Libro de Actas

# Jornada Jóvenes Investigadores Tecnológicos

## Facultad Regional Venado Tuerto
## 30 de octubre de 2025

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

AJEA
Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN

UTN FRVT

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto
JIT 2025 : Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos ; Compilación de Ezequiel Cejas ; Coordinación general de Jorge Fernando Amigo. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Universidad Tecnológica Nacional, 2026.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-42-0264-6

1. Tecnología. 2. Ingeniería. I. Cejas, Ezequiel , comp. II. Amigo, Jorge Fernando, coord.
CDD 600

Libro de Actas
Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos
Fecha del Congreso: 30 de octubre de 2025
Lugar de las Jornadas: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.

DOI: https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026
ISBN: 978-950-42-0264-6
Fecha de Publicación: 04/2026

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

# Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos

30 de octubre de 2025

Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado, Facultad Regional Venado Tuerto
Universidad Tecnológica Nacional

https://frvt.utn.edu.ar/

Actas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# Editorial

Esta publicación reúne los trabajos de investigación y desarrollo presentados en las Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos (JIT) 2025. El evento, consolidado en el ámbito académico y actualmente en su 13va edición, se ha sostenido de manera ininterrumpida como un espacio de encuentro para jóvenes investigadores y como una plataforma clave para la difusión y promoción de la actividad científico–tecnológica. En él participan estudiantes de grado, jóvenes graduados y estudiantes de maestría, especialización y doctorado que desarrollan sus actividades en la Universidad Tecnológica Nacional (UTN).

Las JIT, desde sus inicios en 2013, han sido organizadas en todas sus ediciones por las cinco Facultades Regionales de la provincia de Santa Fe: Rafaela, Reconquista, Rosario, Venado Tuerto y Santa Fe, alternando anualmente la sede entre cada una de ellas. En cada edición, la Facultad Regional anfitriona invita, como criterio general, a la Facultad Regional geográficamente más cercana cuyo asiento no pertenezca a la provincia de Santa Fe. En esta oportunidad, la institución invitada fue la Facultad Regional Villa María.

Los principales objetivos de las JIT son divulgar los avances de los trabajos de I+D+i desarrollados por estudiantes de grado, posgrado y graduados recientes; destacar la relevancia de la investigación científica y tecnológica para el entramado socio–productivo del país, aun en contextos de crecimiento variable; fomentar la vocación científica en los jóvenes y brindar un espacio que les permita consolidarse en la comunicación de sus trabajos y resultados. En esta edición, en un contexto de marcado desfinanciamiento de la educación pública en general –y de la universitaria en particular– así como del sistema científico–tecnológico nacional, las facultades participantes realizaron los esfuerzos necesarios para garantizar la realización presencial del evento. Superando las dificultades propias de este escenario, participaron alrededor de unos 190 jóvenes investigadores, cerca de 80 evaluadores y se presentaron más de 90 trabajos científicos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# Autoridades FR Venado Tuerto

**Ing. Rena Jorge A.**
Decano

**Ing. Amigo Jorge F.**
Secretario de Ciencia, Tecnología y Posgrado

## Coordinación y Dirección JIT 2025

**Dr. Cejas Ezequiel**
Coordinador

## Comité asesor

**Ing. David Oscar**
Decano Regional Rafaela

**Ing. Moschen Brian**
Decano Regional Reconquista

**Ing. Cicarelli Rubén F.**
Decano Regional Rosario

**Esp. Ing. Donnet Eduardo**
Decano Regional Santa Fe

**Ing. Laorden Marcelo**
Secretario de Ciencia y Tecnología Rafaela

**Ing. Capeletti Walter**
Secretario de Ciencia y Tecnología Reconquista

**Dr. Scenna Nicolás J.**
Secretario de Ciencia, Tecnología y Posgrado Rosario

**Dr. Vega Jorge**
Secretario de Ciencia, Tecnología y Vinculación Santa Fe

**Ing. Cena Norberto G.**
Decano Regional Villa María (invitada)

**Ing. Huber Gabriel F.**
Secretario de Ciencia, Tecnología y Posgrado Villa María

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# Comité Académico y Científico

## Facultad Regional Venado Tuerto

**Amigo, Jorge Fernando**
**Braun, Oscar Adrían**
**Chamorro, Garcés Juan Camilo**
**Costamagna, Pablo Manuel**
**Dabove, Daniel**
**Diab, Jacinto**
**Ferreyra, Matias German**
**Filippetti, Maria Cecilia**
**Meyer, Lía Caren**
**Papa, Mara Jaquelina**
**Pisaco, Juan Pablo**
**Reyes López, Diana Erica**
**Soria, Magalí Valeria**

## Facultad Regional Rafaela

**Bergese Tivano, Cristian Rene**
**Bertone, Sergio Eduardo**
**Bianchotti, Jezabel Daiana**
**Boglione Mondino, Rosana de los Milagros**
**Bonetti, Carlos Alberto**
**Diaz, Felipe Victor**
**Fernandez, Erica Soledad**
**Fornari, Javier Fernando**
**Griffa Vignolo, Carina Andrea**
**Mónaco, Héctor Darío**
**Monier, Eduardo Carlos**
**Nittmann, Juan José**
**Puccini, Gabriel Darío**
**Querini, Pedro Luis**
**Tieri, Maria Paz**
**Tourn ,Benjamin**

## Facultad Regional Reconquista

**Alarcon, Martin Alejandro**
**Alarcon, Rodrigo German**
**Capeletti, Walter Hernán**
**Colman, Gabriel Porfirio**
**Crudeli, Rossana Irma**
**Folla, Alejandro José**
**Maggi, Norberto Claudio**
**Martin, Héctor Daniel**
**Mendoza, Sandra Marina**
**Muchiut, Ariel Luis**
**Ros, Mario Alberto**
**Ruiz, David Emmanuel**
**Soto, Walter Ariel**
**Stechina Adriana Soledad**
**Suligoy, Juan Pablo**

## Facultad Regional Rosario

**De Federico, Sara Ester**
**Francesconi, Javier Andrés**
**Giordani, Claudio Marcelo**
**Godoy, Ezequiel**
**Kraft, Romina Alejandra**
**Mackler, Cesar Eliecer**
**Marino, Carlos Edgardo**
**Martinet, Roxana Mariel Guadalupe**
**Medin, Cristian Fernando**
**Mores, Patricia Liliana**
**Rullo, Pablo Gabriel**
**Salerno, Juan José**
**Santa Cruz, Judith Ailen**
**Zomoffen, David Alejandro Ramón**

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Facultad Regional Santa Fe

**Agosta, Rodrigo Mariano**
**Albanesi, Alejandro Eduardo**
**Cabrera, Santiago Pedro**
**Caliusco, María Laura**
**Carbonetti, Angel Amilcar**
**Casco, Eva Silvana**
**Darras, Gonzalo**
**Demarchi, María Cecilia**
**Fuentes Mora, Mauren**
**Giménez Uribe, Alfonso**
**Guilarducci, Anabela Guadalupe**
**Imaz, Fernando Javier**
**Leurino Esborraz, Rodrigo César**
**Prono, Alejandra Rita**
**Sanseverinatti, Carlos Ignacio**
**Steinmann Moscoso, Irene Beatriz**
**Stella, José Alberto**
**Tymoschuk, Ana Rosa**
**Zanitti, Laura Isabel**

## Facultad Regional Villa María

**Baccifava, Ruben Luis**
**Beltrán, Romina Alejandra**
**Catalano, José Luis**
**Gomez Sanchez, Andrea Valeria**
**Gonella, Javier Nicolás**
**Lucioni, Eldo José**
**Marin, Graciela Nilda**
**Monje, Hugo Miguel**
**Sensini, Fabián Marcelo**

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# Trabajos distinguidos

## Estudio preliminar de biofilms bacterianos en superficies de acero inoxidable

**Facultad Regional Villa María**

## Mejora de la calidad laboral en el sector ladrillero del norte de la provincia de Santa Fe

**Facultad Regional Reconquista**

## Determinación de costos y rentabilidad de la apicultura en el norte de Santa Fe

**Facultad Regional Reconquista**

## Gestión de presión en redes de distribución de agua mediante aprendizaje por refuerzo y redes neuronales gráficas

**Facultad Regional Rafaela**

## Modelo simplificado para la dispersión de cloro mediante simulación de Monte Carlo

**Facultad Regional Rosario**

## Laboratorios virtuales con errores pseudoaleatorios para la enseñanza de física en ingeniería

**Facultad Regional Santa Fe**

## Aplicación del georradar para la evaluación y diagnóstico de estructuras

**Facultad Regional Santa Fe**

## Resultados preliminares de inactivación microbiana mediada por plasma no–térmico utilizando un reactor a escala piloto

**Facultad Regional Venado Tuerto**

## Análisis del modelo e–NRTL aplicado al equilibrio líquido–vapor del sistema reaccionante PZ–H2O

**Facultad Regional Rosario**

## Propuesta de tratamiento de lixiviados de relleno sanitario de la ciudad de Rafaela: filtros y humedales construidos

**Facultad Regional Rafaela**

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# Índice

## Eje temático

## Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos

**Análisis del modelo e–NRTL aplicado al equilibrio líquido-vapor del sistema reaccionante PZ–$H_2O$** ..... Pág.20
*Analysis of the e–NRTL model applied to the liquid-vapor equilibrium of the PZ–$H_2O$ reacting system*
Lara Casabella, Pilar Conforti

**Análisis comparativo de modelos termodinámicos en la compresión de biogás** ..... Pág.25
*Comparative analysis of thermodynamic models in biogas compression*
Facundo Félix Chelini, Alan Adriel Rodriguez Fogu

**Análisis comparativo del comportamiento del residuo de levaduras de la producción de cerveza frente a distintos métodos de secado** ..... Pág.31
*Comparative study of the behavior of yeast residues from beer production compared to different drying methods*
Matías Bergamaschi, Alejo Ravagnan, Nicolas Lucenti, Sofia Rey, Lucia Ferreyra, Lisandro Rudolf, Mauro Leombruno, Candela Modica

**Obtención de concentrados y aislados proteicos utilizando extracción sólido–líquido asistida por ultrasonido y tratamiento enzimático** ..... Pág.37
*Obtaining protein concentrates and isolates using ultrasound-assisted solid–liquid extraction and enzymatic treatment*
Lucia Ureta, María Regina Bonavia, Martina Andreosi, Juan Pablo Iglesias

## Eje temático

## Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería

**Laboratorios virtuales con errores pseudoaleatorios para la enseñanza de física en ingeniería** ..... Pág.44
*Virtual labs with pseudorandom generated errors for physics teaching in engineering*
Gael Suarez Belletti

**Desarrollo y simulación de un sistema de brazo robótico mediante visión artificial con aplicación didáctica y proyección industrial** ..... Pág.50
*Development and Simulation of a Robotic Arm System through Computer Vision with Didactic Application and Industrial Projection*
Diego Butto, Julián Gervasoni

**Estudio de comandos del programa Mathematica y organización para estudiantes de ingeniería** ..... Pág.56
*Study of command functions in the Mathematica program and organization for engineering students*
Dylan Ruben Gavilan

**Cónicas en mi Ciudad** ..... Pág.59
*Conicas in my City*
Lisbeth Abigail Pujol, Luca David Alarcón, Nicolás Chaves

**Elaboración de una simulación virtual para el Trabajo Práctico de laboratorio de Precipitación y Filtración, como refuerzo en el aprendizaje de Química General de la FRSF–UTN** ..... Pág.64
*Design and implementation of a virtual simulation for the laboratory Practical Work of Precipitation and Filtration, to enhance the learning process in General Chemistry at FRSF–UTN*
Santiago Lopez Delzar, Erick Caberos, Williams Condori, Roxana Medina

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Resolución de problemas integradores de Química General en equipos agiles, evaluados bajo la taxonomía SOLO ..... Pág.70
*Solving General Chemistry's Integrative Problems in Agile Teams, Assessed through the SOLO Taxonomy*
Esteban Montalvo, Erick Caberos Tobarias, Gonzalo Morel

Equipos ágiles y coevaluación: una estrategia innovadora para fortalecer aprendizajes en Ingeniería ..... Pág.76
*Agile Teams and Peer Assessment: An Innovative Strategy to Strengthen Learning in Engineering*
Santiago Lopez Delzar, Pilar Lequi, Mateo Imaz, Facundo Guglielmone

Desarrollo de memoria de cálculo de un intercambiador de calor como herramienta didáctica en ingeniería mecánica ..... Pág.82
*Development of a design calculation report for a heat exchanger as a didactic tool in mechanical engineering*
Nazareth Bonet, Mateo Conta, Tomas Soratti

Puesta en marcha y calibración de un canal de ensayos hidráulicos para enseñanza y experimentación ..... Pág.88
*Commissioning and calibration of a hydraulic test channel for teaching and experimentation*
Danisa Bogdel, Joaquina Castro

Estrategias para optimizar la finalización de Proyecto Final en Ingeniería en Energía Eléctrica ..... Pág.94
*Strategies to Optimize the Completion of the Final Project in Electrical Energy Engineering*
Rosario Belén Macor, Juan Ignacio Salemme

Uso de maquetas y software como herramientas didácticas para comprender el comportamiento estructural ..... Pág.100
*Use of models and software as teaching tools to understand structural behavior*
Lucía Albano, Juan Francisco Cati

# Eje temático

# Análisis de señales, modelados y simulación

Vibraciones en entramados utilizando series de potencias con teoría de viga de Timoshenko .... Pág.107
*Vibrations in trusses using power series with Timoshenko's beam theory*
Marcos Pereson, Macarena Caballero, Tiago Speranza

Simulación de tránsito en SUMO de intersecciones urbanas como herramienta para la planificación vial ..... Pág.113
*Traffic simulation in SUMO of urban intersections as a tool for road*
Sofia Coccolo, Noelia Fladung, Julia Heinzen

Control predictivo basado en modelo como sistema de gestión de energía en microrredes ..... Pág.119
*Model Predictive Control as energy management system in microgrids*
Ezequiel Robert, Franco Germán Guardiani, Macarena Caballero, Melani Faulkner

Identificación de objetos tipo industrial por medio de análisis de imágenes con técnicas de aprendizaje profundo..... Pág.125
*Identification of industrial objects through image analysis using deep learning techniques*
Melani Fátima Faulkner

Modelo de generación de vientos basados en datos históricos ..... Pág.132
*Wind generation model based on historical data*
Leonel Abuin

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Programación en lenguaje Python de un MPC utilizando Casadi..... Pág.138
*MPC programming in Python language using Casadi*
Brian Bournissent, Enzo Corgniali, Erik Goldberger, Malena Ribatto, Marcos Rossi, Ramiro Ayala

Simulación de amplitud y frecuencia de oleaje para estructuras offshore ..... Pág.145
*Simulation of wave amplitude and frequency for offshore structures*
Nicolás Leonel Ledesma

Análisis de confiabilidad en redes de distribución de media tensión para la planificación de la expansión: caso de estudio en Esperanza, Argentina..... Pág.151
*Reliability Analysis in Medium Voltage Distribution Networks for Expansion Planning: Case Study in Esperanza, Argentina*
Luis Andreotti

Resultados preliminares de la medición de ozono en el interior de envases sellados empleando una descarga no–térmica a presión atmosférica para el tratamiento de alimentos..... Pág.157
*Preliminary Results on Ozone Measurement Inside Sealed Packages Using a Non-Thermal Atmospheric Pressure Discharge for Food Processing*
Facundo Ordoñez

Impacto de la vibración sinusoidal en la descarga granular de una tolva bidimensional mediante el Método de Elementos Discretos..... Pág.163
*Impact of sinusoidal vibration on granular discharge in a two-dimensional hopper using the Discrete Element Method*
Leandro Chiabrando, Roxana Godoy

Estudio sistemático de texturas en cojinetes hidrodinámicos y su influencia en la capacidad portante..... Pág.169
*Systematic study of textures in hydrodynamic bearings and their influence on load–carrying capacity*
Franco Cragnolino, Santiago Zamateo

Gestión de presión en redes de distribución de agua mediante aprendizaje por refuerzo y redes neuronales gráficas..... Pág.173
*Pressure Management in Water Distribution Networks using Reinforcement Learning and Graph Neural Networks*
Melina Denardi, Tamara Ghirardotti

## Eje temático
## Aplicaciones mecánicas y mecatrónica

Mejora de la calidad laboral en el sector ladrillero del norte de la provincia de Santa Fe ..... Pág.180
*Improving Labor Quality in the Brickmaking Sector of Northern Santa Fe Province*
Agustín Muñoz, Elías Jones, Gerardo Cintes, Nicolás Faccioli

## Eje temático
## Energía

Caracterización de demanda eléctrica de usuarios industriales mediante técnicas de redes neuronales..... Pág.187
*Characterization of Industrial Electricity Demand Using Neural Network Techniques*
Axel Timoteo Smith

Influencia de los usuarios de baja tensión en la calidad de la energía eléctrica..... Pág.194
*Influence of low voltage users on electrical power quality*
Ciro Toscano Ruffinatto

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Estudio y selección de corredores de subtransmisión de energía eléctrica 33 kV de la provincia de Santa Fe para instalación de parques fotovoltaicos de mediana escala ..... Pág.201
*Study and selection of medium voltage subtransmission corridors in Santa Fe province for the installation of medium–scale photovoltaic parks*
Matías Maglianesi

Comparación de métodos de medición de vida útil para lámparas LED ..... Pág.206
*Comparison of LED Lamp Lifetime Measurement Methods*
Matías Maglianesi, Agustina Solís

Microrredes con generación distribuida: estudio de impacto de fuentes fotovoltaicas y almacenamiento con baterías ..... Pág.212
*Microgrids with Distributed Generation: Impact Study of Photovoltaic Sources and Battery Storage*
Carlos Ariel Romani

Metodología para el análisis de consumo y calidad de energía en usuarios residenciales ..... Pág.218
*Methodology for the Analysis of Energy Consumption and Power Quality in Residential Users*
Emiliano Rubén Bauza, Federico Nicolás Díaz

Aplicación del índice de vulnerabilidad socio–energética en un barrio de Ibarlucea: resultados preliminares ..... Pág.224
*Application of the socio–energy vulnerability index in a neighborhood of Ibarlucea: preliminary results*
Cindy Touma

Resistencia eléctrica en trajes conductivos: comparación de ensayo IEC 60895 y métodos alternativos ..... Pág.230
*Electrical Resistance in Conductive Suits: Comparison of IEC 60895 Testing and Alternative Methods*
Leandro Olivo, Esteban Pfaffen

Comparativa de generación de energía real vs generación de energía teórica estimada de un sistema solar fotovoltaico ..... Pág.236
*Comparison of Actual Energy Generation vs. Estimated Theoretical Generation of a Photovoltaic Solar System*
Ignacio Molina, José Giménez

Estimación de campos electromagnéticos para verificación de valores admisibles en línea de alta tensión ..... Pág.242
*Estimate of electromagnetic fields for verifying admissible values of a power transmission line*
Francisco Moine

# Eje temático

# Estructuras y construcciones civiles

Diseño de pieza de unión de estructura sombra de ganado ..... Pág.249
*Design of the connecting piece for a livestock shade structure*
Jonatán Rodrigo Cuatrín, Lautaro Falchini

Aplicación del método de factores de la ISO 15686 en la determinación de la vida útil de construcciones patrimoniales de la ciudad de Santa Fe ..... Pág.256
*Application of the Factor Method of ISO 15686 in Determining the Service Life of Heritage Buildings in the City of Santa Fe*
Augusto Baqué, Francisco Dallo Coniglio

Aplicación del georradar para la evaluación y diagnóstico de estructuras ..... Pág.262
*Ground–penetrating radar application for the evaluation and diagnosis of structures*
Ruth Gauna Pinatti, María Ema Sarli, Camila Villalba

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# Eje temático
# Materiales

**Evaluación de porosidad en componentes de Al–Si inyectado usando tomografía computada.... Pág.270**
*Porosity evaluation in injected Al-Si components using computed tomography*
Boris Riva, Carolina Cardozo

**Desarrollo de un procedimiento para la calibración de xilohigrómetros en madera ..... Pág.277**
*Development of a procedure for the calibration of xylohygrometers in Wood*
Nicolás Decleire, Nicolás Gatica

**Determinación de propiedades mecánicas de la madera de álamo del Valle de Río Negro .... Pág.283**
*Determination of mechanical properties of poplar wood from the Río Negro Valley*
Gianella Peró, Santiago Picinato

**Producción de nanotubos de TiO2 mediante anodizado electroquímico: avances preliminares.... Pág.289**
*Production of TiO2 nanotubes by electrochemical anodization: preliminary progress*
Aldana Berenice Cativa Sonzini

**Cizalladura en probetas de madera contralaminada de pino ponderosa ..... Pág.294**
*Shear Strength of Ponderosa Pine Cross-Laminated Timber Specimens*
Andrea D. Tosco, Nicolás Decleire

**Análisis de porosidad en un acople de Al–Si inyectado usando tomografía computada..... Pág.299**
*Porosity analysis in an injected Al–Si coupling using computed tomography*
Carolina Cardozo

**Análisis de inconsistencias en el prototipo de speckle dinámico para evaluación de hidratación del cemento: identificación y caracterización de problemas de configuración..... Pág.305**
*Analysis of inconsistencies in the dynamic speckle prototype for cement hydration evaluation: identification and characterization of configuration issues*
Catalina Durdos, Yasmin Acosta

**Optimización de prestaciones acústicas de tableros aglomerados de residuo de desmote de algodón ..... Pág.311**
*Optimization of the acoustic performance of particleboards made from cotton gin waste*
Valentín Tomás Mangoldt

**Desarrollo de un material compuesto en base a tierra adicionada con cemento portland y reforzado con malla plástica para ser usado como contrapiso en viviendas de interés social..... Pág.318**
*Development of a composite material based on dirt added with portland cement and reinforced with plastic mesh to be used as a subfloor in housing of social interest*
Máxima Poldoni, Marianela Salinas Leiva, Morena Troncoso

**Hormigón drenante: efecto del contenido de pasta y energía de compactación sobre sus propiedades físico-mecánicas..... Pág.324**
*Pervious concrete: effect of cement paste content and compaction energy on its physical and mechanical properties*
Emiliano Snaider, Bruno Francisco Croce

**Caracterización de suelos para la producción industrial de bloques de tierra comprimida (BTC): evaluación de su viabilidad técnica..... Pág.330**
*Technical Advisory on the Industrialized Production of Compressed Earth Blocks: Soil Characterization and Plant Redesign*
Gonzalo Darras

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Adaptación de un microscopio Arcano XSZ–107 para observación de materiales opacos mediante microscopía óptica digital ..... Pág.337
*Adaptation of an Arcano XSZ–107 microscope for observation of opaque materials using digital optical microscopy*
Augusto Baqué, Gonzalo Barrientos Santini

Resistencia a la compresión y erosión húmeda en bloques de tierra comprimida fabricados en Mendoza ..... Pág.343
*Compressive strength and wet erosion resistance of compressed earth blocks manufactured in Mendoza*
Lara Mariam Auday Cruz, Renato Adolfo Pilatti

Lineamientos para la evaluación de morteros de cemento para impresión 3D ..... Pág.349
*Guidelines for the evaluation of cement mortars for 3D printing*
Franco Aguado, Gonzalo González, Sharon Rupp, Francisco Oliva

# Eje temático

# Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable

Avances recientes en tecnologías de captura de $CO_2$ ..... Pág.356
*Recent advances in CO2 capture technologies*
Daira Agostina Longo

Evaluación del comportamiento térmico de un calentador solar de agua sanitaria con materiales económicos..... Pág.362
*Evaluation of the Thermal Behavior of a Low-Cost Domestic Solar Water Heater*
Facundo Chamarez, Santiago Masin

Impacto de los RSU en la composición química elemental de aguas superficiales y subterráneas del distrito General Obligado (Avance: selección de puntos de muestreo)..... Pág.368
*Impact of MSW on the elemental chemical composition of surface and groundwater in the General Obligado district (Progress: sampling point selection)*
Agustín Echeverría

Evaluación estacional de la calidad del aire mediante monitoreo de material particulado (PM2.5) en la ciudad de Rafaela, Santa Fe (AR)..... Pág.375
*Seasonal assesment of air quality through particulate matter (PM2.5) in the city of Rafaela, Santa Fe (AR)*
Mariana Carrel, Martina Costanzo, Nain Schmidt, Ariana Castro

Huellas ambientales en industrias lácteas de Rafaela y la región ..... Pág.382
*Environmental footprints in Dairy Industries of Rafaela and the region*
Marisol Belén Farías, Alejandro Lo Presti, Francisco De Michelis

Estudio preliminar de biofilms bacterianos en superficies de acero inoxidable ..... Pág.389
*Preliminary study of bacterial biofilms on stainless steel surfaces*
Melisa Romina Baumann

Análisis de paridad de red en sistemas fotovoltaicos de baja potencia instalados en la ciudad de Santa Fe. impacto del Programa Prosumidores 4.0 ..... Pág.395
*Grid parity analysis of low–power photovoltaic systems installed in Santa Fe city. Impact of Prosumer 4.0 program*
Agustina Fiorella Solís

Modelo Simplificado para la dispersión de cloro mediante simulación Monte Carlo ..... Pág.401
*Simplified Model for chlorine dispersion using Monte Carlo simulation*
Delfina Apiz

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Educación ambiental en ingeniería con metodología de aprendizaje basada en proyectos.... Pág.408**
*Environmental Education in Engineering with Project-Based Learning Methodology*
Esteban Montalvo, Martina Carraro, Guillermina Lesca, Luis Utz Goettig

**Análisis de dosis de fertilizante líquido aplicado por camiones cisterna en entornos agrícolas del norte de Santa Fe ..... Pág.414**
*Analysis of liquid fertilizer doses applied by tanker trucks in agricultural environments in northern Santa Fe*
Francisco Dominguez, Lucas Damián Snaider

**Evaluación de riesgo en industrias de procesos: un enfoque probabilístico mediante árboles de eventos y función probit ..... Pág.421**
*Assessing the risk in process industries: a probabilistic approach using event trees and probit functions*
Maylen Rocio Cocca, Pilar Di Loreto, Valentina Lourdes Rodríguez

**Resultados preliminares de inactivación bacteriana mediada por plasma no–térmico utilizando un reactor a escala–piloto ..... Pág.427**
*Preliminary results of non-thermal plasma–mediated bacterial inactivation using a pilot–scale reactor*
Ornella Ridissi Pregno, Lisbeth Abigail Pujol

**Propuesta de tratamiento de lixiviados de relleno sanitario de la ciudad de Rafaela: filtros y humedales construidos ..... Pág.433**
*Leachate treatment proposal for Rafaela's landfill: filters and constructed wetlands*
Franco Hammerschlag

**Estimación de distancias seguras mediante modelos subrogados para la optimización del layout de una planta de almacenamiento de sustancias peligrosas ..... Pág.440**
*Safety Distances Estimation Applying Subrogate Models for the Layout Optimization of a Hazardous Substances Storage Plant*
Selena Herrmann, Ornella Sdrigotti

**Estudio comparativo de los agentes atmosféricos corrosivos sobre cupones de acero al carbono en distintos sitios del área metropolitana de la ciudad de Rosario ..... Pág.446**
*Comparative study of atmospheric corrosive agents on carbon steel coupons in different sites of the metropolitan area of Rosario city*
Valentina Aletti, Brandina Capriotti

**Determinación del Índice de Calidad del Agua en drenajes urbanos ..... Pág.452**
*Determination of the Water Quality Index in urban drainage systems*
Daniel Andereggen, Valentín Piovano

**Evaluación preliminar de sistemas integrados de cultivos y ganadería lechera en Argentina: hacia la circularidad energética, de carbono y nutrientes ..... Pág.459**
*Preliminary assessment of integrated crop-dairy systems in Argentina: towards energy, carbon and nutrient circularity*
Maximiliano Woloschin, Antonella Maletto

**Regresión del modelo eNRTL aplicado al equilibrio sólido–líquido–vapor de la mezcla $CO_2$–$NH_3$–$H_2O$ con precipitación de $NH_4HCO_3$. ..... Pág.466**
*Regression of the eNRTL model applied to the solid–liquid–vapor equilibrium of the $CO_2$–$NH_3$–$H_2O$ mixture with $NH_4HCO_3$ precipitation*
Gaspar Ariel Tosello

**Modelado de fugacidad y caída de presión en membranas para la purificación de biogás..... Pág.472**
*Modeling Fugacity and Pressure Drop in Membranes for Biogas Purification*
Rocío Victoria Asad

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Flujo diario de las emisiones de $CH_4$ y $CO_2$ de purines en un sistema de producción lechera .... Pág.478
*Daily flow of $CH_4$ and $CO_2$ emissions in slurry from a dairy production system*
Matías Delbon, Mateo Caussi

Método simplificado para la obtención de distancias seguras basadas en riesgo ..... Pág.482
*Simplified Method for Obtaining Risk-Based Safety Distances*
Agustina Zacchino, Ornella Sdrigotti, Selena Herrmann

Base de datos para el módulo fisicoquímico de CEIBO 2.0. Un Sistema para el análisis cuantitativo de riesgos y el diseño seguro de procesos..... Pág.488
*Physiochemical Database for CEIBO 2.0. A System for Quantitative Risk Analysis and the Safe Design of Processes*
Lucio Andriani Martínez

Propuesta de modelo simplificado para la evaluación de los efectos de jet fires de GNL ..... Pág.494
*Proposed Simplified Model for the Assessment of LNG Jet Fire Effects*
Facundo Esci

Avances en el proyecto de una base de datos hidrológica para la región de Venado Tuerto ..... Pág.501
*Progress on the project to create a hydrological database for the Venado Tuerto region*
Ayelén Grillo, Estefanía Zoppi, Florencia Alderete

# Eje temático
# Sistemas de información e informática

Diseño de un perfil UML para modelado conceptual en Simulación..... Pág.506
*Designing a UML profile for conceptual modelling in simulation*
Florencia Abigail Hiembuchner

Plataforma de subastas descentralizadas a través de blockchain y contratos inteligentes .... Pág.512
*Decentralized Auction Platform Using Blockchain and Smart Contracts*
Nicolás Mauro Courtalón

Modelo de detección de perturbaciones en redes de media tensión mediante DEVS..... Pág.518
*Model for detecting disturbances in medium voltage networks using DEVS*
Christian German Schwab

Generación del modelo computacional para simulación basada en eventos discretos a partir de un modelo de diseño ..... Pág.524
*Generation of the Computational Model for Discrete-Event Simulation from a Design Model*
Victoria Elizabeth Meichtry Regner

Diseño de una arquitectura IoT adaptable con una integración NoSQL/SQL implementada a múltiples sistemas ciberfísicos: caso de un vivero hidropónico..... Pág.531
*Design of an adaptable IoT architecture with a NoSQL/SQL integration implemented to multiple cyber-physical systems: case of a hydroponic nursery*
Juan Ignacio Alaguibe

Diseño e implementación de un prototipo de un sistema “Single Sign-On” (SSO) para la Facultad Regional Santa Fe (FRSF), UTN..... Pág.536
*Design and implementation of a prototype of a ‘Single Sing-On’ system for the Facultad Regional Santa Fe (FRSF), UTN*
Nahuel Agustín Nuñez

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# Eje temático
# Tecnología de las organizaciones

**Maximizando la eficiencia y confiabilidad industrial: ¿puede el Aprendizaje Automático potenciar el mantenimiento predictivo?** ..... Pág.543
*Maximizing industrial efficiency and reliability: Can Machine Learning enhance Predictive Maintenance?*
Emily Knoll, Guillermina Perren, Sheila Favole

**Propuesta de transformación digital: Caso de estudio aplicado al sector alimenticio y metalúrgico...** Pág.549
*Digital transformation proposal: Case study applied to the food and metallurgical sectors*
Luis Nadalutti, Brenda Voisard

**El margen bruto agrícola. Un aporte para enriquecer la metodología de cálculo** ..... Pág.555
*The Agricultural Gross Margin. A Contribution to Enrich the Calculation Methodology*
Fabio García, Sandra Hurt, Ian Duarte, Nahuel Isaías

**Determinación de costos y rentabilidad de la apicultura en el norte de Santa Fe** ..... Pág.562
*Determination of Costs and Profitability of Beekeeping in Northern Santa Fe*
Juan Diaz, Daniela Tomadin

# Eje temático
# Transportes y vías de comunicación

**Impacto del costo del combustible en el transporte de carga de granos en la Ruta Nacional 11** ..... Pág.569
*Impact of fuel costs on grain cargo transportation on National Route 11*
Valentín Cicaré

**Análisis y propuesta de mejora de intersección crítica mediante simulación del tránsito urbano con NETEDIT y SUMO – Caso de estudio ciudad de Rafaela** ..... Pág.576
*Analysis and Improvement Proposal of a Critical Intersection through Urban Traffic Simulation with NETEDIT and SUMO – Case study of Rafaela*
Santiago Jesús Gasparotti

**Análisis de la superestructura ferroviaria existente para la implementación de un servicio urbano de pasajeros en Santa Fe** ..... Pág.582
*Analysis of the existing railway superstructure for the implementation of an urban passenger service in Santa Fe*
Candela Lozano, Mariana Natta

**Relevamiento preliminar del uso y conocimiento de SRI en Argentina** ..... Pág.588
*Preliminary survey of the use and knowledge of SRI in Argentina*
Lucia Schonfeld Toci

# Eje temático
# Electrónica, computación y comunicaciones

**Prototipo de la digitalización del proceso de recolección y transporte de leche** ..... Pág.594
*Prototype of the digitalization of the milk collection and transportation process*
Juan Armentano, Juan Gómez Gagliardi, Felipe Sola

**Desarrollo de un sistema para la adquisición de datos para celdas de carga** ..... Pág.600
*Development of a data acquisition system for load cells*
Juan Manuel Elizagoyen, Joaquín Berho

# TRABAJOS

Eje temático

# Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

MENCIÓN ESPECIAL

**Eje temático:** Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Análisis del modelo e-NRTL aplicado al equilibrio líquido-vapor del sistema reaccionante PZ-$H_2O$

## Analysis of the e-NRTL model applied to the liquid-vapor equilibrium of the PZ- $H_2O$ reacting system

Presentación: 30/10/2025

**Lara Casabella**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina
laracasabella25@gmail.com

**Pilar Conforti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina
pconforti@frro.utn.edu.ar

### Resumen

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo que permita disponer de información confiable del sistema piperazina-agua (PZ-$H_2O$), con el fin de evaluar su potencial aplicación como solvente en procesos de captura de dióxido de carbono ($CO_2$) mediante columnas de absorción. Para ello, se realizó la representación del Equilibrio Líquido-Vapor (ELV) del sistema piperazina-agua (PZ-$H_2O$) empleando el modelo e-NRTL (Electrolyte Non-Random Two-Liquid). El modelo matemático fue implementado en el software GAMS (General Algebraic Modeling System) y como variable de estudio se analizó la variación de la presión parcial de PZ en la fase vapor en función de su composición a diferentes temperaturas. Los resultados obtenidos se contrastaron con datos experimentales obteniendo una adecuada representación del sistema.

