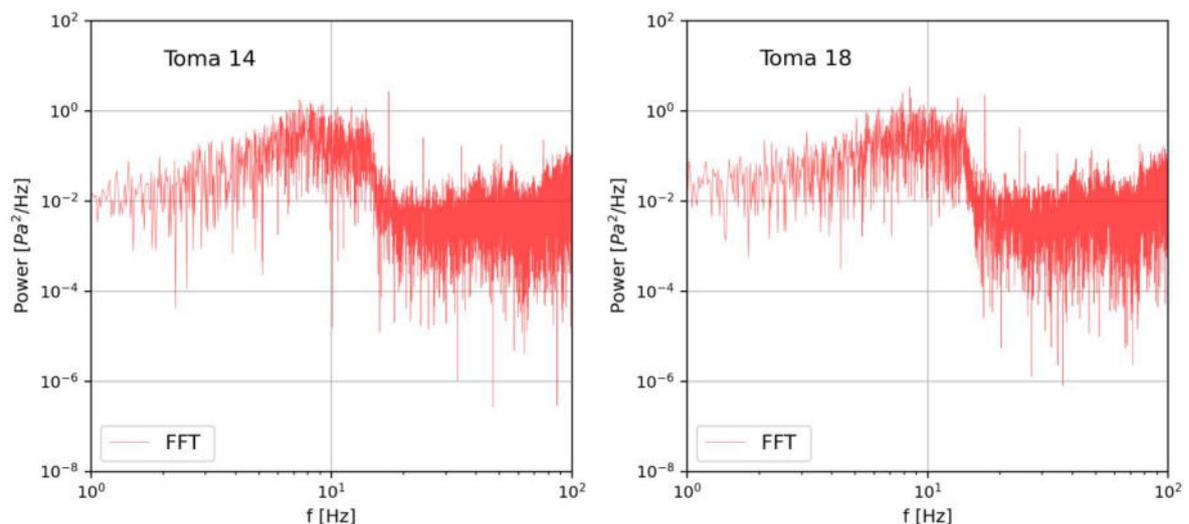


Figura 7: Función de densidad espectral para las tomas de presiones 14 y 18.

Se puede decir entonces que la turbulencia es un fenómeno aleatorio, y esto requiere un gran número de datos para realizar un análisis estadístico, como en este caso donde se obtuvieron 122.901 datos de presiones efectivas con un tiempo de 60 segundos por toma. A su vez, el tratamiento de tal magnitud de datos hace necesario el uso de códigos en programas que optimicen el análisis y el tiempo.

De manera complementaria a este trabajo se realizará un procesamiento de la señal adquirida empleando la Serie de Fourier para obtención de funciones de auto-correlación y .....

## REFERENCIAS

- [1] Tennekes H., Lumley J. L., *A First Course in Turbulence*, The M.I.T. Press, Cambridge, 1994.
- [2] Blessman J. *O Vento na Engenharia Estrutural*, Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre, 1995.



- [3] Alvarez y Alvarez G., Castro H., Marighetti J., Wittwer A., De Bortoli M., Natalini M. B., *Canal de Aire de la Facultad de Ingeniería de la U.N.N.E.*, Comunicación en la Revista de la Asociación Argentina de Energía Renovables y Ambiente, (AVERMA), Vol. 8, Nº 2, 2004.
- [4] Branco, Juan, Marighetti, Jorge, *Mediciones de presión media y fluctuante en túnel de viento de baja velocidad y cálculo de fuerzas aerodinámicas de un perfil NACA 4412*, IV Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, 2014.



## SIMULACIÓN ESTRUCTURAL PARA MATERIALES ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES, DE UNA PRÓTESIS VALVULAR AÓRTICA EN SITUACIONES NO BASALES

José Di Paolo, Exequiel R. Frías, Brenda A. Weiss y Marcelo E. Berli

Grupo Biomecánica Computacional – UNER Facultad de Ingeniería

Ruta Prov. 11, km 10, 3100 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina - [jose.dipaolo@uner.edu.ar](mailto:jose.dipaolo@uner.edu.ar)

[exequiel.fries@uner.edu.ar](mailto:exequiel.fries@uner.edu.ar)

[brenda.weiss@uner.edu.ar](mailto:brenda.weiss@uner.edu.ar)

[marcelo.berli@uner.edu.ar](mailto:marcelo.berli@uner.edu.ar)

### RESUMEN

El implante percutáneo de válvula aórtica es una solución prometedora para el tratamiento de la insuficiencia valvular, especialmente para personas que no pueden ser sometidas a una operación a corazón abierto. En las últimas dos décadas diversos autores y fabricantes investigaron el mejoramiento de los implantes con materiales poliméricos, utilizando la simulación numérica como herramienta esencial para disminuir los costos de prototipado y ensayos in vitro.

En este trabajo se presentan simulaciones computacionales mediante el método de elementos finitos para el análisis del comportamiento dinámico del cierre de una prótesis valvular aórtica, compuesta de polímero en su totalidad. La misma podría ser colocada como reemplazo de una válvula aórtica insuficiente mediante una implantación transcatereter o por cirugía de reemplazo convencional.

A partir de la simulación para una geometría 3D completa tomada de la bibliografía, se evalúa el comportamiento de una prótesis valvular trivalva a través de una simulación estructural sin considerar las interacciones fluido-estructura tal como se indica en varios trabajos. Se asume el material como sólido elástico lineal en cuatro casos y en un quinto caso como hiperelástico. Sobre la geometría original de las valvas se aplica una condición de carga fisiológica basal en forma de presión diferencial transvalvular, para un periodo de tiempo correspondiente a un ciclo cardíaco basal completo de 70 latidos por minuto y también para casos no basales con cambios en la precarga, la poscarga y la frecuencia cardíaca, para el material de base y materiales alternativos.

Los resultados muestran que las tensiones sobre las valvas están por debajo de los límites de rotura de los materiales considerados, excepto en las zonas de los empotramientos de las valvas con los pilares de soporte y el anillo de sutura, donde existen zonas de concentración de tensiones que pueden derivar en daños.

**Palabras Clave:** Prótesis Valvular Poliuretánica, Válvula Aórtica, Simulación Estructural, Método de Elementos Finitos.



## 1. INTRODUCCIÓN

El implante percutáneo de válvula aórtica (TAVI – por sus siglas en inglés-), se ha convertido en una solución prometedora para el tratamiento de la insuficiencia valvular [1]. No obstante, existen controversias por su uso y por las numerosas complicaciones derivadas del procedimiento de implantación; aún así, el acuerdo generalizado es que una persona que no pueda ser sometida a una operación a corazón abierto, pueda recibir una TAVI. En las dos últimas décadas diversos autores y fabricantes han investigado la posibilidad de mejorar los implantes con materiales poliméricos [2]. En este sentido, la simulación numérica es una herramienta esencial para disminuir los costos de las pruebas y ensayos in vitro, tanto de las geometrías como de los materiales involucrados.

A los fines de aportar conocimientos, en este trabajo se utiliza una metodología numérica basada en el método de elementos finitos para evaluar en una geometría 3D una prótesis valvular aórtica polimérica (PVAP) con posibilidades de ser una TAVI. La PVAP considerada es una válvula de reemplazo aórtica constituida por tres valvas elásticas (ver Figura 1). Se simula una estructura sólida sometida a cargas estacionarias, en este caso de un material denominado styrene block copolymer (SBP) [3, 4], que se utiliza como base de comparación para otros materiales. Asimismo, se analiza especialmente el cierre de la válvula porque es el lapso del ciclo cardíaco en el que se desarrollan las mayores tensiones sobre el material [4]. Este análisis se realiza ante situaciones de cargas basales y no basales: específicamente por incremento de la presión diferencial sobre la prótesis, lo que constituye un elemento nuevo que se ha omitido en la bibliografía existente [1, 2, 3]

La elección de la simulación estructural (SE) en vez de la simulación de la interacción fluido estructura (FSI), radica en que el interés actual es conocer el comportamiento elástico del material. Como se indica en el trabajo de Sturla et al. [5], una SE tiene la ventaja de ser menos costosa en términos computacionales, proveyendo una información comparable a la simulación FSI en cuanto a las tensiones y deformaciones sufridas por el material. En todas las simulaciones se evaluaron las tensiones de Von Mises y los desplazamientos del material respecto de su posición no deformada, que se muestra en la Figura 1.c.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

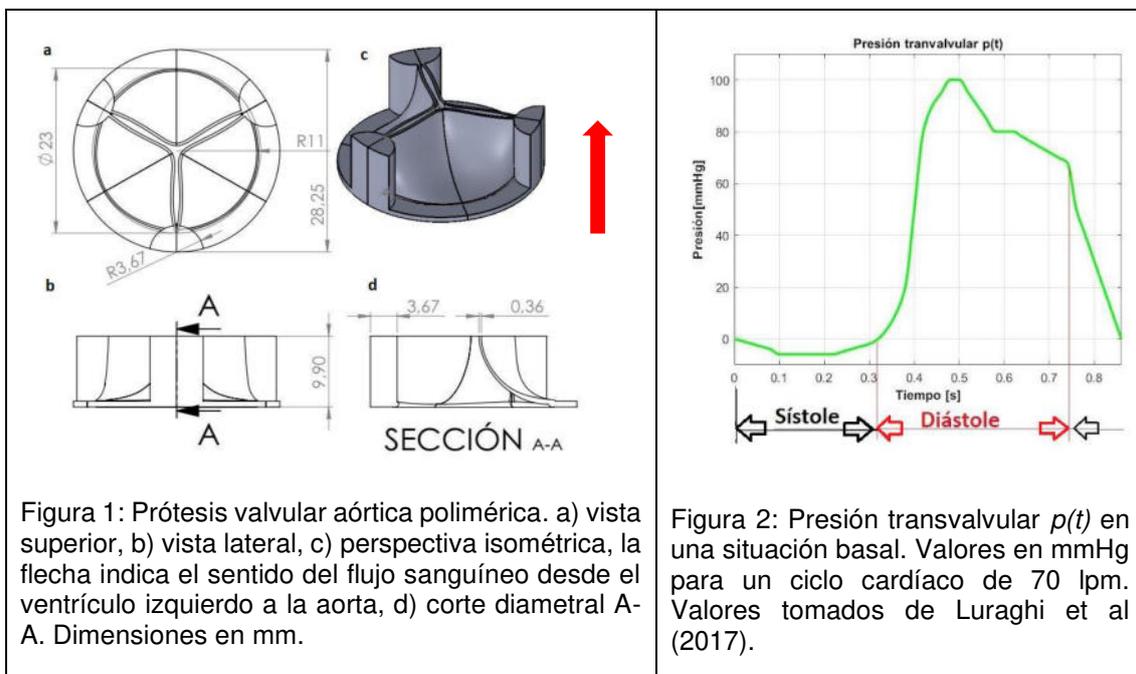
### 2.1 Metodología y geometría 3D de la válvula.

La geometría 3D utilizada para la PVAP es la que se ve en la Figura 1, como una arquitectura acorde para implantarse en forma percutánea (TAVI). La simulación computacional por su parte, se basó en el método de elementos finitos (MEF) para la resolución de las ecuaciones de elasticidad de manera estacionaria utilizando el software con licencia COMSOL Multiphysics

versión 5.2a. El análisis se realizó a través de un ciclo cardíaco completo, recorriendo la variabilidad temporal de la presión diferencial entre la aorta y el ventrículo izquierdo suponiendo un estado estacionario para cada instante de tiempo del ciclo; se utilizó para cada nuevo valor del tiempo la solución anterior como inicialización en un proceso de continuación paramétrica de orden cero. Ello fue asumido por la muy baja frecuencia del fenómeno (entre 1 y 2 Hz), por lo cual la dependencia temporal explícita puede ser obviada lo cual resulta en una tarea computacional simplificada.

Se analizaron las zonas del material sujetas a las mayores tensiones durante todo el ciclo, tanto para materiales poliméricos asumidos como sólidos elásticos lineales como no lineales, siendo la carga aplicada la presión tranvalvular  $p(t)=P_{ao}-PV$ , que es la diferencia entre la presión aórtica ( $P_{ao}$ ) y la presión del ventrículo izquierdo ( $PV$ ) (ver Figura 2).

La PVAP trivalva posee una estructura que tiene tres partes principales: un anillo en la base, las valvas y tres pilares estructurales de la misma altura que las valvas. Posee un diámetro de entrada efectivo de 22 mm (hay una reducción desde los 23 mm por el anillo y los pilares) y una altura de 9,9 mm. En la figura 1 también se indica la línea media de las valvas, ésta es una línea imaginaria al solo efecto de la simulación del contacto entre valvas para generar los pares de contactos necesarios. Las valvas tienen un espesor de 360  $\mu\text{m}$  en el extremo libre, ensanchándose hasta los 390  $\mu\text{m}$  en el empotramiento de la base, tal como se aprecia en la Figura 1.d.





En términos generales, la geometría es la misma que la del trabajo de Luraghi et al (2017) [3]; aunque los datos faltantes se hayan inferido, la curva parabólica y circunferencial de las valvas, es aproximada. Este artículo fue utilizado para validar los resultados obtenidos en la primera de todas las simulaciones realizadas.

## 2.2 Simulaciones realizadas

**S1:** Cinco simulaciones para validar el esquema numérico, utilizando la condición de carga  $p(t)$  de la Figura 2. La malla MEF fue sucesivamente refinada y la variación del tamaño de los elementos se realizó mediante un parámetro de incremento/reducción (MH) variando entre 1,2 y 0,8. La convergencia de la solución se evaluó mediante las tensiones de Von Mises para cada instante del ciclo cardíaco en puntos seleccionados de las valvas; los resultados además se compararon exitosamente con los resultados publicados [3].