**Palabras clave:** PZ, e-NRTL, ELV

### Abstract

In this study, the Liquid-Vapor Equilibrium (LVE) of the piperazine-water (PZ-$H_2O$) system was represented using the e-NRTL (Electrolyte Non-Random Two-Liquid) model. The mathematical model was implemented in the GAMS (General Algebraic Modeling System) software, and the variation in the partial pressure of piperazine in the vapor phase as a function of its composition at different temperatures was analyzed as a study variable. The results obtained were compared with experimental data, yielding an adequate representation of the system. The main objective of this work is to develop a model that provides reliable information on the PZ-$H_2O$ system, in order to evaluate its potential application as a solvent in carbon dioxide ($CO_2$) capture processes using absorption columns.

**Keywords:** PZ, e-NRTL, VLE

## 1. Introducción

La absorción química se considera como una tecnología potencialmente viable para la captura de $CO_2$ de diferentes fuentes de emisión, en particular aquellas con bajas concentraciones de $CO_2$ (Mores et al., 2018). Tradicionalmente, la monoetanolamina (MEA) se ha utilizado como absorbente de referencia; sin embargo, se han propuesto nuevos procesos en donde se utiliza PZ con el objetivo de aumentar la eficiencia de absorción y reducir el consumo energético (Yi et al., 2024).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

El diseño de equipos de absorción y desorción requiere contar con modelos de transferencia de masa, cuyas propiedades se estiman a partir de las composiciones en equilibrio (Longo, 2024). Para la representación de equilibrios de fases se emplean con frecuencia el modelo simplificado de Kent-Eisenberg (SKEM) y el modelo e-NRTL. El primero, de carácter semiempírico, supone que la fase líquida se comporta idealmente y ajusta sus parámetros a partir de datos experimentales. En cambio, el modelo e-NRTL incorpora la no idealidad mediante coeficientes de actividad, considerando tanto las interacciones iónicas de largo alcance como las interacciones locales entre todas las especies en la fase líquida. De manera general, se reconoce que el modelo e-NRTL ofrece una adecuada precisión permitiendo que sus parámetros se ajusten con datos experimentales en un intervalo definido de temperatura y concentración.

El presente trabajo tiene como objetivo representar el equilibrio líquido-vapor (ELV) de la mezcla binaria piperazina-agua (PZ-$H_2O$) mediante la aplicación del modelo e-NRTL en GAMS, con el propósito de disponer de información confiable que sirva de base para su aplicación en procesos de captura de $CO_2$. Particularmente, se estudia la evolución de la presión parcial de la piperazina y la presión total del sistema en función de su composición y de la temperatura, y se comparan los resultados obtenidos con datos experimentales disponibles en la literatura (Yi et al., 2024; Hartono et al., 2013; Hilliard et al., 2008) a fin de validar la precisión del modelo. En una primera etapa, el trabajo se enfoca únicamente en el solvente (PZ-$H_2O$), dado que, esta información es fundamental para posteriormente desarrollar un modelo que incluya el $CO_2$.

## 2. Materiales y métodos

Se aplicó el modelo e-NRTL a una mezcla de PZ y $H_2O$ para analizar el efecto de la temperatura y la composición de la mezcla binaria, en la presión parcial de PZ y la presión total, cuando la mezcla alcanza el equilibrio entre fases.

### *2.1 Descripción general del modelo*

En el fenómeno bajo estudio se presentan dos fases en equilibrio: líquido y vapor. En la fase líquida existen dos reacciones en equilibrio R1 y R2. Se puede observar que en la fase líquida hay 5 especies ($i$), 2 moleculares ($PZ, H_2O$) y 3 iónicas ($H_3O^+, OH^-, PZH^+$ ). Por otro lado, en la fase vapor se encuentran únicamente las dos especies moleculares ($PZ, H_2O$). Este equilibrio de fases se presenta en la Figura 1

$$2H_2O \overset{Kw}{\leftrightarrow} H_3O^+ + OH^- \quad \text{(R1)}$$

$$H_2O + PZH^+ \overset{K_{PZH^+}}{\leftrightarrow} PZ + H_3O^+ \quad \text{(R2)}$$

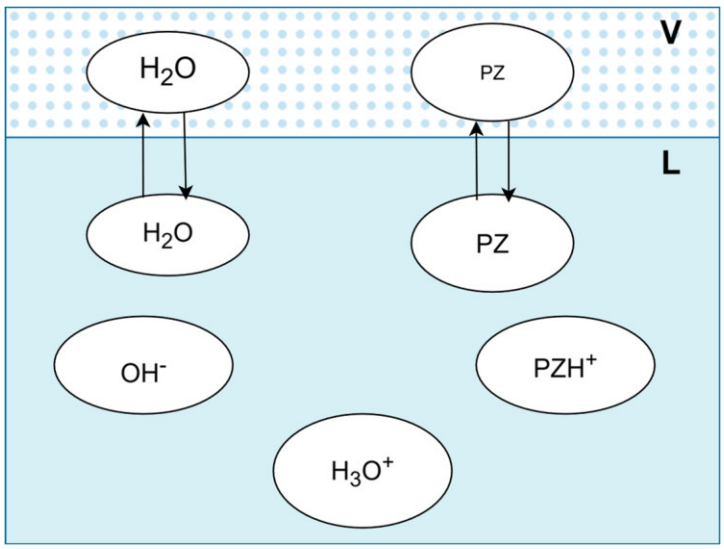



**Figura 1**. Diagrama ELV de PZ en agua.

La composición de la mezcla en equilibrio, expresada en fracciones molares ($x_i$), además de los balances de masa y de cargas debe satisfacer las expresiones de la constante de equilibrio ($K$) para cada una de las reacciones (Ec. 1 y 2). Por otro lado, las constantes de equilibrio de cada reacción dependen solamente de la temperatura (Ec. 3 y 4). En estas ecuaciones, $\Delta G$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

representa la energía libre de Gibbs y R, la constante de los gases. Como referencia para la condición de equilibrio se utilizan los coeficientes de actividad ($\gamma_i$) que se obtienen a partir del modelo e-NRTL.

$$K_w = \frac{\gamma_{H_3O^+}\, x_{H_3O^+}\, \gamma_{OH^-}\, x_{OH^-}}{(\gamma_{H_2O}\, x_{H_2O})^2} \quad (1)$$

$$K_{PZH^+} = \frac{\gamma_{H_3O^+}\, x_{H_3O^+}\, \gamma_{PZ}\, x_{PZ}}{\gamma_{H_2O}\, x_{H_2O}\, \gamma_{PZH^+}\, x_{PZHO^+}} \quad (2)$$

$$\ln(K_W) = -\frac{\Delta G_{R1}}{RT} \quad (3)$$

$$\ln(K_{PZH^+}) = -\frac{\Delta G_{R2}}{RT} \quad (4)$$

Por último, el equilibrio líquido-vapor se establece mediante la igualdad de fugacidades (Ec. 5) y para representar a la fase vapor se empleó la ecuación de estado de Redlich-Kwong. En la ecuación 5 $\emptyset_i^v$ representa el coeficiente de fugacidad del compuesto i en la mezcla de la fase vapor, $y_i$ la fracción molar del componente i en la fase vapor, P la presión total del sistema, $\emptyset_i^0$ el coeficiente de fugacidad del componente puro i a la temperatura T y a su presión de vapor y $P_i^0$ la presión de vapor del componente puro i a la temperatura actual.

$$\emptyset_i^v y_i P = x_i \gamma_i \emptyset_i^0 P_i^0 exp\left[\frac{v_i^0 (P - P_i^0)}{RT}\right] \quad (5)$$

Los parámetros de ajuste, junto con las constantes asociadas a diversas restricciones, se obtuvieron a partir de la bibliografía (Yi et al., 2024) y de la base de datos de Aspen Plus.

2.2 *Implementación y validación*.

El modelo matemático se implementó en el software orientado a ecuaciones GAMS (General Algebraic Modeling System). Este resultó ser NLP (non-linear-programming), cuenta con 166 variables y 156 ecuaciones y para su resolución se empleó el resolvedor no lineal CONOPT.

Se compararon los resultados del modelo implementado con datos experimentales de la literatura. Es relevante mencionar que el modelo se resuelve en modo simulación y no es objetivo del trabajo realizar un ajuste de los parámetros.

## 3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo matemático e-NRTL, junto con su comparación con estudios previos. Los resultados del modelo desarrollado muestran una concordancia razonable con los reportados por Hartono et al. (2013) y Hilliard et al. (2008), así como una similitud aceptable con los gráficos presentados por Yi et al. (2024).

La Figura 2 presenta la evolución de la presión parcial de PZ en función de su fracción molar para distintas temperaturas. Se observa que dicha presión parcial se incrementa tanto al aumentar la concentración de PZ en la mezcla como al elevar la temperatura. En general, la comparación con datos experimentales resulta satisfactoria en el rango de concentración y temperaturas analizado. La representación de los datos experimentales resulta similar al trabajo de referencia (Yi et al., 2024) y a los datos experimentales expuestos en la bibliografía (Hartono et al., 2013; Hilliard et al., 2008).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

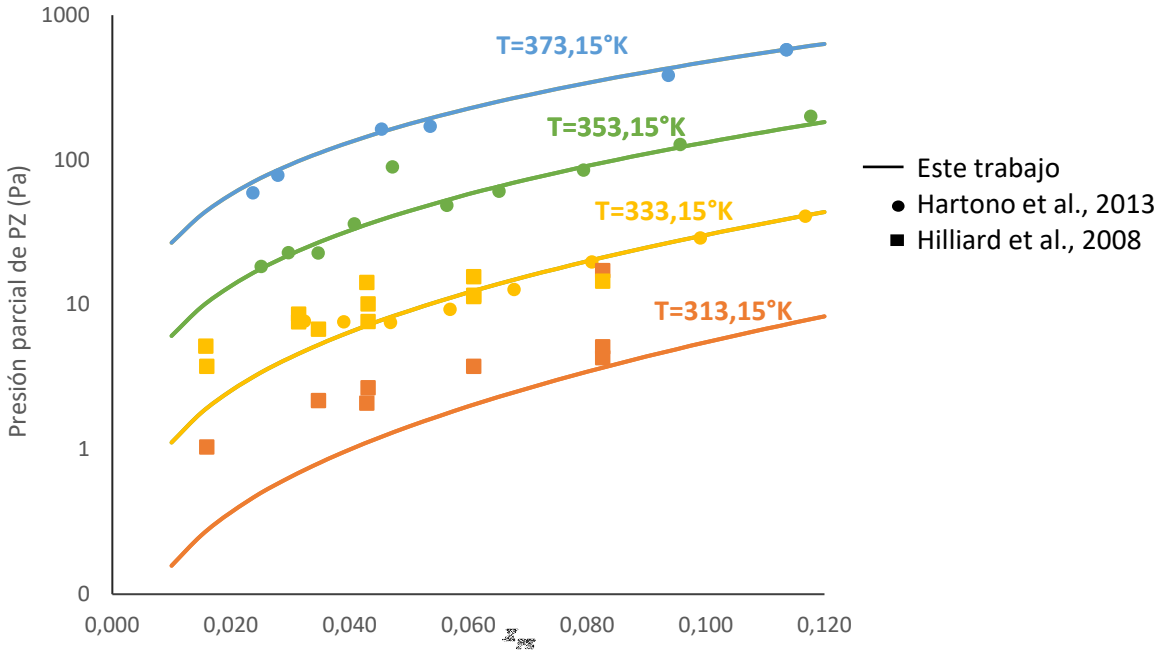



**Figura 2.** Presión parcial de PZ en función de la composición de la mezcla a distintas temperaturas.

La Figura 3 ilustra la evolución de la presión total del sistema en función de la concentración de PZ en las fases líquida y vapor. El análisis se realizó a diferentes temperaturas, evidenciando que, en todos los casos, un incremento en la concentración de PZ conduce a una disminución de la presión total del sistema. Asimismo, los resultados obtenidos con el modelo implementado en este trabajo muestran una concordancia aceptable con los valores experimentales disponibles.

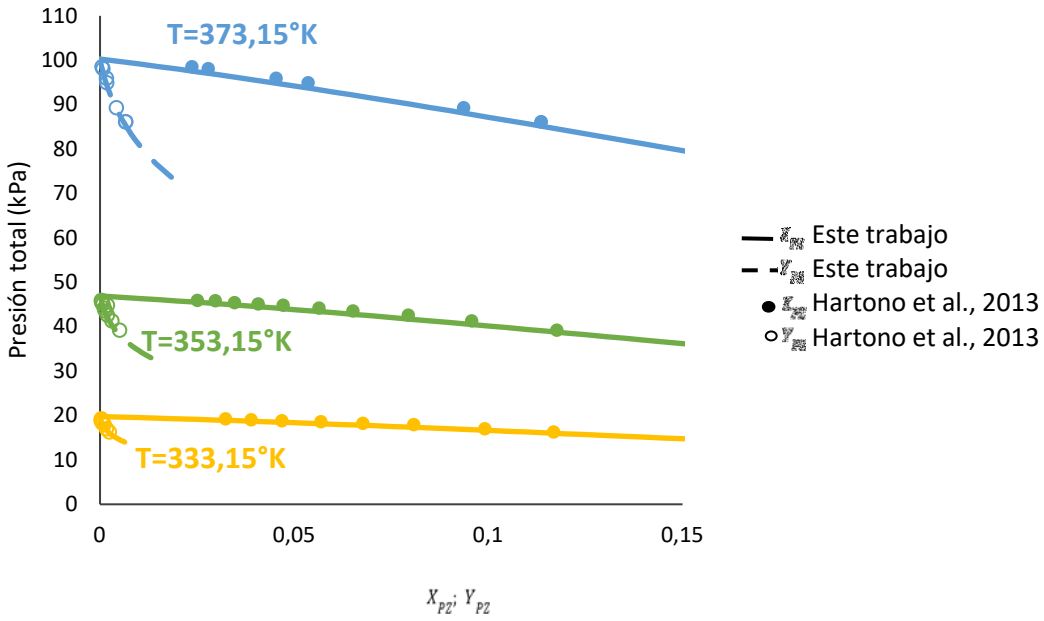



**Figura 3.** Presión total del sistema en función de la fracción molar de PZ en el líquido y en el vapor a distintas temperaturas.

## 4. Conclusiones

El modelo e-NRTL implementado en GAMS para la mezcla binaria PZ-$H_2O$ se ajusta de manera aceptable a datos experimentales en el rango de temperaturas analizado. De esta manera, se puede considerar su uso futuro como solvente para elaborar un modelo que incorpore el $CO_2$. Esto permitiría la estimación de propiedades termodinámicas y de transporte que se requieren en el diseño de equipos de absorción para la captura del mismo.

## Agradecimientos

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Se desea expresar un especial agradecimiento a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, y al Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), así como al doctor Juan Ignacio Manassaldi y a la ingeniera Daira Longo, por su valioso apoyo y contribución al desarrollo del presente trabajo.

## Referencias bibliográficas

Hartono, A., Saeed, M., Ciftja, A. F., & Svendsen, H. F. (2013). “Binary and ternary VLE of the 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP)/piperazine (Pz)/water system”, *Chemical Engineering Science* 91, 151–161.

Yi, N, Herraiz, L, Fang, M, García, S & Van der Spek, M (2024). “Open access, thermodynamically consistent, electrolyte NRTL model for piperazine, AMP, water, CO2 systems on Aspen Plus”, *Separation and Purification Technology*, 350, 127924.

Hilliard, M. D. (2008). “A Predictive Thermodynamic Model for an Aqueous Blend of Potassium Carbonate, Piperazine, and Monoethanolamine for Carbon Dioxide Capture from Flue Gas”, Tesis (Doctor of Philosophy), The University of Texas at Austin, Austin.

Mores, P. L., Manassaldi, J. I., Scenna, N. J., Caballero, J. A., Mussati, M. C., Mussati, S. F. (2018).

“Optimization of the design, operating conditions, and coupling configuration of combined cycle power plants and CO2 capture processes by minimizing the mitigation cost”, *Chemical Engineering Journal*, 331, 870-894.

Longo, D. (2024). “Análisis del modelo matemático e-NRTL del ELV para el sistema reaccionante MEA-CO2-H2O”. Jóvenes Investigadores Tecnológicos, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario, Rosario, Argentina, 18 de octubre de 2024.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Análisis comparativo de modelos termodinámicos en la compresión de biogás

## Comparative analysis of thermodynamic models in biogas compression

Presentación: 30/10/2025

**Facundo Félix Chelini**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina
facuchelini@gmail.com

**Alan Adriel Rodriguez Fogu**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina
E-mail: alanadrielrodriguezfogu@gmail.com

### Resumen

En este trabajo se implementaron modelos de sistemas de compresión con enfriamiento considerando tres modelos termodinámicos para la estimación de propiedades de los gases: Peng Robinson (PR), Soave Redlich Kwong (SRK) y Redlich Kwong (RK). Se compararon los modelos, obteniéndose diferencias porcentuales despreciables entre los resultados de modelación matemática en GAMS y el simulador Aspen Hysys. Además, se analizó la influencia de la relación de compresión en el trabajo de compresión neto. Los modelos RK, SRK y PR resultaron adecuados para simular y optimizar sistemas de compresión de biogás, siendo PR el que mostró la mejor concordancia, por lo que se selecciona para su posterior incorporación a un modelo de purificación de biogás con membranas. También, se observó un comportamiento independiente de los modelos al realizar una variación de la composición representativa de las distintas etapas del proceso de purificación de biogás, y a una presión final mayor del sistema.

**Palabras clave:** Ecuaciones de estado, Modelado matemático, Optimización no lineal, Sistema de compresión

### Abstract

In this work, compression systems with intercooling were modeled using three thermodynamic models for estimating gas properties: Peng-Robinson (PR), Soave-Redlich-Kwong (SRK), and Redlich-Kwong (RK). The models were compared, showing negligible percentage differences between the mathematical modelling results in GAMS and the Aspen HYSYS simulator. Additionally, the influence of the compression ratio on the net compression work was analyzed. The RK, SRK, and PR models were found to be suitable for simulating and optimizing biogas compression systems, with PR showing the best agreement and thus selected for subsequent integration into a membrane-based biogas purification model. Also, independent behavior of the models was observed when varying the representative composition of the different stages of the biogas purification process, and at a higher final system pressure.

**Keywords:** State equations, Mathematical modelling, Nonlinear optimization, Compression system

## 1. Introducción

La creciente preocupación por el cambio climático y la gran dependencia en las fuentes fósiles para la obtención de energía ha impulsado el desarrollo de alternativas energéticas provenientes de fuentes renovables que contribuyan a una matriz más sostenible. En este contexto, el biogás se ha consolidado como una opción con alto potencial, ya que este se obtiene a partir

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, promoviendo, a su vez, la valorización de desechos y la generación de energía limpia. Dicho biogás constituye una fuente de metano que, si es adecuadamente purificada, puede reemplazar al gas natural fósil sin incrementar la concentración de dióxido de carbono ($CO_2$) atmosférico (Yusuf & Almomani, 2023).

El biogás presenta una composición variable según el sustrato utilizado y las condiciones del biodigestor, generalmente está constituido por 55–60% de metano ($CH_4$), 35–40% de dióxido de carbono, vapor de agua ($H_2O$), y trazas de compuestos como ácido sulfhídrico ($H_2S$), amoníaco ($NH_3$) y compuestos orgánicos volátiles (VOC´s) (Werkneh et al., 2022). Esta fracción significativa de $CO_2$ limita el poder calorífico del gas y dificulta su inyección en redes de distribución, además de incrementar su agresividad frente a materiales metálicos por la formación de ácidos en presencia de humedad. Por ello, la etapa de purificación resulta crítica para obtener un producto final con un contenido superior al 95% de $CH_4$, asimilable al gas natural de uso comercial (Rodero-Raya et al., 2024).

Entre los distintos métodos de separación, la tecnología de membranas es una de las más prometedoras debido a su bajo consumo energético, simplicidad operativa y menores costos de inversión y operación en comparación con otras técnicas como absorción química (Tomczak et al., 2024). Para que el biogás pueda ser alimentado a un sistema de membranas, se requiere alcanzar presiones de operación adecuadas. En este sentido, la compresión en múltiples etapas con enfriamiento intermedio constituye una estrategia clave, ya que reduce la temperatura alcanzada tras cada compresión, disminuye el trabajo neto requerido y protege la integridad de los equipos (Yusuf & Almomani, 2023). De esta forma, el proceso de compresión no solo es un requisito operativo para la separación, sino que también influye directamente en la eficiencia energética global del proceso.

En este trabajo se propone el diseño y modelado de un sistema de compresión dual, el cual incorpora un proceso de enfriamiento intermedio posterior a cada etapa de compresión, y es implementado en GAMS (General Algebraic Modelling System), como etapa previa a la separación por membranas. El objetivo es analizar cómo las condiciones de operación y el uso de diferentes ecuaciones de estado (PR, RK y SRK) impactan en la minimización del trabajo total de compresión, integrando de manera coherente el aprovechamiento de metano proveniente de biodigestores como fuente de energía renovable.

## 2. Materiales y métodos

El desarrollo de los modelos de compresión dual con enfriamiento fue estructurado en distintas etapas, con el objetivo de representar de manera rigurosa el comportamiento termodinámico del sistema y optimizar su desempeño energético. En primera instancia, se definió la composición de la mezcla gaseosa de alimentación, y, mediante la aplicación de tres paquetes de propiedades termodinámicos desarrollados anteriormente en el Centro en forma de librerías, se obtuvieron distintas características de los componentes (entalpía, densidad y entropía). Para lograrlo, éstos requieren el aporte de distintos parámetros, como lo son las propiedades críticas y el calor de formación de cada componente, los coeficientes de interacción binaria, y los coeficientes de estimación de la capacidad calorífica a presión constante. Este paso resultó esencial para particularizar el modelo al caso de estudio, permitiendo establecer las bases para una posterior implementación en el entorno de simulación.

Una vez obtenida la caracterización inicial, se procedió a realizar la formulación matemática del sistema de compresión en dos etapas, la cual permite describir el funcionamiento de los equipos que integran el mismo: dos compresores y dos intercambiadores de calor, dadas las condiciones de entrada y salida (presión, temperatura, composición y caudal molar). Se modela bajo condiciones no ideales ya que, según Da Conceicao et. al. (2023), a presiones iguales o superiores a los 10 bar debe asumirse un comportamiento real de la mezcla gaseosa.

En síntesis, la metodología propuesta integra la caracterización de la mezcla, la formulación matemática del sistema, y la optimización numérica en GAMS, lo que permite evaluar la influencia de las variables de operación sobre el trabajo requerido en un proceso de compresión multietapa con enfriamiento intermedio.

### 2.1. *Descripción del sistema de compresión*

El gas proveniente del biodigestor (F-1) ingresa al sistema de compresión bajo las condiciones $P_1$ = 1,01325 bar y $T_1$=313,15 K. El primer compresor ($C_1$) realiza un trabajo de compresión W-1, y, como resultado, la presión y temperatura se

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

incrementan, obteniendo una corriente de gas de salida (F-2) con temperatura $T_2$ y presión $P_2$. La salida del primer compresor se alimenta a un primer intercambiador de calor ($IC_1$), el cual disminuye la temperatura del flujo sin producir un descenso de presión y entrega un calor Q-1. La corriente salida (F-3) es alimentada a un segundo y último compresor ($C_2$), que incrementa la presión a su valor final ($P_4 = P_5$) y realiza un trabajo W-2, y, nuevamente, la temperatura es incrementada. La última etapa del sistema consta de un segundo intercambiador de calor ($IC_2$), el cual disminuye la temperatura ($T_5$), y entrega un calor Q-2. Todas las compresiones son realizadas isoentrópicamente. El esquema del sistema de compresión se detalla en la Figura 1.

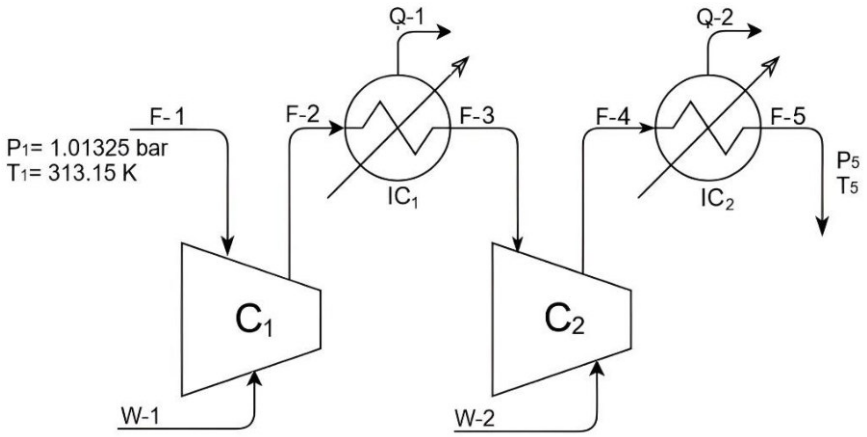



**Figura 1.** Gráfico de sistema de compresión (elaboración propia).

2.2. *Modelado matemático*

Se desarrollaron tres modelos matemáticos, los cuales buscan optimizar el trabajo de compresión, basados en distintas ecuaciones de estado en fase vapor: Peng Robinson (PR), Soave Redlich Kwong (SRK) y Redlich Kwong (RK), representadas por las ecuaciones (1), (2) y (3), respectivamente, donde a y b son parámetros característicos de cada sustancia, α es una función de la temperatura, V es el volumen de la mezcla, y R es la constante universal de los gases. Se empleó el resolvedor CONOPT, dado que las ecuaciones termodinámicas y de balance presentan un comportamiento intrínsecamente no lineal. Los modelos desarrollados consisten en 58 variables y 48 restricciones de igualdad y desigualdad. El modelado permitió obtener una solución que no solo reproduce el comportamiento físico del sistema, sino que además garantiza condiciones de operación energéticamente más eficientes.

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b) + b(V - b)} \tag{1}$$

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a\alpha(T)}{V(V + b)} \tag{2}$$

$$P = \frac{RT}{V_F - b} - \frac{a(T^{-0.5})}{F(V_F + b)} \tag{3}$$

En los tres casos, se implementaron de manera consistente los balances de materia y energía para cada etapa del proceso, lo que permitió describir el comportamiento termodinámico de la corriente a través de los compresores y los intercambiadores de calor intermedios. Esta formulación garantiza una representación coherente del sistema, facilitando la estimación del trabajo de compresión y el efecto del enfriamiento intermedio sobre la eficiencia global del proceso. Se distinguen idénticos balances de materia para los dos tipos de quipos empleados en el sistema para los tres modelos ($F_e - F_s = 0$ y $F_e x_e^i - F_s x_s^i = 0$). En cuanto a los balances de energía, se distinguen los del compresor ($F_e H_e - F_s H_s + W = 0$; $S_e - S_s^{ID} = 0$; $\eta(H_s - H_e) = H_s^{ID} - H_e$) y el del intercambiador de calor ($F_e H_e - F_s H_s - Q = 0$). Donde F es el caudal molar, e es entrada, s es salida, x es la fracción molar de cada componente i, H y S son la entalpía y entropía de la corriente respectivamente, ID indica que es el estado de referencia ideal, Q es el calor del intercambiador, y W y η son el trabajo y la eficiencia del compresor.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 3. Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestran las condiciones de entrada al primer compresor para los puntos 3.1. y 3.2., dicha composición fue basada en lo presentado por Žák et al. (2018), y fue levemente modificada para que la suma de las fracciones molares resulte igual a la unidad. Además, la presión de salida del sistema es de P-5 = 10 bar.

**Tabla 1**. Datos de entrada para una mezcla multicomponente

| F [kmol/h] | P[bar] | T [K] | $X_i$ [Base Molar] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,41 | 1,01325 | 313,15 | $CO_2$: 0,4706 | $CH_4$: 0,5100 | $O_2$: 0,0100 | $H_2S$: 0,00095 | $H_2O$: 0,0084 |

3.1. *Validación del modelo*

Como instancia de validación, se realizó la comparación entre los resultados del trabajo neto óptimo del sistema de compresión obtenidos mediante el modelo desarrollado en GAMS para cada ecuación de estado y los obtenidos en Aspen HYSYS. Los mismos se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Comparación de trabajo neto óptimo [kJ/h]

| | GAMS | HYSYS | Diferencia [%] |
|---|---|---|---|
| PR | 19050,3764 | 19050,3765 | 0,00000073 |
| RK | 19050,62 | 19008,85 | 0,22 |
| SRK | 19079,3142 | 19079,3146 | 0,0000021 |

Las diferencias obtenidas resultan prácticamente insignificantes, lo que respalda la validez de los modelos desarrollados y su consistencia frente a los casos de referencia.

3.2. *Análisis de resultados en condiciones no ideales con P-5 =10 bar.*

En las Figuras 2 y 3 se analiza la influencia de la variación paramétrica de la presión de salida del primer compresor (P-2). en el trabajo de compresión. En la Figura 2 se observa que la diferencia entre los modelos PR y SRK es despreciable en todo el rango analizado (alrededor del 0,0013%), y presenta una diferencia menor respecto del SRK (aproximadamente 0,15%). Cuando la presión es aproximadamente 3,208 bar, el trabajo neto de compresión es mínimo.

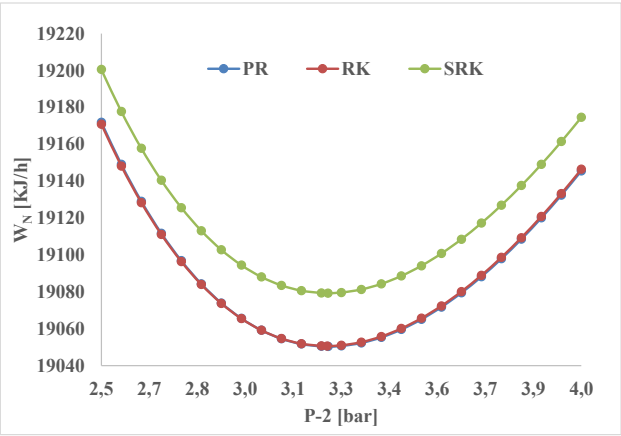



**Figura 2.** Trabajo neto considerando los tres modelos termodinámicos

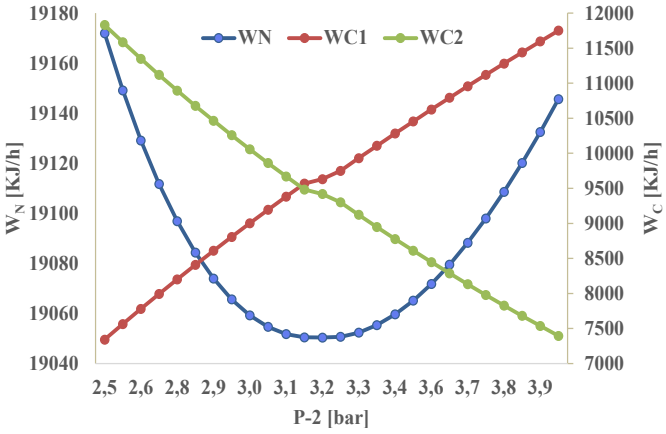



**Figura 3.** Trabajo neto y de compresores para PR

En la Figura 3 se muestra la evolución del trabajo de cada compresor para el modelo PR, observándose que al aumentar P-2 el trabajo requerido en el primer compresor se incrementa, mientras que el del segundo disminuye. Como es de esperar, estas tendencias son muy similares para SRK y RK. Por lo tanto, se puede concluir que el mínimo trabajo neto se alcanza cuando ambas etapas operan con la misma relación de compresión, repartiendo de manera equilibrada el esfuerzo de compresión entre los equipos.

*3.3. Análisis de resultados en condiciones no ideales con P-5 = 20 bar.*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Dado que los tres modelos dan resultados similares, se selecciona a PR como representativo del comportamiento de los mismos con el fin de analizar la influencia de la presión y la composición de la mezcla a comprimir. Se consideró el doble de presión respecto del caso base y se consideraron composiciones representativas de la alimentación (A), el permeado (P) y el retenido (R) de una etapa de separación por membranas. Las composiciones, presentadas en el trabajo de Zak et. al. (2018), son las siguientes: $X^P_{CH_4}: 0{,}24 - X^P_{CO_2}: 0{,}7348 - X^P_{O_2}: 0{,}012 - X^P_{H_2S}: 0{,}0012 - X^P_{H_2O}: 0{,}012$ y $X^R_{CH_4}: 0{,}96 - X^R_{CO_2}: 0{,}0315 - X^R_{O_2}: 0{,}006 - X^R_{H_2S}: 0{,}0006 - X^R_{H_2O}: 0{,}0019$. Además, se establece la fracción de vapor en la unidad. Bajo esas condiciones, se observa en la Tabla 3 que la presión y el trabajo neto óptimos presentan diferencias despreciables, lo que sugeriría una independencia de los resultados del modelo termodinámico respecto de la composición.

**Tabla 3.** Comparación de trabajo neto óptimo [kJ/h] y presión óptima [bar] (P-5 = 20 bar, PR)

| | **Alimentación** | **Permeado** | **Retenido** | **Dif. A vs P** | **Dif. A vs R** |
|---|---|---|---|---|---|
| **$W_N$ [kJ/h]** | 25727,6 | 25610,9 | 25883,2 | 0,4537% | -0,6045% |
| **P-2 [bar]** | 4,585 | 4,607 | 4,560 | -0,4798% | 0,5453% |

Por otro lado, en la Tabla 4 se observa que, al incrementar la presión final (P-5=20 bar), en promedio para las tres composiciones, el trabajo de compresión en la segunda etapa representa el 77% del total (la presión se incrementa de 4,6 bar a 20 bar). Este resultado es mayor al caso de base (P-5=10 bar) en el que la presión se modifica de 3,2 bar a 10 bar (68% del total).

**Tabla 4.** Comparación de trabajo óptimo de cada compresor [kJ/h] (P- 5= 20 bar, PR)

| **Alimentación** | | **Permeado** | | **Retenido** | |
|---|---|---|---|---|---|
| **CP1** | **CP2** | **CP1** | **CP2** | **CP1** | **CP2** |
| 13111,947 | 12615,7 | 13123,863 | 12487,0 | 13109,663 | 12773,5 |

## 4. Conclusiones

Se implementaron modelos de sistemas de compresión-enfriamiento dual considerando tres modelos termodinámicos para la estimación de propiedades de los gases (RK, SRK y PR). Se compararon los modelos obteniéndose diferencias porcentuales despreciables entre los resultados de modelación matemática en GAMS y el simulador Aspen Hysys. Los modelos (RK, SRK y PR) resultaron adecuados para simular y optimizar sistemas de compresión de biogás a presiones elevadas donde el comportamiento del gas se aleja del ideal. También, se observó una independencia de los requerimientos de compresión respecto de la composición del gas a comprimir. Si bien los tres modelos mostraron un desempeño adecuado, se adoptará el de PR para modelar las etapas de compresión y enfriamiento e incorporarlas a un modelo de dos o más membranas para la purificación de biogás y la captura de CO2. El objetivo final será evaluar rangos típicos de composiciones de biogás según su origen y analizar el comportamiento del sistema de separación en su conjunto.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo educativo provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario (UTN-FRRo) y el Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI). También, al Dr. Juan Ignacio Manassaldi, a la Dra. Patricia Mores, y a Rocío Asad, por el acompañamiento y revisión durante el desarrollo de este trabajo.

## Referencias bibliográficas

Asad, R. V. (2023). Modelo matemático de una membrana para la purificación de una mezcla multicomponente de biogás. Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos JIT 2024, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Da Conceicao, M., Nemetz, L., Rivero, J., Hornbostel, K., & Lipscomb, G. (2023). Gas Separation Membrane

Module Modeling: A Comprehensive Review. Membranes, 13(7), 639.

Tomczak, W., Gryta, M., Daniluk, M., & Żak, S. (2024). Biogas Upgrading Using a Single-Membrane System: A Review. Membranes, 14(4), 80.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Rodero-Raya, M. D. R., Muñoz, R., González-Sánchez, A., & Ruiz, H. A. (2024). Membrane materials for biogas purification and upgrading: Fundamentals, recent advances and challenges. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(5), 114106.

Werkneh, A. A. (2022). Biogas impurities: Environmental and health implications, removal technologies and future perspectives. Heliyon, 8(10), e10929.

Yusuf, N., & Almomani, F. (2023). Recent advances in biogas purifying technologies: Process design and economic considerations. Energy, 265, 126163.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Análisis comparativo del comportamiento del residuo de levaduras de la producción de cerveza frente a distintos métodos de secado

## Comparative study of the behavior of yeast residues from beer production compared to different drying methods

Presentación: 30/10/2025

**Matías Bergamaschi**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), Rosario, Santa Fe, Argentina
matiasbergamaschi@gmail.com

**Alejo Ravagnan**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), Rosario, Santa Fe, Argentina
ravagnanalejo@gmail.com

**Nicolas Lucenti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), Rosario, Santa Fe, Argentina
nicolucen@gmail.com

**Sofia Rey**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), Rosario, Santa Fe, Argentina
sofireyros@gmail.com

**Lucia Ferreyra**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), Rosario, Santa Fe, Argentina
ferreyralu2000@gmail.com

**Lisandro Rudolf**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), Rosario, Santa Fe, Argentina
lisandrorudolf@gmail.com

**Mauro Leombruno**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), Rosario, Santa Fe, Argentina
munileo927@gmail.com

**Candela Modica**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), Rosario, Santa Fe, Argentina
candelamodica@gmail.com , Argentina

### Resumen

El proceso productivo cervecero genera efluentes con un impacto ambiental significativo, entre ellos el residuo de levaduras por su contenido de DBO. Es importante considerar una opción superadora al vertido de éste contribuyendo con producción sustentable. Esta investigación tiene como objetivo el estudio de un producto para recuperar el residuo e incorporar valor agregado. Para ello se evaluó el comportamiento del residuo de levaduras aplicando tres métodos de secado: estufa con y sin

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

convección forzada, y vacío a temperatura ambiente. Se obtuvieron contenidos críticos de humedad 4,6 ± 0,1 g y 5,4 ± 0,1 g para convección forzada y libre respectivamente a tiempos críticos de 35 y 50 minutos, no se alcanzó el punto crítico para el método de secado en vacío. Como conclusión, descartamos los resultados obtenidos en esta experiencia, la misma demandó mucho tiempo respecto de las otras, siendo una desventaja operativa y económica.

**Palabras clave:** Secado, Levadura, Residuo, producción sustentable

## Abstract

The brewing process generates effluents with a significant environmental impact, including yeast waste due to its BOD content. It is important to consider an alternative to discharging this waste, contributing to sustainable production. This research aims to study a product that can recover the waste and incorporate added value. To this end, the behavior of the yeast waste was evaluated using three drying methods: oven drying with and without forced convection, and vacuum at room temperature. Critical moisture contents of 4.6 ± 0.1 g and 5.4 ± 0.1 g were obtained for forced and free convection, respectively, at critical times of 35 and 50 minutes; the critical point was not reached for the vacuum drying method. In conclusion, we reject the results obtained in this experiment because it took a lot of time compared to the others, which was a disadvantage from an operational and economic perspective.

**Keywords:** Drying, Yeast, Residue, Sustainable Production

## 1. Introducción

En los últimos años, la producción y el consumo de cerveza artesanal han experimentado un crecimiento sostenido tanto a nivel nacional como regional. En la provincia de Santa Fe, dicho aumento ha sido acompañado por políticas de incentivo y apoyo a la producción, elaboración y comercialización de estos productos, fomentando incluso la apertura hacia mercados de exportación. Según la Cámara Argentina de Productores de Cerveza Artesanal, el sector creció alrededor de un 40% en los últimos cinco años en Argentina (Bae Negocios, 2022), consolidándose como una de las industrias emergentes más dinámicas del país.

Como contrapartida, este proceso genera efluentes y residuos con alto impacto ambiental. Entre ellos, el más relevante corresponde a las levaduras, que representan entre un 4 y 6% del volumen total de cerveza producida (Seluy, 2015) y se caracteriza por su elevada demanda biológica de oxígeno (DBO). La gestión de este subproducto depende de los recursos y capacidades de cada productor: algunos lo reutilizan parcialmente en nuevos lotes (con un número limitado de recuperación) o en alimentación animal, mientras que en muchos casos se descarta junto con el efluente. Estás prácticas implican elevados costos logísticos y operativos debido a su alto contenido de humedad, además de generar incumplimiento del marco normativo ambiental vigente.

Las levaduras de cervecería son organismos unicelulares que poseen valor nutricional y biotecnológico (Martinet et al., 2023, Cruz Daza y Meyer Sánchez, 2019, Ferreira et al, 2010; Otero et al, 2000). Diversos estudios muestran su aplicaciones en la alimentación animal (Díaz-Plascencia et al., 2022; Arevalo Tanata, 2018; Ozorio et al, 2003), y procesos industriales. Su aprovechamiento presenta limitaciones prácticas: debe ser utilizada en corto plazo, bajo refrigeración, o sometida a procesos de inactivación para conservar su valor nutricional.

En la ciudad de Rosario, un número creciente de establecimientos cerveceros genera biomasa residual de levaduras que, en gran parte, termina siendo descartada por falta de infraestructura, lo que genera desventajas competitivas y aleja a los productores del concepto de producción verde. Estudios previos han abordado el proceso de producción de cerveza artesanal y sus variables operativas (Martinet et al., 2023), la optimización de la reutilización de levaduras y su impacto en la calidad del efluente (Stüber et al., 2023; Bertune et al, 2021), estudios realizados en colaboración con productores y organismos de control ambiental.

Uno de los métodos más simples, accesibles y efectivos para el tratamiento de residuos de levadura cervecera es el secado en estufa, el cual permite reducir significativamente el volumen y la humedad del residuo, facilitando su conservación, manejo y posterior valorización. Es una técnica de bajo costo operativo y bajo requerimiento tecnológico, adecuado para pequeñas y

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

medianas cervecerías artesanales que buscan una gestión sustentable de sus subproductos (Kang et al., 2025). Entre sus ventajas, destaca la reducción de hasta un 80 % del volumen original del residuo, lo que minimiza los costos logísticos y el impacto ambiental del descarte (Vorländer et al., 2023). Asimismo, este tratamiento posibilita el aprovechamiento del residuo seco como ingrediente en alimentos, suplementos nutricionales o como materia prima para la extracción de β-glucanos y otros compuestos bioactivos de alto valor (Industria Alimentaria, 2023). Por lo tanto, el secado en estufa representa una solución práctica y sustentable para transformar un residuo orgánico en un recurso útil dentro de la economía circular. Páramo et al. (2002), realizaron experiencias de secado a temperaturas de 40, 50 y 60 °C. En sus estudios, proponen el secado de levaduras cerveceras con el objetivo de su implementación en alimentación animal. Picado et al. (2005) evaluaron la cinética de secado de la levadura cervecera, para lo cual utilizaron temperaturas de 40, 50 y 60 °C. Kang et al. (2025), propusieron que una temperatura de secado de 50 °C puede ser un buen compromiso entre eficiencia de secado y preservación de valor agregado.

En este contexto, el presente trabajo propone evaluar diferentes métodos de procesamiento del residuo de levaduras, particularmente técnicas de secado, con el fin de optimizar su aprovechamiento y transformarlo en un producto con valor agregado, minimizando el impacto ambiental de la industria cervecera artesanal, promoviendo la transición hacia prácticas de producción sustentable y favoreciendo el cumplimiento del marco normativo.

## 2. Materiales y métodos

2.1 *Materiales*

- Residuo de levadura de productores locales.
- Estufa con convección forzada marca DALVO.
- Estufa sin convección forzada marca SIFIC.
- Desecador.
- Bomba de vacío marca BOECO R-300.
- Balanzas BOECO BAS 31 plus y OHAUS Scout Pro.
- Cápsula de aluminio de 5,7 cm de diámetro y 0,5 cm de altura.

2.2 *Métodos*

2.2.1 Ensayo de secado por vacío a temperatura ambiente

Se homogeneizó la muestra y se pesaron 11,0 ± 0,1 g en la cápsula de aluminio. Posteriormente se llevó al sistema de vacío. Se registró la modificación del peso cada 30 minutos hasta obtener peso constante. Las determinaciones se realizaron por duplicado.

2.2.2 Ensayo de secado por convección forzada:

Se homogeneizó la muestra y se pesaron 11,0 ± 0,1 g en la cápsula de aluminio. Se llevó a la estufa a 70°C y una velocidad del aire de secado de 0,7 m/s. Se registró la modificación del peso cada 5 minutos hasta obtener peso constante. Las determinaciones se realizaron por duplicado.

2.2.3 Ensayo de secado sin convección forzada:

Se homogeneizó la muestra y se pesaron 11,0 ± 0,1 g en la cápsula de aluminio. Posteriormente se llevó a la estufa a 70°C. Se registró la modificación del peso cada 5 minutos hasta obtener peso constante. Las determinaciones se realizaron por duplicado.

Tanto para el ensayo de secado por vacío como para el secado en estufa, se utilizó una balanza contigua a los equipos con el objetivo de minimizar el tiempo de pesada, sin dejar enfriar las muestras.

## 3. Resultados y discusión

Los parámetros a evaluar para los 3 métodos de secado fueron los siguientes

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- Humedad remanente en función del tiempo, tanto en base húmeda como su posterior ajuste a base seca en pos que el análisis sea representativo.
- Velocidad de secado en función de humedad remanente.
- La fracción de humedad, tanto en base húmeda como seca.
- Tiempo crítico de secado y contenido crítico de humedad

A continuación, se muestran las curvas obtenidas para el secado de residuos de levaduras. En la Figura 1, se observa la evolución de la humedad expresada en g agua/g sólido seco en función del tiempo. Se realizó el ajuste de estas a un polinomio de grado 3, para representar el comportamiento frente al tratamiento térmico y a los fines de poder procesar los datos y obtener la velocidad de secado en función de la humedad, para los distintos tratamientos. Se obtuvo un ajuste de 0.9972, 0.9994 y 0,999 para el secado a vacío, convección libre y convección forzada respectivamente.

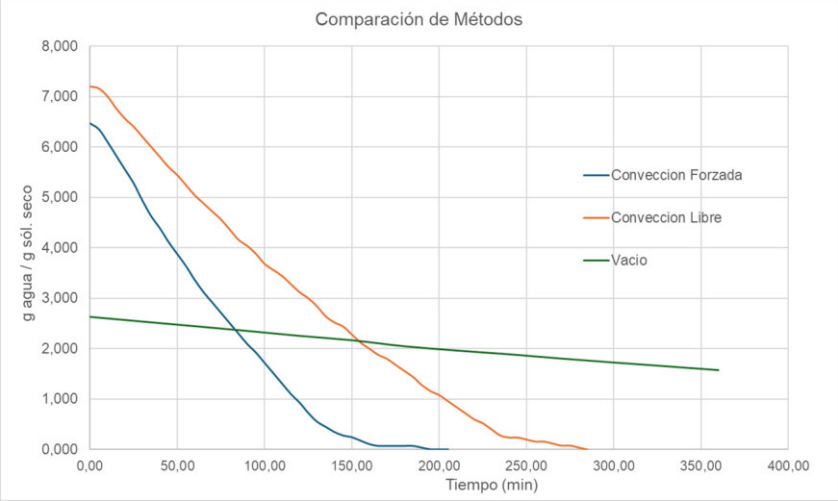



**Figura 1**. humedad base seca vs tiempo

En la Figura 2 se muestran las velocidades de secado obtenidas para cada caso. En las mismas pueden observarse los tiempos críticos de secado, donde el cambio de pendiente, tendiendo a valores pequeños.

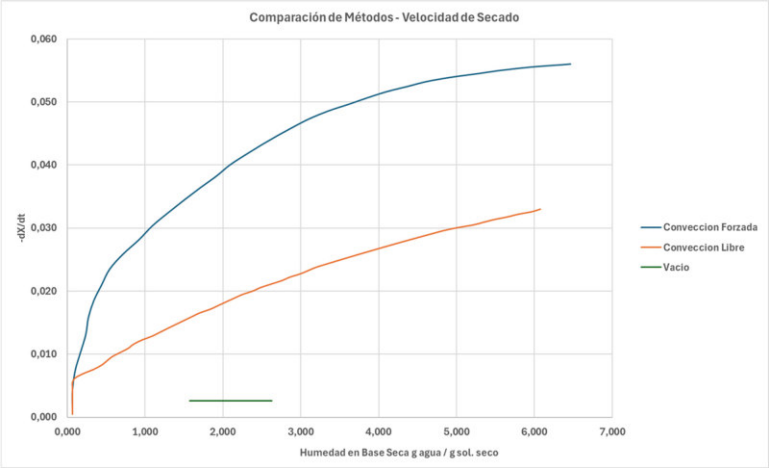



**Figura 2**. Velocidad de secado vs Humedad remanente en base seca

En las condiciones de ensayo para el método de secado con convección forzada el tiempo crítico obtenido fue menor como también el contenido critico de humedad a la que se llegó, lo cual es coincidente con los conceptos de secado, transferencia de calor y de masa. En la Tabla I se muestran los valores para facilitar su apreciación.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla I**. Variación de la humedad en base seca en función del tiempo

| | Convección Forzada | Convección Libre |
|---|---|---|
| Tiempo (minutos) | Seca g agua / g sol. seco | Humedad en Base Seca g agua / g sol. seco |
| 0,00 | 6,464 | 7,20 |
| 5,00 | 6,347 | 7,16 |
| 10,00 | 6,093 | 7,00 |
| 15,00 | 5,820 | 6,76 |
| 20,00 | 5,546 | 6,56 |
| 25,00 | 5,272 | 6,40 |
| 30,00 | 4,929 | 6,20 |
| 35,00 | 4,621 | 6,00 |
| 40,00 | 4,382 | 5,80 |
| 45,00 | 4,108 | 5,60 |
| 50,00 | 3,868 | 5,44 |
| 55,00 | 3,629 | 5,24 |
| 60,00 | 3,355 | 5,04 |
| 65,00 | 3,115 | 4,88 |
| 70,00 | 2,910 | 4,72 |
| 75,00 | 2,704 | 4,56 |
| 80,00 | 2,499 | 4,36 |
| 85,00 | 2,294 | 4,16 |
| 90,00 | 2,088 | 4,04 |

## 4. Conclusiones

Como conclusiones del presente trabajo, descartamos los resultados obtenidos de la experiencia de secado asistida por vacío y realizada a temperatura ambiente debido a que la misma demandó mucho tiempo respecto de las otras siendo una desventaja desde el punto de vista operativo y económico, en la misma no se evidenció un tiempo crítico, ya que la velocidad con la que se elimina el agua en la superficie de la muestra, no llego a superar la velocidad de difusión de esta desde su interior hasta la superficie expuesta. Se propone para estudios futuros, continuar con el secado del residuo de levaduras evaluando distintas temperaturas para los dos métodos seleccionados, el impacto en su perfil nutricional como así también realizar el estudio económico de los métodos empleados.

## Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la UTN-FRRo y al CIDTA, por su valiosa ayuda y por brindarnos el soporte e infraestructura para desarrollar las actividades. También a quienes nos proveen las muestras. Además, a todos los integrantes del Proyecto Evaluación de Métodos de Secado del Residuo de Levaduras en la Producción de Cerveza para la obtención de productos con valor agregado e impacto en el desarrollo productivo verde.

## Referencias bibliográficas

Arevalo Tanata, D. L. (2018). Uso de levadura de cervecería (Saccharomyces cerevisiae) para disminuir los costos de producción de pollos parrilleros en Ucayali. Trabajo de investigación en la Universidad Nacional de Ucayali (Perú).

Bertune, S, D´ortona, K, Recoaro, A, Sartori, M.(2021). Caracterización fisicoquímica de maltas disponibles en el mercado para cerveceros artesanales, Actas de JIT 2019, 26 y 27 de septiembre, Universidad Tecnológica Nacional de Rosario.

Bojorge, R., Martínez, J., Páramo, L., Picado, A (2002). Diseño de un sistema separador secador para la recuperación de cerveza residual y secado de la levadura con fines a su utilización como alimento animal. Tesis (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Ingeniería UNI-RUSB, Managua, Nicaragua, 128 páginas.

Campetelli, G., Fajardo, N., Ferritto Fernandez, A. C., Godoy, E., Martinet, R., Modica, C., Moreno, A., Rey, S., Rubio Bonnet, M., Rudolf, L. y Stüber, Y. (2023). Diseño de un proceso de producción de cerveza a escala laboratorio en vistas de optimizar el proceso de recuperación de levaduras. Trabajo presentado en CYTAL 2023. Universidad Tecnológica Nacional de Rosario.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Cruz Daza, E., Meyer Sánchez, L. (2019). Evaluación de la reutilización de levadura Saccharomyces cerevisiae para la implementación en un segundo proceso fermentativo de la cerveza tipo pale ale belga producida en la Cerveceria Moonshine. Tesis (Ingeniero Químico), Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías, Bogotá D.C., 221 páginas

Díaz-Plascencia, D., Ordóñez-Baquera, P. L., Mancillas-Flores, P. F., Gallegos-Jiménez, J. C., Villarreal-Balderrama, J. A., Espinoza-Prieto, J. R., & Martínez-Yáñez, R. (2022). Mejora del comportamiento productivo de cerdos en crecimiento-finalización por consumo de aditivo líquido de levaduras. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 9(1). https://doi.org/10.19136/era.a9n1.2905

Ferreira, I. M. P. L. V. O., Pinho, O., Vieira, E., & Tavarela, J. G. (2010). Brewer's Saccharomyces yeast biomass: Characteristics and potential applications. Trends in Food Science & Technology, 21(2), 77–84. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.008

Industria Alimentaria. (2023). Nueva técnica de secado de levadura de cerveza preserva su valor nutricional. Recuperado de https://www.industriaalimentaria.org/blog/contenido/nueva-tecnica-de-secado-de-levadura-de-cerveza-preserva-su-valor-nutricional

Kang, H. J., Yu, H. H, Cho, C. W., Rhee, Y. K., Kim, T. W. y Chin, Y. W. (2025). Optimización de la composición del medio y las condiciones de secado en lecho fluidizado para la producción eficiente de levadura seca. Microorganisms, 13(1), 22. https://doi.org/10.3390/microorganisms13010022

Martínez, L. A., Disalvo, A., & Moreno, S. (2020). Obtención y caracterización de β-glucanos a partir de levadura residual de cerveza artesanal. Repositorio CONICET Digital. Recuperado de https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/CONICETDig_cf731ede00a00ca6c96846a852b5be90

Otero, M. A., Cabello, A., García, L., López, J., Vasallo, M. C. (2000). Tecnología para la utilización integral de la levadura de cerveza en la industria alimenticia. Archivos Latinoamericanos de nutrición, 50(4), 361-365

Ozório, O. A, Verreth, J. A. J, Aragao, C. R, Vermeulen, C. J., Schrama, J. W., Verstegen, M. W. A. y Huisman, E. A. (2003). Los suplementos dietéticos de carnitina aumentaron el metabolismo lipídico y disminuyeron la oxidación proteica en juveniles de bagre africano (Clarias gariepinus) alimentados con altos niveles de grasa . Revista de acuicultura en los trópicos, 18 (3), 225-238.

Picado, A., Mendiet, R. y Martínez, J. (2005). Cinética de secado de la levadura cervecera (Saccharomyces cerevisiae). Nexo, 19(01), 49-56.

Seluy, L. G. (2015). Procesos de tratamiento y valorización de efluentes de la industria cervecera, Tesis (Doctor en Ingeniería), Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, 216 páginas.

Stüber, Y., Godoy, E., Campetelli, G., & Martínez, R. (2023). Impacto del recuperado de levaduras sobre la calidad del efluente de la producción de cerveza artesanal. Trabajo presentado en CONASA 2023. Recuperado de https://ria.utn.edu.ar/items/fab88b73-1398-4d15-8985-74383173bfc0

Vorländer, K., Bahlmann, L., Kwade, A., Finke, J. H. y Kampen, I. (2023). Efecto de los parámetros de proceso, los protectores y los materiales de soporte en la supervivencia de las células de levadura durante la granulación en lecho fluidizado para la formación de comprimidos. Pharmaceutics , 15 (3), 884. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030884

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Villa María

# Obtención de concentrados y aislados proteicos utilizando extracción sólido-líquido asistida por ultrasonido y tratamiento enzimático

# Obtaining protein concentrates and isolates using ultrasound-assisted solid-liquid extraction and enzymatic treatment

Presentación: 30/10/2025

**Lucia Ureta**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación en Simulación para Ingeniería Química (GISIQ), Villa María, Córdoba, Argentina.
luciaureta2000@gmail.com

**María Regina Bonavia**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación en Simulación para Ingeniería Química (GISIQ), Villa María, Córdoba, Argentina.
regibonavia@gmail.com

**Martina Andreosi**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación en Simulación para Ingeniería Química (GISIQ), Villa María, Córdoba, Argentina.
andreosimartina@gmail.com

**Juan Pablo Iglesias**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación en Simulación para Ingeniería Química (GISIQ), Villa María, Córdoba, Argentina.
jpiglesias01@gmail.com

## Resumen

Se presentan avances parciales realizados en el desarrollo de actividades experimentales a nivel de laboratorio/planta piloto para obtención de concentrados y aislados proteicos utilizando extracción sólido-líquido asistida por ultrasonido y tratamiento enzimático, con el objetivo de evaluar aumentos de rendimiento que podrían implementarse, a escala de producción, frente al proceso tradicional de extracción alcalina de proteínas vegetales. Se muestran los resultados alcanzados por aplicación del pretratamiento por sonicación seguido de extracción alcalina tradicional, determinándose la variación de porcentajes de sólidos totales y de proteína recuperados en función del tiempo de aplicación de ultrasonido. Se presenta un breve resumen del tipo de enzimas que se aplicará para evaluar la extracción alternativa mediante aplicación de tecnologías de hidrolisis enzimática. A futuro se pretende realizar experiencias combinadas de ambas alternativas. Con los resultados finales se pretende disponer de información validada para la implementación en el proceso productivo si resultara favorable el análisis técnico-económico.

**Palabras clave:** Concentrados y aislados proteicos, Extracción sólido líquido, Ultrasonido, Hidrólisis enzimática.

## Abstract

Partial progress is presented in the development of experimental activities at the laboratory/pilot plant level for the production of protein concentrates and isolates using ultrasound-assisted solid-liquid extraction and enzymatic treatment. This study aims

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

to evaluate yield increases that could be implemented on a production scale compared to the traditional alkaline extraction process for plant proteins. The results achieved by applying sonication pretreatment followed by traditional alkaline extraction are shown, determining the variation in the percentages of total solids and protein recovered as a function of ultrasound application time. A brief summary is presented of the type of enzymes that will be used to evaluate alternative extraction using enzymatic hydrolysis technologies. Future combined experiments with both alternatives are planned. The final results are expected to provide validated information for implementation in the production process if the technical-economic analysis is favorable.

**Keywords:** Protein concentrates and isolates, Solid-liquid extraction, Ultrasound, Enzymatic hydrolysis.

## 1. Introducción

En el contexto de convenios establecidos entre la FRVM y PORTA Hnos. S.A., desde 2007 a la fecha, el GISIQ ha participado en la realización de actividades de transferencia y asistencia tecnológica en conjunto con los integrantes del Departamento de Ingeniería de la empresa en una serie de proyectos realizados y puestos en marcha, entre los que puede citarse; destilería de vinagres, plantas convencionales de producción de bioetanol y minidestilerías, entre otros. Desde 2021 se ha colaborado con el desarrollo de la primera planta de concentrados y aislados proteicos de soja y arvejas cuya tecnología responde a procesos extractivos clásicos (Toselli et al, 2021; Toselli et al, 2022; Toselli et al, 2022).

En la actualidad se trabaja en el desarrollo de ensayos experimentales sobre otras tecnologías asociadas en la búsqueda de una mejora continua de rendimiento, puntualmente se cita asistencia por ultrasonido (US) y extracción por hidrolisis con enzimas. Los autores de esta ponencia se desempeñan en condición de becarios del proyecto PATCVM0008753TC, participando en la realización de los trabajos experimentales que se llevan a cabo a escala laboratorio/planta piloto: tales becas, así como aportes de equipamiento, materiales e insumos son financiados por la empresa en cuestión. El plan de trabajo establecido se basa en tres etapas, estas son: i) evaluación de variables experimentales mediante aplicación de Extracción Asistida por Ultrasonido (EAUS) a escala laboratorio/planta piloto como pretratamiento al clásico de extracción alcalina, ii) analizar el comportamiento experimental de la tecnología alternativa de Extracción Acuosa Asistida por Enzimas (EAAE) y iii) evaluar experimentalmente el rendimiento de un proceso asistido con EAUS y EAAE combinadas.

Se puede indicar que el US comprende ondas mecánicas de alta frecuencia que, al propagarse en medios líquidos, generan un fenómeno denominado cavitación acústica. Esto implica la formación y colapso de microburbujas, liberando energía en forma de pulsos localizados de alta presión y temperatura que inducen micro-turbulencias y choques mecánicos capaces de modificar estructuras materiales, favoreciendo así la extracción (Shen et al., 2023). Su aplicación en la industria alimentaria, ha demostrado mejorar propiedades físico-químicas de matrices complejas aumentando la productividad de los distintos procesos (Parzanese, 2021; Abdulstar et al., 2023).

La EAUS es considerada una técnica verde, por su bajo consumo de solventes y energía; reduce el tiempo de operación, conserva la integridad de moléculas sensibles al calor, favorece la disrupción celular y mejora el transporte de masa, facilitando la liberación de compuestos bioactivos. Sus principales ventajas incluyen: altos rendimientos, fácil implementación y alta calidad de productos (Alshehhi, 2023; Panda and Manickam, 2019, Kumar et al. 2021). Mirón-Mérida y et al (2024) evaluaron la influencia del US sobre las propiedades estructurales y funcionales de extractos proteicos de lentejas, observando mejoras significativas frente a la extracción alcalina convencional. Otros autores concluyeron que el US puede utilizarse para optimizar el rendimiento de la extracción de proteína vegetal (Sengar et al. 2022; Sert et al. 2022, Shen et al, 2023).

La EAAE también es un proceso ecológico que permite recuperar proteína de matrices vegetales mediante agua y enzimas resultado un método alternativo al proceso tradicional. Las cantidades recuperadas representa un desafío para mejorar el rendimiento de la operación clásica. En comparación, la adición de enzimas produce una reducción del tamaño de las proteínas por hidrólisis, facilitando su extracción y además baja el pH de procesamiento, evitando así condiciones severas de desnaturalización (de Moura et al, 2009, Campbell et al, 2011; Zhao et al, 2022).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En este trabajo se muestran los avances parciales alcanzados a nivel experimental hasta la fecha, habiéndose concluido con lo planificado para la etapa i, y se ha dado comienzo a las actividades de la etapa ii, la cual una vez finalizada, proporcionará los lineamientos para el desarrollo, a futuro, de la etapa iii. Una vez concluidas las mismas se prevé disponer de información técnica válida para implementar a escala de planta industrial a efectos de potenciar el rendimiento de los procesos extractivos de distintas proteínas vegetales.