**S2:** Una simulación modificando las propiedades materiales de las valvas pero manteniendo la carga utilizada en S1. En este caso se utilizaron las propiedades de un poliuretano basado en poliisobutileno (PIB), un material utilizado en injertos vasculares. Del mismo modo que en S1, en esta situación también se realizó el estudio de convergencia para determinar la malla óptima.

**S3:** Una simulación modificando las propiedades materiales de las valvas pero manteniendo la carga utilizada en S1. En este caso se utilizaron las propiedades del poliuretano (PU) en una de sus versiones comerciales. Del mismo modo que en S1, en esta situación también se realizó el estudio de convergencia para determinar la malla óptima.

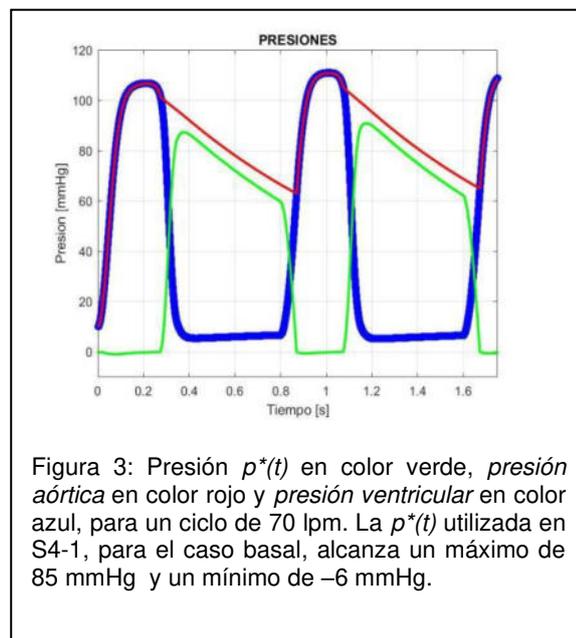
**S4:** Diez Simulaciones, de las cuales nueve corresponden a condiciones no basales, empleando la malla optimizada en S1. Para las simulaciones S4 se implementó computacionalmente un modelo cero dimensional (0D) del ventrículo izquierdo basado en una analogía entre circuitos eléctricos e hidráulicos [6]. Ello permitió obtener las curvas de presión y caudal en función del tiempo: tanto para el estado basal como los no basales. En la Tabla 1 se indican los parámetros del modelo 0D:  $R_s$  es la resistencia sistémica,  $R_m$  la resistencia de la válvula mitral,  $C_s$  la compliancia sistémica y  $f_l$  la frecuencia cardíaca en lpm. Las situaciones no basales corresponden a las presentadas en [6] y las últimas tres a la variación de la frecuencia. En la Tabla 1 los valores modificados se presentan en color azul para cada S4 en el modelo del circuito cardiovascular de corazón izquierdo y circulación sistémica. S4-1 es la situación de carga basal.

En cada una de ellas se impuso una condición de carga diferente, representadas por curvas de presión en función del tiempo  $p^*(t)$  (ver Figura 3), que es la presión transvalvular definida por el modelo cardiovascular 0D. Para el caso de S4-1, la curva  $p^*(t)$  se puede ver en la Figura 3, la cual corresponde a una condición basal en condiciones fisiológicas normales para una persona adulta. Los casos S4-2, S4-3 y S4-4 corresponden a la variación de la poscarga, implementadas

modificando la resistencia y compliancia sistémica, como se indica en la Tabla 1. Mientras que las simulaciones S4-5, S4-6 y S4-7 corresponden a variaciones de la precarga modificando la resistencia de la válvula mitral, como también se indica en la Tabla 1, representando una insuficiencia en la válvula mitral. Para las simulaciones S4-8, S4-9 y S4-10, se aumentaron la frecuencia y la poscarga, estas condiciones corresponden a una sobrecarga de presión por hipertensión arterial. En todos los casos, se realizaron comparaciones respecto a la condición basal asumida en S4-1.

Tabla 1: Situaciones no basales para S4

	Rs	Rm	Cs	f
S4-1	1,0	0,005	1,33	70
S4-2	1,5	0,005	1,33	70
S4-3	2,0	0,005	1,33	70
S4-4	1,0	0,005	1,00	70
S4-5	1,0	0,080	1,33	70
S4-6	1,0	0,320	1,33	70
S4-7	1,0	0,800	1,33	70
S4-8	2,0	0,005	1,00	81
S4-9	2,0	0,005	1,00	96
S4-10	3,0	0,005	0,80	120



**S5:** Una simulación modificando las propiedades materiales de las valvas, en este caso con un comportamiento no lineal, pero manteniendo la carga utilizada en S1. Las propiedades del material asumido corresponden a un elastómero termoplástico denominado Styrene-Ethylene/Propylene-Styrene (SEPS), un material con características apropiadas para fabricar válvulas. Del mismo modo que en S1, en esta situación también se realizó el análisis de convergencia de la malla para determinar la óptima.



## 2.3 Materiales

El material de la válvula polimérica es conocido como SBP, posee una densidad de  $870 \text{ kg/m}^3$  y un comportamiento como sólido elástico lineal con un módulo de elasticidad de  $3,8 \text{ MPa}$  y un coeficiente de Poisson de  $0,49$  [3]. Estas propiedades materiales se utilizaron en las simulaciones S1 y S4.

En la simulación S2 se utilizó poliisobutileno basado en poliuretano termoplástico (PIB-80A) definido como un material sólido elástico lineal de densidad de  $1,320 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , módulo de elasticidad de  $4,6 \text{ MPa}$ , y un coeficiente de Poisson de  $0,38$  [7, 9]. En la simulación S3 se utilizó poliuretano (PU) comercial definido como un material sólido elástico lineal de densidad de  $1,800 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , módulo de elasticidad de  $11,5 \text{ MPa}$  y un coeficiente de Poisson de  $0,45$  [8].

Para S5 el material modelado (SEPS) -un elastómero termoplástico con buena deformabilidad y resistencia- posee una densidad de  $900 \text{ kg/m}^3$ . Su comportamiento no lineal tensión-deformación puede ser caracterizado mediante un modelo hiperelástico. En este caso se optó por un modelo isotrópico de Mooney–Rivlin de 2 parámetros, tal como lo describieron Serrani et. al (2016) [4]. Los valores de las constantes utilizadas fueron:  $C_1$  de  $0,30 \text{ MPa}$  y  $C_2$  de  $0,36 \text{ MPa}$  [4].

## 2.4 Condiciones de contorno e iniciales.

Se estudió el ciclo cardíaco en un periodo completo aplicando una carga de compresión  $p(t)$  distribuida sobre las valvas como una presión uniforme pero de intensidad variable en cada instante de tiempo (ver Figura 2), para un ciclo cardíaco de  $70 \text{ lpm}$ . La presión fue variable desde  $0$  a  $-6 \text{ mmHg}$  durante la fase de sístole y de  $0$  a  $100 \text{ mmHg}$  durante la fase de diástole, en un lapso de unos  $150 \text{ ms}$  y aumentando de manera casi exponencial. En todos los casos se colocó una restricción de movimiento -desplazamiento cero- sobre el anillo quirúrgico que se sutura a la arteria y a los pilares. Es decir: condición de contorno fija para las partes en color celeste y carga  $p(t)$  aplicada sobre las caras de las valvas en color gris en la Figura 4. Para las simulaciones S4, la presión transvalvular fue  $p^*(t)$ , es decir la generada por el simulador cardiovascular 0D.

El contacto entre las valvas fue simulado de a pares, con una condición de paridad generada e implementada con el denominado “método rápido” del software y en una configuración que aumenta la estabilidad de la iteración. Para ello y como ya se mencionó, las tres valvas están divididas imaginariamente en 2 partes con 3 planos diametrales (ver Figuras 1 y 4). Aunque el problema posee simetría en tres sectores de  $120^\circ$  cada uno, se resolvió la geometría 3D completa, debido a los suficientes recursos computacionales y a los fines de asegurar los resultados.



## 2.4 Tarea computacional.

La tarea computacional se realizó ejecutando el algoritmo basado en el software COMSOL. El software fue intervenido incorporando datos y/o restricciones acordes a la física del problema analizado y luego ejecutado en el clúster de la Facultad de Ingeniería-UNER. Dicho clúster cuenta con 10 nodos DELL Power Edge FC430 montados sobre una arquitectura de Sistema Blade FX2 también de DELL. Cada nodo posee 2 procesadores Intel Xeon E5-2670 v3 2.5GHz, 30Mb de Cache, 12 Cores/24T, 128 GB de memoria RAM, en red de alta velocidad Infiniband de 56 Gb/s. Para cada simulación se utilizó una discretización con elementos tetraédricos del tipo Lagrange cuadráticos. Para cada geometría se evaluaron 5 tipos de malla con MH decreciente, por ejemplo, para S1: S1-1 (MH=1,2), S1-2 (MH=1,1), S1-3 (MH=1,0), S1-4 (MH=0,9) y S1-5 (MH=0,8); lo que permitió un refinamiento sucesivo. Los detalles de los números de elementos y los tiempos de cómputo se presentan en la Tabla 2 para la simulación S1.

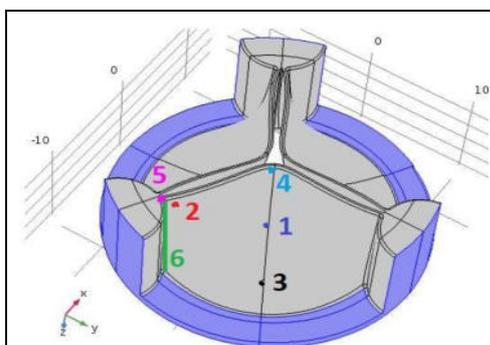


Figura 4. Condiciones de contorno para la PVAP, en color gris la carga como presión uniforme, en color celeste la condición de contorno de desplazamiento cero. Se marcan los puntos estudiados y la arista de interés en color verde.

Tabla 2. Número de elementos y tiempos de cómputo de cada simulación para las 5 simulaciones S1

/	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S1-5
<b>MH</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>	<b>1.0</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>
<b>Elementos (x 1000)</b>	64,6	102,4	140,3	191,9	270,0
<b>Cómputo (horas)</b>	16,0	23,5	31,5	59,6	80,1

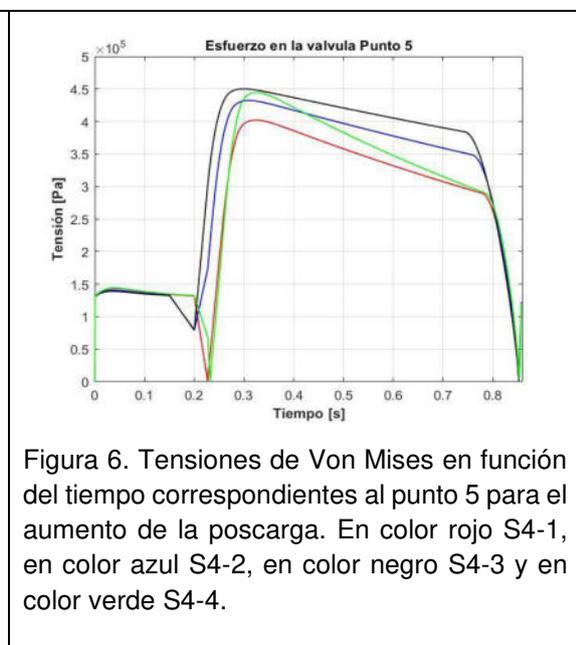
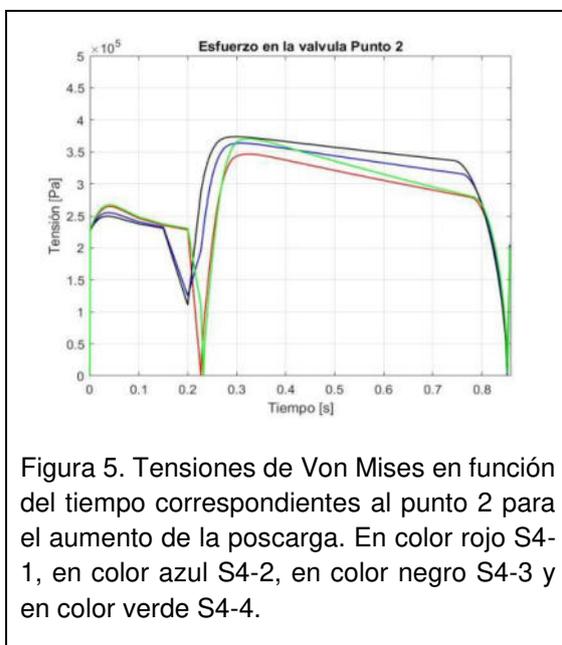
En cada simulación, además de las ecuaciones de elasticidad para un sólido elástico lineal, se resolvieron de manera cuasi estacionaria y acopladas, las ecuaciones que describen el contacto entre las valvas para determinar las tensiones normales y tangenciales. Los instantes de tiempo empleados para el cálculo no fueron uniformes debido a que  $p(t)$  presenta zonas de valor aproximadamente constante como en el intervalo entre 0,1-0,3 s y zonas con un elevado gradiente como en el intervalo entre 0,3-0,5 s. Todos los resultados que se presentan en este trabajo corresponden a la malla con la que se obtuvo la solución convergente para la cual no se registraron variaciones de las tensiones de Von Mises en más de 2% respecto a la malla refinada inmediata siguiente.