## 2. Materiales y métodos

*2.1. Desarrollo de experiencias de EAUS*

Para llevar adelante las mismas se empleó un equipo Digital Ultrasonic, de frecuencia fija, con volumen de trabajo de 2 litros, equipado con sistema de calefacción y control de tiempo y temperatura. Este permite la generación de ondas ultrasónicas en un rango de frecuencia nominal de 40 kHz. La temperatura del baño de sonicación fue monitoreada y regulada según los requerimientos del proceso. Como parte del análisis de humedad de los extractos, se utilizó una termobalanza METTLER TOLEDO modelo HE53, con resolución de 0,001 g apta para la determinación precisa de sólidos totales mediante secado controlado. Adicionalmente, para la separación sólido-líquido posterior a la extracción, se utilizó una centrífuga de laboratorio de 12 tubos de ensayo de 20 ml, con velocidad variable hasta 4000 rpm, permitiendo una separación rápida y eficiente de fases. Los equipos citados se presentan en la Figura 1(a), (b) y (c); respectivamente.

(a) (b) (c)

**Figura 1**: a) Equipo de US, b) Termobalanza y c) Centrífuga

La metodología consistió en la preparación de una suspensión al 10 % (p/p), mediante la dispersión de 20 g de soja molida desgrasada en 180 ml de agua. La suspensión fue ajustada a pH 6 y llevada a la temperatura de procesos con agitación constante. Luego se aplicó a las mismas el pretratamiento de sonicación y posterior extracción alcalina tradicional.

La sonicación se realizó con tiempos variables de exposición (1, 3, 5, 7 y 10 minutos), los cuales fueron comparados frente a ensayos de extracción sin aplicación del pretramiento con US, a fin de establecer el efecto de este sobre la liberación de sólidos totales y compuestos solubles. Luego de la sonicación, se mantuvo la suspensión bajo agitación durante 5 minutos adicionales. Seguido de esto se ajustó el pH al punto isoeléctrico de las proteínas, promoviendo su precipitación y separación posterior. Se utilizó la termobalanza para la determinación rápida de sólidos totales por duplicado. Las muestras finalmente fueron centrifugadas durante 20 minutos, para la separación de las fases líquida y sólida. Las fracciones de sobrenadante y precipitado fueron transferidas a cápsulas de porcelana y secadas en estufa a 60–90 °C hasta peso constante, permitiendo cuantificar los sólidos recuperados. Para la determinación del nitrógeno proteico se trabajó con un sistema Kjeldahl automático marca VELP, cuyas imágenes se observan en la Figura 2, perteneciente a la empresa, que fue utilizado para las experiencias. Accediendo al mismo, en el contexto de un convenio de uso compartido de laboratorio, vigente entre las partes para el desarrollo de actividades académicas y de I+D.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 2**. Equipo Kjeldahl automático para determinación de nitrógeno

En la Figura 3(a), (b) y (c) se presenta un conjunto de imágenes que corresponden a distintas etapas de la secuencia de operaciones desarrolladas durante las experiencias de laboratorio.

(a) (b) (c) (d) (e)

**Figura 3:** a) Sonicación b) Extracción c) Centrifugado d) Sólidos post secado e) Sobrenadante post secado.

*2.2. Próximas experiencias a realizar de EAAE*

Actualmente se encuentran en evaluación la metodología para su implementación en tanto se espera el arribo de las enzimas adquiridas a dos empresas internacionales proveedoras. Dichos productos se corresponden con dos marcas comerciales disponibles en el mercado. Las mismas son beta glucanasas, presentando una de ellas además actividad de xilanasa, celulasa y hemicelulasa de la cual se espera un mejor comportamiento en cuanto a su capacidad para romper las matrices vegetales. El segundo tipo adquirido corresponde a aminopeptidasas (ambas exopeptidasas pero una de ellas tiene además capacidad de endopeptidasa). Se prevé el desarrollo de experiencias que permitan evaluar los rendimientos de extracción por hidrolisis enzimática además de explorar otras variables tales como actividad de las mismas, dosis a emplear, temperatura y pH de trabajo, entre otras. Finalmente, se pretende correlacionar los resultados experimentales para contar con un análisis técnico económico que permita comparar su eventual implementación frente a la extracción alcalina.

*2.3. Última etapa prevista: experiencias combinadas de EAUS y EAAE*

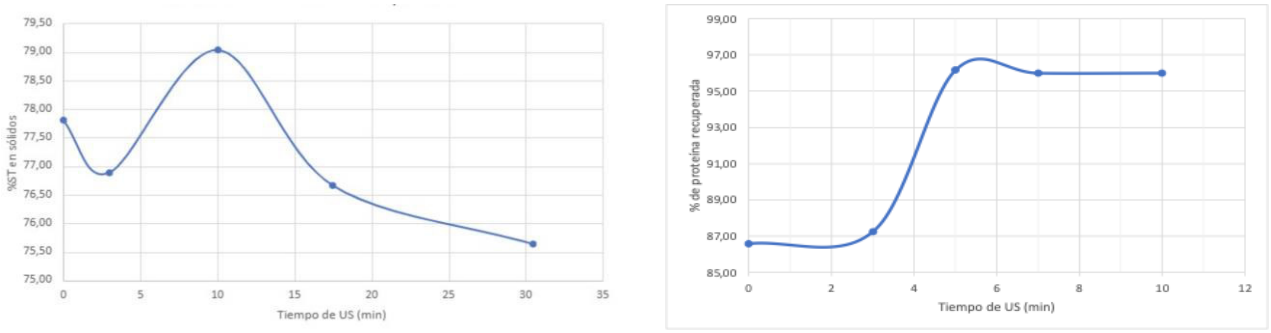
Se prevé comenzar a realizar estas experiencias, a futuro y en las mismas escalas de laboratorio/planta piloto una vez alcanzados los resultados derivados de la etapa anterior.

## 3. Resultados y discusión

Por lo antes expuesto se presentan los resultados alcanzados solamente de la experiencia de EAUS. Al contar con un registro detallado de las masas obtenidas en todas las etapas se realizaron los respectivos balances de masa globales, con los cuales fue posible evaluar la eficiencia del proceso para cada condición operativa. Los resultados experimentales permitieron comparar la influencia de los distintos tiempos de pretratamiento con US respecto de los blancos tomados como referencia, esto es aquellos correspondientes a tratamientos alcalinos sin sonicación y analizar sus efectos sobre los rendimientos alcanzados.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En la Figura 4 a, se muestra los resultados de porcentaje de sólidos totales, en base seca, obtenidos luego del centrifugado para los diferentes tiempos de pretratamiento por aplicación US pudiendo observarse un máximo de sólidos totales separados por centrifugado con tiempos de pretratamiento de 10 minutos. Luego de realizarse los balances de masa respectivos en la Figura 4 b se muestran los porcentajes de proteína recuperados en la fase sólida respecto del total teórico de éstas presentes en la muestra de partida, que aparecen finalmente recuperados en el sólido centrifugado seco, que era el objetivo inicial de la experiencia. Se puede indicar que se cuantificaron las mejoras porcentuales de rendimiento alcanzados al compararse con los del proceso tradicional, aun cuando los mismos no se indican por cuestiones de confidencialidad establecidos.




(a) (b)

**Figura 4**. a) Porcentaje de sólidos totales separados b) Porcentaje de proteína recuperada del total disponible.

## 4. Conclusiones

Se replicaron a escala de laboratorio condiciones controladas de extracción asistida, con evaluación de rendimiento, asegurando la reproducibilidad y la calidad de los datos obtenidos. La mayor recuperación de ST en la fase sólida centrifugada presentó un máximo para diez minutos de pretratamiento de Sonicación. Los mayores porcentajes de recuperación de proteínas se obtuvieron para tiempos de pretratamiento de cinco o más minutos de aplicación de US. El porcentaje de proteínas recuperadas cambia de manera abrupta (aproximadamente un 9%) entre los tres y cinco minutos de pretratamiento. Para tiempos mayores de aplicación de US no se observaron diferencias significativas.

## Referencias bibliográficas

Abdulstar, A. R., Altemimi, A. B., & Al-Hilphy, A. R. (2023). “Exploring the Power of Thermosonication: a Comprehensive Review of its Applications and Impact in the Food Industry”. *Foods,* 12 (7), 1459.

Alshehhi, M., Wu, G., Kangsadan, T., Chew, K. W., & Show, P. L. (2023). “Ultrasound-Assisted Food Processing: a Mini Review of Mechanisms, Applications, and Challenges”. *E3S Web of Conferences*. 428, 02011.

Campbell KA GC, Johnson LA, Jung S, de Moura JMN, Kapchie V, Murphy P. (2011). “Advances in Aqueous Extraction Processing of Soybeans”. *J Am Oil Chem Soc,* 88, 449–465

de Moura JMLN, Almeida NM, De Johnson LA (2009). “Scale-up of Enzyme-assisted Aqueous Extraction Processing of Soybeans”. *J Am Oil Chem Soc,* 86, 809–815

Kumar, K., Srivastav, S., & Sharanagat, V. S. (2021). “Ultrasound Assisted Extraction (UAE) of Bioactive Compounds from Fruit and Vegetable Processing By-Products: A Review”. *Ultrasonics sonochemistry*, 70, 105325.

Mirón-Mérida, V. A., Soria-Hernández, C., Richards-Chávez, A., Ochoa-García, J. C., Rodríguez-López, J. L., and Chuck-Hernández, C. (2024). “The Effect of Ultrasound on the Extraction and Functionality of Proteins from Duckweed (Lemna minor)”. *Molecules,* 29 (5), 1122.

Parzanese, M. (2021). “Ultrasonidos: Tecnologías para la Industria Alimentaria”. *Alimentos Argentinos*. 62-69.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Sengar, A. S., Thirunavookarasu, N., Choudhary, P., Naik, M., Surekha, A., Sunil, C. K., & Rawson, A. (2022). “Application of Power Ultrasound for Plant Protein Extraction, Modification and Allergen Reduction–a Review”. *Applied Food Research*, 2 (2), 100219.

Sert, D., Rohm, H., & Struck, S. (2022). “Ultrasound-Assisted Extraction of Protein from Pumpkin Seed Press Cake: Impact on Protein Yield and Techno-Functionality”. *Foods*, 11 (24), 4029.

Shen, L., Pang, S., Zhong, M., Sun, Y., Qayum, A., Liu, Y., Rashid, A., Xu, B., Liang, Q., Ma, H., & Ren, X. (2023). “A Comprehensive Review of Ultrasonic Assisted Extraction (UAE) for Bioactive Components: Principles, Advantages, Equipment, and Combined Technologies”. Ultrasonics Sonochemistry, 101, 106646. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646.

Toselli L.A, Beltrán R.A, Gallardo A, Comba N, Bosco D. (2021). “Obtención de Concentrados Proteicos de Soja (SPC) a partir de Harinas Desgrasadas”. 1° Congreso de Investigaciones y Desarrollos en Tecnología y Ciencia. I-IDETEC, Villa María, Córdoba, Argentina, 21 al 25 de junio.

Toselli L.A, Beltrán R.A, Gallardo A, Comba N, Bosco D. (2022). “Desarrollo y Puesta en Marcha de una Planta de Producción de Aislado Proteico de Arveja- PPI”. Actas del 6º Congreso Argentino de Ingeniería y el 12º Congreso Argentino de Enseñanza de Ingeniería. 6°CADI y 12 CAEDI. Resistencia (Chaco) y UNNE, Corrientes (Capital), Argentina, 7 al 9 de septiembre.

Toselli L.A, Beltrán R.A, Gallardo A, Comba N, Bosco D. (2022). “Desarrollo de una Planta Industrial para Elaboración de Concentrados Proteicos de Soja y Arvejas”. Memorias del Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. CLICAP 2022. Fac. de Cs. Aplic. a la Industria de la UNC, San Rafael, Mendoza, Argentina, 6 al 8 de abril.

Zhao Y., Tian R., Xu Z., Jiang, L., and Sui X. (2022). “Recent Advances in Soy Protein Extraction Technology”. Northeast Agricultural University, June 27.

## Eje temático

# Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

MENCIÓN ESPECIAL

**Eje temático**: Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional**: Santa Fe

# Laboratorios virtuales con errores pseudoaleatorios para la enseñanza de física en ingeniería

## Virtual labs with pseudorandom generated errors for physics teaching in engineering

Presentación: 30/10/2025

**Gael Suárez Belletti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo de Investigación en Enseñanza de la Ingeniería (GIEDI), Santa Fe, Argentina
gaelbelletti@gmail.com

### Resumen

En la actualidad, los simuladores de experiencias físicas disponibles entregan resultados exactos que aíslan a estudiantes de la dispersión de datos que experimentaría en un laboratorio real. El objetivo es generar recursos de metodología activa que complementen la enseñanza teórica tradicional. Junto con una web para centralizar simuladores y contenido teórico, se propone una herramienta de creación de escenarios, donde docentes pueden predefinir las condiciones iniciales, así como un porcentaje de error. Estos se generan de forma pseudoaleatoria para emular la variabilidad de resultados característica de una experiencia de laboratorio. El archivo puede descargarse en formato JSON para carga posterior de sus estudiantes a cargo. Se creó un entorno web gratuito, responsivo, minimalista, *mobile-first* de disponibilidad inmediata que cumple con pruebas de rendimiento, volumen y con la Disposición 6/2019 de accesibilidad argentina, al igual que el estándar internacional WCAG 2.2.

**Palabras clave:** Laboratorio virtual, Simulador web de Física, Teoría de errores, Dispersión de resultados, Pautas de Accesibilidad para el Contenido de la Web (WCAG)

### Abstract

Currently, simulators about Physics lab experiences are widely available and provide exact results, isolating students from the data spread found in a real laboratory setting. Our goal is to create active methodology resources that complement traditional theoretical teaching. Along with a platform designed to centralize simulators and theoretical content, a scenario creation tool is proposed, allowing instructors to preset initial conditions as well as an error percentage. These are generated pseudo-randomly to emulate the variability of results characteristic of a hands-on laboratory experience. The file can be downloaded in JSON format for later loading by their assigned students. A free, responsive, minimalist, mobile-first web environment was developed, offering immediate availability and complying with performance and load tests, as well as the Argentine Accessibility Regulation 6/2019 and the international WCAG 2.2 standard. It provides customization options such as a dyslexic-friendly font, text size adjustment, and high-contrast mode.

**Keywords:** Virtual lab, Web Physics simulator, Error analysis, Data spread, Web Content Accessibility Guidelines (WCAG)

## 1. Introducción

En materias transversales a las ingenierías como la física, donde la experimentación es fundamental para entender fenómenos teóricos complejos, se requieren de espacios adecuados para la experimentación que no solo garanticen el correcto funcionamiento del proceso y la seguridad de dichos estudiantes y docentes, sino también un alcance equitativo de la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

enseñanza que muchas veces se dificulta en grupos numerosos. Ante esta necesidad, es necesario replantear las herramientas virtuales disponibles como los simuladores de experiencias físicas, que permiten replicar los beneficios mencionados sin depender de recursos tradicionales.

Diversos estudios comprobaron con éxito la implementación de laboratorios virtuales (Lara Ramírez et. al., 2022; Silva Quiroz et. al., 2017) y se destaca la facilidad de observar de forma ideal fenómenos que no podrían replicarse en la realidad, pero se producen sin esfuerzo mediante la codificación. Esta ventaja, sin embargo, aísla a estudiantes de la dispersión de resultados característica de una experiencia real de laboratorio, donde las conclusiones a partir de la observación deben incluir las posibles fuentes de errores, como la precisión de instrumentos utilizados, posible error de procedimiento, apreciación o a causa de las condiciones del escenario como la temperatura, presión, humedad, etc.

Además de la experiencia de laboratorio como representación visual, el objetivo del simulador es generar una nueva instancia de estrategia de metodología activa; poner el foco en cada estudiante al convertir el proceso de enseñanza en actividades más que en el contenido (Silva Quiroz et. al., 2017) donde tanto la toma de datos como la elaboración de conclusiones en un posterior informe queda a cargo de cada uno, acompañado de una guía. Se promueve así la generación de competencias útiles en contexto de ingeniería como la investigación autodidacta, la colaboración entre compañeros mediante comparación y debate, además de la elaboración de informes sujetos a normas comunes en ámbitos de investigación como las normas APA.

Luego de un exhaustivo proceso de indagación de servicios de simuladores online (Agosta et. al., 2025) donde solo el 25,3% de los relevados presentan dispersión en mediciones y el 1,3% presenta dispersión en magnitudes, se concluyó necesario el desarrollo de nuevos simuladores que logren cubrir con éxito objetivos pedagógicos, al igual que el tratamiento de los datos con enfoque científico, que incluya dispersión en mediciones, magnitudes y condiciones iniciales de la experiencia.

Por otra parte, cada docente a cargo pasa a tomar un rol de acompañamiento en lugar de dirigir el procedimiento paso por paso, además de promover la libre exploración del fenómeno sin atarse a los tiempos del laboratorio presencial. El entorno virtual también le brinda control sobre en qué subtemas específicos hacer hincapié para reforzar la teoría, pudiendo configurar los parámetros a su antojo y favorecer así la reproducibilidad a través de la herramienta de creación de escenarios, donde la variabilidad de resultados le permitirá a cada estudiante sacar conclusiones por medio del aprendizaje colaborativo.

Para lograrlo, se propone la centralización de estos recursos en una plataforma que incluya tanto los simuladores como una sección “Wiki”, encargada de reunir material teórico auxiliar, guías de trabajos prácticos, ejercicios resueltos y otros apoyos importantes para el grupo de estudiantes. La plataforma elegida debe poder accederse de forma gratuita, con configuraciones mínimas que garanticen opciones de accesibilidad. También debe permitir que tanto el código generado para la simulación como otros tipos de contenido (texto, archivos, imágenes) coexistan en la plataforma. En cuanto a los simuladores, deben ser académicamente fiables, representativos y atractivos para reforzar los contenidos dados en clase, además de pasar las pruebas básicas de accesibilidad, rendimiento, volumen y usabilidad.

## 2. Materiales y métodos

La plataforma elegida es un sitio web de acceso gratuito, donde se centralizará la información y los simuladores. Se descartaron plataformas nativas de escritorio como ejecutables Java, C++ o Python debido a que, si bien no requieren conexión a internet, si requieren de un determinado conjunto de recursos (Sistema operativo particular, RAM, memoria, núcleos) al igual que procedimientos previos al uso, como descarga, instalación, configuración inicial, etc. En la tabla 1, podemos ver en detalle el análisis de algunas de las plataformas que estuvieron en discusión para alojar la página.

En la tabla 2 se puede ver un resumen de las tecnologías utilizadas en su creación.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 1**. Análisis de distintos *hostings* y su estado final de decisión

| Nombre | ¿Gratis? | Ventajas | Desventajas | Decisión final |
|---|---|---|---|---|
| Moodle | Sí | Plataforma conocida por estudiantes y profesores, baja curva de aprendizaje. Contiene el campus general de la facultad. Tiene aplicación móvil. | No permite introducir código Javascript para insertar simuladores. La personalización estética es muy limitada. | Funcionalidad muy limitada. No permite introducir código Javascript para los simuladores |
| Google Sites | Si | Fácil de usar. Plataforma de renombre. | No permite introducir código Javascript para insertar simuladores. La personalización estética es muy limitada. No está pensada para alojar cualquier tipo de página web, sino blogs del tipo Wordpress. | Funcionalidad muy limitada. No permite introducir código Javascript para los simuladores |
| Weebly | Sólo versión básica | Hosting conocido Cuenta con plantillas | Funcionalidad y almacenamiento escasos. Personalización limitada, sujeta a capacidad creativa del host. | Funcionalidad limitada. Funcionalidad ampliada no es gratuita |
| Wix | Sólo versión básica | Hosting conocido. Cuenta con plantillas. | Funcionalidad y almacenamiento escasos. Personalización limitada, sujeta a capacidad creativa del host. | Funcionalidad limitada. Funcionalidad ampliada no es gratuita |
| GitHub Pages | Sí, en tanto el repositorio sea público | Amplia funcionalidad disponible de forma gratuita. Amplia capacidad de personalización: Acepta todo tipo de código, incluso archivos de tipo *markdown* y txt. Al usar GitHub está estrechamente relacionado con Git, que permite control de versiones y con GitHub Actions que permite automatizaciones. | El dominio requiere que se incluya “github.io” en su nombre. El repositorio donde se aloja el código fuente debe ser público. | Mejor relación entre ventajas y desventajas |

**Tabla 2**. Tecnologías utilizadas para la creación de la página

| Nombre | Tipo | Versión | Función en el proyecto |
|---|---|---|---|
| HTML | Lenguaje de marcado | HTML5 | Estructuración de la página |
| Tailwind CSS | Framework | V4.1 | Estilos CSS |
| Javascript | Lenguaje | ES13 | Funcionalidad |
| JQuery | Librería | V3.7.1 | Herramienta de creación de escenarios. *Toggles* |
| Chart.js | Librería | V4.5.0 | Gráficos |

Al principio, se contempló la posibilidad de usar Bootstrap para agilizar el diseño visual de la página: Un *framework front end* que permitía generar una web *responsive*, *mobile-first*. Por *mobile-first*, entendemos el tipo de diseño que toma como dispositivo principal a los teléfonos móviles. Se descartó finalmente para utilizar Tailwind CSS, un *framework* de CSS que, al igual que Bootstrap, permite generar contenido *mobile-first* y responsive fácilmente. La decisión de utilizarlo frente a

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Bootstrap fue gracias a la facilidad con que cada elemento puede alternar automáticamente entre dos modos: Tema claro y oscuro. Si bien es posible incorporar una opción para hacerlo de manera manual (por ejemplo, a través de un botón), Tailwind detecta automáticamente el tema utilizado por el navegador; estos, muchas veces cambian de acuerdo con el tema utilizado por el sistema operativo. Como Tailwind solo es un *framework* de CSS, otorga más libertad creativa que Bootstrap, pero también implica más trabajo para el desarrollador generar elementos reutilizables como acordeones, *dropdowns*, etc.

Para la paleta de colores, se consideraron los colores #FF9400 y #FF0014 pertenecientes al logo institucional GIEDI. Finalmente, se utilizaron colores representativos del logo UTN FRSF para mantener la identidad institucional. Se generan como valores predeterminados para su utilización en Tailwind de la siguiente manera: color-utn-regular, color-utn-light, color-utn-dark. La paleta para cada modo puede verse en la figura 1, donde el color slate pertenece a Tailwind.

**Figura 1**. Paleta de colores para cada modo de la página

La página de inicio tiene la estructura de la figura 2, donde los simuladores se disponen visualmente en tarjetas alojadas en un grid. Cada tarjeta cuenta con información importante como título, descripción y autor, además de acompañarse de una ilustración minimalista y una etiqueta que informe la asignatura a la que pertenece. Estas etiquetas en el futuro se utilizarán para filtrar el contenido por materia.

Cada simulador presenta parámetros que pueden ser modificados por cada estudiante. Se utilizan deslizadores ya que es la forma más gráfica de mostrar la interactividad con la experiencia, y desplegables cuando se requiere condicionar la cantidad de opciones (Ej: Material, medio exterior). También, incluye un botón disponible para la carga de escenarios.

## 3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan capturas de pantalla del primer despliegue de la página (Figuras 2 a 4).

**Figura 2.** Página de inicio (modo claro)

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 3.** Simulador de reflexión y refracción (modo claro)

**Figura 4.** Tabla de resultados para índice de refracción experimental (modo oscuro)

## 4. Conclusiones

Luego de analizar las características de cada plataforma disponible, los procedimientos posteriores al despliegue para su incorporación, la posible curva de aprendizaje de cada estudiante, las características del lenguaje elegido en cuanto al tiempo de desarrollo, los estándares nacionales e internacionales de accesibilidad, la escalabilidad del proyecto para la incorporación de otras futuras funcionalidades de laboratorio, decisiones de diseño acordes a las buenas prácticas, se desarrolló y desplegó mediante recursos gratuitos una página web con las siguientes características:

1. Disponible para uso inmediato (tanto por el cuerpo estudiantil como por la comunidad), sin restricciones como cuota de transferencia, tiempo de uso, registro obligatorio, etc.

2. Promueve equidad en el acceso al contenido al cumplir con un nivel de accesibilidad AA de acuerdo con la Disposición 6/2019 (Gobierno Argentino, 2019) y las pruebas de accesibilidad de acuerdo con el estándar WCAG a través de servicios como TAW, WAVE, y Lighthouse.

3. Pasa con éxito pruebas de: Rendimiento, usabilidad, accesibilidad, volumen de datos, validación de datos, integración. Se espera poder implementar pruebas de aceptación entre estudiantes y docentes que lo utilicen.

4. Permite divulgar la importancia de la creación de recursos desde la universidad hacia la comunidad mediante la estética institucional y la futura incorporación a las actividades académicas.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF). También, al Ing. Agosta Rodrigo, perteneciente al grupo GIEDI.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Referencias bibliográficas

Agosta, R., Ferrando, R., Albano, L., Barán, V., Oliva, D. (2025). “Simuladores de experimentos físicos con dispersión de resultados, para la enseñanza con metodologías activas en carreras de ingeniería mecánica”, Actas del 9° Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, IX CAIM 2025, Argentina, 17 al 19 de septiembre.

Angelini, M. L. (2021). *La simulación como estrategia educativa: propuesta adaptada para el medio físico y virtual*. Madrid: Dykinson.

Lara Ramírez, L. E., Pérez Vega, M. I., Villalobos Gutiérrez, P. T., Villa-Cruz, V., Orozco López, J. O., López Reyes, L. J. (2022). “Uso de laboratorios virtuales como estrategia didáctica para el aprendizaje activo”, *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6 (1), 9-12.

Silva Quiroz, J., Maturana Castillo, D. (2017). “Una propuesta de modelo para introducir metodologías activas en educación superior”, *Innovación educativa (México, DF)*, 17 (73), 117-131.

Gobierno Argentino. (2019). *Disposición 6/2019: Los 38 criterios de Conformidad.* Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/infoleg/disp6-2-329284.pdf>

Gobierno Argentino. (2019). *Pautas de accesibilidad para el contenido de la web*. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/pautas-de-accesibilidad-para-el-contenido-de-la-web.pdf>

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Desarrollo y simulación de un sistema de brazo robótico mediante visión artificial con aplicación didáctica y proyección industrial

## Development and Simulation of a Robotic Arm System through Computer Vision with Didactic Application and Industrial Projection

Presentación: 30/10/2025

**Diego Butto**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
diegbutto@gmail.com

**Julián Gervasoni**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
juliangervasoni2011@hotmail.com

**Resumen**

Este trabajo presenta el diseño y la simulación de un sistema de brazo robótico controlado mediante visión artificial, con fines didácticos y proyección industrial. A través de una Raspberry Pi 5 y una cámara web, se emplea la librería MediaPipe para reconocer gestos de la mano que son traducidos en señales binarias y enviados al robot como entradas digitales. El robot, programado con posiciones y lógica condicional, ejecuta rutinas de manipulación de piezas en respuesta a dichos gestos. Las pruebas realizadas en simulación y en laboratorio validaron la factibilidad del enfoque, demostrando su utilidad como herramienta educativa en robótica y automatización. Asimismo, se plantea como línea futura la integración de comandos por voz e inteligencia artificial para el reconocimiento de colores y formas, con el fin de ampliar sus posibilidades hacia aplicaciones industriales.

**Palabras clave:** Robótica industrial, Visión artificial, Control por gestos.

**Abstract**

This work presents the design and simulation of a robotic arm system controlled through computer vision, with educational purposes and industrial projection. Using a Raspberry Pi 5 and a webcam, the MediaPipe library is employed to recognize hand gestures, which are translated into binary signals and sent to the robot as digital inputs. The robot, programmed with predefined positions and conditional logic, executes piece manipulation routines in response to these gestures. Tests carried out in both simulation and laboratory environments validated the feasibility of the approach, demonstrating its usefulness as an educational tool in robotics and automation. Furthermore, future work includes the integration of voice commands and artificial intelligence for color and shape recognition, in order to expand its capabilities towards industrial applications.

**Keywords:** Industrial, robotics, Computer vision, Gesture control.

## 1. Introducción

Como lo cita Llopis, Romero Pérez, & Ariño Latorre, (2010), “En las últimas décadas se ha seguido la tendencia de automatizar de manera progresiva procesos productivos de todo tipo. Esta tendencia ha sido y sigue siendo posible gracias al

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

desarrollo y abaratamiento de la tecnología necesaria. La automatización de los procesos de producción persigue diversos objetivos como son: mejorar la calidad y mantener un nivel de calidad uniforme; producir las cantidades necesarias en el momento preciso; mejorar la productividad y reducir costes; hacer más flexible el sistema productivo (facilitar los cambios en la producción).

Estos objetivos se han convertido de hecho en requisitos indispensables para mantener la competitividad, por lo que el aumento del nivel de automatización de los procesos es simplemente una necesidad para sobrevivir en el mercado actual".

Siguiendo este enfoque, nace el interés de aplicar visión e inteligencia artificial en un brazo manipulador dentro del ámbito académico para ser trasladado luego a escala industrial. El proceso consiste en obtener en la práctica, una rutina de trabajo en función de señales a fin de desarrollar acciones programadas en el robot.

Desde el punto de vista formativo, tomando esta cita de (Vargas Guativa, Guapacho Castro, & Isaza Domínguez, 2017, pág. 6). "En los programas de formación superior, donde la posibilidad de contar con estas herramientas tecnológicas hace que los beneficios de hacerlo sean notables, se han desarrollado trabajos investigativos diversos: con ellos se han implementado planes para permitir que los docentes universitarios cuenten con los conocimientos y dispongan de las herramientas necesarias para realizar actividades educativas que involucren TIC".

Para cumplir los objetivos de formar a docentes y alumnos, se desarrolla un sistema práctico que integra un brazo manipulador (ABB IRB120), un cámara web, una ventosa neumática, un microprocesador y un software específico para lograr una rutina de trabajo según señales.

1.1 *Objetivos*

Crear una herramienta educativa que facilite la enseñanza práctica de las tecnologías de automatización en el entorno universitario. Para lograr esto, el proyecto tiene como muestra las figuras 1 y 2:

1.1. 1Diseñar y Construir un Prototipo Funcional: Integrar un sistema capaz de captar y reconocer señales o gestos que realice una persona con la mano y pueda enviar una señal en lenguaje binario que pueda ser leída por el brazo manipulador.

1.1.2 Programar el Robot Manipulador: Implementar la programación a través del software RobotStudio, simulación y ensayo necesarios para que el brazo manipulador realice las tareas definidas en forma virtual en una primera instancia y de forma práctica mediante el uso del manipulador.

1.1.3. Integrar el Sistema de Cámara Web: instalar y asegurar el funcionamiento de la cámara web y la Raspberry Pi, utilizando la librería MediaPipe para reconocer gestos de la mano que son traducidos en señales binarias.

1.1.4. Integrar el Sistema de Ventosa neumática: Asegurar el funcionamiento sin problemas del sistema de ventosa para facilitar el movimiento y manejo de las piezas dentro de la simulación.

1.1.5 Desarrollar Materiales Educativos: Crear guías instructivas y manuales prácticos para los estudiantes, junto con material audiovisual que apoye la experiencia de aprendizaje. Al cumplir con estos objetivos, el proyecto busca proporcionar a los estudiantes una herramienta práctica que refuerce los conceptos teóricos y mejore su comprensión de las tecnologías de automatización actuales, además de simular en pc la misma programación real en virtual para multiplicar las capacidades de trabajo en diferentes puestos para los alumnos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

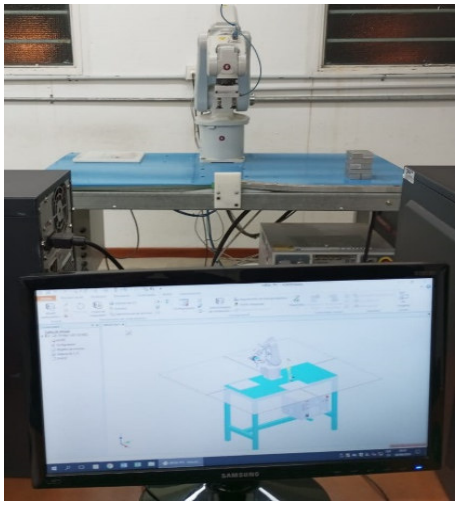


**Figura 1.** Visualización del equipamiento físico y su respectivo homólogo en el simulador.

**Figura 2.** Mesa donde se realiza la simulación de visión artificial.

Es decir, como objetivo general perseguimos desarrollar la formación a través de alumnos avanzados y docentes que dominen esta tecnología para poder utilizar este brazo manipulador en varias prácticas para hacer extensivo este conocimiento a las diferentes comunidades tanto universitarias como industriales.