### 3. RESULTADOS

Por razones de espacio sólo se exponen los resultados correspondientes a las formas S4 (casos no basales) y S5, para modelos de sólido elástico lineal (SBP) y no lineal (SEPS) respectivamente.

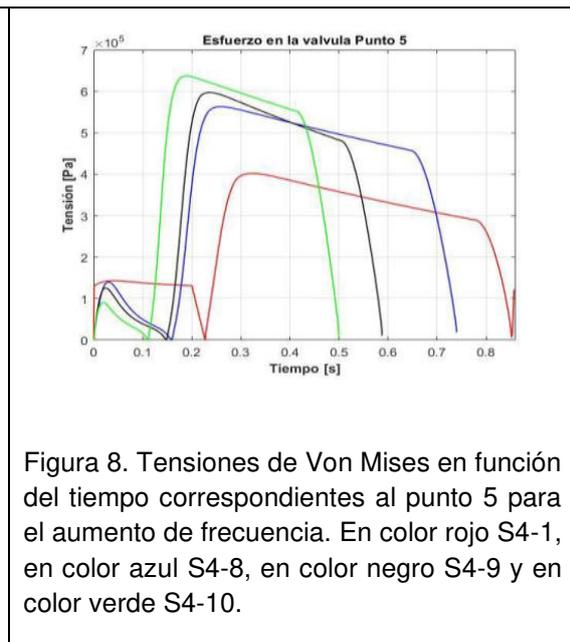
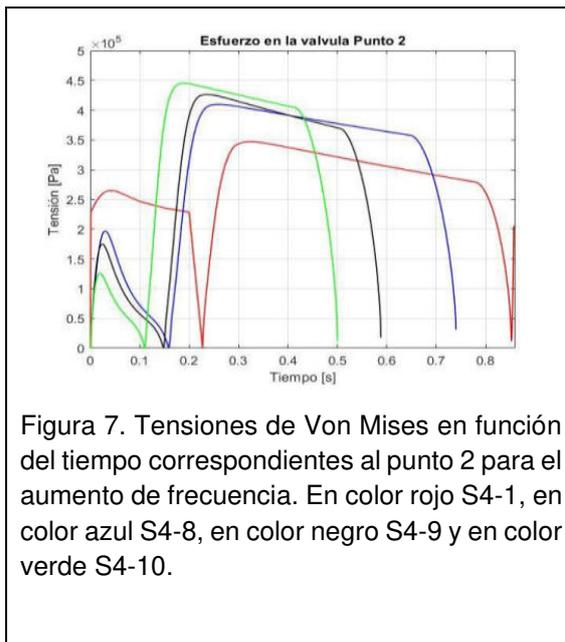
#### 3.1 Tensiones para el caso S4

Entre otros resultados, la simulación computacional permite obtener las tensiones de Von Mises que se alcanzan en las valvas y los pilares de sujeción. Así, se obtuvieron los valores máximos de las tensiones de Von Mises para todos los puntos de interés, los más relevantes resultan para los puntos 2 y 5 y en todos los casos el valor máximo de la tensión se encontró sobre el final del cierre de la válvula ( $3,200 \times 10^3$  kPa, arista 6 de la figura 4). En el caso de comparar las variaciones de poscarga (ver Figuras 5 y 6), las tensiones de Von Mises en función del tiempo para los puntos 2 y 5 aumentan. Es decir, que al aumentar la resistencia sistémica, se eleva la presión y por ende las tensiones relevadas son mayores. Se puede ver que para el punto 2 el rango de variación de la tensión para las distintas simulaciones es estrecho y encuentra su máximo durante la sístole en un valor de 260 kPa para el caso S4-4, y el máximo de 375 kPa durante la diástole para S4-3, en color negro en la Figura 5. Asimismo, para el punto 5, el rango de variación de la tensión también está acotado encontrando un máximo durante la sístole de 138 kPa para el caso S4-4, y un máximo durante la diástole de 449 kPa para S4-3, en color negro en la Figura 6.



Al comparar resultados variando la frecuencia y la poscarga (ver Figura 7 y 8), las tensiones de Von Mises en función del tiempo para los puntos 2 y 5 aumentan significativamente. Se puede

ver que para el punto 2 el rango de variación de la tensión posee un máximo de 260 kPa durante la sístole para el caso S4-1, y un máximo durante la diástole de 498 kPa para S4-10, en color verde en la Figura 7. Por su parte, para el punto 5, la tensión máxima durante la sístole es de 138 kPa para el caso S4-1, y el máximo durante la diástole es de 638 kPa para S4-10, en color verde en la Figura 8.



La implementación de casos no basales mediante la serie de 10 simulaciones S4 permitió observar que es necesario que se presenten patologías de consideración como la hipertensión arterial, para elevar las tensiones en la PVAP. En este caso se logró observar que el aumento de la frecuencia y la poscarga, elevarían considerablemente las tensiones. Para el caso del punto 2 (ver Figura 4) la tensión máxima puede aumentar un 29% y para el punto 5 un 60%. Esto se ve en las Figuras 7 y 8 al comparar el caso testigo S4-1 en color rojo frente al caso de mayor carga S4-10 en color verde.

### 3.2 Tensiones y desplazamientos para S5

Para el material SEPS y la carga  $p(t)$ , se utilizó la malla del caso S1-3. En las valvas, durante la fase de sístole, las tensiones más elevadas se presentaron en los puntos 2 y 1. Por su parte, las tensiones de Von Mises alcanzaron el máximo de 750 kPa durante la fase de diástole en el punto 2. En la Figura 9 se muestran las evoluciones de las tensiones de Von Mises para los cinco puntos analizados.

Como para los materiales elásticos lineales, para SEPS se encontraron zonas de concentración de tensiones en la unión de las valvas con los pilares, esto se puede ver en la Figura 10. Dichas

zonas -en color amarillo- indican tensiones menores respecto a los primeros casos, no existiendo puntos donde se supere el valor de 1,0 MPa. En la figura 10.a se muestran las tensiones durante la apertura máxima de la válvula, en el instante  $t=0,15$  s, y en la Figura 10.b el desplazamiento máximo en la apertura, de 9,35 mm en la fase de sístole. En el instante  $t=0,50$  s la válvula se deforma y se cierra totalmente, alcanzando la tensión máxima en toda la PVAP 770 kPa y presentando un desplazamiento de 1,45 mm en la zona central de la valva como se muestra en la Figura 10.d.

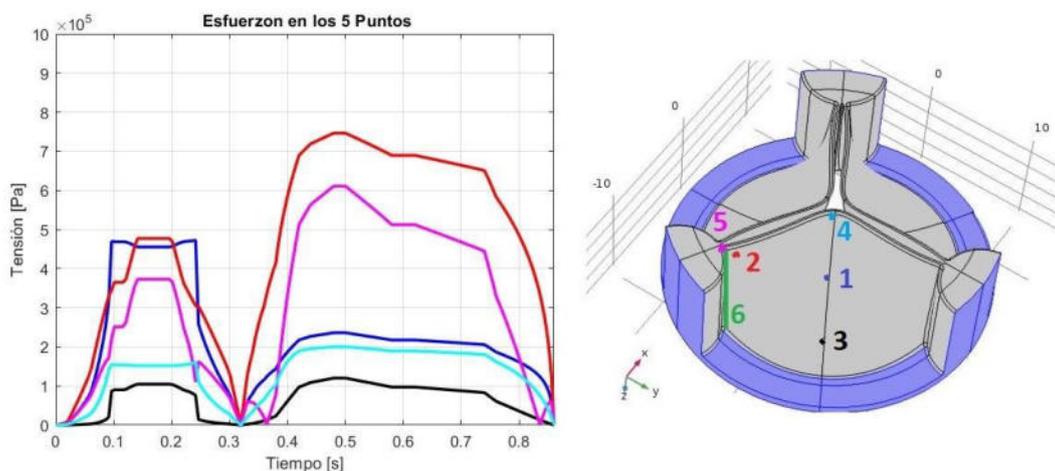


Figura 9. Tensiones de Von Mises durante el ciclo cardíaco (izq) para los 5 puntos de interés marcados en la geometría (der).

El modelo hiperelástico predice para los puntos analizados (ver Figura 9) tensiones del mismo orden de magnitud que el modelo lineal, pero las tensiones máximas en la zona de unión entre el pilar y las valvas son menores en un 76% que S4-1, alcanzando un máximo de solo 770 kPa durante la fase de diástole, lo que lo muestra como el material más resistente por unidad de masa entre los modelados en este trabajo. Desde el punto de vista mecánico el SEPS posee una tensión de rotura de 13 MPa, valor muy alejado de las tensiones halladas que lo muestra también como el material más seguro entre los considerados [10, 11]. Por último, SEPS es un excelente material por su biocompatibilidad, debido a que no predispone a la trombogénesis ni a la generación de reacciones inflamatorias [12, 13].

#### 4. CONCLUSIONES

Se realizó la simulación mediante elementos finitos de la apertura y cierre de una PVAP mediante un modelo estructural basado en el software con licencia COMSOL Multiphysics 5.2a, ejecutado con recursos computacionales de cómputo avanzado. La geometría de la válvula simulada fue obtenida de la bibliografía y sobre ella se analizaron las performances de diversos materiales alternativos: para la situación de base o de carga basal, como para casos de cargas no basales

correspondientes a estados patológicos o de exigencia física. Para estos últimos casos, el modelo muestra qué, si bien las tensiones en las valvas aumentan al elevarse la presión diferencial sobre la válvula, éstas se mantienen muy por debajo de los límites de resistencia a la rotura de los materiales. Las simulaciones, en coincidencia con la bibliografía especializada, indican que el material SEPS además de su excelente biocompatibilidad, presenta menores tensiones para las mismas cargas y la resistencia por unidad de masa más alta. Por ello SEPS, sería el material más adecuado para la construcción de PVAP.

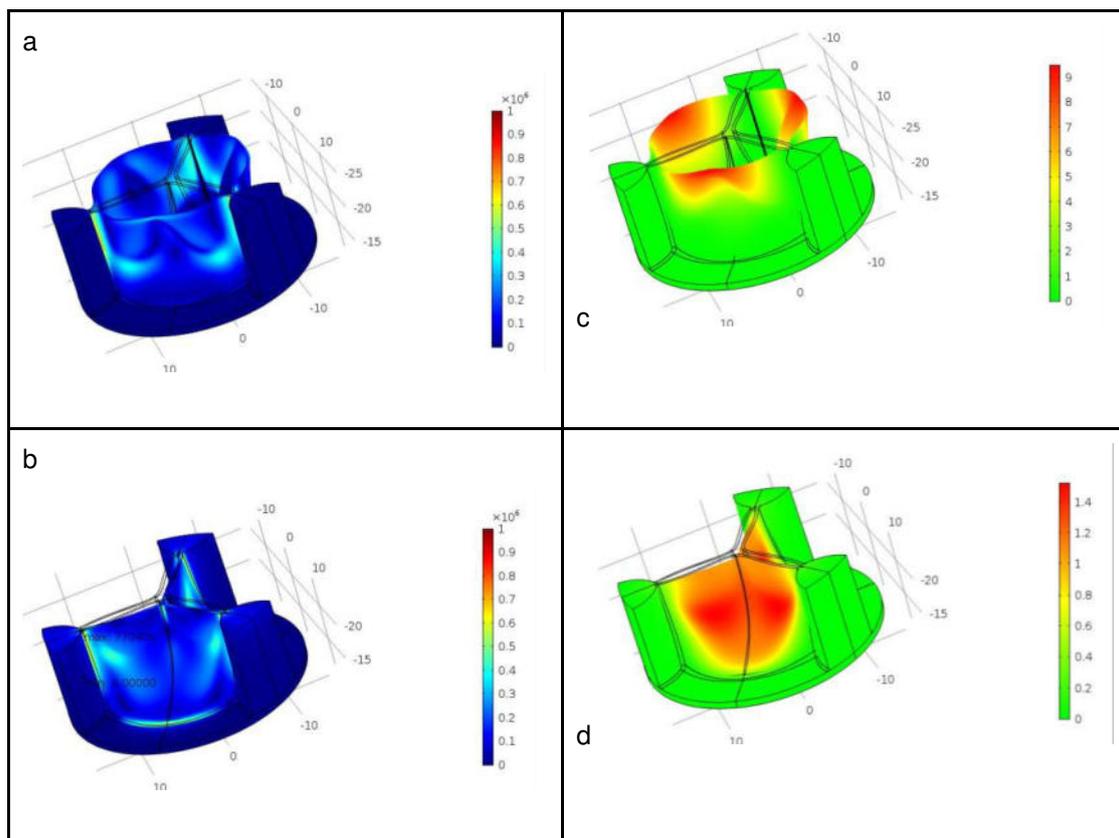


Figura 10. Vista en perspectiva de la válvula compuesta por SEPS (S5): a) tensiones de Von Mises en escala de 0 a 1 MPa para  $t = 0,150$  s, b) tensiones de Von Mises en escalas de 0 a 1 MPa para  $t = 0,500$  s, y c) desplazamientos en escalas en mm -para los mismos instantes- respecto a la geometría no deformada (líneas en color negro) que alcanza un máximo de 9,38 mm en la apertura máxima y d) 1,45 mm durante el cierre.