## 2. Metodología

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en el laboratorio de robótica de la UTN FRRA, comenzando con el diseño del sistema. Con un robot manipulador ABB IRB120, brazo de construcción similar al de utilizado en industria sólo reducido en sus distancias y capacidad de carga debido a sus dimensiones, pero sin diferencias en cuanto a la programación a lo que se encuentran en las industrias actualmente, el cual es esencial para el proceso.

Este robot fue integrado con un cámara web, una ventosa neumática, un microprocesador y un software específico. Lo cual le permite reconocer señales que realiza una persona con la mano y responder siguiendo una secuencia de trabajo programada. Además, es equipado con un sistema de ventosa neumática para tomar, sujetar y trasladar piezas de plástico desde un tablero hasta una posición determinada. Se utilizan ventosas de silicona con alta capacidad de succión para asegurar un agarre firme. El sistema incluye un mecanismo de control de vacío para ajustar la fuerza de succión según el tamaño y peso de las cajas.

Para controlar el robot manipulador, se desarrolló un programa que dependiendo de las entradas digitales (señales enviadas en lenguaje binario por el microprocesador) realiza diferentes secuencias. Durante las pruebas, se realizaron ajustes y calibraciones para mejorar la precisión del robot. La fuerza de succión del sistema de ventosa se ajustó y se optimizó el tiempo de respuesta del robot para asegurar una operación fluida y sin errores.

La programación se realizó utilizando el manual del operador RobotStudio (AB, 2011) y el programa RobotStudio el cual permite controlar el manipulador para los distintos proyectos que se deseen realizar.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 3. Resultados

Para validar el proceso, se realiza un muestreo para determinar la capacidad de detección de gestos del sistema integrado. El mismo consiste en realizar los gestos programados y ver como respeta la secuencia de trabajo el brazo manipulador, variando la distancia desde el punto de captura de la cámara web. En la tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos en un muestreo de 30 ciclos con los 4 gestos programados a diferentes distancias. Se evidencia que la mejor distancia es a 2 metros, si nos alejamos a 3 metros del robot, la capacidad de detección es solo del 22%.

**Tabla 3.1**: resultados capacidad de detección de la cámara web.

| Condición | | | Intentos correctos | Intentos incorrectos | % |
|---|---|---|---|---|---|
| **Distancia** | **Intensidad de iluminación** | **Posición de la mano** | | | |
| 1 m. | 320 Lux | _Pulgar arriba<br>_Puño cerrado<br>_Pulgar abajo<br>_Mano abierta | 28 | 2 | 93% |
| 2 m. | 390 Lux | | 29 | 1 | 97% |
| 3 m. | 293 Lux | | 9 | 11 | 22% |

Instrumento de medición utilizados: cintra métrica y Luxómetro YFE modelo YF-170.

En la figura 3, 4 y 5 se muestran las tres posiciones que toma la persona para realizar el testeo: uno, dos y tres metros al borde del banco de trabajo.

**Figura 3**. posición que toma la persona, un metro.

**Figura 4**. posición que toma la persona, dos metros.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 5**. posición que toma la persona, tres metros.

## 4. Conclusiones

El proyecto se concretó en todas sus etapas incorporando este trabajo práctico dentro de asignaturas de la carrera de ingeniería industrial y electromecánica. Esto proporciona una valiosa experiencia práctica para los estudiantes, además refuerza la comprensión de los conceptos teóricos de la automatización y la robótica, promoviendo un aprendizaje más efectivo y aplicado (Martinez & Rodriguez Pesce, 2017) (Santillán Mariño, Montalvo Jaramillo, & López Ortiz, 2017).

Desde la perspectiva educativa, la integración de un sistema robótico controlado por visión artificial en el contexto académico permite vincular a los estudiantes con entornos tecnológicos cercanos a los de la industria moderna. La posibilidad de trabajar con un manipulador ABB IRB120, simulado en RobotStudio y complementado con un sistema de ventosa y control por gestos, facilita la apropiación de competencias prácticas que resultan esenciales para la formación de ingenieros preparados para la industria 4.0 (Vargas Guativa J. A., 2017).

Desde el punto de vista técnico, los ensayos realizados confirmaron que el sistema presenta una alta tasa de detección y respuesta cuando se cumplen condiciones óptimas de distancia e iluminación, alcanzando hasta un 97% de precisión a 2 metros. Sin embargo, también se identificaron limitaciones en condiciones menos favorables, como a 3 metros, donde la precisión descendió al 22%. Este hallazgo evidencia tanto la validez del sistema como la necesidad de optimizar hardware y software para ampliar su rango de aplicación, aspecto ya señalado en otras experiencias de implementación de visión artificial en entornos educativos (Llopis R. S., 2010).

En cuanto a la proyección industrial, este desarrollo abre la posibilidad de aplicar sistemas de control más naturales e intuitivos en la interacción hombre–máquina. La combinación de control por gestos con visión artificial constituye un primer paso hacia estaciones de trabajo colaborativas, donde los operarios puedan interactuar con robots de manera ergonómica y eficiente, mejorando la flexibilidad y productividad de los procesos (Santillán Mariño C. J., 2017).

Finalmente, puede afirmarse que este proyecto no solo cumple con los objetivos académicos de formar y reforzar competencias en automatización y robótica, sino que también constituye una base sólida para futuras líneas de investigación y desarrollo. Entre ellas destacan la integración de inteligencia artificial para el reconocimiento de voz, colores y formas, la validación del sistema en entornos industriales reales y la creación de rutinas más complejas de manipulación. De este modo, el trabajo logra tender un puente efectivo entre la enseñanza universitaria y la innovación tecnológica aplicada al sector productivo, consolidando un aporte de relevancia tanto académica como industrial.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Mg. Eduardo Monier, coordinador e investigador de apoyo, perteneciente al grupo GIAMNCI (Grupo de investigación de métodos numéricos en ciencia e ingeniería), el Esp. Ing. Diego Pollini y Alexis Walter; Mauro Zvic como Becarios BINID, en el marco del proyecto “Desarrollo y Simulación de un Sistema de Brazo Robótico mediante Visión Artificial con Aplicación Didáctica y Proyección Industrial.”

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Referencias bibliográficas

AB, A. (2011). Manual del operador robot studio. Obtenido de https://library.e.abb.com/public/6aeb483836740e11c1257b4b0052375b/3HAC032104-005_revE_es.pdfAB, A. (2011). *Manual del operador robot studio.* Obtenido de https://library.e.abb.com/public/6aeb483836740e11c1257b4b0052375b/3HAC032104-005_revE_es.pdf

Llopis, R. S., Romero Pérez, J. A., & Ariño Latorre, C. V. (2010). *Automatización Industrial.* Castelló de la Plana: Col·lecció Sapientia, 31.

Martinez, M. C., & Rodriguez Pesce, E. (02 de 12 de 2017). Formación Docente en Robótica - Una Experiencia en un Curso Semi Presencial. *Revista Tecnología y Ciencia*, págs. https://doi.org/10.33414/rtyc.35.82-93.2019.

Santillán Mariño, C. J., Montalvo Jaramillo, P. E., & López Ortiz, S. A. (12 de 07 de 2017). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE ESTACIÓN DE PALETIZADO PARA BALDOSAS CON EL ROBOT INDUSTRIAL KAWASAKI RS003N PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN DE LA FACULTAD DE MECÁNICA. *TRABAJO DE TITULACIÓN*, pág. http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/7555/1/15T00668.pdf.

Vargas Guativa, J. A., Guapacho Castro, J. J., & Isaza Domínguez, L. G. (Septiembre - Diciembre de 2017). Robótica móvil: una estrategia innovadora . *Revista Virtual - Universidad Católica del Norte*, pág. http://revistavirtual.ucn.edu.co.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional**: Reconquista

# Estudio de comandos del programa Mathematica y organización para estudiantes de ingeniería

## Study of command functions in the Mathematica program and organization for engineering students

Presentación 30/10/2025

**Dylan Ruben Gavilan**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Diseño Mecánico (GRUDIM), Reconquista, Santa Fe, Argentina.
dgavilan3127@comunidad.frrq.utn.edu.ar

### Resumen

En la Facultad Regional Reconquista se dictan desde hace varios años talleres destinados a que los estudiantes de los tres primeros años de ingeniería se familiaricen con el software simbólico Mathematica de Wólfram Research. En estas instancias se abordan temas de asignaturas de primero a tercer año mediante prácticas desarrolladas íntegramente en dicho programa. Una de las consignas consiste en la investigación de nuevos comandos por parte de los alumnos. En este trabajo se presenta una recopilación de los comandos analizados en sucesivas ediciones de los talleres, organizada en un diccionario temático dentro del mismo entorno de Mathematica, clasificado por áreas de estudio. Esta herramienta busca servir de apoyo a futuros estudiantes y favorecer el aprendizaje autónomo de la programación simbólica aplicada a la ingeniería.

**Palabras claves:** Wólfram Mathematica, Comandos, Diccionario Temático.

### Abstract

At the Facultad Regional Reconquista, workshops have been held for several years to help first- to third-year engineering students become familiar with Wolfram Research's symbolic software Mathematica. In these sessions, topics from core courses are practiced entirely within the program. One of the activities consists of investigating new command functions. This work presents a compilation of commands analyzed by students during these workshops, organized as a thematic dictionary within Mathematica, classified by subject area. The proposed tool aims to support future students and promote autonomous learning of symbolic programming applied to engineering.

**Keywords:** Wolfram Mathematica, Commands, Thematic Dictionary.

## 1. Introducción

En la Facultad Regional Reconquista se desarrollan desde hace varios años talleres destinados a que los estudiantes de los primeros años de ingeniería se familiaricen con el uso del programa de lenguaje simbólico *Mathematica*, de Wólfram Research. En dichos talleres se abordan temas de asignaturas básicas mediante prácticas realizadas íntegramente en este software, fomentando así la exploración de sus herramientas y comandos.

Dentro de estas actividades, una de las propuestas consiste en investigar y presentar el funcionamiento de un nuevo comando. A partir de este ejercicio, en el presente trabajo se realizó una recopilación de los comandos estudiados por los alumnos, organizados y sistematizados en un único archivo de Mathematica. Este archivo, estructurado a modo de diccionario

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

y acompañado por un índice interactivo, permite consultar de manera rápida y clara los distintos comandos según su área de aplicación, constituyéndose en un recurso de apoyo tanto para estudiantes como para docentes.

## 2. Metodología

El trabajo se desarrolló en el marco de los talleres de Mathematica dictados en la Facultad Regional Reconquista. En una primera instancia, cada estudiante seleccionó un comando del programa con el objetivo de investigar su funcionamiento, utilidad y posibles aplicaciones en el ámbito de la ingeniería. Posteriormente, los comandos analizados fueron recopilados y unificados en un único archivo de Mathematica. Para garantizar su accesibilidad, se organizaron de manera alfabética y se agruparon según áreas temáticas relacionadas con las asignaturas de primero a tercer año de la carrera. Finalmente, se incorporó un índice interactivo, que permite la navegación rápida entre secciones, y se estructuraron los contenidos en subceldas que incluyen la definición del comando, ejemplos de uso y observaciones relevantes. Esta metodología permitió transformar los aportes individuales en un recurso colectivo de consulta y aprendizaje.

## 3. Resultados

Se obtuvo un archivo único en Mathematica que reúne los comandos investigados, organizados alfabéticamente y con un índice interactivo para facilitar su consulta. Cada comando incluye ejemplos y descripciones básicas. En la Figura 1 se muestra parte del índice interactivo, mientras que la Figura 2 presenta los comandos acomodados alfabéticamente dentro del archivo, permitiendo una navegación rápida y sencilla a través del contenido. Estas imágenes ilustran claramente la organización del archivo y la manera en que los comandos se pueden consultar según su área de aplicación. Además, facilitan la comprensión de la estructura del recurso, mostrando cómo se integraron los aportes individuales de los estudiantes en un único documento funcional y accesible.

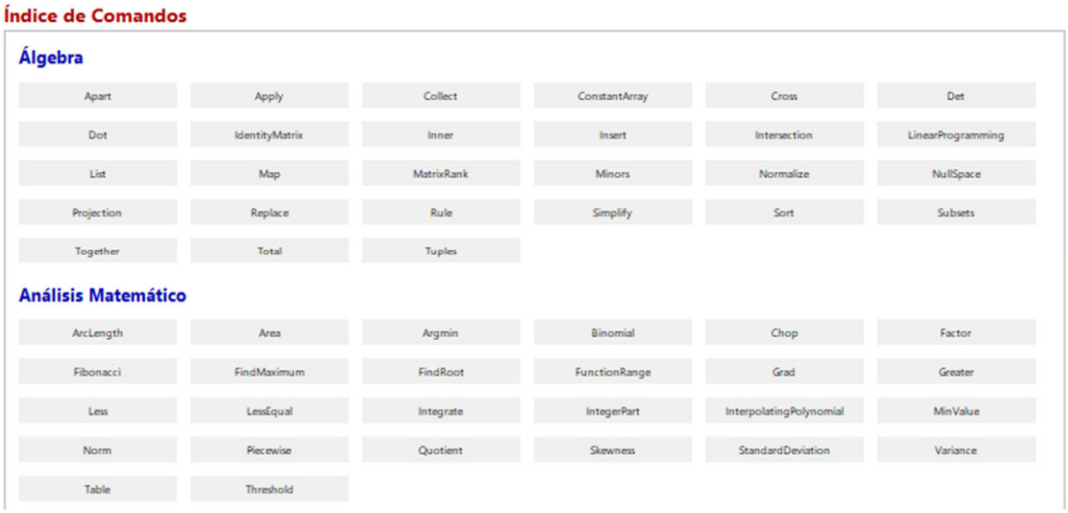



**Figura 1** – Parte del índice iterativo.

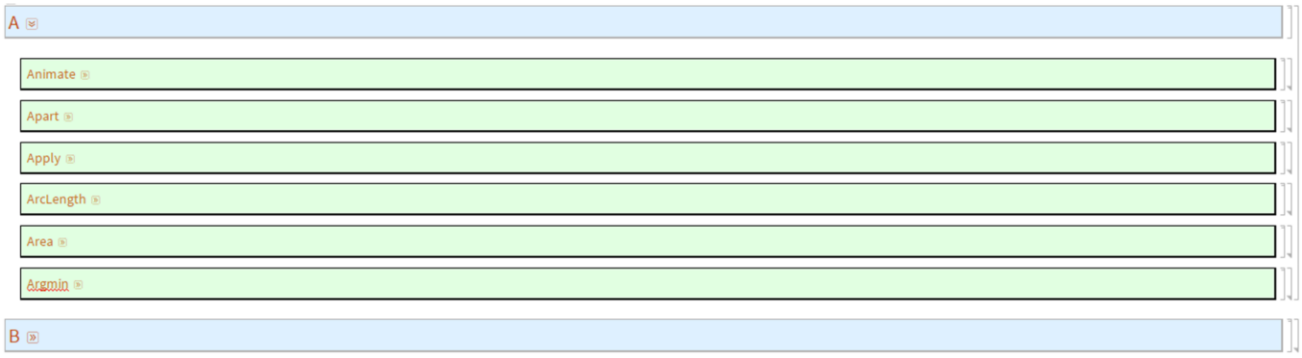



**Figura 2** – Comandos acomodados alfabéticamente.

3.1 *Ejemplo de aplicación concreta en Álgebra*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Supongamos que el alumno está estudiando álgebra y necesita resolver un práctico de matrices. Una opción muy útil es utilizar el comando Det, que permite calcular el determinante de una matriz de manera sencilla. En la Figura 3 se muestra la interfaz de Wolfram Mathematica en el menú de Álgebra, donde se puede seleccionar el comando Det.

Una vez seleccionado, este lo llevará hacia donde se encuentra el comando, como se muestra en la figura 4, donde podrá ver la definición del comando y un ejemplo práctico que también va a poder modificarlo y practicar con el comando.

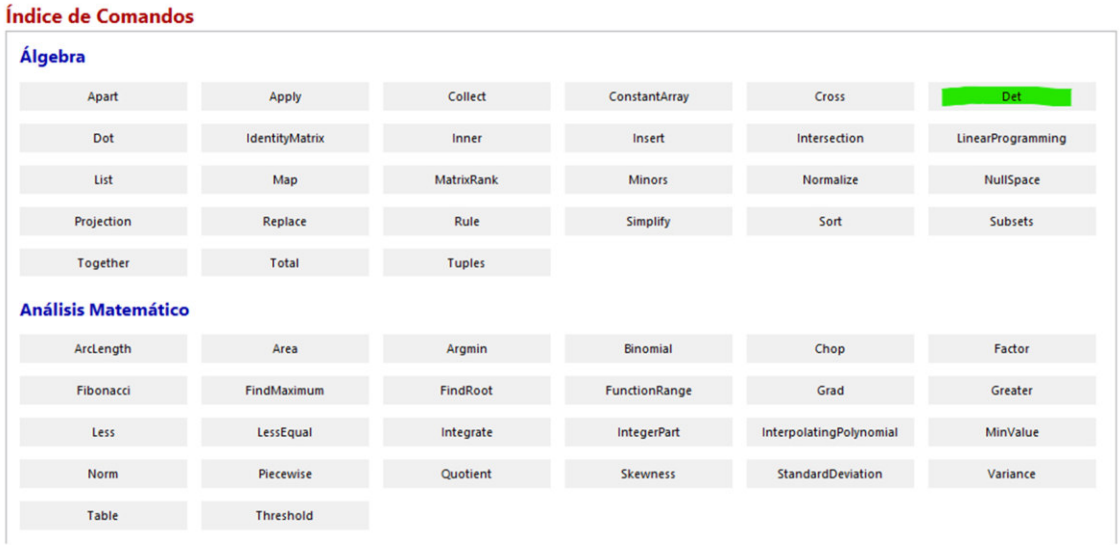



**Figura 3**. Interfaz de Wolfram Mathematica en el menú de Álgebra.

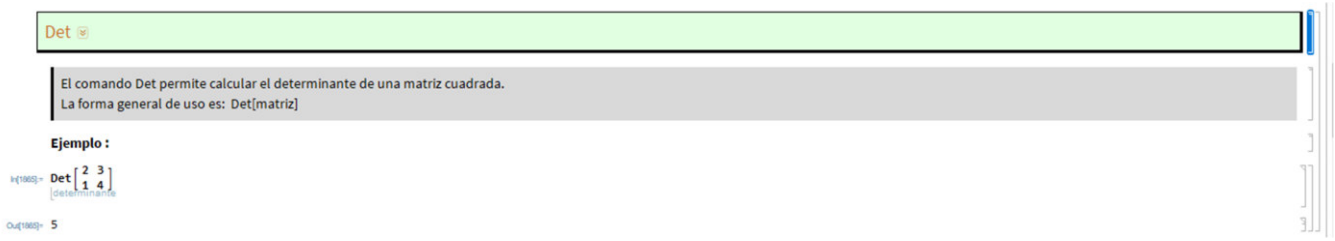



**Figura 4**. Definición del comando y ejemplo práctico

## 4. Conclusiones

El trabajo permitió reunir en un único recurso los comandos estudiados por los estudiantes, organizados de forma práctica y con un índice interactivo que facilita su uso. Este material se presenta como una herramienta de apoyo para el aprendizaje y como base para futuras ampliaciones del proyecto.

## Referencias bibliográficas

Wolfram Research. (s.f.). *An Elementary Introduction to the Wolfram Language* (3rd ed.). Recuperado de https://www.wolfram.com/language/elementary-introduction/3rd-ed/

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería.
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Venado Tuerto

# Cónicas en mi Ciudad

## Conicas in my City

Presentación: 30/10/2025

**Lisbeth Abigail Pujol**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Venado Tuerto, Sistema de información de ciencia y tecnología (SICyT), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
lapujol@frvt.utn.edu.ar

**Luca David Alarcón**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Venado Tuerto, Sistema de información de ciencia y tecnología (SICyT), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
lucasdavidala@gmail.com

**Nicolás Chaves**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Venado Tuerto, Sistema de información de ciencia y tecnología (SICyT), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
nchaves@frvt.utn.edu.ar

### Resumen

La presente experiencia educativa surge como respuesta a los desafíos actuales en la enseñanza universitaria, mediante propuestas centradas en el estudiante y el aprendizaje activo. El objetivo principal fue aplicar el modelado matemático como estrategia didáctica para la enseñanza de las cónicas en la asignatura Álgebra y Geometría Analítica, acercando contenidos abstractos a situaciones reales. En el marco del proyecto de investigación y desarrollo PID TEPPVT0010242, los estudiantes identificaron curvas en su entorno urbano, las fotografiaron y trabajaron en GeoGebra para representarlas y obtener sus ecuaciones. La metodología incluyó observación, trabajo colaborativo, deducción algebraica y contraste con herramientas digitales. Los resultados mostraron avances significativos en el reconocimiento de ecuaciones, el uso de software y la integración de teoría con práctica. Se concluye que la propuesta favorece el aprendizaje significativo, la autonomía y el trabajo en equipo, fortaleciendo competencias transferibles.

**Palabras clave:** Modelado matemático, Cónicas, GeoGebra, Aprendizaje colaborativo, Innovación didáctica, Enseñanza contextualizada.

### Abstract

This educational experience arises as a response to current challenges in university teaching, through student-centered proposals and active learning. The main objective was to apply mathematical modeling as a didactic strategy for the teaching of conics in Algebra and Analytic Geometry, bringing abstract contents closer to real-life situations. Within the framework of the research and development project PID TEPPVT0010242, students identified curves in their urban environment, photographed them, and worked with GeoGebra to represent them and obtain their equations. The methodology included observation, collaborative work, algebraic deduction, and comparison with digital tools. The results showed significant progress in the recognition of equations, the use of software, and the integration of theory with practice. It is concluded that the proposal fosters meaningful learning, autonomy, and teamwork, while strengthening transferable skills.

**Keywords:** Mathematical modeling, Conics, GeoGebra, Collaborative learning, Didactic innovation, Contextualized teaching.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

La enseñanza de las cónicas en primer año de las carreras de ingeniería, resulta bastante complicado por ello se desarrolló esta experiencia en el marco del proyecto de investigación y desarrollo PID TEPPVT0010242, en la asignatura Álgebra y Geometría Analítica de la carrera de Ingeniería Civil en la UTN – FRVT, bajo el enfoque de modelización matemática que favorecen aprendizajes contextualizados (Di Blasi, Regner & Santos, 2023). A través de cinco encuentros presenciales con estudiantes de primer año, se combinaron actividades de observación, análisis algebraico y representación digital.

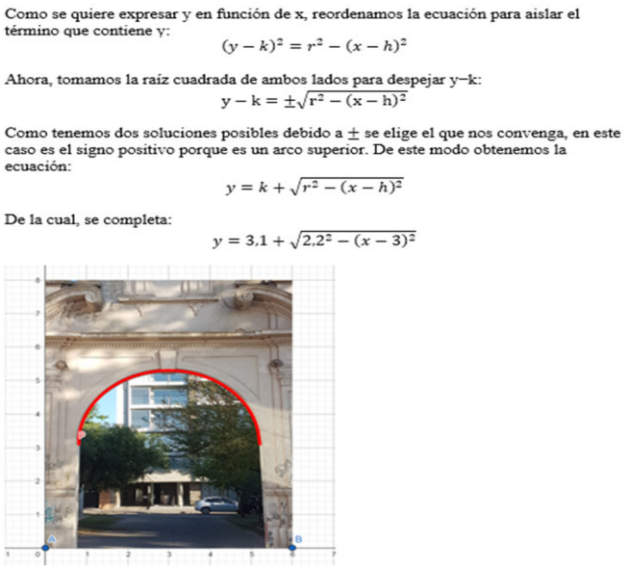
## 2. Materiales y métodos

La experiencia se desarrolló con una duración total de aproximadamente ocho horas de trabajo áulico. Se empleó una metodología activa basada en el modelado matemático, el aprendizaje colaborativo y el uso de herramientas digitales, en línea con propuestas recientes que destacan la potencialidad de la modelización en la enseñanza universitaria (Di Blasi, Regner & Santos, 2023).

En el primer encuentro, se motivó a los estudiantes a observar el entorno urbano mediante una presentación de imágenes de estructuras reales con curvas características. A partir de esta actividad inicial, se brindaron pautas para registrar fotografías propias que sirvieran como insumo de trabajo. Además, se aplicó un cuestionario diagnóstico digital para relevar conocimientos previos.

**Figura 1.** Actividad en clase.

En los segundo y tercer encuentros, los grupos compartieron sus registros fotográficos y formularon hipótesis sobre las posibles curvas presentes. A partir de guías de trabajo, se formalizó el estudio de las cónicas como lugares geométricos y se avanzó en la deducción de sus ecuaciones canónicas. En esta etapa se utilizaron diversos procedimientos: medición de radios o ejes, construcción de mediatrices, cálculo de parámetros y empleo de coordenadas.



Como se quiere expresar y en función de x, reordenamos la ecuación para aislar el término que contiene y:

$$(y-k)^2 = r^2 - (x-h)^2$$

Ahora, tomamos la raíz cuadrada de ambos lados para despejar y−k:

$$y - k = \pm\sqrt{r^2 - (x-h)^2}$$

Como tenemos dos soluciones posibles debido a ± se elige el que nos convenga, en este caso es el signo positivo porque es un arco superior. De este modo obtenemos la ecuación:

$$y = k + \sqrt{r^2 - (x-h)^2}$$

De la cual, se completa:

$$y = 3{,}1 + \sqrt{2{,}2^2 - (x-3)^2}$$

**Figura 2.** Extracto de un trabajo presentado por alumnos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Lugar: Monumento al Venado.
Argentina, Santa Fe, Venado Tuerto, Moreno e Hipólito Yrigoyen, Latitud: -33.745909, Longitud: -61.969570.

$$\frac{(x-h)^2}{a^2} - \frac{(y-k)^2}{b^2} = 1$$

De la cual, se completa:

$$\frac{(x-4{,}2)^2}{0{,}5^2} - \frac{(y-2{,}4)^2}{0{,}2^2} = 1$$

**Figura 3.** Ejemplo y resultado

En el cuarto encuentro, se abordó la generalización algebraica. Mediante el método de completar cuadrados, los estudiantes transformaron ecuaciones cuadráticas generales a sus formas canónicas. Este momento permitió consolidar la relación entre el análisis algebraico y la representación geométrica.

Figura V Tercera imagen de estudio, curva parabólica.

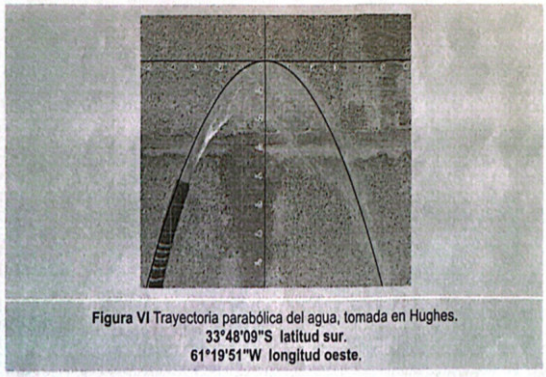


Figura VI Trayectoria parabólica del agua, tomada en Hughes.
33°48'09"S latitud sur.
61°19'51"W longitud oeste.

**Figura 4.** Ejemplo y resultado.

Explicación del grupo que modeló una parábola a partir del recorrido de un chorro de agua.

La fotografía trabajada en clase, muestra una parábola invertida donde $y = -5$ cuando $x = -4$ y b=0 tomamos los ejes de coordenadas en centímetros y se decidió que pasara por el origen correspondiendo a la siguiente expresión: $y = -\frac{5}{16}x^2$

**Figura 5.** Extraído de trabajo práctico.

Finalmente, en el quinto encuentro, se realizó una instancia de evaluación sumativa complementada con una puesta en común para la reflexión grupal y la retroalimentación. Además de la prueba escrita, se aplicaron rúbricas de desempeño que contemplaron la participación, la dinámica grupal y la autonomía en la resolución de problemas.

## 3. Resultados y discusión

En la evaluación diagnóstica inicial, se observó que el 78 % de los estudiantes cursaba Álgebra por primera vez. Respecto al reconocimiento de curvas, el 81 % identificó la parábola, el 59 % la elipse, el 40 % la circunferencia y el 37 % la hipérbola. En cuanto a las ecuaciones, el 74 % reconoció la de la circunferencia, el 51 % la de la parábola, el 40 % la de la elipse, mientras que el 67 % no identificó la de la hipérbola. Estos resultados iniciales pusieron en evidencia dificultades conceptuales que orientaron las estrategias didácticas implementadas.

Durante el desarrollo de la experiencia, los estudiantes lograron representar sus fotografías en GeoGebra y deducir las ecuaciones correspondientes. Se emplearon distintos procedimientos: medición de radios y ejes, trazado de mediatrices, uso de coordenadas y parámetros, así como inserción de imágenes en el software para ajustar curvas. La diversidad de estrategias

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

empleadas muestra la potencialidad del enfoque de modelado matemático para promover pensamiento crítico y flexibilidad en la resolución de problemas.

La evaluación intermedia, mediante cuestionarios de opción múltiple, mostró resultados alentadores:

- En circunferencia, el 89 % identificó correctamente centro y diámetro.
- En elipse, el 68 % reconoció la relación entre ejes y distancia focal.
- En hipérbola, el 83 % identificó la ecuación a partir de parámetros.
- En parábola, el 76 % resolvió correctamente un problema aplicando la distancia focal.

Estos logros evidencian que el trabajo con imágenes del entorno, apoyado en GeoGebra, favoreció la apropiación de conceptos que en la teoría resultan más abstractos.

La evaluación final indicó que el 60 % de los estudiantes aprobó el examen sobre cónicas, mientras que un 30 % del restante obtuvo calificaciones entre 4 y 6, mejorando resultados previos de la asignatura. Además, la actividad fomentó la motivación y el trabajo en equipo: el 60 % de los participantes calificó la dinámica grupal y la distribución de roles como excelente, un 38 % como muy buena y el resto como buena.

En términos generales, los resultados muestran que el enfoque permitió articular teoría y práctica, integrar recursos digitales y promover el aprendizaje colaborativo.
Los estudiantes becarios del grupo han trabajado activamente en la sistematización y el análisis de los datos relevados a través de cuestionarios y rúbricas. Esta labor permitió contrastar resultados, identificar avances y reconocer las dificultades persistentes vinculadas a la formalización algebraica. Asimismo, su participación en la elaboración de materiales digitales y en el acompañamiento a los estudiantes fortaleció la dimensión colaborativa del proyecto, brindándoles una experiencia concreta en el campo de la investigación educativa aplicada.

Los resultados obtenidos reflejan avances significativos en la comprensión de las cónicas y en la aplicación del modelado matemático en situaciones contextualizadas.

## 4. Conclusiones

En esta experiencia “Cónicas en mi ciudad” se demostró que es posible abordar contenidos abstractos como las cónicas desde un enfoque contextualizado, innovador y cercano a la realidad del estudiante. El uso combinado de observación del entorno, modelado matemático y herramientas digitales como GeoGebra favoreció la comprensión conceptual, la motivación y la participación activa en el aula.

Los resultados obtenidos evidencian avances en la identificación y deducción de ecuaciones, así como en la capacidad de aplicar conceptos algebraicos a situaciones reales. El trabajo colaborativo fortaleció la dinámica grupal y promovió habilidades de comunicación, liderazgo y autonomía, consolidando aprendizajes significativos más allá del contenido disciplinar.

Desde nuestro rol de becarios, participar en el proyecto nos permitió adquirir experiencia en investigación educativa aplicada, colaborando en la preparación de materiales, el registro de datos y el análisis de resultados. Esta participación nos brindó un espacio formativo valioso, en el que pudimos articular nuestra formación académica con la práctica investigativa, fortaleciendo competencias transferibles para nuestro futuro profesional.

En síntesis, la experiencia constituye un ejemplo de cómo la integración entre docentes y becarios puede potenciar la innovación didáctica y generar un impacto positivo tanto en los aprendizajes de los estudiantes como en la formación de jóvenes investigadores.

## Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Venado Tuerto (UTN-FRVT) y al Grupo de Investigación del Departamento de Materias Básicas por el acompañamiento y apoyo brindado en el desarrollo de esta experiencia.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Referencias bibliográficas

Di Blasi, M., Regner, C., & Santos, S. (2023). *Modelización matemática: Propuesta para su enseñanza*. Buenos Aires: Editorial Dunken.

Monden, Y. (1983). *Toyota production system: An integrated approach to Just-In-Time*. Norcross, GA: Industrial Engineering and Management Press.

Shapiro, J. (2006). *Modeling the supply chain*. Toronto: Nelson Education.