Los resultados se compararon satisfactoriamente con los publicados en la literatura especializada. A futuro, se evaluarán aspectos particulares tales como: el ancho de cada valva, la altura de la válvula y otros materiales poliméricos, así como sumar simulaciones con interacción fluido-estructura para analizar el reflujo en el momento del cierre de la válvula.

#### AGRADECIMIENTOS

A la UNER y su Facultad de Ingeniería por el sostenimiento económico de este trabajo a través del PID 6194.



## REFERENCIAS

- [1] Morganti, S., Brambilla, N., Petronio, A. S., Reali, A., Bedogni, F., & Auricchio, F. Prediction of patient-specific post-operative outcomes of TAVI procedure: The impact of the positioning strategy on valve performance. *Journal of Biomechanics*, 49(12), 2513–2519. URL <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.10.048>
- [2] Bezuidenhout, D., Williams, D. F., & Zilla, P. Polymeric heart valves for surgical implantation, catheter-based technologies and heart assist devices. In *Biomaterials* (Vol. 36, pp. 6–25). Elsevier Ltd. URL <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.09.013>
- [3] Luraghi, G., Wu, W., de Gaetano, F., Rodriguez Matas, J. F., Moggridge, G. D., Serrani, M., Stasiak, J., Costantino, M. L., & Migliavacca, F. Evaluation of an aortic valve prosthesis: Fluid-structure interaction or structural simulation? *Journal of Biomechanics*, 58, 45–51, 2017. URL <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.04.004>
- [4] Serrani, M., Brubert, J., Stasiak, J., De Gaetano, F., Zaffora, A., Costantino, M. L., and Moggridge, G. D. "A Computational Tool for the Microstructure Optimization of a Polymeric Heart Valve Prosthesis." *ASME. J Biomech Eng.* June 2016; 138(6): 061001. URL <https://doi.org/10.1115/1.4033178>
- [5] Sturla, F., Votta, E., Stevanella, M., Conti, C. A., & Redaelli, A. (2013). Impact of modeling fluid-structure interaction in the computational analysis of aortic root biomechanics. *Medical Engineering and Physics*, 35(12), 1721–1730.  
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002192909190027K?via%3Dihub>
- [6] Traver, J. E., Nuevo-Gallardo, C., Tejado, I., Fernández-Portales, J., Ortega-Morán, J. F., Pagador, J. B., & Vinagre, B. M. (2022). Cardiovascular Circulatory System and Left Carotid Model: A Fractional Approach to Disease Modeling. *Fractal and Fractional*, 6(2).  
URL <https://doi.org/10.3390/fractalfract6020064>
- [7] Cozzens, D., Wei, X., & Faust, R. (2013). Electrospinning of biostable polyisobutylene-based thermoplastic polyurethanes. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 51(6), 452–459. URL <https://doi.org/10.1002/polb.23232>
- [8] Chandran, S.-H. Kim, G. Han, Stress distribution on the cusps of a polyurethane trileaflet heart valve prosthesis in the closed position, *Journal of Biomechanics*, Volume 24, Issue 6, 1991, Pages 385-395, ISSN 0021-9290
- [9] Kidane, A. G., Burriesci, G., Edirisinghe, M., Ghanbari, H., Bonhoeffer, P., & Seifalian, A. M. (2009). A novel nanocomposite polymer for development of synthetic heart valve leaflets. *Acta Biomaterialia*, 5(7), 2409–2417. URL <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.02.025>
- [10] Kraton™ G SEP(S)/EP Polymer Grades (Kraton™ G1730) [https://www.twchinmou.com/Kraton\\_%20G%20ERS%20Polymer%20Grades%20.pdf](https://www.twchinmou.com/Kraton_%20G%20ERS%20Polymer%20Grades%20.pdf) and [https://kraton.com/products/KRATON\\_G\\_SEPS.php](https://kraton.com/products/KRATON_G_SEPS.php)
- [11] Septon™ 2004 SEPTON 2004 - Kuraray (specialchem.com) and SEPTON™ Hydrogenated Styrenic Block Copolymer - Kuraray Elastomer
- [12] Sarrafzadeh-Ghadimi, N., Ghalichi, F., Niroomand-Oscuii, H., & Fatourae, N. (2022). Design of an aortic polymeric valve with asymmetric leaflets and evaluation of its performance by finite element method. *Computers in Biology and Medicine*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105440>
- [13] Brubert, J., Krajewski, S., Wendel, H. P., Nair, S., Stasiak, J., & Moggridge, G. D. (2015). Hemocompatibility of styrenic block copolymers for use in prosthetic heart valves. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 27(2). doi:10.1007/s10856-015-5628-7



## TRENES DE CARGA CON AUTONOMÍA ENERGÉTICA ILIMITADA

José Di Paolo <sup>1</sup> y Eduardo A. Villarino <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cátedra Transporte Ferroviario – Departamento Transporte – UNER, Facultad de Ingeniería  
Ruta Prov. 11, km 10, 3100 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina - [jose.dipaolo@uner.edu.ar](mailto:jose.dipaolo@uner.edu.ar)

<sup>2</sup> División de Proyectos Nucleares. Departamento de Tecnología – INVAP  
Av. Cmte. Luis Piedrabuena 4950 (8400) San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.  
[Men@invap.com.ar](mailto:Men@invap.com.ar)

### RESUMEN

La producción de energía basada en combustión, ha puesto al mundo en los umbrales de una crisis a escala global por el paulatino aumento de la temperatura media anual. La energía nuclear es la más competitiva en costo por MWh, tanto a gran escala (potencias de 1000MW eléctricos) como a pequeña escala (potencias menores a 10MW eléctricos) y con un alto grado de seguridad. Además de la nula contribución al calentamiento global, el suministro de energía está garantizado en todo momento.

A nivel internacional se están desarrollando micro-reactores de potencia (menores a 10MW eléctricos), tanto para aplicaciones terrestres como espaciales y es un hecho que esta tecnología de micro-reactores está madurando rápidamente. La utilización de un enriquecimiento del 19,75 % elimina cualquier traba política y de no proliferación que pudiera haber asociada a la compra de combustible. La capacidad que el país ha adquirido en materia nuclear al cabo de muchos años de actividad seria y sostenida por la Comisión Nacional de Energía Atómica (más de 60 años) permitiría analizar la posibilidad de desarrollar micro-reactores nucleares que dieran otra dimensión a nuestra capacidad de transporte de cargas terrestre por trenes.

Luego, no existiendo ninguna prohibición de carácter legal a nivel mundial, que impida a la República Argentina producir motores nucleares basados en micro-reactores, se vuelve válida la posibilidad de desplegar la investigación y el desarrollo de estas tecnologías para su producción nacional, tendiendo a mover el transporte masivo de cargas con cero emisiones y apuntando a la creación de un mercado de bienes de altísimo valor agregado. Micro-reactores como impulsores, reducirían las emisiones a la atmósfera a lo largo de los 30 años previstos en el diseño, con sólo 3 a 6 recambios de combustible.

**Palabras clave:** *Energía Nuclear, Micro-Reactores, Trenes de Carga, Cero Emisiones*



## 1. INTRODUCCIÓN

Tener un accidente automovilístico fatal es mil veces más probable que el hecho que ocurra un accidente severo en una planta nuclear. No obstante, a pesar de todas las muertes que se cobran las rutas, la gente sigue viajando en automóvil a la vez que no acepta el riesgo asociado a la actividad nuclear que es mucho más bajo que cualquier otra actividad cotidiana. Claramente, esta mala percepción del riesgo está relacionada con asociaciones de la palabra “nuclear” a temas bélicos y bombas atómicas.

La industria nuclear es una de las actividades más seguras desarrolladas por el hombre. Más del 50% del presupuesto de una planta nuclear se destina solamente a sistemas de seguridad y la mayoría de ellos no llegan a emplearse a lo largo de la vida útil de la planta. La mayoría de las personas no tiene presente que el principal problema de la energía nuclear y de los reactores no reside en sus posibilidades técnicas, sino en la lucha burocrática que hay que dar para usos pacíficos de la energía nuclear.

A partir de cálculos muy conservativos se delimitan zonas de evacuación, fuera de las cuales la dosis es menor a la recibida por causas naturales. Es decir, la radiación recibida a causa del accidente es muchísimo menor que la radiación que se recibe por fuentes naturales (por ejemplo, el bombardeo de rayos cósmicos). Dicha zona tiene un radio de 30 km en Chernobyl y de 20 km en Fukushima; hablar de un radio de alcance mayor es erróneo y sería una declaración sin fundamentos técnicos. El CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) por ejemplo, es un reactor de naturaleza muy distinta al de Chernobyl y Fukushima, ya que su diseño contiene sistemas de seguridad pasivos cuya actuación no depende de operadores. Ello hace casi imposible un accidente como los referidos.

No obstante, el accidente de Three Mile Island (1979), la ya citada catástrofe de Chernobyl (1985) y la reacción pacifista a la carrera armamentística nuclear en los años setenta y ochenta, contribuyeron a consolidar en los países desarrollados amplias mayorías contrarias a la energía nuclear. Los distintos segmentos de las clases políticas nacionales optaron, bien por seguir esas corrientes de opinión o bien por no enfrentarse a ellas. De este modo, la pérdida de confianza detuvo los planes de expansión de la producción de electricidad a partir de la energía nuclear en casi todos los países. Prácticamente, la única excepción notable fue la de Francia, que ha llegado a producir más de tres cuartos de su electricidad en centrales nucleares. Llegado el 2006, Electricité de France ya había adoptado la decisión firme de construir un nuevo reactor nuclear de tercera generación. Actualmente la generación de centrales nucleares es la cuarta [1].

El ejemplo más mencionado entre quienes pretenden lanzar de nuevo la opción nuclear es el de Finlandia, país al que se le supone una acendrada conciencia medioambiental y un sólido compromiso con el Protocolo de Kioto y que, sin embargo, en 2009 inauguró su quinto reactor.



Los argumentos favorables a la energía nuclear en los principales foros internacionales sobre cuestiones energéticas, son los esgrimidos por organismos internacionales como la Agencia Internacional de la Energía (AIEA), argumentos que pueden sintetizarse en:

1) La nula contribución al calentamiento global (o cambio climático). La principal ventaja es la gran densidad energética del uranio: 5 gramos de uranio producen la misma energía eléctrica que 810 kilos de carbón, 565 litros de petróleo o 480 metros cúbicos de gas natural. Otra ventaja es el volumen de los productos generados por el funcionamiento de la central y el posterior tratamiento y almacenamiento. Por ejemplo, una central nuclear de 1000 MW (eléctricos, desde ahora MWe) genera en un año 155 toneladas de combustible irradiado, que queda depositado bajo severísimos controles de seguridad. Por otro lado, una central de gas natural de 1000 MWe libera a la atmósfera durante un año 5 millones de toneladas de dióxido de carbono, 14 toneladas de azufre, 12.200 toneladas de óxidos de nitrógeno y 454 toneladas de cenizas.

2) La reducción de la dependencia energética, un problema cada vez más serio a la vista de la inestabilidad geopolítica de zonas como Oriente Medio o de las políticas contrarias a los intereses occidentales de países exportadores de petróleo, como Irán o Venezuela.

3) El encarecimiento de los precios del petróleo frente a la proximidad del cenit de producción (*peak oil*) a escala mundial. En cualquier caso, la demanda energética de países de rápido crecimiento económico como China (o India) redundará en el mantenimiento de precios altos en el mediano plazo. La energía nuclear, ahora competitiva en precios con el petróleo, ha de ser un ingrediente necesario en el menú de transición hacia un futuro menos dependiente del petróleo y del gas natural.

4) La necesidad de un suministro de energía garantizado para el consumo, para lo cual es imprescindible la energía nuclear. En el día a día no se puede depender de fuentes cuya producción varía con imponderables meteorológicos o climáticos (energía solar, eólica, hidráulica). Por el contrario, las centrales nucleares producen todos los días del año, veinticuatro horas al día. En el medio y largo plazo, la energía nuclear puede mitigar la creciente escasez de petróleo y gas natural. Mantener o mejorar el actual nivel de vida, requiere una producción de energía acorde por lo que es imprescindible una energía que ya ha demostrado su eficacia al respecto.

Es claro, además, que todos esos argumentos siguen enfrentándose a uno poderosísimo en sentido contrario. El que pone el acento en la cuestión de los residuos de alta radioactividad. Hasta ahora las soluciones son temporales mientras se encuentra una definitiva. Primero los residuos se almacenan en las mismas centrales nucleares durante su vida útil y luego se almacenan en depósitos -por ahora temporales- en lugares caracterizados por su estabilidad geológica. Nada de ello evita que esos residuos sigan emitiendo niveles altos de radioactividad



durante miles de años, ni se suprime el riesgo de fugas radioactivas en el futuro. La respuesta de los partidarios de esta energía gira hoy en torno a una palabra clave, la “transmutación”. Se trataría de transmutar los elementos radioactivos en otros mucho menos peligrosos. Se habla de reducir en un alto porcentaje dichos residuos, depositándose el resto en almacenamientos geológicos profundos. Algunos creen que algo así se alcanzará en un futuro cercano. Otros creen que, como los almacenamientos temporales pueden durar cien años, éste es tiempo suficiente para que se haya encontrado una solución técnica al problema [2, 3].

Es innegable que la producción de energía mediante ciclos térmicos basados en combustión, ha puesto al mundo en los umbrales de una crisis a escala global sin precedentes por el paulatino aumento de la temperatura media anual. Ello ha terminado con muchas formas de vida a la vez que asecha constantemente a la humanidad: en su salud y en su bienestar en general. Parece ser -por todo lo dicho- el momento indicado para plantear nuevos objetivos de utilización de la energía nuclear, como por ejemplo la propulsión de trenes de carga a través de micro-reactores nucleares, satisfaciendo todos los requisitos dimensionales, de potencia y seguridad, para dar al transporte terrestre una evolución hacia las cero emisiones con las siguientes ventajas:

- 1) Autonomía ilimitada para recorrer los circuitos de transporte a altas velocidades, una situación costosísima para otras fuentes de energía.
- 2) Simplicidad del sistema de vías al no requerir electrificación ni sistemas de recarga de combustibles en estaciones intermedias.
- 3) Posibilidad de ubicar el reactor en un vagón de servicio, aparte de la locomotora pero solidario a ella, donde se centralice la generación de energía para ser transportada desde allí a los motores de tracción.

En este trabajo se presenta una discusión y lineamientos generales tendientes a la generación de proyectos de micro-reactores nucleares nacionales para ser utilizados como propulsores, particularmente, en trenes de carga.

## 2. MICRO-REACTORES NUCLEARES

### 2.1 Antecedentes

En los años 60 se iniciaron diversos programas para el desarrollo de reactores nucleares para aplicaciones espaciales, tanto en los Estados Unidos como en la Unión Soviética. La URSS lideró el programa más extenso en términos de lanzamientos de la historia, basado en tres diseños principales: Romashka, Bouk y TOPAZ [4]. La línea de reactores Bouk, fue considerada la más exitosa de la historia, ya que entre 1967 y 1985 se lanzaron 37 reactores de esta gama, alimentando con 2 KW de potencia eléctrica una serie de satélites de espionaje. En los Estados Unidos entre los años 1958 y 1978 se sostuvo el programa SNAP (Systems for Nuclear Auxiliary



Power) [5], del cual el único reactor SNAP de fisión en ser lanzado al espacio fue el SNAP-10A en 1965, con una capacidad de generación de 500 watts de potencia eléctrica. Por otro lado, el mayor impulso lo tomaron los generadores termoeléctricos de radioisótopos, también desarrollados en el programa SNAP. Estos no generan energía por fisión, sino en base al decaimiento radiactivo de un radioisótopo (por ejemplo, Pu-238, Am-241, Sr-90, Po-210, etc.). El éxito fue rotundo y es al día de hoy que se siguen utilizando para abastecer de energía a sondas espaciales y robots que viajan a explorar el planeta Marte.

Los micro-reactores terrestres por su parte, son reactores nucleares muy pequeños, diseñados para abastecer de forma confiable y resiliente demandas energéticas en localidades remotas por un intervalo de tiempo muy prolongado. La potencia típica erogada por este tipo de reactores suele rondar entre 1 y 10MWe, es decir, una cantidad hasta 1000 veces menor que la potencia de un reactor convencional. Esta característica particular le permite a la industria nuclear penetrar en mercados eléctricos descentralizados, donde el precio de la electricidad es más caro y las tecnologías nucleares actuales no se encuentran compitiendo. Los micro-reactores no fueron concebidos para rivalizar contra los grandes reactores convencionales, sino contra medios alternativos de energía (generadores Diesel, turbinas de gas, energías renovables, etc.). Con este tipo de reactores se busca complementar el abanico de aplicaciones de la energía nuclear que, hoy en día, se encuentra acotado a los grandes reactores (más de 1000 MWe). Es un hecho que la tecnología de micro-reactores está en auge y con más de una docena de diseños [6-12].

Los micro-reactores pueden funcionar como una batería nuclear las 24 horas del día durante los 365 días del año, y están diseñados para funcionar hasta 10 años sin necesidad de apagarse para hacer recambio de combustibles. Esto los convierte en una alternativa ideal para abastecer demandas energéticas de sectores aislados como, por ejemplo: comunidades polares, islas, minas, industrias e instalaciones de defensa. Estos reactores pueden ser fabricados y ensamblados en fábricas y luego ser transportados en camiones, trenes, barcos o incluso en aviones debido a su reducido peso y tamaño.

La tecnología de micro-reactores proporciona una combinación de beneficios no alcanzada por otras fuentes de energía: son altamente resilientes, libres de emisiones de gases de efecto invernadero, flexibles, pueden producir electricidad a demanda y pueden funcionar durante años en forma continua. Otro beneficio importante que debe tenerse en cuenta es la cantidad de superficie ocupada, los micro-reactores requieren menos de 20 m<sup>2</sup> por cada MWe, lo cual es menos de la mitad de lo que ocupa una estación generadora Diesel.

Los micro-reactores pueden producir energía bajo demanda y operar independientemente de las condiciones climáticas. Presentan excelentes características de seguimiento de carga, atributo que los vuelve adecuados para servir con cargas variables. Un denominador común entre los diferentes diseños de micro-reactores es su facilidad de operación debido a su pequeño tamaño,



baja potencia, nivel inherente de seguridad y la incorporación de avances tecnológicos. Muchos de los diseños propuestos operan en forma autónoma, requiriendo una cantidad ínfima de acciones humanas. Los micro-reactores son similares a los reactores de investigación en su tamaño y magnitud de riesgo, los cuales poseen una larga historia de operación exitosa y segura. El factor decisivo en el éxito del desarrollo de micro-reactores es su viabilidad económica. Un estudio llevado a cabo por el Nuclear Energy Institute de los Estados Unidos en 2019 estima que el costo para generar electricidad estará entre 0,14 USD/kWh y 0,41 USD/kWh. A medida que las empresas continúen produciendo micro-reactores, se espera que los costos futuros oscilen entre 0,09 USD/kWh y 0,33 USD/kWh. Por otro lado, los generadores Diesel en promedio, generan electricidad a costos entre 0,15 USD/kWh y 0,60 USD/kWh.

## 2.2 Requerimientos para un propulsor nuclear

Para analizar la factibilidad de construcción de un tren propulsado por energía nuclear hay que tener en cuenta que el reactor debe cumplir, además de los requerimientos para operar en condiciones estáticas, los derivados de su uso específico:

- 1) Debe poder operar en forma estable y confiable montado en una plataforma sometida a movimiento variable en sentido longitudinal.
- 2) Debe poder ser instalado en un compartimiento de dimensiones del tipo de un contenedor.
- 3) Debe poder aceptar exigencias de potencia elevadas.
- 4) Debe poder detenerse y mantenerse apagado en cualquier situación operativa, accidental o producto de una avería.
- 5) Debe asegurar la refrigeración del núcleo en caso de siniestros.
- 6) Debe poseer estructuras, componentes y sistemas importantes para la seguridad aptos para soportar las cargas dinámicas derivadas de fenómenos naturales.
- 7) Debe emitir el menor nivel de ruido posible en las diferentes condiciones de operación.
- 8) Debe estar correctamente aislado para evitar elevadas temperaturas en las inmediaciones del reactor.

## 3. FACTIBILIDAD DE UN PROYECTO ARGENTINO

Es necesario expresar -de antemano- que no existe ninguna prohibición de carácter legal que impida a la República Argentina -si así lo decidiera- producir trenes con propulsión nuclear. Ningún instrumento internacional actualmente vigente veda el desarrollo de esa clase de bienes a los Estados, poseedores o no de armas nucleares. Dicho ello, no puede ignorarse que en



algunos casos ha habido en esta materia dudas e interpretaciones encontradas. Es innegable que no hay tratado alguno de desarme que imposibilite la construcción o adquisición de bienes nucleares, más aún, con fines pacíficos. Existen sí, ciertos acuerdos relativos al control de las armas nucleares y a la no proliferación que tienen vinculación, por ejemplo, con los submarinos nucleares [13].

El hecho de que no existan impedimentos de orden legal que inhiban el desarrollo o adquisición de trenes de propulsión nuclear no implica que, si la República Argentina -o cualquier otro país no desarrollado- decidiese embarcarse en esa vía, no se produzcan reacciones de origen exterior predominantemente negativas. Tiene sentido reflexionar acerca de esas probables críticas que, aunque con fundamentos carecerán de carácter jurídico. Al mismo tiempo, cabe señalar que además de las críticas y presiones que pueden emanar de fuentes internacionales, seguramente habrá cuestionamientos de procedencia interna –probablemente- de mayor envergadura.

La tecnología implicada en los micro reactores de potencia (~ 10 MWe) [14-19] que se están desarrollando, tanto para aplicaciones terrestres como espaciales, está optimizándose rápidamente, con varios diseños en desarrollo y múltiples esfuerzos internacionales.

Además de la pequeñez relativa de estos reactores, se caracterizan por estar diseñados para abastecer de forma confiable demandas energéticas y son capaces de funcionar (incluso en plataformas móviles) de manera autónoma durante varios años sin necesidad de apagarse para hacer recambio de combustibles, todo ello con independencia de las condiciones climáticas.

La capacidad que el país ha adquirido en materia nuclear al cabo de muchos años de actividad seria y sostenida por la Comisión Nacional de Energía Atómica (más de 60 años) y el sector científico y las universidades asociadas, permitiría analizar la posibilidad de desarrollar un tren nuclear que diera otra dimensión a nuestra capacidad de transporte de cargas, ya sea por grandes extensiones, a través de geografías con grandes pendientes o en alta velocidad por el vasto territorio nacional.

La construcción de un tren con propulsión nuclear tendría otros efectos muy beneficiosos desde el punto de vista del desarrollo tecnológico, nuclear y de nuestras exportaciones. Por ejemplo, el proyecto Atucha II, destinó desde el año 2005 hasta el 2011 la mayor parte de su presupuesto a bienes y servicios nacionales donde están incluidas la mayoría de las empresas de ingeniería del país, así como también algunas de las principales universidades argentinas.

Esta tecnología puede ser desarrollada, además, para abastecer demandas energéticas de sectores aislados como, por ejemplo: comunidades árticas/antárticas, islas, minas, industrias e instalaciones de defensa. Incluso pueden llegar a suministrar electricidad de emergencia en zonas de desastres naturales.



#### 4. MICRO-REACTOR COMERCIAL HOLOS

Para el desarrollo sería posible basarse en los micro-reactores: estático e-Vinci de Westinghouse [8] o el transportable de Holos. Éste último es un micro-reactor móvil [20] con una potencia eléctrica de diseño de 3 a 13 MWe. La vida útil del núcleo se prevé entre 12 y 20 años. El sistema de conversión de energía Holos está integrado y sellado por completo con módulos de combustible que individualmente son subcríticos. Este micro-reactor puede funcionar en modo isla en sitios sin infraestructura de red eléctrica para satisfacer demandas eléctricas locales y con capacidades autónomas de seguimiento de carga. Una característica distintiva de este micro-reactor es la capacidad de suministrar electricidad de emergencia en zonas de desastres naturales. Holos puede ser completamente integrado en contenedores normalizados, lo cual facilita su transporte (ver Figura 1). El núcleo de Holos se forma mediante el acoplamiento de múltiples módulos subcríticos independientes (ver Figura 2).

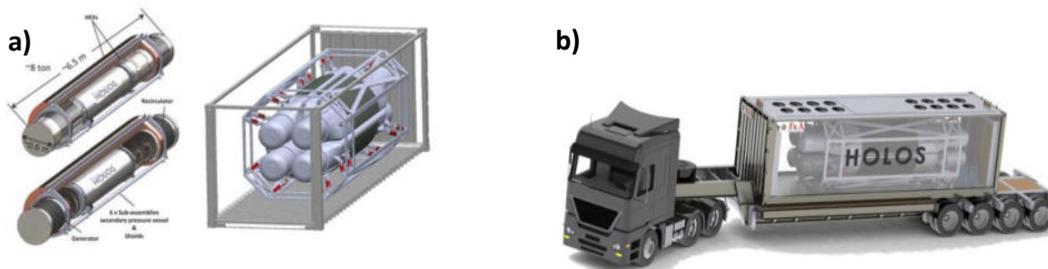


Figura 1: a) Esquema del reactor Holos. b) Esquema de un micro-reactor siendo transportado por camión.