Armas Costa, R., et al. (2017). *Introducción al modelado matemático con Matlab*. Bogotá: Ediciones Lasalle.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnología educativa y enseñanza de ingeniería
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Elaboración de una simulación virtual para el Trabajo Práctico de laboratorio de Precipitación y Filtración, como refuerzo en el aprendizaje de Química General de la FRSF-UTN

## Design and implementation of a virtual simulation for the laboratory Practical Work of Precipitation and Filtration, to enhance the learning process in General Chemistry at FRSF-UTN

Presentación: 30/10/2025

**Santiago Lopez Delzar**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Departamento de Materias Básicas, Cátedra de Química General, Santa Fe, Argentina
slopezdelzar@frsf.utn.edu.ar

**Erick Caberos**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Departamento de Materias Básicas, Cátedra de Química General, Santa Fe, Argentina
ecaberos@frsf.utn.edu.ar

**Williams Condori**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Departamento de Materias Básicas, Cátedra de Química General, Santa Fe, Argentina
wcondori@frsf.utn.edu.ar

**Roxana Medina**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Departamento de Materias Básicas, Cátedra de Química General, Santa Fe, Argentina
rmedina@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) se han consolidado como herramientas transversales en la educación, posibilitando nuevas formas de enseñar, aprender y experimentar. Para la enseñanza universitaria de ciencias básicas, las TIC permiten representar escenarios físicos mediante entornos virtuales que favorecen tanto la práctica guiada como la interpretación de fenómenos y procedimientos. En la Facultad Regional Santa Fe (FRSF) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), se desarrollaron simulaciones virtuales (SV) que reproducen los trabajos prácticos de laboratorio de la asignatura Química General, elaboradas con el motor de juegos CONSTRUCT 2, utilizando las guías de trabajo práctico (TP) de la cátedra. La presente labor aborda el TP “Precipitación y Filtración”. En comparación con las prácticas en pre-pandemia, se observó que las SV facilitan la comprensión, ayudan a relacionar contenidos y agilizar el tiempo y producción de los TP, constituyendo un recurso pedagógico necesario para potenciar la experiencia del aprendizaje.

**Palabras clave:** Simulación Virtual, Trabajo Práctico, Laboratorio de Química.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Abstract

Information and communication technologies (ICTs) have established themselves as cross-cutting tools in education, enabling new ways of teaching, learning, and experimenting. For university teaching of basic sciences, ICTs allow physical scenarios to be represented through virtual environments that facilitate both guided practice and the interpretation of phenomena and procedures. At the Santa Fe Regional Faculty of the National Technological University, virtual simulations (VS) were developed that reproduce the practical laboratory work of the General Chemistry course. They were developed with the CONSTRUCT 2 game engine, using the course's practical work guides. This work addresses the "Precipitation and Filtration" teaching project. Compared to pre-pandemic practices, it was observed that VS facilitates comprehension, helps relate content, and speeds up the time and production of practical work, constituting a necessary pedagogical resource to enhance the learning experience.

**Keywords:** Virtual Simulation, Practical Work, Chemistry Laboratory

## 1. Introducción

Una de las condiciones para la regularidad de la asignatura Química General, correspondiente a las distintas carreras de ingeniería de la FRSF-UTN, es la realización y aprobación de TP de laboratorio. A través de estas actividades, los estudiantes adquieren habilidades experimentales, comprenden los contenidos básicos de la materia, los vinculan con situaciones de la vida cotidiana y los integran (competencias) a su futura práctica profesional en el campo de la ingeniería.

Estas actividades presenciales se vieron interrumpidas durante la pandemia del COVID-19, lo que intensificó el empleo de las TIC (Cruz, E.P.U. et al., 2022). Esta situación requirió que el cuerpo de docentes y becarios del actual proyecto de investigación (PID) adaptara dichas prácticas al Campus Virtual (MOODLE) de la universidad, dictando las clases teórico-prácticas a través de videoconferencias en línea mediante MICROSOFT TEAMS. Si bien el uso de las TIC se incrementó notablemente durante 2020 y 2021, no es la primera vez que estas herramientas se aplican en la enseñanza de las ciencias básicas. Un ejemplo reconocido es PhET (Physics Education Technology), un conjunto de simulaciones en línea desarrollado en la Universidad de Colorado desde 2002, que permite realizar diversas experiencias en el ámbito de las ciencias exactas (Sailema-Castro, R. I. et al., 2025).

Con el regreso a la presencialidad de las clases, las TIC comenzaron a consolidarse como recursos complementarios permanentes en la enseñanza de la química. En este contexto, las SV se destacan por ofrecer entornos interactivos que enriquecen las prácticas de laboratorio tradicionales, favoreciendo la comprensión de los contenidos y optimizando los tiempos de trabajo. Estas simulaciones se desarrollan a partir de un motor de juegos (CONSTRUCT), entendido como un software de creación de videojuegos que permite utilizar funciones previamente establecidas de renderizado en 2D o 3D, motores físicos y de colisiones, sonido y automatización de procesos. Se trata de una herramienta ampliamente utilizada en la industria del entretenimiento, pero que en el ámbito educativo posibilita diseñar experiencias realistas y accesibles. La experiencia con este tipo de recursos demostró que la combinación de interacción y animaciones genera un entorno de aprendizaje dinámico, que permite al estudiante desenvolverse de manera asincrónica y experimentar incluso más allá de lo que se enseña en la práctica sincrónica (Assenza, T. et al., 2024).

El presente informe se centra en el TP nº4: Precipitación y Filtración, en el cual se analiza cómo la implementación de un simulador el cual contribuye a mejorar la comprensión de los fenómenos, reforzar los contenidos y agilizar el desarrollo de la experiencia de laboratorio, constituyéndose en un recurso pedagógico complementario de valor para los estudiantes de primer año para las distintas carreras de ingeniería.

## 2. Materiales y métodos

El presente trabajo analiza el estudio comparativo del trabajo en el laboratorio de Precipitación y Filtración formulado por el departamento de Química de la FRSF-UTN, para las carreras de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, a dos cohortes de alumnos y alumnas ingresantes de distintos años. Para una muestra poblacional de casos que incluyeron 98 estudiantes ingresantes para el año 2024 y 70 para el año 2025.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Para ambos años, la metodología de trabajo fue la siguiente: cada estudiante, una vez explicado el trabajo práctico por el docente a través de la guía impresa que se les proporciona, podía acceder (la semana previa al laboratorio) a su aula virtual de la materia encontrándose con una serie de eventos a cumplimentar (Figura 1).

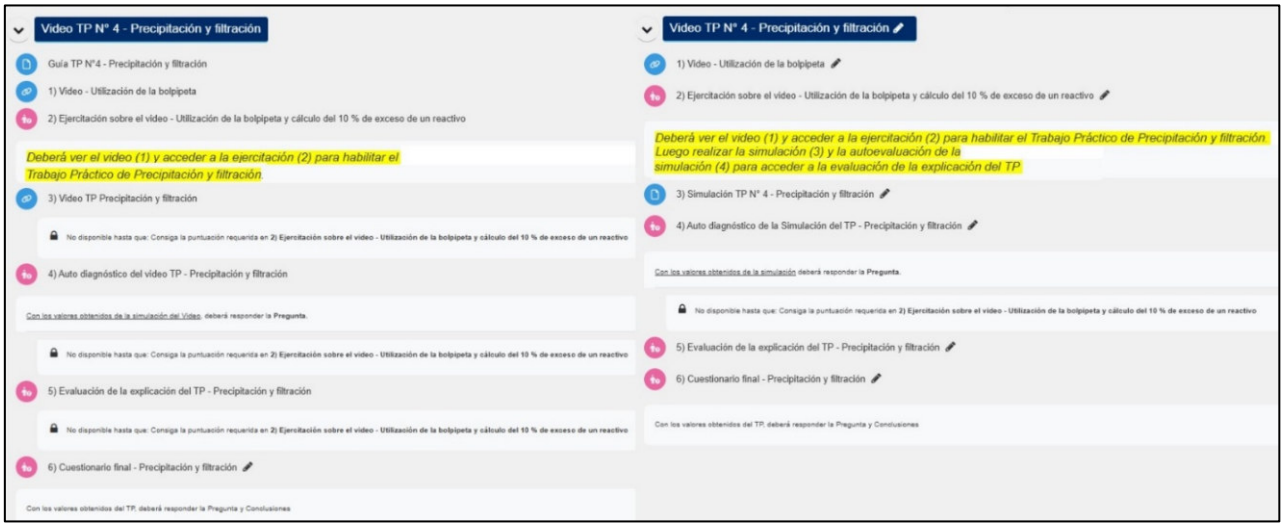



**Figura 1.** Aulas Virtuales comparativas 2024-2025.

Para el año 2024 se elaboró un video de la experiencia utilizando un Smarthphone Samsung A54 y el programa FILMORA para la edición del mismo (link del video: https://www.youtube.com/watch?v=r9h1mumIdbI). Bajo el PID en curso, y a través de los docentes de la cátedras y becarios a distintas carreras, en el 2025 se comenzó la SV la cuál requirió la generación de una guía lógica de secuencias de imágenes y animaciones. Para ello se empleó el software ADOBE AFTER EFFECTS, con el cual se diseñaron distintos videos que posteriormente fueron procesados mediante la colección de herramientas de código abierto FFmpeg y comerciales (Gitlab, Filmora y Capcut). Compilando todo con el motor de juegos Construcy 2 para crear la SV, la cual fue publicada en el campus virtual (plataforma Moodle)

Para ambas comisiones se comparó los resultados obtenidos en la evaluación de la explicación del TP con el objetivo de ver la influencia de las experiencias del video y la simulación

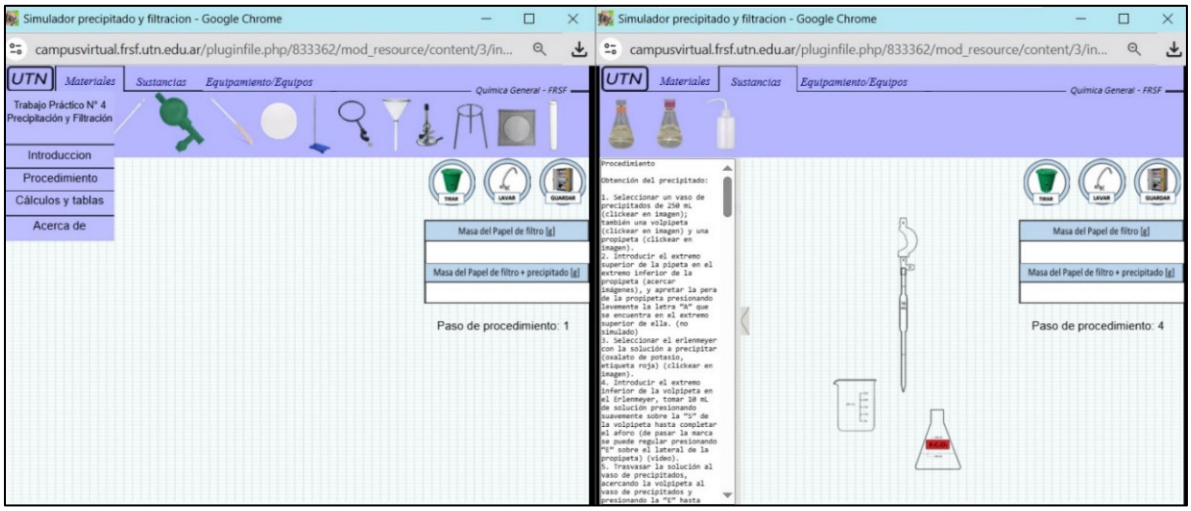



**Figura 2:** Ventanas emergentes de la SV (plano de trabajo).

La simulación presenta una interfaz intuitiva y amigable para el estudiante, organizada mediante un HUD (Head-Up Display), es decir, la barra superior constante de la aplicación. En este espacio se agrupan las principales pestañas de navegación: UTN, Materiales, Sustancias y Equipamientos/Equipos. Cada una de las mismas ofrece la información necesaria para seguir los pasos del TP, tal cual se realizaría en presencialidad (Figura 2).

Para ambos años, una vez completados los incisos del 1 al 3 en sus aulas virtuales (cabe destacar que los estudiantes podían rever tanto el video como la SV cuantas veces desearan), cada alumno y alumna accedía a un autodiagnóstico para la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

elaboración de resultados observables en el video y/o en la simulación, los que formaban parte de los cálculos y los valores aproximados que deberían gestionar a la hora del laboratorio in situ. Dichos valores agregados debían ser correctos a la hora de la carga en la plataforma, dándole a sus respuestas la retroalimentación correcta, por parte del docente (Figura 3).

Una vez realizado el inciso 4 (el recuadro n°1 del borde superior derecho se resalta en color verde, indicando una respuesta efectiva), el estudiante puede acceder a la Evaluación del TP.

**Figura 3:** Autodiagnóstico de los datos obtenidos en el video y/o simulación.

2.1 *Evaluación*

En consideración de la cátedra, los docentes informaron desde un principio a los alumnos que la evaluación del TP, inciso 5, estaría disponible tres días antes al ingreso del trabajo de laboratorio presencial, y que cada participante debía alcanzar un valor mínimo (30 puntos) de la nota de la evaluación para poder acceder a ese día de trabajo.

Al ingresar al link, los alumnos tendrían un solo intento permitido para su evaluación asincrónica, y de la cual dispondrían de 30 minutos para la realización de la misma. Dicha actividad fue organizada bajo el entorno MOODLE, con una base de preguntas en formatos de arrastrar y soltar textos, opción múltiple, identificación de imágenes, verdadero y falso, multi numérica, selección de palabras faltantes, entre otras (Figura 4).

Por otro lado, la corrección de las preguntas que componen la evaluación final cada TP se efectuó automáticamente a través de una base de datos previamente cargada, y cuya devolución (el alumno podría posteriormente acceder a ver la misma) retornaba con la retroalimentación pertinente (Schiappa Pietra, José M. Et.al, 2020).

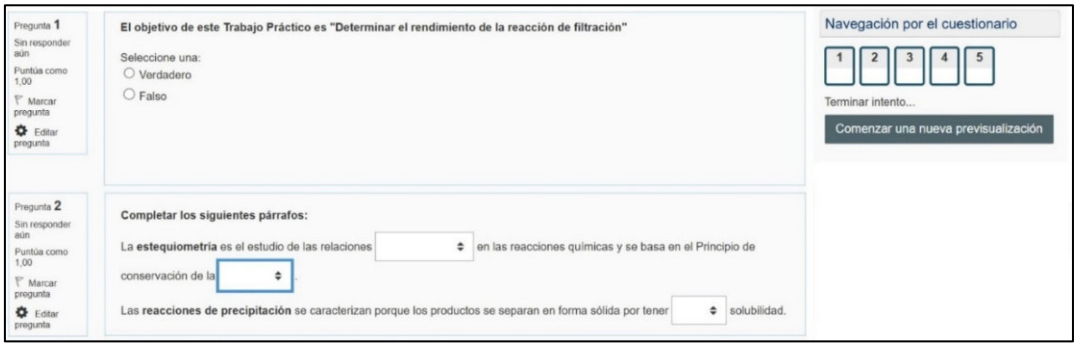



**Figura 4**: Ejemplificación de la ejercitación para el TP n°4.

## 3. Resultados y discusión

En la Tabla 1 se compara en porcentaje de alumnos los rangos de puntajes obtenidos y tiempo empleado para cada evaluación de la explicación entre las cohortes 2024 y 2025; junto con los valores promedios obtenidos para las mismas comisiones de la cohorte 2025, del primer intento de la autoevaluación de la simulación. En la figura 5 se muestran la cantidad de alumnos por cohorte y su puntaje alcanzado en la evaluación.

**Tabla 1.** Comparación de los puntajes obtenidos, en porcentajes de alumnos, y tiempo empleado, en la evaluación de la explicación (cohortes 2024 y 2025); y valores promedios de la autoevaluación de la simulación del TP (cohorte 2025).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| Comisión | Alumnos | Puntaje obtenido [%] | | | | | | | | | | Tiempo Empleado [min] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 100-90 | 89-80 | 79-70 | 69-60 | 59-50 | 49-40 | 39-30 | 29-20 | 19-10 | 9-0 | μ±σ |
| **Eléctrica 2024** | 25 | 40 | 40 | 8 | 8 | 4 | - | - | - | - | - | 10,4±6,1 |
| **Mec A 2024** | 43 | 54 | 28 | 7 | 9 | 2 | - | - | - | - | - | 9,1±3,8 |
| **Mec B 2024** | 30 | 40 | 23 | 10 | 21 | 3 | 3 | - | - | - | - | 9,5±5,3 |
| **Promedio 2024** | 32,7 | 44,7 | 30,3 | 8,3 | 12,7 | 3,0 | 3,0 | - | - | - | - | 9,7±5,1 |
| **Prom. Autoeval. Simu. 2025** | 23,7 | 53,3 | 11,0 | - | 26,3 | - | 5,7 | - | 3,0 | - | 4,0 | 11,1±9,4 |
| **Eléctrica 2025** | 22 | 45 | 32 | 13 | 5 | - | 5 | - | - | - | - | 5,3±1,6 |
| **Mec A 2025** | 31 | 45 | 42 | 3 | 10 | - | - | - | - | - | - | 7,4±2,8 |
| **Mec B 2025** | 17 | 47 | 35 | 12 | 6 | - | - | - | - | - | - | 8,3±4,5 |
| **Promedio 2025** | 23,3 | 45,7 | 36,3 | 9,3 | 7,0 | - | 5,0 | - | - | - | - | 7,0±3,0 |

De la comparación estadística entre las cohortes 2024 y 2025, y considerando a su vez las distintas comisiones (Eléctrica, Mecánica A y Mecánica B), se observa una tendencia que, para este trabajo, se resume en el análisis de los promedios de los porcentajes de calificaciones obtenidas en la evaluación de la explicación del TP y del tiempo empleado en su resolución.

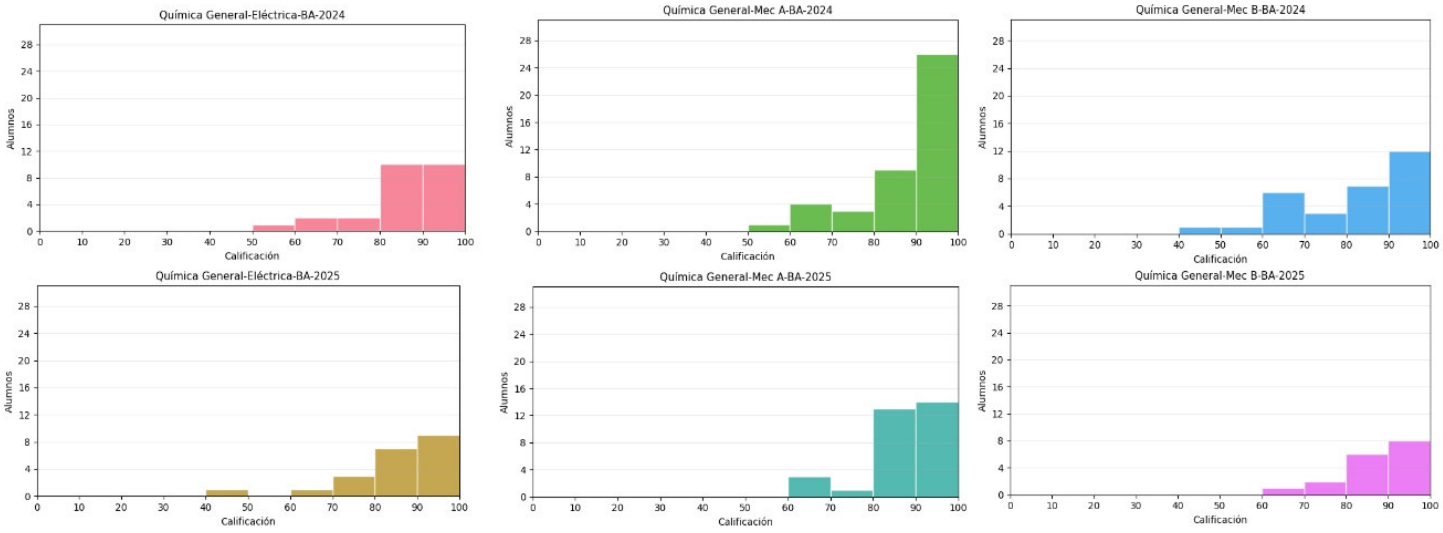



**Figura 5**: Calificaciones alcanzadas por los alumnos en las cohortes 2024 (fila superior) y 2025 (fila inferior).

La cohorte 2024 contó en promedio con mayor cantidad de alumnos. Con respecto a la evaluación de la explicación del TP, son bajos los porcentajes de los alumnos (4% o menos) que obtienen puntajes menores a 59, concentrándose el 75% de alumnos en promedio, entre los puntajes 100-80. El tiempo promedio requerido para realizar esta evaluación fue de 9,7 minutos.

En la cohorte 2025 el promedio de alumnos, que realizó la actividad previa de la simulación del TP y su autoevaluación, fue similar al que realizo la evaluación de la explicación del TP. De esta autoevaluación, se observa, en todas las comisiones, que el 64,3% en promedio de los alumnos obtiene un puntaje entre 100-80 en el primer intento de la simulación y solo un 12,7% en promedio obtiene puntaje por debajo de los 59. Tomándoles en promedio 11,1 minutos para realizar esta actividad. Con respecto a la evaluación de la explicación, el 82% en promedio de los alumnos obtienen puntajes entre el rango de 100-80 y no se observan porcentajes inferiores a 59 puntos en las comisiones de Mecánica A y B, y en Eléctrica solo aumenta en 1 % en promedio en comparación con 2024. Además de observarse la tendencia de un aumento de los porcentajes obtenidos en las notas de la evaluación por parte de los alumnos que participaron en la autoevaluación de la simulación también se aprecia una reducción del tiempo promedio para la realización de esta actividad (7 minutos).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 4. Conclusiones

A modo de cierre, y a partir de los resultados expuestos, puede afirmarse que la simulación virtual constituye una herramienta eficaz para la comprensión y el estudio de los contenidos abordados en el laboratorio. Esto se refleja en la mejora de las calificaciones obtenidas por los alumnos de ambas cohortes, así como en la reducción del tiempo requerido para la realización de las evaluaciones. Asimismo, la implementación de la simulación permitió agilizar el desarrollo del TP en la instancia presencial, dado que los estudiantes arribaron mejor preparados gracias al uso de esta herramienta promovida en los últimos años.

En el caso particular de la cátedra de Ingeniería en Energía Eléctrica, cohorte 2025, se detectó un pequeño porcentaje de alumnos con calificaciones en el rango de 49-40. Esta situación podría atribuirse a diversos factores, tales como falta de atención durante la simulación, errores en procedimientos de cálculo, dificultades de comprensión de algunos temas tratados en clase, entre otras. Si bien se trata de un grupo reducido de estudiantes que cumplen con los mínimos requeridos, resulta conveniente trabajar en estrategias que permitan mejorar dichos resultados y garantizar que todas las comisiones alcancen calificaciones superiores al 60%.

Finalmente, en el marco de la formación de futuros profesionales, las simulaciones virtuales contribuyen significativamente al fortalecimiento de competencias clave, como la interpretación de resultados y enunciados, el desarrollo del pensamiento crítico, el manejo de TIC y la integración de los conocimientos adquiridos en la cátedra.

## Agradecimientos

Agradecemos ante todo a los docentes de la cátedra de Química General, FRSF-UTN, quienes fueron tutores en la elaboración de esta labor presentada: Prof. Lic. José Maximiliano Schiappa Pietra y el Dr. Ing. Carlos Córdoba, director y co-director respectivamente del Proyecto de Investigación TEPPFE0010239*"*, y que forma parte de la Tesis doctoral *"La búsqueda de un aprendizaje integral a través de la generación e implementación de simulaciones virtuales que refuercen las competencias de los alumnos en los laboratorios de química para las carreras de ingeniería",* del Lic. Schiappa Pietra, de la carrera de posgrado Doctorado en Educación en Ciencias Experimentales, de la Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Litoral.

## Referencias bibliográficas

Cruz, E. P. U., Riofrío, M. C. O., & Salcán, N. D. J. S. (2022). "Experimental activities using virtual simulators to learn chemistry during covid-19 pandemic". Revista Chakiñan de Ciencias Sociales y Humanidades, no. 17, pp. 122-137. Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador.

Sailema-Castro, R. I., Licoa-Vera, G. K., Carlin-Chávez, E. L., & Bernardes-Carballo, K. (2025). "Impacto del uso de los simuladores PhET en la enseñanza de química para bachillerato: desafíos y oportunidades docentes". Código Científico Revista De Investigación, 6(1), 507–534. https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/n1/903

Assenza, T., Flecha, J., Schiappa Pietra, J. M., Córdoba, C. A., Castiglioni, M., Lopez Delzar, S., & Caberos, T. (2024). "Desarrollo de software y material audiovisual para un experimento de separación de fases". XII Congreso Nacional de Ingeniería en Informática/Sistemas de Información (CoNaIISI 2024), Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca.

Schiappa Pietra, José M., Avalis, C., Liprandi, D. y Cordoba, C. (2020). "Modelo de evaluación en un laboratorio de química bajo la implementación de entornos virtuales". VII Jornadas Nacionales y III Latinoamericanas de Ingreso y Permanencia en Carreras Científico-Tecnológicas. Facultad Regional de Tucumán, UTN. San Miguel de Tucumán.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Resolución de problemas integradores de Química General en equipos agiles, evaluados bajo la taxonomía SOLO

## Solving General Chemistry's Integrative Problems in Agile Teams, Assessed through the SOLO Taxonomy

Presentación: 30/10/2025

**Esteban Montalvo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
emontalvo@frsf.utn.edu.ar

**Erick Caberos Tobarias**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
ecaberostobarias@frsf.utn.edu.ar

**Gonzalo Morel**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
gmorel@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

El aprendizaje de Química General en Ingeniería demanda comprender conceptos abstractos y aplicarlos a problemas concretos. Con este fin, se implementó una actividad asincrónica en la que participaron 180 estudiantes de primer año de Ingeniería Mecánica, Civil y Eléctrica de la UTN–FRSF, organizados en 42 equipos ágiles. Los grupos resolvieron problemas integradores de contenidos del primer cuatrimestre, distribuyendo roles y tareas de manera colaborativa. La evaluación se realizó mediante rúbricas basadas en la taxonomía SOLO, identificando niveles de comprensión desde respuestas superficiales hasta aprendizajes abstractos y transferibles. Los resultados mostraron predominio de niveles medios y altos, con diferencias entre carreras y evidencias de subestimación en la autoevaluación. La experiencia favoreció el desarrollo de competencias disciplinares y transversales, consolidando un enfoque de enseñanza innovador y centrado en el estudiante.

**Palabras clave:** Química General, Equipos ágiles, Taxonomía SOLO

### Abstract

Learning General Chemistry in Engineering requires understanding abstract concepts and applying them to concrete problems. To address this challenge, an asynchronous activity was carried out with 180 first-year students from Mechanical, Civil, and Electrical Engineering at UTN–FRSF, organized into 42 agile teams. The groups solved integrative problems covering key first-semester topics, distributing roles and tasks collaboratively. Assessment was conducted through rubrics based on the SOLO taxonomy, which identified levels of understanding ranging from surface responses to abstract and transferable learning. Results showed a predominance of medium and high levels, with differences across programs and evidence of underestimation in self-assessment. The experience fostered both disciplinary and transversal competencies, consolidating an innovative and student-centered teaching approach.

**Keywords:** General Chemistry, Agile Teams, SOLO Taxonomy)

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

El aprendizaje de la Química General en las carreras de Ingeniería constituye un desafío, ya que los estudiantes deben no sólo comprender conceptos abstractos, sino también aprender a aplicarlos en los diversos contextos que se presenten. En búsqueda de favorecer este proceso, se diseñó una actividad asincrónica con la aplicación de equipos ágiles, y se empleó la taxonomía SOLO como marco de evaluación formativa.

En esta experiencia, la taxonomía SOLO (Structure of Observed Learning Outcomes) se utilizó como una guía para caracterizar distintos niveles de comprensión alcanzados por los estudiantes. SOLO proporciona un marco útil para caracterizar niveles de comprensión y orientar la evaluación formativa (Biggs, 2005). Su aplicación buscó que los alumnos tomaran conciencia de la profundidad de su propio aprendizaje: desde respuestas superficiales hasta aquellas que integran y relacionan conceptos. Para ello, se elaboraron rúbricas basadas en SOLO que permitieron a los estudiantes autoevaluarse y comprender qué se esperaba de ellos en cada nivel de resolución. Así, no solo se midieron sus conocimientos en los temas, sino también cómo los estructuraban y utilizaban para resolver un problema químico.

Al mismo tiempo, se conformaron equipos ágiles, inspirados en los principios de la agilidad educativa (Adkins, 2010; Bollati et al., 2022). Estos métodos se adoptaron con la orientación de favorecer la autoorganización de los grupos de estudiantes. Cada equipo debió distribuir roles, coordinar tareas y sostener una comunicación fluida entre pares para resolver problemas integradores de Química General. El énfasis estuvo en el proceso de trabajo colaborativo y en la capacidad de adaptarse a los cambios surgidos durante la actividad, más que en la mera obtención de la respuesta final.

De este modo, los equipos ágiles funcionaron como el medio para dinamizar la participación y el aprendizaje activo, mientras que la taxonomía SOLO ofreció el marco para orientar y evaluar la calidad de los resultados alcanzados. La combinación de ambas metodologías permitió que los estudiantes asumieran un rol protagonista en su propio aprendizaje, desarrollaran competencias vinculadas al trabajo en equipo y comprendieran mejor cómo evolucionar en la resolución de problemas de Química General.

## 2. Materiales y métodos

La actividad se desarrolló a finales del primer cuatrimestre de 2024 en la asignatura Química General de las carreras de Ingeniería Mecánica, Civil y Eléctrica de la UTN Facultad Regional Santa Fe. Participaron aproximadamente 180 estudiantes de primer año, organizados en 42 equipos ágiles de entre 4 y 5 integrantes (24 equipos en Mecánica, 10 en Civil y 8 en Eléctrica). La consigna consistió en la resolución asincrónica de problemas integradores, que retomaban los contenidos abordados durante el primer cuatrimestre: formulación y nomenclatura, estequiometría, estados de la materia, procesos endotérmicos y exotérmicos, concentración de soluciones, propiedades coligativas y termoquímica.

Cada grupo recibió un problema distinto y debió autoorganizarse para avanzar en su resolución. La dinámica de equipos ágiles buscó fomentar la comunicación entre pares, la distribución autónoma de roles y la capacidad de adaptarse a los obstáculos surgidos en el proceso. De este modo, el trabajo grupal no sólo apuntó a reforzar conocimientos disciplinares, sino también a ejercitar competencias transversales como la colaboración, la organización y la toma de decisiones en conjunto.

La evaluación de la actividad se diseñó a partir de una rúbrica elaborada por la cátedra y basada en la taxonomía SOLO, con cinco niveles de comprensión. Para facilitar su interpretación, los niveles se agruparon en dos categorías:

Aprendizajes superficiales:

- Preestructural: respuestas erróneas o tautológicas, sin evidencia de aprendizaje significativo.
- Uniestructural: respuestas que sólo abordan parcialmente la consigna, limitándose a la terminología sin profundizar.
- Multiestructural: respuestas con abundancia de datos, pero sin organización ni foco en la cuestión central.

Entendimiento profundo:

- Relacional: integración de los conceptos en una explicación coherente, con sentido en el marco global de la asignatura.
- Abstracto ampliado: capacidad de generalizar y transferir lo aprendido a nuevos contextos o problemas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La estrategia combinó autoevaluación grupal y heteroevaluación docente, con el fin de confrontar la percepción de los estudiantes respecto a su aprendizaje con el análisis de los profesores. Esta doble mirada permitió no sólo valorar los resultados obtenidos, sino también estimular a los estudiantes a tener una reflexión crítica sobre la calidad de sus respuestas y la profundidad de su propio proceso de aprendizaje.

## 3. Resultados y discusión

La rúbrica que se utilizó para evaluar los problemas integradores según las categorías SOLO se presenta en Tabla 1.

**Tabla 1.** Rúbrica para evaluar las respuestas según las categorías SOLO

| Categoría SOLO | Criterios |
|---|---|
| I- Aprendizaje Superficial - Preestructural (Respuestas erróneas) | **P(1-5)-(a):** Presenta dificultades en la formulación de compuestos, no consigue balancear adecuadamente la reacción.<br>**P(1-5)-(b):** No emite criterio sobre el tipo de reacción de acuerdo con su endo/exotermicidad.<br>**P(1-5)-(c):** No consigue calcular el reactivo limitante y las relaciones de masa y/o moles.<br>**P(1 y 5)-(d):** No consigue calcular la concentración de la solución y la propiedad coligativa.<br>**P(2 y 4)-(d):** No consigue realizar el cálculo de gases usando la Ley de los gases ideales.<br>**P(2 y 4)-(e) y P3(d):** No consigue formular e identificar correctamente los tipos de calor involucrados, y presenta errores en el diagrama T vs t. |
| II- Aprendizaje Superficial – Uniestructural (Respuestas incompletas, bien orientadas) | **P(1-5)-(a):** Supera lo anterior, realiza la formulación, pero tiene errores en el balance de la reacción.<br>**P(1-5)-(b):** Responde sobre el signo de la entalpía, pero no lo asocia al criterio de endo/exotermicidad.<br>**P(1-5)-(c):** Tuvo dificultades en calcular correctamente una de las dos consignas, por ejemplo: calcula mal el reactivo limitante y arrastra el error al cálculo de relaciones de masa/moles o viceversa.<br>**P(1 y 5)-(d):** No consigue calcular bien alguna de las dos consignas (la concentración de la solución o la propiedad coligativa).<br>**P(2 y 4)-(d):** Calcula usando la Ley de los gases ideales, pero no obtiene el resultado correcto (ej. errores de unidades).<br>**P(2 y 4)-(e) y P3(d):** Consigue formular e identificar correctamente los tipos de calor involucrados, pero no representa correctamente todos los calores en el diagrama T vs t (falta algún proceso). |
| III- Aprendizaje Superficial – Multiestructural (No se aborda cuestión clave, cuenta conocimientos, pero no los relaciona) | **P(1-5)-(a):** Formula y balancea, no tiene errores, pero no argumenta.<br>**P(1-5)-(b):** Responde sobre el signo de la entalpía, y lo asocia al criterio de endo/exotermicidad, no ofrece otro argumento.<br>**P(1-5)-(c):** Calcula correctamente las dos consignas (cálculo del reactivo limitante y relaciones de masa/moles), pero sin argumentar.<br>**P(1 y 5)-(d):** Calcula correctamente las dos consignas (concentración de la solución y propiedad coligativa) pero sin argumentar.<br>**P(2 y 4)-(d):** Calcula correctamente usando la Ley de los gases ideales, pero no ofrece argumento.<br>**P(2 y 4)-(e) y P3(d):** Consigue formular e identificar correctamente los tipos de calor involucrados, y representa correctamente todos los calores en el diagrama T vs t, pero no ofrece argumento. |
| IV- Aprendizaje Profundo – Relacional (Abordan un punto, relacionan y dan sentido a los resultados) | **P(1-5)-(a):** Formula, balancea correctamente y añade un argumento (explica el procedimiento) de forma simple.<br>**P(1-5)-(b):** Responde sobre el signo de la entalpía, lo asocia al criterio de endo/exotermicidad, y ofrece argumento (ej. una reacción exotérmica libera calor al ambiente).<br>**P(1-5)-(c):** Calcula correctamente las dos consignas (cálculo del reactivo limitante y relaciones de masa/moles), pero argumenta simplemente lo que hace.<br>**P(1 y 5)-(d):** Calcula correctamente las dos consignas (concentración de la solución y propiedad coligativa) pero argumenta simplemente lo que hace.<br>**P(2 y 4)-(d):** Calcula correctamente usando la Ley de los gases ideales, y ofrece argumento simple. |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | |
|---|---|
| | **P(2 y 4)-(e) y P3(d):** Consigue formular e identificar correctamente los tipos de calor involucrados, y representa correctamente todos los calores en el diagrama T vs t, ofrece argumento simple. |
| V- Aprendizaje Profundo - Abstracto Ampliado (Respuesta ampliada que trasciende y aplica a campos nuevos) | **P(1-5)-(a):** Suma un argumento ampliado sobre los tipos de nomenclatura, relación de coeficientes estequiométricos, estados de agregación, teoría del tema.<br>**P(1-5)-(b):** Responde sobre el signo de la entalpía, lo asocia al criterio de endo/exotermicidad, y ofrece argumento ampliado a lo anterior (ej. ejemplos de procesos con similares características).<br>**P(1-5)-(c):** Calcula correctamente las dos consignas (cálculo del reactivo limitante y relaciones de masa/moles), pero el argumento es amplio.<br>**P(1 y 5)-(d):** Calcula correctamente las dos consignas (concentración de la solución y propiedad coligativa) y ofrece argumento ampliado (ej. explica la propiedad coligativa).<br>**P(2 y 4)-(d):** Calcula correctamente usando la Ley de los gases ideales, y ofrece un argumento ampliado (ej. enuncia la ley o aspectos sobre la teoría o propiedades de los gases ideales).<br>**P(2 y 4)-(e) y P3(d):** Consigue formular e identificar correctamente los tipos de calor involucrados, y representa correctamente todos los calores en el diagrama T vs t, ofrece argumento ampliado (ej. explica lo que sucede en el cambio de fase, calor específico, etc.). |

La Figura 1, la Figura 2 y la Figura 3 representan la distribución porcentual de niveles de repuesta según Taxonomia SOLO, diferenciada por tema, para Ingeniería Eléctrica, Civil y Mecánica, respectivamente. En cada figura se presentan dos instancias de evaluación: (a) autoevaluación de los equipos y (b) heteroevaluación realizada por los docentes. De la Tabla 1, los problemas son: P(1-5)-(a), a la formulación y nomenclatura, P(1-5)-(b) a procesos endotérmicos y exotérmicos, P(1-5)-(c) a balances estequiométricos (cálculo del reactivo limitante y relaciones de masa), P(1 y 5)-(d), al cálculo de concentraciones de soluciones y propiedades coligativas, P(2 y 4 )-(d) a la Ley de los gases ideales, y P(2 y 4 )-(e) y P3 (d) a conocimientos de termoquímica.

En el caso de Ingeniería Eléctrica (Figura 1a y Figura 1b), se destaca un mayor porcentaje de respuestas evaluadas en niveles relacional y abstracto ampliado por parte de los docentes; por ejemplo, la heteroevaluación evidenció un desempeño sólido en termoquímica, alcanzando el 100% en nivel relacional. La diferencia con la autoevaluación, más baja, muestra que los estudiantes subestimaron sus capacidades. Esto indica que poseen un dominio conceptual mayor al que reconocen, y que la autoevaluación debe ser reforzada como práctica de reflexión metacognitiva.

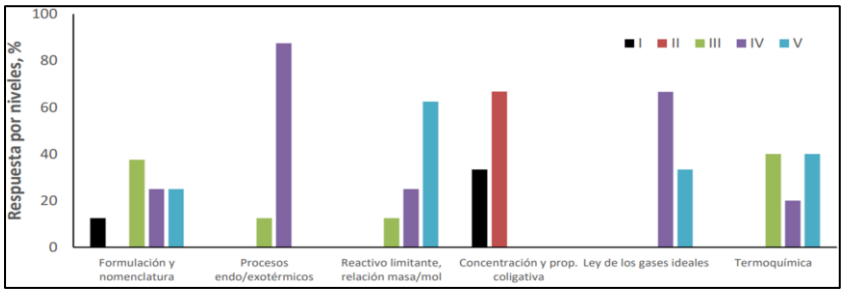



**Figura 1a.** Autoevaluación en Ingeniería Eléctrica. Distribución porcentual de niveles de repuesta por tema.

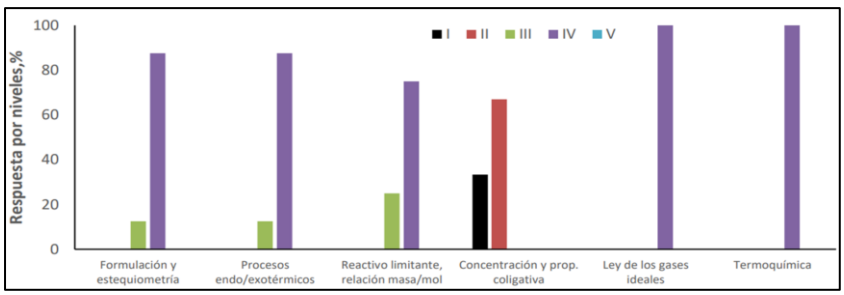



**Figura 1b.** Heteroevaluación en Ingeniería Eléctrica. Distribución porcentual de niveles de repuesta por tema.

En Ingeniería Civil (Figura 2a y Figura 2b), Se observó un predominio de niveles multiestructural y relacional en los primeros temas, lo que refleja apropiación progresiva de los conceptos. Sin embargo, en coligativas y termoquímica se repitieron las mismas dificultades detectadas en Eléctrica, lo que confirma que estos contenidos demandan un refuerzo específico por su complejidad y su ubicación en la etapa final del cuatrimestre.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

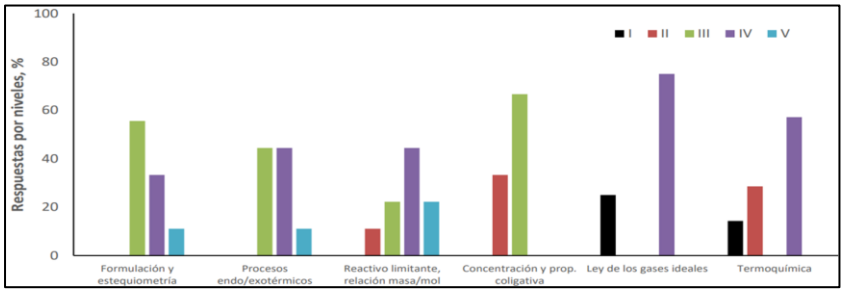



**Figura 2a.** Autoevaluación en Ingeniería Civil. Distribución porcentual de niveles de repuesta por tema.

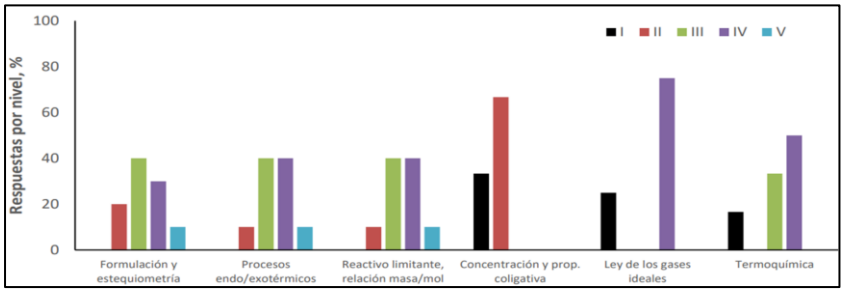



**Figura 2b.** Heteroevaluación en Ingeniería Civil. Distribución porcentual de niveles de repuesta por tema.

En Ingeniería Mecánica (Figura 3a y Figura 3b), la dispersión en todos los niveles revela respuestas menos homogéneas y un mayor desafío para alcanzar aprendizajes profundos. La explicación más probable es la conformación de grupos numerosos, donde no todos los estudiantes participan activamente. Este hallazgo sugiere que, en cohortes amplias, es clave acompañar a los equipos con estrategias de seguimiento más cercano que aseguren la participación equitativa y la calidad de las producciones.

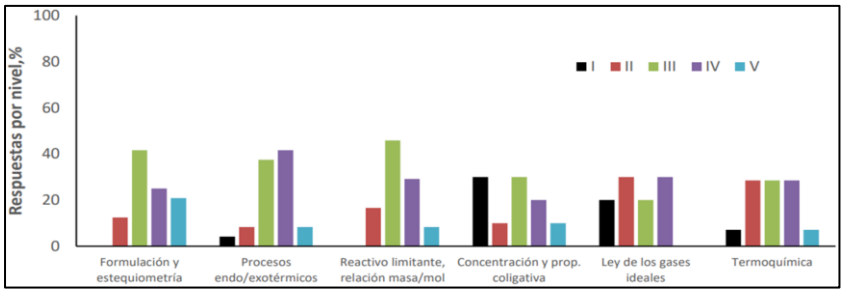



**Figura 3a.** Autoevaluación en Ingeniería Mecánica. Distribución porcentual de niveles de repuesta por tema.

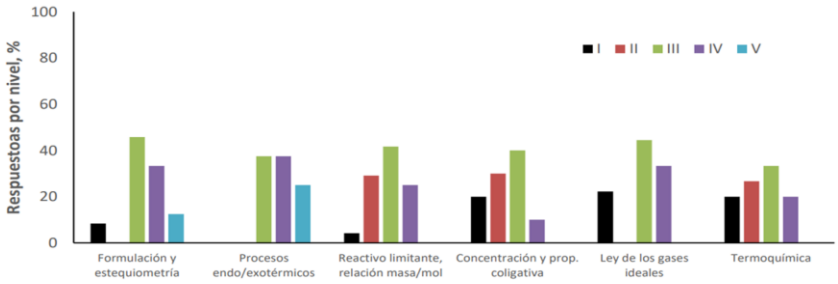



**Figura 3b.** Heteroevaluación en Ingeniería Mecánica. Distribución porcentual de niveles de repuesta por tema.

El uso de rúbricas basadas en la taxonomía SOLO permitió el análisis de las producciones estudiantiles, identificar patrones de aprendizaje y valorar no sólo la cantidad, sino la calidad de los conocimientos adquiridos. Asimismo, la modalidad asincrónica de trabajo en equipos ágiles contribuyó a fortalecer competencias vinculadas al trabajo colaborativo, la organización autónoma y la toma de decisiones. Estos aspectos, si bien no fueron objeto de evaluación cuantitativa en este trabajo, su impacto se evidenció en la calidad de las entregas y en la coherencia de los argumentos presentados por los equipos.

## 4. Conclusiones

La implementación de equipos ágiles junto con la evaluación mediante rúbricas basadas en la taxonomía SOLO permitió a los estudiantes de Química General no sólo resolver problemas integradores, sino también reconocer el nivel de comprensión

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

alcanzado. Los resultados mostraron una predominancia de niveles medios y altos, con diferencias entre carreras que reflejan particularidades en la dinámica grupal y en la dificultad de ciertos contenidos. La autoevaluación reveló que los estudiantes tienden a subestimar su desempeño, lo que resalta la necesidad de seguir fortaleciendo la metacognición como parte del aprendizaje. En conjunto, la experiencia confirmó que este enfoque fomenta tanto la adquisición conceptual como el desarrollo de competencias transversales esenciales en Ingeniería: trabajo en equipo, autonomía y pensamiento crítico. Su continuidad y expansión se presentan como una vía efectiva para consolidar aprendizajes profundos en los primeros años de formación universitaria.

Desde nuestra visión como estudiantes avanzados, que colaboramos en actividades de docencia e investigación, representa una oportunidad para adquirir habilidades de comunicación frente a alumnos, impartir contenido académico, evaluar aprendizajes a través de taxonomías, recopilar datos de investigación, organizar equipos agiles y manejar estrategias de evaluación mediante rubricas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los Proyectos de Investigación PID TETCFE0010163TC y PID FETETCI354 y de la UTN Regional Santa Fe. Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario (UTN-FRRo) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por sus apoyos financieros al congreso. También agradecer a los becarios de investigación de ambos proyectos por su contribución a la actividad, siendo los estudiantes: Martina Carraro, Guillermina Lesca, Facundo Guglielmone, Agustín Perotti, Luis Utz, Mateo Imaz, Pilar Lequi.

## Referencias bibliográficas

Adkins, L. (2010). *Coaching Agile Teams: A Companion for ScrumMasters, Agile Coaches, and Project Managers in Transition*. Nueva York: Addison-Wesley.

Bollati, V.A., Arias, M., Sandobal, V. y Cuenca, L. (2022). "*Una estrategia ágil de enseñanza-aprendizaje*", Actas del 10mo Congreso Nacional de Ingeniería Informática / Sistemas de Información, Facultad Regional Concepción del Uruguay.

Rodríguez, J. (2004). *El aprendizaje basado en problemas*. Madrid: Editorial Médica Panamericana.

Biggs, J. B. (2005). *Calidad del aprendizaje universitario* (P. Manzano Bernández, Trad.; 1ª ed., 3ª imp.). Madrid, España: Narcea Ediciones.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Equipos ágiles y coevaluación: una estrategia innovadora para fortalecer aprendizajes en Ingeniería

## Agile Teams and Peer Assessment: An Innovative Strategy to Strengthen Learning in Engineering

Presentación: 30/10/2025

**Santiago Lopez Delzar**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
slopezdelzar@frsf.utn.edu.ar

Pilar Lequi
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
plequi@frsf.utn.edu.ar

Mateo Imaz
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
mimaz@frsf.utn.edu.ar

Facundo Guglielmone
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
fguglielmone@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

En el primer cuatrimestre del presente año se llevó a cabo una actividad de repaso integrador en el marco de la enseñanza de Química General en carreras de Ingeniería. El objetivo fue fortalecer los aprendizajes de los estudiantes, con énfasis en la resolución de problemas, el trabajo colaborativo y la coevaluación entre pares. Los denominados grupos ágiles son equipos conformados al inicio del cuatrimestre con el propósito de promover la colaboración sostenida y la distribución equitativa de tareas. Bajo esta modalidad se desarrolló la clase de repaso, planificada a partir de metodologías de Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) y Aprendizaje Basado en Equipos (ABE). Cada grupo abordó problemas integradores en modalidad de carpeta abierta, lo que favoreció la recuperación activa de contenidos. Posteriormente, se implementó una coevaluación estructurada y, como cierre, los equipos entregaron resoluciones y observaciones fundamentadas. Finalmente, se aplicó una encuesta para evaluar el impacto de la experiencia.

**Palabras clave:** trabajo colaborativo, coevaluación, Química General

### Abstract

During the first semester of this year, an integrative review activity was carried out within the framework of General Chemistry courses in Engineering programs. The aim was to strengthen student learning with an emphasis on problem solving, collaborative work, and peer assessment. The so-called agile teams were formed at the beginning of the semester with the purpose of fostering sustained collaboration and equitable task distribution. Under this modality, the review class was designed based on Problem-Based Learning (PBL) and Team-Based Learning (TBL) methodologies. Each team worked on integrative problems in an open-notebook format, which encouraged the active retrieval of knowledge. Subsequently, a structured peer assessment was implemented and, as a closing activity, teams submitted both their solutions and substantiated observations. Finally, a survey was conducted to evaluate the impact of the experience.

**Keywords:** collaborative work, peer assessment, General Chemistry

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

El aprendizaje en Ingeniería requiere estrategias que no solo apunten a la adquisición de conocimientos teóricos, sino también al desarrollo de habilidades prácticas y de trabajo en equipo. Una de las herramientas más utilizadas para esto es la resolución de problemas, ya que permite aplicar los contenidos y estimula el pensamiento crítico. Sin embargo, cuando se plantea de forma tradicional —con ejercicios repetitivos y poco vinculados con la realidad— puede presentar limitaciones en cuanto a la motivación de los estudiantes y la comprensión profunda de los contenidos (Morales y Landa, 2004).

Para superar estas dificultades, se incorporaron metodologías activas como el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) y el Aprendizaje Basado en Equipos (ABE). El ABP sitúa al estudiante como protagonista de su aprendizaje, enfrentándolo a situaciones que requieren análisis y toma de decisiones (Espinoza Freire, 2021). El ABE, por su parte, organiza grupos heterogéneos y permanentes donde cada integrante aporta desde sus propias fortalezas, promoviendo la diversidad cognitiva y la colaboración (Barrows, 1996).

En esta línea, la experiencia desarrollada en Química General de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional adaptó el enfoque del ABE mediante la conformación de Equipos Ágiles (EA), equilibrados con un tablero de habilidades. Esta propuesta buscó potenciar el aprendizaje colaborativo, mejorar la permanencia de los estudiantes y favorecer el desarrollo de competencias profesionales en un entorno centrado en el alumno (Córdoba et al., 2024).

El presente informe describe la experiencia de innovación didáctica implementada, donde se combinaron ABP y ABE para resolver problemas integradores en EA como instancia de repaso previa al primer examen parcial. Además de reforzar los contenidos disciplinares, la propuesta permitió ejercitar habilidades transversales como el trabajo grupal, la comunicación efectiva y la coevaluación entre pares.

## 2. Materiales y métodos

Al finalizar el primer cuatrimestre del presente año, durante las semanas de repaso previo al primer examen parcial, se llevó a cabo la actividad descripta. En cada comisión de Ingeniería Civil, Eléctrica, Mecánica e Industrial de la UTN – Facultad Regional Santa Fe se propuso la resolución de problemas integradores en modalidad sincrónica, mediante el trabajo en Equipos Ágiles (EA) conformados al inicio del cuatrimestre.

La muestra poblacional estuvo compuesta por 130 estudiantes de primer año, organizados en 32 EA de 4 a 5 integrantes cada uno.

La actividad consistió en asignar a cada equipo dos Problemas Integradores (PI), con un tiempo límite de una hora, que abarcaban los contenidos de formulación y nomenclatura, estequiometría y cálculo de concentraciones. Se permitió la utilización de todos los recursos disponibles (apuntes, guías de coloquios, tabla periódica, tabla de aniones y cationes, calculadora), exceptuando el uso de celulares.

Finalizado el tiempo de trabajo, el docente designaba un alumno por equipo para entregar la resolución en formato físico (hoja de papel). A continuación, se explicaban en el pizarrón las respuestas correctas, se entregaba un documento clave a cada grupo y se definían los pares para la instancia de coevaluación. Para esta etapa se diseñó una Lista de Cotejo (LC), presentada en la Tabla 1 del apartado “Resultados y discusiones”. Las LC incluían ítems vinculados a cada PI, con espacios para observaciones, sugerencias y comentarios, buscando favorecer la comprensión de los criterios de resolución y el desarrollo de una mirada crítica y constructiva entre pares.

La información recolectada permitió al equipo docente realizar una retroalimentación integral, reforzar la preparación de los estudiantes de cara al parcial y, al mismo tiempo, fomentar la reflexión compartida y la evaluación colaborativa, priorizando la participación activa y el compromiso grupal.

Finalmente, con el propósito de valorar la percepción estudiantil, se aplicó una encuesta individual a través del campus virtual. Esta instancia aportó información clave para evaluar la efectividad de la propuesta y orientar futuras mejoras en su implementación.

## 3. Resultados y discusión

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

A continuación, se presentan en la Tabla 1 cada uno de los criterios seleccionados (LC1-5 y LC6-10) para evaluar la resolución de los PI1 y PI2, respectivamente. La lista de cotejo define con dos parámetros simples, mediante el cumplimiento o no de cada objetivo. En dicha tabla se han incluido los resultados generales para los 32 EA.

**Tabla 1**. Lista de cotejo para la coevaluación de los PI 1 (LC1-5) y PI2 (LC6-10)

| No. | Criterios a evaluar en la Lista de Cotejo | Sí (%) | No (%) |
|---|---|---|---|
| LC1 | Escribió correctamente la ecuación química. | 77,82 | 22,18 |
| LC2 | Balanceó correctamente la ecuación química. | 88,09 | 11,91 |
| LC3 | Identificó correctamente el reactivo limitante. | 55,65 | 44,35 |
| LC4 | Desarrolló correctamente el procedimiento para el cálculo de número de moles y gramos de productos involucrados en la reacción. | 63,84 | 36,16 |
| LC5 | Determinó correctamente número de moles y gramos de productos involucrados en la reacción. | 66,51 | 33,49 |
| LC6 | Escribió correctamente la fórmula del ácido sulfúrico. | 73,66 | 26,34 |
| LC7 | Expresó correctamente la unidad de concentración molal de la solución de ácido sulfúrico. | 50,30 | 49,70 |
| LC8 | Calculó correctamente el valor de concentración molal de la solución de ácido sulfúrico. | 44,79 | 55,21 |
| LC9 | Expresó correctamente la fracción molar de soluto y solvente de la solución de ácido sulfúrico. | 55,06 | 44,94 |
| LC10 | Calculó correctamente el valor de la fracción molar de soluto y solvente de la solución de ácido sulfúrico. | 43,60 | 56,40 |

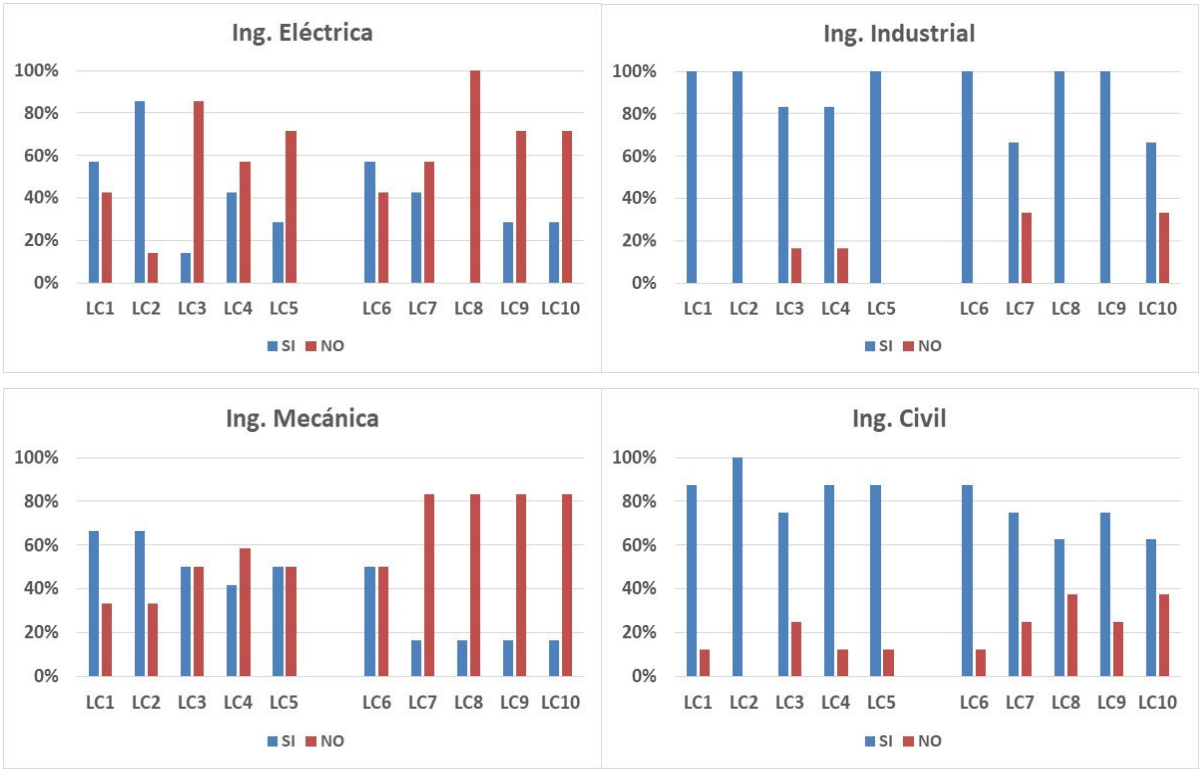



**Figura 1**. Resultados de la coevaluación entre EA para cada una de las carreras siguiendo los criterios de la lista de cotejo (LC1-5 para PI1, LC6-10 para PI2).

Se puede apreciar que en ocho de los 10 criterios se obtuvo el 50% o más de las respuestas correctas, visualizando que aquellas donde se presentan dificultades corresponden al cálculo de concentraciones. A continuación, se presentan los resultados parciales de la LC por cada carrera, en la Fig. 1.

Como se puede observar, las comisiones de Ing. Industrial y Civil alcanzan mejores resultados, en la mayoría de los criterios, que el promedio reportado en la Tabla 1. Esto se debe a diversos factores como la cantidad de estudiantes por

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

comisión, el interés que muestran los estudiantes acerca del cursado de la materia, el cumplimiento del cronograma de la asignatura, el abordaje de la actividad por parte de los EA, el uso de materiales, así como el desempeño docente.

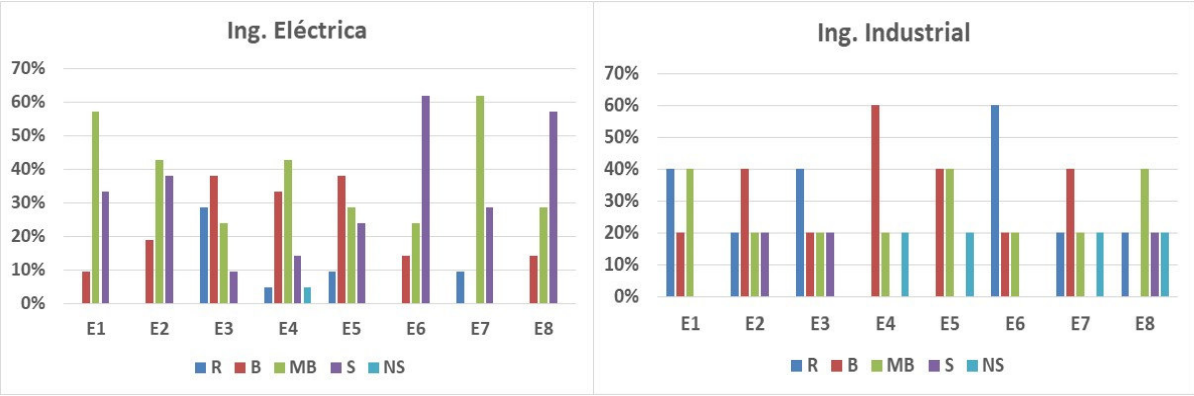
Durante la corrección colectiva, los docentes expusieron en el pizarrón las resoluciones paso a paso, señalando los errores más frecuentes y contrastándolos con los procedimientos correctos. Esta dinámica permitió a los estudiantes identificar sus equivocaciones, comprender las causas y consolidar los pasos lógicos necesarios para arribar a la respuesta adecuada. La retroalimentación, más allá de la corrección, se convirtió en un espacio de aprendizaje significativo, ya que reforzó contenidos críticos, ofreció estrategias de resolución más claras y promovió una reflexión conjunta entre docentes y estudiantes. De este modo, la actividad no solo favoreció la comprensión conceptual, sino que también fortaleció la confianza en la aplicación de los procedimientos químicos.

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de una encuesta respondida por un total de 107 estudiantes. En la Fig. 2 se muestran los resultados para cada una de las carreras.

**Tabla 2**. Encuesta sobre el Repaso del Primer Parcial de Química

| No. | Criterios a evaluar en la Encuesta* | R (%) | B (%) | MB (%) | S (%) | NS/NC (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| E1 | La metodología del trabajo y las actividades propuestas fueron acordes a los temas dados en clases. | 10,58 | 18,40 | 51,66 | 18,32 | 1,04 |
| E2 | El material complementario (coloquios, teorías, tabla periódica, tabla de aniones y cationes) fue útil en la elaboración de los problemas de repaso. | 6,04 | 22,54 | 42,51 | 27,87 | 1,04 |
| E3 | El tiempo destinado para hacer la realización de las actividades de repaso fue suficiente. | 27,83 | 35,53 | 23,94 | 11,08 | 1,62 |
| E4 | La actividad de repaso fue una instancia de aprendizaje que permitió observar otros métodos de resolución de problemas y autoevaluarse. | 9,18 | 36,10 | 34,86 | 9,84 | 10,02 |
| E5 | La lista de cotejo utilizada en la coevaluación fue fácil de responder. | 2,96 | 32,99 | 34,54 | 19,65 | 9,86 |
| E6 | La propuesta resultó interesante, motivadora, y facilitó la comprensión e integración de conocimientos de Química. | 15,58 | 16,22 | 35,09 | 29,40 | 3,71 |
| E7 | La propuesta permitió adquirir habilidades para continuar aprendiendo. | 9,58 | 23,10 | 41,82 | 18,29 | 7,21 |
| E8 | La dinámica grupal contribuyó al desarrollo de la actividad. | 7,32 | 9,14 | 37,44 | 39,02 | 7,08 |

*R: regular, B: bien, MB: muy bien, S: sobresaliente, NS/NC: no sabe/no contesta.



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

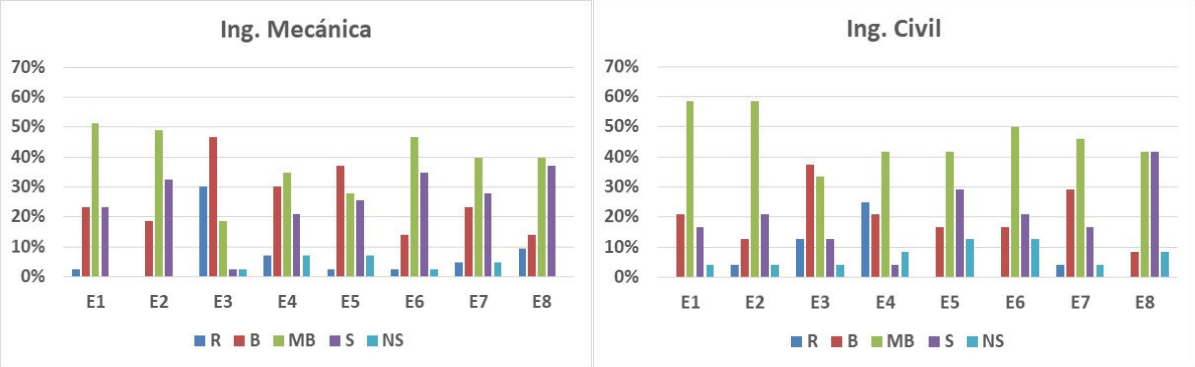



**Figura 2**. Resultados de la encuesta realizada por cada estudiante, en cada una de las carreras

Como se puede apreciar en la Tabla 2 y dejando de lado los criterios E3 y E4, se alcanzan niveles de categorías “MB” y “S” superiores al 50%. Se dejan de lado E3 y E4 porque dichos criterios se relacionan con la duración de la actividad y su calificación como una nueva metodología para la resolución de problemas y autoevaluarse. Dichos criterios reflejan la necesidad de trabajar sobre los mismos para próximas ediciones.