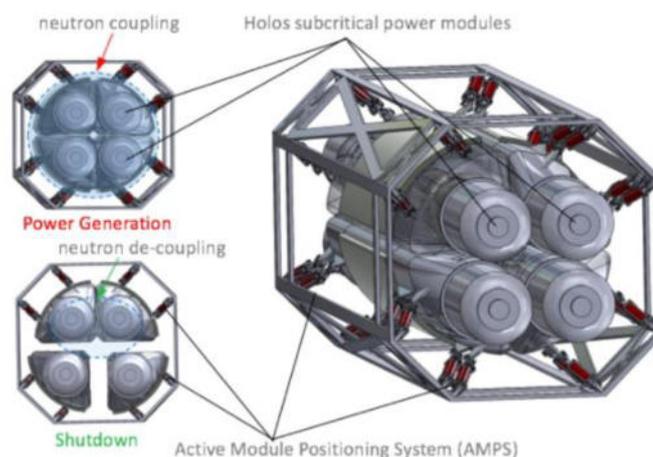


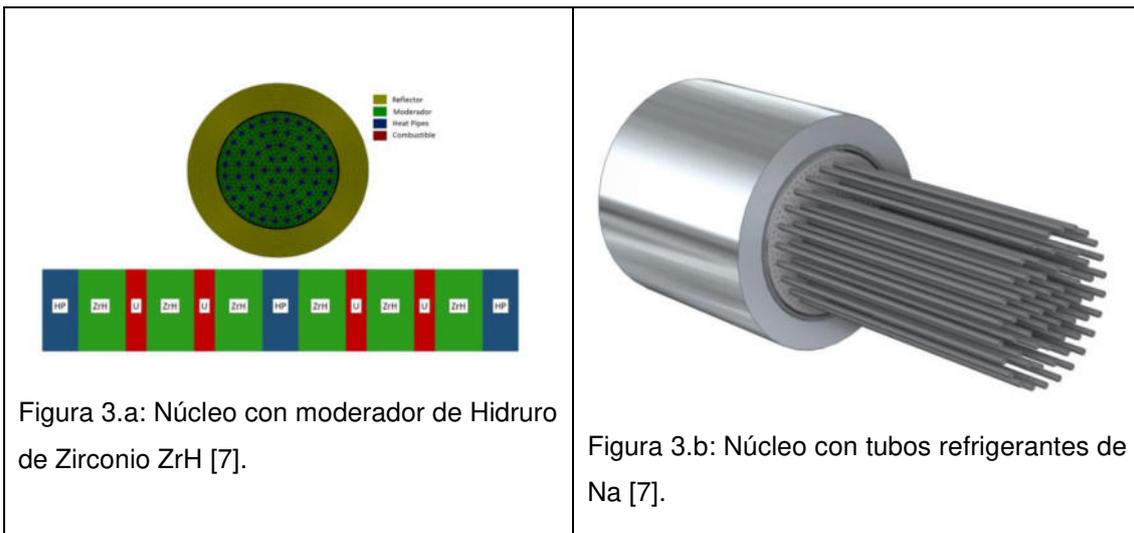
Figura 2: Esquema de los módulos subcríticos del reactor Holos.

Los módulos se componen de una matriz de grafito (moderador) con orificios para alojar combustibles (enriquecidos al 19,75 %) y permitir el paso del refrigerante. La refrigeración de cada módulo combustible subcrítico se lleva a cabo de forma independiente, por medio de la circulación de un fluido gaseoso (Helio o CO<sub>2</sub>). Cada módulo sub-crítico incluye el combustible,



intercambiadores de calor y turbo maquinaria para transformar el calor en energía eléctrica. El control de reactividad se basa en un sistema hidráulico que acerca o aleja los módulos combustibles, modificando de esta manera la tasa de fuga de neutrones.

Una arquitectura alternativa a esta, sería la de un núcleo de hidruro de zirconio (ZrH) donde se alojen las varillas de combustible y tubos absorbedores de calor, a través del cambio de fase del Na contenido en su interior (ver Figura 3).



## 5. PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE UN TREN NUCLEAR

La construcción de un tren propulsado por energía nuclear demandará básicamente tres etapas que pueden llegar a solaparse en el tiempo:

- 1) Estudio de factibilidad técnico-económica. Análisis del aire ambiente como fuente fría.
- 2) Desarrollo del tren.
- 3) Construcción del tren

En la primera etapa debe definirse el tipo de máquina teniendo en consideración que el aire ambiente será el sumidero de calor o fuente fría. Asimismo, debe establecerse como condición la utilización de las vías actuales teniendo en cuenta las trochas y cargas portantes, de modo de no requerirse nueva infraestructura. Estos requerimientos podrán ser técnicamente difíciles de alcanzar pero conformarán la meta esencial del diseño hacia el cual se deben concentrar los esfuerzos. Las desviaciones debidas a problemas tecnológicos o económicos respecto a los objetivos operativos serán auditadas por la autoridad que reglamenta el transporte. Definido el tipo de tren debe diseñarse el sistema de propulsión y todos sus componentes en una primera



distribución interna. Este primer diseño permitirá: calcular los parámetros operativos básicos, efectuar los primeros cálculos estructurales y realizar el balance de cargas de generación. Deben identificarse para cada equipo o sistema los problemas no resueltos a nivel del proyecto y elaborarse los programas de desarrollo correspondiente. Finalizando la primera etapa se evaluarán los costos y los tiempos de ejecución con sus respectivas incertezas.

La segunda etapa consiste principalmente en la construcción y experimentación de un reactor prototipo en laboratorio, como también de parte del sistema de propulsión. El reactor y los equipos térmicos asociados (máquinas con ciclos Stirling o paneles termoeléctricos) se montarán en una sección del tren que a su vez estará soportada por un bastidor con posibilidades de imprimir aceleraciones controladas. El objetivo es someter el reactor a condiciones límites de diseño. Pasada la etapa de experimentación destinada a la validación del reactor nuclear y de algunos equipos asociados, el prototipo continuará funcionando para acumular experiencia que permita diagramar acciones preventivas en la operación del tren. Además, ésta será la base de la escuela de preparación y entrenamiento del personal maquinista. Esta etapa contiene a su vez diferentes fases destinadas a la fabricación de instalaciones de ensayo tales como circuitos de alta presión, conjunto crítico, bancos de ensayo de mecanismos de accionamiento de barras de control, bombas, válvulas y otros componentes. Paralelamente se llevarán a cabo los estudios de detalle, tanto estructurales como hidrodinámicos. Gran parte del esfuerzo se dedicará a la definición, adquisición, adaptación o desarrollo y construcción de los equipos auxiliares. El objetivo de esta segunda etapa es contar con la ingeniería necesaria para la construcción del tren y de las instalaciones de apoyo.

La tercera etapa es la construcción del primer tren y la realización del programa de puesta en servicio y los ensayos correspondientes. Se deben construir además las instalaciones de apoyo en estaciones y talleres de mantenimiento.

Sobre el tema de los costos involucrados en el desarrollo y construcción de un tren nuclear, existe una persistente confusión abonada por frecuentes comentarios de personas que sólo conocen tangencialmente el estado de desarrollo de la tecnología nuclear en la Argentina. Los desarrollos de las plantas de enriquecimiento de uranio, de esponja de zirconio, de elementos combustibles, de berilio, de extracción, tratamiento y purificación de minerales uraníferos han sido encarados exitosamente y dichas plantas se encuentran operando. Se han elaborado y adquirido códigos de cálculo neutrónico, termo-hidráulico, de resistencia estructural, hidrodinámico, electromagnéticos y de diseño de todos los servicios auxiliares de una planta nuclear. Se han construido reactores de experimentación y ensayo, circuitos de alta presión y temperatura, laboratorios de análisis de materiales y de corrosión. Pueden diseñarse los sistemas de control y construirse en el país toda la instrumentación necesaria incluyendo sistemas expertos de última generación. Se han creado grupos de diseño en todas las áreas y



la industria ha contribuido sustancialmente a la construcción de las centrales nucleares que existen en el país; pero sobre todo se cuenta con miles de especialistas e instituciones académicas. En este sentido, la UNER a través de su Facultad de Ingeniería puede participar y coordinar proyectos de esta envergadura, necesariamente a ejecutar por consorcios públicos o públicos-privados.

En este marco, en el aprovechamiento y optimización de estos recursos y en su profundo conocimiento, es que se podrían afrontar los costos y los tiempos necesarios para el desarrollo y construcción de un tren nuclear.

## 6. CONCLUSIONES

Históricamente el desarrollo de los reactores para propulsión de submarinos precedió a los reactores para generación eléctrica, de manera que el costo que significó la creación de la tecnología nuclear, fue en gran parte absorbido por el desarrollo del submarino nuclear. En la Argentina el proceso sería inverso. Hubo un importante programa para el desarrollo de centrales nucleares que adquirió tecnología y generó una importante infraestructura. Para el país, la construcción de un tren propulsado por energía nuclear significaría una ampliación adicional y una optimización de los recursos humanos y materiales disponibles para la generación de bienes de muy alto valor agregado para un mercado del que se pueda ser líder. Están dadas todas las condiciones tecnológicas para concretar el proyecto sin que ello implique minimizar el esfuerzo y los riesgos involucrados.

## AGRADECIMIENTOS

Al Departamento Transporte de la FI-UNER por el apoyo a esta propuesta de desarrollo e innovación.

## REFERENCIAS

- [1] Juan Carlos Rodríguez, Víctor Pérez-Díaz, "Discusión y opinión pública sobre la energía nuclear en España", PANORAMASOCIAL, N° 5, Primer Semestre, 2007.
- [2] Daniel Cano Ott, La transmutación de los residuos radioactivos, <http://www.rsef.org>, 2008
- [3] Raymond L., Nuclear energy: an introduction to the concepts, system and applications of nuclear processes. Oxford: Elsevier, 2009.
- [4] Buden, D., Summary of space nuclear reactor power systems, 1983-1992, Idaho National Engineering Lab., 1993.



- [5] Corliss, W. R., SNAP nuclear space reactors. US Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, 1966.
- [6] Peakman A., Owen H., Abram T., "The core design of a Small Modular Pressurised Water Reactor for commercial marine propulsion", *Progress in Nuclear Energy* 113, 175–185, 2019.
- [7] Ruiz K. S., "Diseño Conceptual De Micro-Reactores De Potencia". Instituto Balseiro, <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/925/>, 2020.
- [8] Westinghouse, eVinci Micro- Reactor, <https://www.westinghousenuclear.com/new-plants/evinci-micro-reactor, 2020>.
- [9] Leipner, C., Westinghouse small modular reactors: Innovative technologies for a flexible energy matrix. Symposium on nuclear technologies: Sustainable development for Brazil; Rio de Janeiro, RJ (Brazil); 4 Sep 2017.
- [10] Hernandez, R., Todosow, M., Brown, N. R., Micro heat pipe nuclear reactor concepts: Analysis of fuel cycle performance and environmental impacts. *Annals of Nuclear Energy*, 126, 419-426, 2019.
- [11] Sterbentz, J. W., Werner, J. E., Hummel, A. J., Kennedy, J. C., O'Brien, R. C., Dion, A. M., et al. Preliminary assessment of two alternative core design concepts for the special purpose reactor. *Inf. tec.*, Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States), 2017.
- [12] Kennedy, J. C., Sabharwall, P., Bragg-Sitton, S. M., Frick, K. L., McClure, P., Rao, D., Special purpose application reactors: Systems integration decision support. Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States), 2018.
- [13] Julio C. Carasales, Carlos Castro Madero y José M. Cohen, Argentina y el submarino de propulsión nuclear, posibilidades y dificultades, Consejo Argentino para las Relaciones Internacionales, 1992.
- [14] Peakman A., Hywel Owen, Tim Abram, "The core design of a Small Modular Pressurised Water Reactor for commercial marine propulsion", *Progress in Nuclear Energy* 113, 175–185, 2019.
- [15] Kevin Sebastián Ruiz, "Diseño Conceptual De Micro-Reactores De Potencia". Instituto Balseiro, 2020.
- [16] <https://www.westinghousenuclear.com/new-plants/evinci-micro-reactor>
- [17] Leipner, C., Westinghouse small modular reactors: Innovative technologies for a flexible energy matrix. Symposium on nuclear technologies: Sustainable development for Brazil; Rio de Janeiro, RJ (Brazil); 4 Sep 2017.
- [18] Hernandez, R., Todosow, M., Brown, N. R. Micro heat pipe nuclear reactor concepts: Analysis of fuel cycle performance and environmental impacts. *Annals of Nuclear Energy*, 126, 419-426, 2019.
- [19] Sterbentz, J. W., Werner, J. E., Hummel, A. J., Kennedy, J. C., O'Brien, R. C., Dion, A. M., et al. Preliminary assessment of two alternative core design concepts for the special purpose reactor. *Inf. tec.*, Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States), 2017.
- [20] <http://www.holosgen.com/>



Trabajo correspondiente al Área Temática de Energía y Medio Ambiente

## Cálculo del retraso límite de acción de compuerta entre dispositivos IGBT conectados en serie y análisis de un circuito de balance para mitigarlo

Martín Alejandro Torres<sup>1</sup>, Roberto Ricardo Ruiz<sup>2</sup>, Jorge Omar Marighetti<sup>3</sup>, Mario Eduardo De Bórtoli<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste – [elepotunne@gmail.com](mailto:elepotunne@gmail.com).

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste – [1roberuiz@gmail.com](mailto:1roberuiz@gmail.com).

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste – [jomaringha@gmail.com](mailto:jomaringha@gmail.com).

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería, UNNE Universidad Nacional del Nordeste –  
[m\\_debortoli@yahoo.com.ar](mailto:m_debortoli@yahoo.com.ar).

### RESUMEN

Se calculan y analizan mediante métodos numéricos, y metodologías de confiabilidad en ingeniería, valores de retraso límite de acción de compuerta al cierre y apertura, entre transistores IGBT conectados en serie. Se define una función de falla, de variables de distribución normal, con valores medios, y desvíos estándar del 50 % de estos, obtenidos de la hoja de datos del IGBT, lo cual contempla retrasos generados por capacitancias e inductancias parásitas. De la función de falla, utilizando el algoritmo FORM (First Order Reliability Method), se obtienen los valores de retraso límite entre transistores, que debe mitigar un circuito de balance, para evitar las sobre tensiones generadas por este retraso. Se debe asegurar una probabilidad de falla de 0.01 %, en 40 IGBT de 650 V de tensión máxima, conectados en serie. Estos dispositivos, pertenecen a la rama de un inversor trifásico de 2 niveles, de 18 kVcc y 200 kVA, en media tensión. Luego, se analiza un circuito de balance que consta de un divisor capacitivo, un divisor resistivo, un diodo y resistencia de realimentación, que actúan sobre la compuerta del IGBT. Este circuito se ensaya de manera numérica, sobre un circuito de 2 IGBT de 650 V, accionados por señales PWM (Pulse Width Modulation) de 10 kHz, con un retraso entre ambas, igual a los antes calculados. La carga es de tipo R-L, de 20 Ohm y 20 mH, respectivamente, la tensión de alimentación es de 1000 V y la corriente de 25 A. Se simulan las condiciones de retraso de señales, al cierre y apertura de los transistores, con y sin circuito de balance. Los resultados muestran, cómo el retraso calculado genera sobre tensiones que exceden los valores nominales de 650 V del IGBT, lo que justifica un circuito de balance, el cual mantiene los valores nominales de la tensión sobre los dispositivos.

**Palabras Clave:** IGBT Conectados en Serie; Inversores; Circuito de Balance; Electrónica de Potencia



## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de la electrónica de potencia se muestra con un creciente avance en distintas áreas, una de ellas es la de la transmisión de energía en corriente continua, como las HVDC (High Voltage Direct Current) o MVDC (Medium Voltage Direct Current).

En nuestro país, la infraestructura energética nacional enfrenta en la actualidad, un fuerte desafío referido a la distribución territorial de la energía eléctrica.

Un análisis de la disponibilidad energética en la región, muestra un deficitario desarrollo de redes de transporte de energía en media y alta tensión, en las provincias del NOA y NEA del país; en el caso de la provincia de Chaco, específicamente, existe un gran déficit de desarrollo energético en la región de "El Impenetrable" (Departamentos de General Güemes y Almirante Brown), [1, 2]. En éste contexto, se presenta como una opción viable la transmisión de energía en corriente continua (CC) en media tensión, como una alternativa respecto a la corriente alterna (AC), con objeto de optimizar el sistema de transporte de la energía eléctrica.

Los componentes fundamentales en la transmisión de CC son las etapas de conversión (rectificadora e inversora). El convertidor de fuente de tensión (VSI, Voltaje Source Inverter), es el elemento utilizado en la transformación de corriente continua a corriente alterna, el cual trabaja como una fuente de voltaje, cubriendo una amplia gama de aplicaciones en baja, media y alta tensión [3]. Para obtener las tensiones de trabajo necesarias, con los dispositivos IGBT actuales, es necesario recurrir a la conexión en serie de los mismos, lo cual añade una complejidad al sistema inversor, debido a que por diversos motivos, como capacitancias, inductancias parásitas, o deficiencias intrínsecas de los transistores, estos no trabajan en perfecta sincronía. Por este motivo, están expuestos a tensiones que son mayores de las que pueden soportar, lo que desemboca en la falla del sistema inversor en su totalidad.

Por otro lado, existen formas activas y pasivas de buscar un balance entre la distribución de tensiones de los transistores conectados en serie, siendo las primeras las más eficaces, pero de mayor costo y complejidad de diseño, más aun cuando la cantidad de dispositivos IGBT conectados en serie es significativa.

Por lo mencionado anteriormente, en este trabajo, se presenta una metodología de cálculo utilizando técnicas de confiabilidad en ingeniería, aplicando el algoritmo FORM (First Order Reliability Method) [4], para obtener un valor de retraso límite entre transistores, cuyos efectos debe ser capaz de absorber el circuito de balance. Este circuito, debe lograr que las tensiones sobre los IGBT, no sobrepasen los valores máximos de los mismos para el retraso límite calculado, siendo este último, el valor para lograr una probabilidad de falla de 0.01 % (confiabilidad  $\beta$  de 3), para 40 IGBT de 650 V de tensión máxima, conectados en serie.



También, se analiza mediante simulaciones numéricas realizadas con el software LTspice® [5], un circuito de balance que consta de un divisor capacitivo, un divisor resistivo, un diodo y una resistencia de realimentación que actúan sobre la compuerta del IGBT.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Descripción del dispositivo inversor

Las características de la carga y potencia del inversor son descriptas en el artículo [6], siendo la potencia necesaria de 0.2 MW y 18 kVcc, en el lado de media tensión. En este caso, se plantea un inversor de 2 niveles, lo cual necesita de más dispositivos IGBT conectados en serie, y lleva a un cálculo de retraso límite conservador.

El transistor en estudio es un IGBT FGW50XS65C, de la marca FUJI, cuyos parámetros máximos y características eléctricas, son mostradas en las Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Valores máximos a 25 °C IGBT FUJI modelo FGW50XS65C

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Tensión colector-emisor	$V_{CES}$	650	V
Tensión compuerta-emisor	$V_{GES}$	$\pm 20$	V
Corriente continua de colector	$I_{C@25}$	77	A
Corriente de conducción del diodo	$I_{F@25}$	80	A
Temperatura de funcionamiento de la juntura	$T_{vj}$	-40 ~ +175	°C

Tabla 2. Características eléctricas IGBT FUJI modelo FGW50XS65C

Parámetro	Símbolo	Condiciones	Valor Típico	Unidad
Tiempo de retraso al encendido	$t_{d(on)}$	$T_{vj} = 150 \text{ °C}$	32	ns
Tiempo de subida	$t_r$	$V_{CC} = 400 \text{ V}$	24	
Tiempo de retraso al apagado	$t_{d(off)}$	$I_C = 25 \text{ A}$	280	
Tiempo de caída	$t_f$	$V_{GE} = 15 \text{ V}$ $R_G = 10 \text{ } \Omega$	21	

Este transistor, posee una tensión entre colector y emisor máxima de 650 V, por lo tanto, se plantea el uso de 40 IGBT en serie, por lo tanto, 80 por rama, en una disposición como se muestra en la Figura 1.

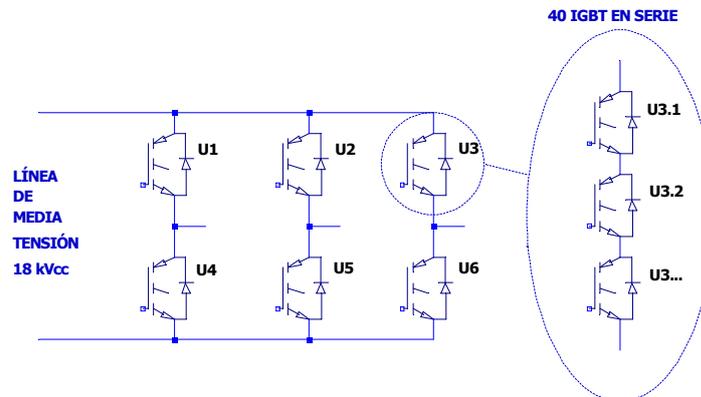


Figura 1: Circuito inversor con IGBT conectados en serie.

## 2.2. Función de falla o retraso límite

Para el cálculo del retraso límite se define una función de falla con las siguientes características

$$0 = LIM(X) - R(X) \quad (1)$$

Esta ecuación busca definir, cual es el valor de retraso límite, que debe ser capaz de absorber el circuito de balance. El circuito elegido, debe lograr que las tensiones sobre los IGBT no sobrepasen los valores máximos para el retraso calculado, siendo este último, el valor para una probabilidad de falla de 0.01 %.

LIM(X) es una variable aleatoria de distribución log-normal, denominada límite de falla.

R(X) es una función que depende del vector aleatorio de distribución normal  $\mathbf{X}$ .

Se analizan, de forma separada, los dos escenarios posibles con el transistor IGBT, cierre y apertura del mismo, por lo tanto, se definen dos funciones de falla.

Para la apertura del transistor, las variables aleatorias serán el tiempo de retraso al apagado  $t_{d\_off}$  (Turn-off Delay Time), y el tiempo de caída de la señal  $t_f$  (Fall Time). Ambas funciones son consideradas como variables de tipo normal, siendo su valor medio el que se encuentra en la hoja de datos para 150 °C, y el desvío estándar un 50 % del valor medio.

Para el cierre del IGBT, las variables aleatorias serán el tiempo de retraso al encendido  $t_{d\_on}$  (Turn-on Delay Time), y el tiempo de alza de la señal  $t_r$  (Rise Time), ambas consideradas como variables de tipo normal.

La función para el cierre del IGBT, es descripta por la siguiente expresión.

$$R(\mathbf{X}) = |N(t_{on}, 0.5 * t_{on}) - t_{on}| + |N(t_r, 0.5 * t_r) - t_r| \quad (2)$$

y para la apertura del transistor, la expresión es.



$$R(\mathbf{X}) = |N(t_{off}, 0.5 * t_{off}) - t_{off}| + |N(t_f, 0.5 * t_f) - t_f| \quad (3)$$

Se relativiza a las variables aleatorias con respecto a sus valores medios, debido a que se busca modelar la aleatoriedad en el desvío de dicho valor.

Se utilizan valores absolutos, debido a que se deben tener en cuenta desvíos positivos y negativos. Por lo tanto, con esta ecuación se busca cuantificar cuanto se aleja el IGBT de su valor medio, entendiendo que en dispositivos de condiciones ideales, el transistor no se aleja de este valor.

El límite de falla LIM, es de

$$\sigma_x = 0.3 * \mu_x \quad (4)$$

$$LIM(X) = LN(\mu_x, \sigma_x) \quad (5)$$

Siendo la ecuación (5), una variable aleatoria log-normal con valor medio  $\mu_x$ , y desvío estándar igual a un 30 % de  $\mu_x$ .

Se considera una variable de estas características, para evitar valores negativos, y para tener en cuenta una completa aleatoriedad en el comportamiento entre los IGBT, debido a que el límite ya no será el mismo para todos los componentes del sistema.

### 2.3. Modos de falla

Como se mencionó anteriormente, se plantea la conexión de 40 IGBT en serie. De esta manera, las probabilidades de falla aumentan. Asumiendo que cada transistor es un modo de falla, existirán 40 modos de falla, uno por dispositivo IGBT conectado en la rama en estudio.

El cálculo se realiza con límites de segundo orden, lo cual entrega un límite de confiabilidad superior e inferior, o de manera similar, un límite de probabilidad de falla superior e inferior. El límite inferior de confiabilidad, o la mayor probabilidad de falla, será lo que guíe la búsqueda del valor límite. El valor de confiabilidad  $\beta$  inferior debe ser, como mínimo de 3, y el valor de probabilidad de falla superior, como máximo de 0.01 % [4].

### 2.4. Obtención del límite de falla LIM

Una vez definida la ecuación (1), se utiliza el software RELAN (Foschi et al., 2005), con el cual se aplica el algoritmo FORM, y se verifican distintos valores límite, hasta que la probabilidad de falla sea de 0.01 % (confiabilidad  $\beta$  de 3). Luego, se realiza el mapeo del valor medio, y desvío estándar de distribución log-normal, a los valores de distribución normal asociados,  $N(\mu_y, \sigma_y)$ , de la siguiente manera.

$$\mu_y = \ln \{ \mu_x / [ 1 + (\sigma_x / \mu_x)^2 ]^{1/2} \} \quad (6)$$

$$\sigma_y = \{ \ln [ 1 + ( \sigma_x / \mu_x )^2 ] \}^{1/2} \quad (7)$$

Con las ecuaciones (6) y (7), se obtiene el valor de extremo superior que cubre el 99.99% de los casos.

$$\text{ext\_sup}_y = \mu_y + 3 * \sigma_y \quad (8)$$

Por último, se regresa la variable (8) a su distribución log-normal original.

$$\text{ext\_sup}_x = e^{\text{ext\_sup}_y} \quad (9)$$

Siendo la ecuación (9), el valor de retraso límite cuyos efectos debe ser capaz de mitigar el circuito de balance seleccionado. El circuito debe asegurar, que los valores de tensión sobre los IGBT, no superen los valores máximos de estos, cuando se aplica el retraso límite calculado.

## 2.5. Circuito de balance

El circuito para que las tensiones sobre los transistores no sobrepasen los valores máximos, Figura 2, presenta la configuración que se analiza.

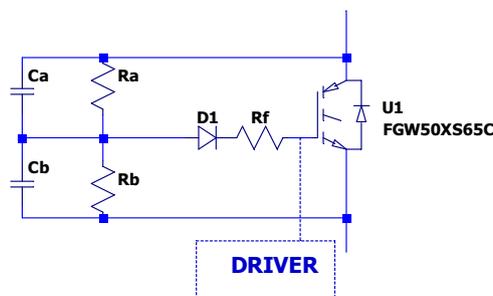


Figura 2: Circuito de balance entre IGBT

Este circuito consta, de un divisor capacitivo, para balance en el régimen transitorio, y un divisor resistivo, para balance en el régimen permanente, a la vez que posee un diodo y una resistencia de feedback, que actúan sobre la compuerta del IGBT.

Los valores de las resistencias, como sugieren [7, 8], son obtenidos de la relación

$$R_a / R_b \geq 10 \quad (10)$$



En este trabajo, se adopta un valor diferente al sugerido por [7, 8] en el radio entre  $C_a$  y  $C_b$ , debido a que se obtienen mejores resultados, si se utiliza la siguiente relación.

$$C_a / C_b \geq 2 \quad (10)$$

Siempre, la capacidad de  $C_a$  debe ser superior a  $C_b$ , ya que la tensión sobre  $C_a$  debe permanecer constante, siendo  $C_b$  quien cambie su estado entre valores negativos y positivos de tensión. A su vez, como se muestra en [7], la resistencia de feedback regula la sensibilidad del accionamiento.

## 2.6. Circuito de prueba para el circuito de balance

El circuito de prueba, sin circuito de balance, Figura 3, consta de una carga R-L y un diodo para descarga de la bobina, dos transistores IGBT FGW50XS65C (modelo SPICE, FUJI Electronics), y una fuente de corriente continua V1 que alimenta la carga R-L. El control de cada IGBT, se realiza mediante una fuente PWM, en la cual a una de ellas se le aplica el retraso límite calculado con el método antes explicado.

Se realizan simulaciones para el cierre, con circuito de balance, Figura 4, y sin circuito de balance, Figura 3, y a su vez, para la apertura, con y sin circuito de balance. Luego, se evalúan las tensiones sobre los transistores en todos los casos mencionados.

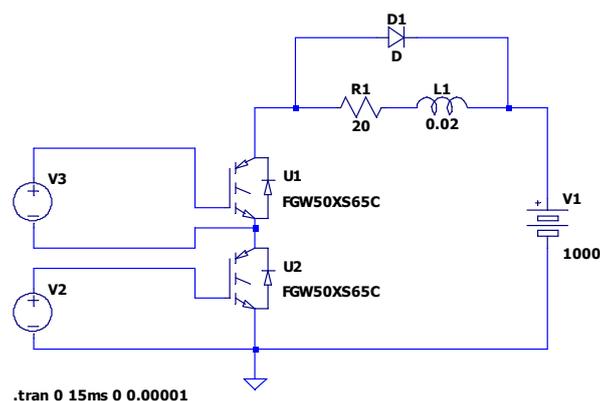


Figura 3: Circuito de prueba sin circuito de balance.

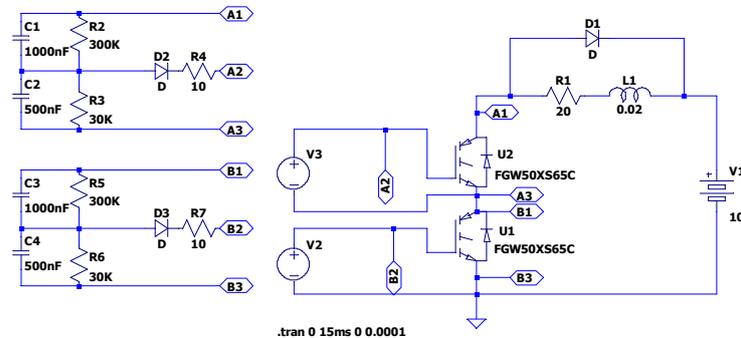


Figura 4: Circuito de prueba con circuito de balance.

## 2.7. Funcionamiento del circuito de balance

El circuito de balance actúa, cuando un IGBT se cierra o se abre, en retraso o adelanto con respecto a otro, así evita que uno de los transistores deba tolerar la totalidad de la tensión  $V_{cc}$ . En régimen de funcionamiento ideal, el voltaje máximo sobre los transistores será de  $V_{cc}/2$ . La tensión sobre  $C_a$  debe ser constante y de valor  $V_{cc}/2$ , por esto debe ser de mayor capacidad que  $C_b$ . La diferencia de potencial sobre  $C_b$ , cambiará desde  $-V_{cc}/2$  hasta un valor positivo, siendo en este momento, cuando se accione el IGBT abierto, sobre el cual la tensión aumenta por encima de  $V_{cc}/2$ , protegiéndolo del fallo.

Vale destacar, que el circuito de balance siempre actúa accionando el IGBT, por lo tanto, cierra el dispositivo y evita que se exceda el límite de tensión soportado por el mismo.

El circuito deberá calibrarse para cada modelo de IGBT, dependiendo de las necesidades en la respuesta.

## 3. RESULTADOS

En la Tabla 3, se observan los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo FORM para las funciones de falla desarrolladas.

Tabla 3. Resultados retraso límite para la apertura del IGBT FUJI modelo FGW50XS65C

Parámetro	Valor [ns]
Turn-off delay time 150 °C	0,00000028
Desviación estándar del 50 % de $t_{off}$	0,00000014



Fall time 150 °C	0,000000021
Desviación estándar del 50 % de $t_f$	0,0000000105
Media de función límite lognormal con $\beta = 3$	0,000000068
Desviación estándar del 30 % de función límite lognormal con $\beta = 3$	0,000000204
<b>Retraso límite</b> , variable lognormal con función de distribución $F(X) = 99,9 \%$	1,57134165018263E-06

Se aprecia, que el retraso límite para la apertura del IGBT es de 1,57134165018263E-06 ns.

En la Figura 5, se pueden ver los resultados de la simulación realizada con Ltspice®, sin circuitos de balance, aplicando el retraso antes mencionado. En la Figura 5 b), se observa como los valores de tensión sobre uno de los transistores supera su valor de voltaje máximo, que es de 650 V, lo que lleva a la falla del IGBT y por lo tanto del sistema.

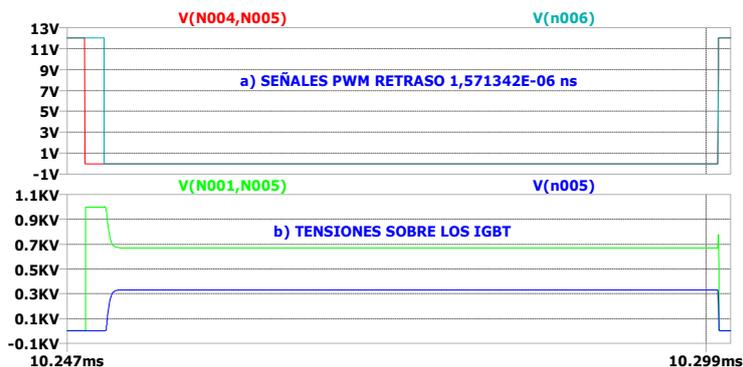


Figura 5: Apertura del IGBT sin circuito de balance.

En la Figura 6, se muestran los resultados obtenidos utilizando el circuito de balance, con los valores de la Figura 4. Se observa que este circuito, logra suavizar los picos de sobre tensión en los IGBT, causados por el retraso aplicado. Como se ve en la Figura 6 c), se alcanzan voltajes menores a los 600 V, lo que indica que el transistor se encuentra protegido. A su vez, en la Figura 6 b), se muestra la tensión en el capacitor C2, que es el aporte del circuito de balance.

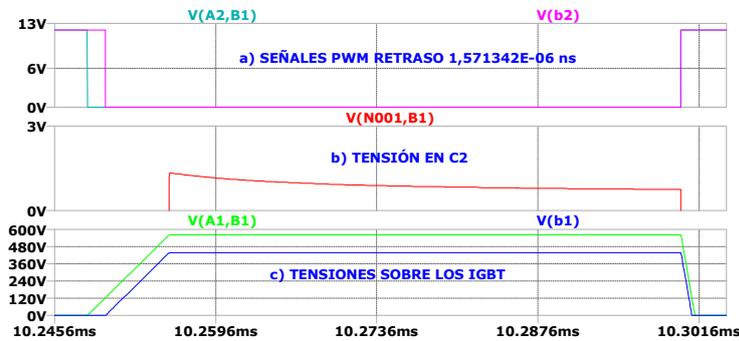


Figura 6: Apertura del IGBT con circuito de balance.

En la Tabla 4, se aprecian los resultados del cálculo de confiabilidad para el cierre del transistor IGBT.

Tabla 4. Resultados retraso límite para el cierre del IGBT FUJI modelo FGW50XS65C

Parámetro	Valor [ns]
Turn-on delay time 150 °C	0,000000032
Desviación estándar del 50 % de t <sub>on</sub>	0,000000016
Rise time 150 °C	0,000000024
Desviación estándar del 50 % de t <sub>r</sub>	0,000000012
Media de función límite lognormal con $\beta = 3$	0,000000095
Desviación estándar del 30 % de función límite lognormal con $\beta = 3$	0,0000000285
<b>Retraso límite</b> , variable lognormal con función de distribución F(X) = 99,9 %	0,00000021953

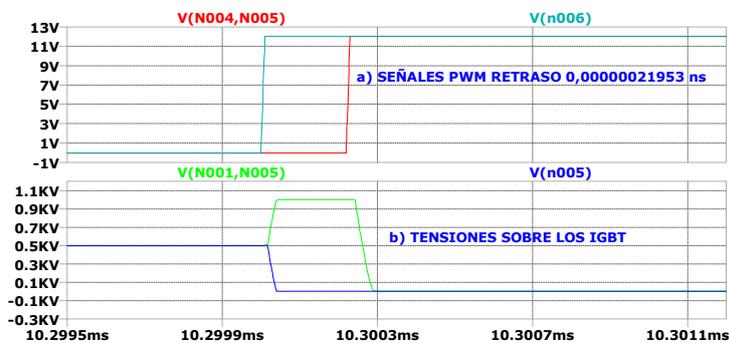


Figura 7: Cierre del IGBT sin circuito de balance.

En la Figura 7, se adjuntan los resultados pertinentes a la simulación, con un retraso límite en el cierre de 0,00000021953 ns, sin circuito de balance. En la Figura 7 b) se muestra, como los valores de tensión superan los 650 V que tolera el transistor.

En la Figura 8, al igual que en la Figura 6, se puede notar la acción del circuito de balance, que logra tensiones sobre los IGBT menores de 560 V, como se ve en la Figura 8 c). También, se puede notar el aporte del capacitor C2 en la Figura 8 b).

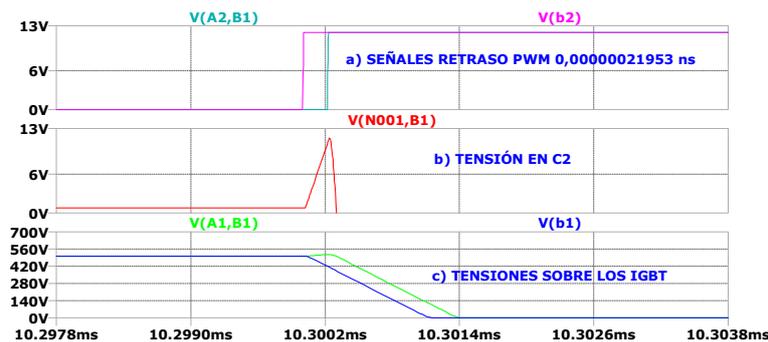


Figura 8: Cierre del IGBT con circuito de balance.

### 3. CONCLUSIONES

Al conectar los transistores en serie, es necesaria la implementación de un método que permita proteger a los IGBT de las posibles sobre tensiones, que son generadas debido a la falta de sincronía en el funcionamiento de los dispositivos, tanto por efectos de inductancias y capacitancias parásitas, así como de imperfecciones intrínsecas de cada transistor.

Dicha falta de sincronía, o retraso, puede ser modelada a través de métodos de confiabilidad en ingeniería, obteniendo un valor límite que servirá para el diseño del método de protección elegido.

Los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas, realizadas con el circuito de balance, con los valores propuestos en la Figura 4, muestran que este circuito puede mitigar las sobre tensiones sobre los IGBT, al lograr que las mismas se mantengan por debajo del valor máximo, que en este caso es de 650 V.

También, se entiende que en el futuro, es posible la mejora del modelo de la función de falla, ya que se estudia incorporar la acción de otros elementos que son parte del sistema de accionamiento de los transistores, como drivers, transformadores, etc.

Por otro lado, es necesario realizar el estudio y análisis con dispositivos de mayor voltaje máximo, como por ejemplo, IGBT de 1200 V, debido a que de esta manera, se reducirán las



cantidades a conectar en serie, lo que se traduce en una reducción de los modos de falla, y así un menor retraso límite, lo cual puede permitir una disminución en los valores de los componentes del circuito de balance.

Por último, será necesario la validación experimental de lo expuesto, para tener un conocimiento completo del funcionamiento del sistema.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Dr. Ing. Oscar Möller por el apoyo, y el aporte de conocimientos, en lo relativo a las estadísticas y confiabilidad en ingeniería.

## REFERENCIAS

- [1] SECHEEP, Ministerio de la Producción, Infraestructura y Servicios Públicos, Subsecretaría de Energía, “Situación del Sistema Obras de Infraestructura Eléctrica 2016-2020”. Gobierno del Chaco, 2016.
- [2] INDEC. Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación, Censo 2010, Chaco, Argentina. 2016.
- [3] María Inés Valla, Santiago A. Verne y Sergio A. González. CONVERTIDORES MULTINIVEL: SU MODULACIÓN Y CONTROL EN APLICACIONES DE GENERACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES.
- [4] Dr. Ing. Oscar MÖLLER. Confiabilidad en Estructuras. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Escuela de Ingeniería Civil instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE). Año 2022.
- [5] Analog Devices. LTspice®. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
- [6] Ruiz, Roberto Ricardo; Torres, Martín Alejandro; Marighetti, Jorge Omar; De Bórtoli, Mario Eduardo. Análisis y simulación de un inversor trifásico de tres niveles anclado por diodos aplicado en una red de media tensión. CADI-CAEDI. Año 2022.
- [7] C. Abbate, G. Busatto, L. Fratelli, F. Iannuzzo, B. Cascone, G. Giannini. Series Connection of High Power IGBT modules for traction applications. European Conference on Power Electronics and Applications. <https://doi.org/10.1109/EPE.2005.219697> . Año 2005.
- [8] Gaurav Trivedi. High-Voltage Switch Using Series-Connected IGBTs With Simple Auxiliary Circuit. IJITE. ISSN: 2321–1776. Año 2013.

# VIII CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA MECÁNICA

---

# III CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA FERROVIARIA

FONDO  
NACIONAL  
DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS  
FODAMI



UTN \* SANTA FE