Los criterios E1, E2, E6 y E8 son los más satisfactorios con alrededor del 70% de respuestas en categorías “MB” y “S”, estando relacionados con la metodología de trabajo, el material empleado en la resolución, el interés y motivación de la propuesta para integrar los conocimientos y las habilidades adquiridas para continuar aprendiendo.

## 4. Conclusiones

La experiencia desarrollada consistió en una clase de repaso sincrónica en Equipos Ágiles, planificada a partir de metodologías ABP y ABE. Los grupos resolvieron problemas integradores de Química General en modalidad de carpeta abierta, lo que favoreció la recuperación activa de contenidos y el trabajo colaborativo. La posterior instancia de coevaluación, guiada por una lista de cotejo y una clave de resolución, permitió identificar dificultades recurrentes —como el cálculo de concentraciones— y generó un espacio de reflexión crítica, intercambio argumentado y retroalimentación constructiva.

La encuesta aplicada a los estudiantes evidenció la necesidad de ajustar la duración de la actividad y reforzar la conciencia sobre el valor del trabajo grupal y la evaluación entre pares. En términos generales, la propuesta fortaleció el compromiso estudiantil, la apropiación de contenidos clave y el desarrollo de habilidades transversales como la colaboración, la autoevaluación y la argumentación.

Como proyección, se plantea mantener e institucionalizar esta práctica en la asignatura, además de explorar su aplicación en otras instancias de evaluación y en diferentes materias del ciclo básico de las carreras de Ingeniería.

Desde nuestra perspectiva como estudiantes que participamos en actividades de docencia e investigación, esta experiencia representa una valiosa oportunidad para fortalecer competencias en comunicación, impartir contenidos académicos, coordinar equipos de trabajo ágiles, estimular el pensamiento crítico, favorecer la toma de decisiones y desarrollar habilidades blandas cada vez más necesarias en la formación de futuros profesionales.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los Proyectos de Investigación PID FETETCI354 y PID TETCFE0010163TC de la UTN Regional Santa Fe. Los autores desean expresar su agradecimiento al apoyo financiero provisto por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). También agradecer a los becarios de investigación de ambos proyectos por su contribución, estudiantes: Pilar Lequi, Gonzalo Morel, Mateo Imaz, Martina Carraro, Guillermina Lesca, Facundo Guglielmone, Agustín Perotti, Luis Utz.

## Referencias bibliográficas

Barrows, H. S., (1996). Problem-based learning in medicine and beyond: A brief overview. New directions for teaching and learning, 1996(68), 3-12.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Córdoba, C. A., Fuentes Mora, M., Mazzieri, V., Schiappa Pietra, J. M., Sánchez, A., Castiglioni, M., Carrara, N., Montalvo, E., & Lopez Delzar, S., (2024). Implementación de equipos ágiles en la asignatura de Química: una estrategia para la permanencia y el desarrollo de competencias. En X Jornadas Nacionales y VI Latinoamericanas de Ingreso y Permanencia en Carreras Científico-Tecnológicas 2024 (IPECyT 2024). Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional. ISBN 978-950-42-0251-6

Espinoza Freire, E. E., (2021). El aprendizaje basado en problemas, un reto a la enseñanza superior. Conrado, 17(80), 295-303.

Morales Bueno, P., Landa Fitzgerald, V., (2004). Aprendizaje basado en problemas. Theoria, 13(1), 145–157. Pontificia Universidad Católica del Perú. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=29901314

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Desarrollo de memoria de cálculo de un intercambiador de calor como herramienta didáctica en ingeniería mecánica

## Development of a design calculation report for a heat exchanger as a didactic tool in mechanical engineering

Presentación: 04/09/2025

**Nazareth Bonet**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
nazareth.bonet@gmail.com

**Mateo Conta**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
contamateo@hotmail.com

**Tomas Soratti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
tomasfsoratti@gmail.com

### Resumen

En el contexto de la formación de profesionales de la ingeniería mecánica, el Laboratorio de Vapor de la Facultad Regional de Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional (FRSF-UTN), cuenta con una instalación con elementos de calderería e instrumentación presentes en la industria. Este trabajo, que se encuentra en sus etapas iniciales, se centra en la verificación integral de un intercambiador de calor tipo casco y tubos, instalado en el laboratorio. El proceso incluye una rigurosa evaluación mecánica, dimensional y térmica, siguiendo las normativas TEMA[1] y ASME[2] y su enfoque se alinea con competencias específicas reservadas al título según lo establecido por el CONFEDI y la Resolución 1254/2018[3], buscando ser una herramienta didáctica que prepare a los estudiantes para los desafíos del campo laboral. Hasta el momento, se ha avanzado en el relevamiento completo del intercambiador, la recopilación de normativas pertinentes y la elaboración de un modelo 3D.

**Palabras clave:** Enseñanza Termodinámica Competencias Mecánica

### Abstract

In the context of Mechanical Engineering professional training, the Steam Laboratory of the Regional Faculty of Santa Fe of the National Technological University (FRSF-UTN) features an installation with boiler components and instrumentation present in the industry. This work, which is in its initial stages, focuses on the integral verification of a shell-and-tube heat exchanger, installed in the laboratory. The process includes a rigorous mechanical, dimensional, and thermal evaluation, following the TEMA[1] and ASME[2] standards, and its approach aligns with specific competencies reserved for the degree as established by CONFEDI and Resolution 1254/2018[3], aiming to be a didactic tool that prepares students for the challenges of the workplace. So far, progress has been made in the complete survey of the exchanger, the collection of relevant regulations, and the development of a 3D model.

**Keywords:** Learning Thermodinamic Competencies Mechanic

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

La generación y uso de vapor de agua/agua caliente, a modo de transporte de energía entre sistemas, tiene un rol preponderante en la industria de procesos, sector en el cual la FRSF-UTN tiene una llegada directa teniendo en cuenta la región donde se encuentra radicada.

Para ello es necesario conocer la naturaleza y el funcionamiento del mismo como la de los distintos dispositivos involucrados en una instalación, a fin de optimizar sus procesos y alcanzar un mayor ahorro en el consumo de los recursos. Debido a ello, dicha facultad cuenta dentro de sus instalaciones con un Laboratorio de vapor con el propósito de contar con una herramienta aplicada para el abordaje de esta temática en las distintas cátedras relacionadas.

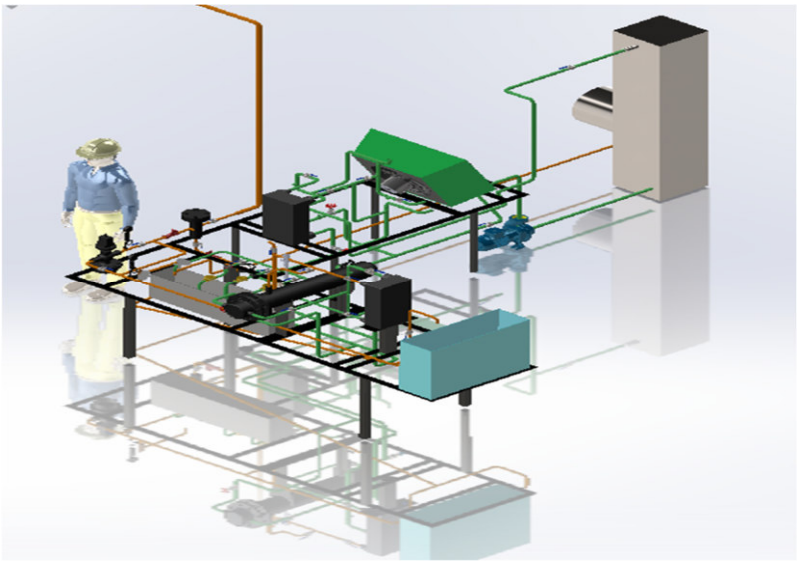


**Figura 1**. Modelado del laboratorio de vapor existente en la UTN-FRSF.

Dentro de los distintos equipos e instrumentos con los que cuenta el laboratorio de vapor, se encuentra un intercambiador de calor casco y tubos. Este tipo de intercambiadores posee un uso muy difundido en la industria y su cálculo nos permite conocer sus características y limitantes de funcionamiento, asegurando su uso seguro en los ensayos con vapor.

La realización de una verificación mecánica, dimensional y térmica significa una herramienta clave para el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería, adquiriendo habilidades necesarias en el campo laboral y pudiendo extrapolar estos cálculos a diversos intercambiadores de calor.

## 2. Metodología

A fin de cumplir con los objetivos, se estructura un sistema de etapas del proceso de cálculo para poder ir conociendo la información del avance de este de forma constatable y organizada.

En primer lugar, se hace hincapié en la verificación por normas TEMA y ASME, las cuales indican las características mecánicas y térmicas con las que un intercambiador de calor debe cumplir para su funcionamiento seguro y eficiente dentro de los parámetros de funcionamiento deseados.

Para ello, se comienza por la obtención y el análisis de la información histórica y técnica del equipo. Este paso es fundamental para comprender el diseño original, las condiciones de fabricación y el historial operativo. Con este fin, se reúne la documentación disponible, como los planos constructivos originales y la ficha técnica del fabricante. Si no existiera la ficha técnica, uno de los objetivos será crearla a partir de los datos que se obtengan. Adicionalmente, se buscan reportes de datos del fabricante (como los formularios U-1 o U-5 de la ASME), los cuales son de gran importancia para la verificación de integridad, así como el historial de mantenimiento y reparaciones, que proporciona un panorama de la vida útil del equipo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Una vez revisada la documentación, se procede a una inspección física detallada del intercambiador para identificar su estado actual y recopilar todas las dimensiones críticas. Este relevamiento se realiza de manera exhaustiva, utilizando la Hoja de Especificaciones de TEMA (Figura G-5.2) como guía para asegurar que no se omita ningún dato relevante. La inspección incluye una revisión visual completa para detectar signos de corrosión, deformaciones o daños estructurales. Luego, se realiza un relevamiento dimensional en el que se miden parámetros clave para ambos lados del equipo. En el lado del casco, se registra el diámetro interno, el espesor nominal, el material de construcción, el espaciamiento y el tipo de bafles. En el lado de los tubos, se mide el diámetro exterior, el espesor, la longitud, el número total de tubos, el material, el arreglo y el paso de los tubos. Por último, se registra el espesor, el diámetro y el material de las placas tubulares.

Para poder realizar una verificación térmica y mecánica, es indispensable definir con precisión las condiciones bajo las que operará el intercambiador. Esto incluye identificar los fluidos de proceso del lado del casco y de los tubos, y recopilar sus propiedades termofísicas, como el calor específico, la viscosidad, la conductividad térmica y la densidad. También se establecen las condiciones de proceso, como los caudales másicos de ambos fluidos y las temperaturas de entrada y salida. Se determina la Máxima Presión de Trabajo Admisible (MAWP) y la Mínima Temperatura de Diseño del Metal (MDMT), valores esenciales para la verificación de cumplimiento con las normativas ASME. Finalmente, se define la caída de presión máxima permitida para cada fluido, un factor crítico para el diseño y la verificación de la eficiencia del intercambiador. Al seguir esta metodología, se obtiene un conjunto completo de datos que permite la verificación por normas TEMA y ASME, asegurando el funcionamiento seguro y eficiente del intercambiador de calor.

Una vez completado el relevamiento inicial, la siguiente fase de nuestro proceso de evaluación consiste en una verificación dimensional detallada según las normas TEMA. El objetivo es confirmar que las características constructivas del intercambiador de calor y sus tolerancias se ajustan a los estándares de la industria, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente.

Para ello, se comienza por clasificar el intercambiador de acuerdo con su aplicación. Luego, se identifica la nomenclatura TEMA completa del equipo, que describe sus componentes principales. Con esta información, se procede a la verificación de las tolerancias de fabricación. Se comparan cada una de las dimensiones relevadas en la inspección física con las tolerancias recomendadas por TEMA. Específicamente, se verifican los diámetros y las tolerancias de las placas tubulares y bafles, y el diámetro y ligamento mínimo de las perforaciones para los tubos. Para los tubos en U, se asegura que el aplanamiento en la curvatura no exceda el 10% del diámetro nominal. Por último, se inspecciona el espaciamiento entre bafles o placas de soporte para confirmar que no exceda el vano máximo admisible, lo que resulta crítico para prevenir la vibración de los tubos y posibles daños.

La siguiente fase consiste en la verificación térmica del intercambiador mediante el método de Kern[4], cuyo fin es determinar si el equipo posee el área de transferencia de calor adecuada para la carga térmica requerida.

Se comienza con el balance de calor para ambos fluidos, lo que nos permite calcular la carga térmica (Q) del proceso. A continuación, se determina la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (MLDT) y se le aplica un factor de corrección ($F_t$) para obtener la diferencia de temperatura real ($\Delta$Tverd). Este factor es crucial, ya que si es inferior a 0,75; las condiciones de operación no son las ideales para el diseño del equipo.

Luego, se calculan los coeficientes de transferencia de calor peliculares para el lado de los tubos ($h_i$) y el lado del casco ($h_o$), incorporando correcciones por viscosidad. Con estos valores, se define el coeficiente global de transferencia de calor ($U_D$), considerando los factores de obstrucción ($R_D$).

Finalmente, el paso clave es la verificación del área. Se calcula el área de transferencia requerida (Areq) y se la compara con el área existente (Aexist) del intercambiador. Si Aexist es mayor o igual que Areq, el equipo es térmicamente adecuado para el proceso. De esta manera, se confirma su capacidad para cumplir con su función de manera eficiente.

El proceso de evaluación concluye con la verificación mecánica y de caída de presión, lo que asegura que el intercambiador puede operar de manera segura bajo las condiciones de diseño. Para la verificación mecánica, se aplican las reglas del Código ASME Sección VIII, División 1. Se calculan los espesores mínimos requeridos por presión para el casco (UG-27 y UG-28) y para los tubos, y se los compara con los espesores reales. Se verifica el diseño de las placas tubulares según los métodos del

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

código o TEMA, y los cabezales (UG-32 o UG-34) y boquillas (UG-37 y UG-45). Todas las bridas se deben validar según el Apéndice Obligatorio 2 de ASME. La Máxima Presión de Trabajo Admisible (MAWP) del equipo es el valor más bajo obtenido de todos sus componentes.

Además de la seguridad mecánica, se comprueban las caídas de presión (ΔP) para ambos fluidos, para asegurar que no excedan los valores permitidos. Para el lado de los tubos, se calcula la caída por fricción y se añaden las pérdidas por retorno en los cabezales, estimadas como 4 cabezas de velocidad por cada paso. Para el lado del casco, se utiliza una ecuación de Fanning modificada que incluye el diámetro equivalente y el número de pasos que el flujo cruza los tubos.

En base en lo expuesto el "Libro Rojo" del CONFEDI, y la Resolución 1254/2018 del Ministerio de Educación de la Nación, las "actividades profesionales reservadas exclusivamente al título" corresponden a aquellas habilitaciones que abarcan tareas que tienen un riesgo directo sobre la salud, la seguridad, los derechos, los bienes o la formación de los habitantes, lo que en un pasado se conocía como "incumbencias" en la Ley de Educación Superior. En lo que respecta a la Ingeniería Mecánica, es concreta la relación con el área de las tecnologías del calor y los sistemas térmicos, y en la (Figura 2) se realiza una síntesis de dichas actividades y competencias para este contexto.

| Actividad Reservada | Competencia Especifica |
|---|---|
| 1. Diseñar, proyectar y calcular sistemas térmicos. | 1.1 Diseñar y desarrollar proyectos de sitemas térmicos |
| 2. Controlar la construcción, operación y mantenimiento de sistemas térmicos. | 2.2. Realizar la gestión del mantenimiento.<br>2.3. Operar y controlar proyectos de ingeniería mecánica. |
| 3. Certificar el funcionamiento y/o condición de uso estado de los sistemas térmicos. | 3.1. Determinar y certificar el correcto funcionamiento y condiciones de uso de lo descripto.<br>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. |

**Figura 2**. Actividades reservadas y competencias del ingeniero mecánico.

## 3. Resultados y discusión

Una vez completadas todas las verificaciones, se procede a la documentación profesional de los resultados. Esto incluye la creación de planos de acuerdo a obra (As-Built) que reflejan las dimensiones reales, la elaboración de una ficha técnica (Data Sheet) detallada siguiendo el formato TEMA y la redacción de una memoria de cálculo que organiza todos los pasos, suposiciones y resultados. El documento final también debe incluir recomendaciones clave para la operación segura y el mantenimiento preventivo del equipo, asegurando así su buen funcionamiento a largo plazo.

Planteada esta metodología de cálculo, se comienza a realizar la memoria de cálculo correspondiente al intercambiador disponible en la UTN-FRSF. En la implementación de la metodología de cálculo propuesta, se alcanzan etapas significativas que conforman la base del análisis. Específicamente, se realiza el relevamiento completo del intercambiador de calor de casco y tubos, lo que implica su desarme y la medición exhaustiva de sus componentes. A partir de estos datos, se crea un modelo 3D del equipo (Figura 3), lo que facilita su visualización y el próximo desarrollo de planos. También se avanza en la recopilación de las normativas y reglamentos pertinentes, incluyendo los códigos TEMA y ASME, que guían las futuras verificaciones. Además, se completa la descripción del intercambiador según la nomenclatura TEMA y se definen con precisión los fluidos que se utilizan en ambos lados del equipo. Si bien se determinan las condiciones de trabajo, quedan pendientes los cálculos finales, la redacción de la memoria de cálculo y la confección de los planos definitivos para la aprobación del proyecto.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

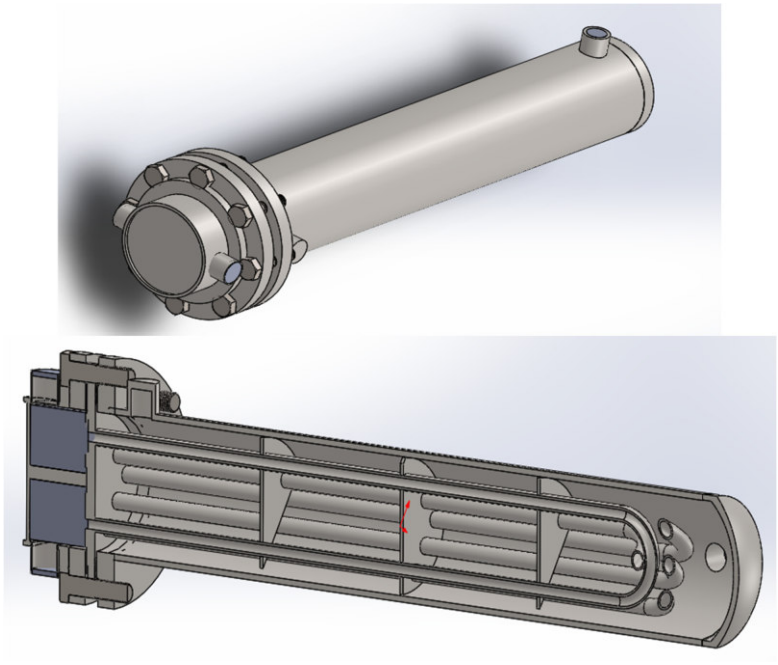


**Figura 3**. Modelo 3D del intercambiador ubicado en el banco de vapor de la UTN-FRSF.

En una etapa futura, se plantea la posibilidad de realizar una simulación con CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para validar los resultados obtenidos en los cálculos manuales y corroborar el desempeño real del intercambiador. Esto brinda una gran oportunidad para aplicar esta avanzada herramienta en el ámbito académico, enriqueciendo la formación práctica de los estudiantes.

## 4. Conclusiones

El relevamiento y la verificación integral de un intercambiador de calor, siguiendo los métodos de Kern y los códigos TEMA y ASME, representan una oportunidad de aprendizaje inigualable para un futuro ingeniero mecánico. Lejos de ser un simple ejercicio teórico, esta metodología proporciona un entorno de simulación práctico que conecta directamente los conceptos vistos en asignaturas como Termodinámica, Mecánica de los Fluidos y Resistencia de Materiales con un equipo real y complejo.

Para un estudiante de ingeniería mecánica, dominar este proceso es de gran importancia, ya que le permite no solo comprender el funcionamiento interno de uno de los equipos más comunes en la industria, sino también desarrollar habilidades de análisis, cálculo y toma de decisiones basadas en normativas internacionales. Al verificar las tolerancias dimensionales, la eficiencia térmica y la integridad estructural, los estudiantes se enfrentan a los desafíos que se presentan en el campo profesional, aprendiendo a identificar problemas, proponer soluciones y asegurar que los equipos operen de forma segura y eficiente. En definitiva, este tipo de experiencia práctica, que simula un entorno industrial real, es una herramienta clave para una formación sólida y completa, preparándolo para el mundo laboral.

El abordaje de un caso real y complejo significa una oportunidad formativa poco frecuente en la experiencia didáctica de la ingeniería mecánica. Esta metodología aporta una nueva conceptualización al proceso de enseñanza, ya que convierte el conocimiento teórico en una herramienta práctica de análisis y toma de decisiones. Al resolver el problema de la integridad y eficiencia de un equipo industrial real, el trabajo contribuye significativamente al saber del estudiante, dotándolo de la experiencia y la visión necesarias para evaluar la seguridad y el desempeño de sistemas complejos en su futuro campo laboral.

## Referencias bibliografías

[1] Tubular Exchanger Manufacturers Association. (2019). Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association (10a. ed.). Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

[2] American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Committee on Pressure Vessels. (2023). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 1. The American Society of Mechanical Engineers

[3] Kern, D. Q. (1999). Procesos de transferencia de calor (N. M. Ambrossi, Trad.; 31a. reimpresión). Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. (Obra original publicada en 1965).

[4] 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.

[5] Shah, R. K., & Sekulić, D. P. (2023). Fundamentals of Heat Exchanger Design (2nd ed., Revised and Expanded). John Wiley & Sons.

[6] Bassyouny, M., Al-Arifi, N., & Abdullah, S. (2022). Design of Shell and Tube Heat Exchangers: A Practical Guide to TEMA, ASME and API Standards. Elsevier.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Puesta en marcha y calibración de un canal de ensayos hidráulicos para enseñanza y experimentación

## Commissioning and calibration of a hydraulic test channel for teaching and experimentation

Presentación: 30/10/2025

**Danisa Bogdel**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería (GIMNI), Santa Fe, Argentina
danisa.01@hotmail.com

**Joaquina Castro**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería (GIMNI), Santa Fe, Argentina
castro.joaquina64@gmail.com

### Resumen

El presente informe aborda la puesta en marcha de un canal destinado a la enseñanza y experimentación en hidráulica, concebido como un recurso versátil para el ámbito académico. La infraestructura combina aspectos constructivos y operativos que permiten la realización de ensayos clásicos de flujo y, a la vez, estudios aplicados en distintas asignaturas. Entre las prácticas previstas se incluyen la simulación de un vertedero poroso y la evaluación de materiales innovadores como el hormigón permeable, ampliando las posibilidades de aplicación. Asimismo, se propone un esquema de planificación y validación mediante herramientas numéricas, donde la dinámica de fluidos computacional (CFD) facilitará la generación de un gemelo digital previo y posterior a la experiencia real. Esta estrategia permitirá anticipar y contrastar resultados, optimizando parámetros como caudales, presiones y perfiles de velocidad. El proyecto contribuye al desarrollo de competencias específicas del perfil del Ingeniero Civil de la UTN, fortaleciendo su formación académica y profesional.

**Palabras clave:** canal de ensayos, calibración, hormigón permeable, gemelo digital, métodos numéricos.

### Abstract

This report addresses the implementation of a channel for teaching and experimentation in hydraulics, conceived as a versatile resource for the academic field. The infrastructure combines construction and operational aspects that allow the performance of classic flow tests and, at the same time, studies applied in different subjects. Planned practices include simulating a porous spillway and evaluating innovative materials such as permeable concrete, expanding application possibilities. Likewise, a planning and validation scheme is proposed using numerical tools, where computational fluid dynamics (CFD) will facilitate the generation of a digital twin before and after the real experience. This strategy will allow results to be anticipated and contrasted, optimizing parameters such as flows, pressures and velocity profiles. The project contributes to the development of specific competencies of the UTN Civil Engineer profile, strengthening their academic and professional training

**Keywords:** test channel, calibration, permeable concrete, digital twin, numerical methods

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El propósito principal es presentar la puesta en marcha del canal de enseñanza y experimentación en el área de Hidráulica de la UTN-FRSF, un proyecto de desarrollo continuo. A lo largo de este documento, se detallarán las características constructivas del canal, incluyendo sus dimensiones y accesorios, elementos fundamentales que configuran su capacidad para la investigación y la docencia.

El canal ha sido concebido para una amplia gama de aplicaciones experimentales. Si bien permitirá la ejecución de los ensayos típicos de hidráulica, su diseño extensible también facilitará otros tipos de análisis. Se prevé su integración en experimentos para diversas cátedras, donde podrá utilizarse para el estudio de elementos específicos, como la simulación de vertederos de diferentes características. Adicionalmente, se proyecta su utilización para la realización de ensayos experimentales con elementos de hormigón permeable o drenante, lo cual ampliará el alcance de las aplicaciones.

Un componente crucial de este proyecto es la planificación de la experimentación y la corroboración de resultados mediante métodos numéricos. Para ello, se empleará el programa Telemac2D (CFD, por sus siglas en inglés), incluyendo el desarrollo de un 'gemelo digital' (Giustolisi, 2023) que permitirá el diseño anticipado de los experimentos. Esta aproximación numérica facilitará la determinación de perfiles de velocidades, magnitudes de presiones y fuerzas sobre las estructuras, así como la calibración de condiciones operativas, tales como el caudal y la inclinación del canal, antes de la ejecución de los ensayos físicos. Este enfoque integral busca maximizar la eficiencia y la profundidad de la comprensión en cada estudio realizado en el canal.

En términos de competencias específicas (CE) de egreso del Ingeniero Civil, la disponibilidad del canal y del recurso de gemelo digital constituyen un aporte a las siguientes (Ordenanza 1853 UTN, 2023):

- CE3: Planificar, diseñar, calcular, proyectar y construir obras e instalaciones para el almacenamiento, captación, tratamiento, conducción y distribución de sólidos, líquidos y gases, incluidos sus residuos.
- CE11: Dirigir, desarrollar, realizar, evaluar, verificar y certificar estudios, análisis, tareas y asesoramientos relacionados con proyectos hidrológicos e hidráulicos, así como la determinación de erosiones, áreas y niveles de inundación.
- CE17: Diseñar, desarrollar, modelar y predecir, las obras, sistemas y procesos de la Ingeniería Civil, aplicando TIC’s herramientas informáticas sencillas e integradas.

El objetivo principal del presente trabajo es documentar la puesta en marcha y calibración del canal de ensayos hidráulicos, describiendo sus características constructivas, los métodos experimentales aplicados y la integración de un gemelo digital para complementar la validación y análisis de los ensayos. Como objetivos específicos, se busca (i) presentar la infraestructura y su potencial de aplicación en la enseñanza, (ii) validar su funcionamiento a través de ensayos representativos y (ii) demostrar la utilidad del gemelo digital en la planificación y contraste de resultados.

# 2. Materiales y métodos

2.1 *Descripción del canal y ensayos físicos.*

El canal de ensayos (Figura 1) corresponde a una estructura de sección rectangular destinada a la circulación de agua, materializada por láminas de acrílico de ½" (1) y presenta unas dimensiones de 2,50 m de longitud por 12 cm de ancho, sostenida por una estructura de perfilería metálica (2). En cada extremo del canal se encuentra un tanque metálico (3) de pequeñas dimensiones (50 cm × 50 cm × 16,5 cm), a través del cual el agua ingresa y se expulsa respectivamente. Este flujo se conduce hacia un tanque plástico de forma cúbica (4) que actúa como reservorio y posee 1,15 m de lado. La circulación del caudal se asegura mediante la incorporación de una bomba centrífuga (5) cuya potencia es de 0,37 kW (aprox. 0,5 HP), en tanto que una válvula aguas abajo de la bomba permite regular el caudal circulante. Asimismo, el canal cuenta con un volante horizontal (6) que permite regular la pendiente de su base, posibilitando la variación de las condiciones de flujo. El aforo volumétrico se realiza mediante un vertedero triangular de 9 cm de base y 8 cm de altura (7), ubicado en el estanque de restitución, que debe ser calibrado.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

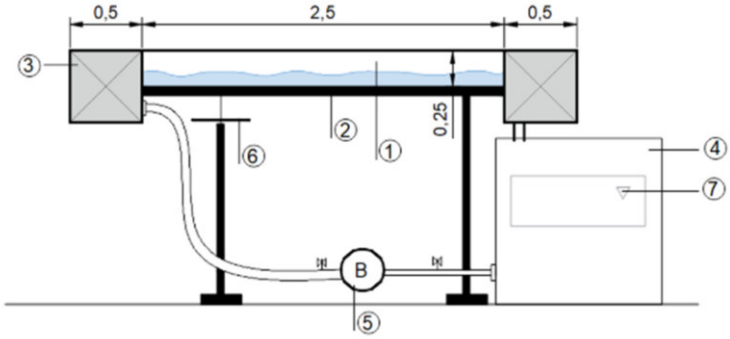



**Figura 1.** Esquema del canal de ensayos a utilizar

Los ensayos a desarrollar corresponden a prácticas clásicas de la hidrodinámica, orientadas a la determinación de parámetros fundamentales como el número de Froude, los tirantes y las energías específicas, así como a la observación de los diferentes tipos de flujo y regímenes hidráulicos. Del mismo modo, se incluirá el análisis de fenómenos locales tales como la formación del resalto hidráulico, la variación del tirante crítico y de las velocidades. También se evaluará la forma en que dichas condiciones se modifican ante la incorporación de accesorios que simulen distintos tipos de vertederos, compuertas, escalones de fondo, variaciones en la pendiente y/o modificaciones en el caudal.

Además de los ensayos clásicos antes mencionados, se encuentra previsto realizar análisis de flujo a través de bloques de hormigón permeable (Fogliatti y otros, 2023), en el marco de colaboración entre los proyectos PID-UTN-10015 y PID-UTN-8795, con el fin de caracterizar dicho material como retardador de excedentes pluviales.

2.1. *Gemelo digital*

A partir de la recolección de datos y de los resultados experimentales obtenidos, se empleará un programa de análisis por métodos numéricos (CFD) para la creación de un gemelo digital del canal. Este modelo permitirá verificar el funcionamiento apropiado del canal, además de posibilitar la modelación de los flujos que, posteriormente, serán replicados en el canal para su observación física. De esta manera, se establece una relación de reciprocidad entre la información obtenida y los resultados esperados

Este planteamiento coincide con la definición propuesta por Giustolisi (2023), quien describe al gemelo digital como una réplica del sistema físico sustentada en información proporcionada por expertos humanos con conocimientos específicos y relevantes, otros modelos digitales y datos históricos relacionados con condiciones pasadas. El cual es capaz de intercambiar información de manera sincrónica o asincrónica con su contraparte real, con el fin de optimizar procesos y apoyar la toma de decisiones en sistemas hidráulicos.

En el caso del flujo en canales abiertos, es habitual que se lo describa con las ecuaciones de aguas someras o de Saint Venant (Hervouet, 2007), que comprende una ecuación de continuidad y dos de momentum, en cada una de las direcciones horizontales. Estas ecuaciones resultan adecuadas para casos de escurrimiento en los cuales el tirante o profundidad de agua es pequeño con relación a la extensión horizontal del flujo.

La solución mediante métodos numéricos de las ecuaciones de Saint Venant puede llevarse a cabo mediante distintos recursos computacionales. En este caso, se ha optado por el programa Telemac2d (Hervouet, 2007; open TELEMAC, 2025), que emplea el método de los elementos finitos para determinar el tirante y las velocidades en casos permanentes o transitorios de flujo con superficie libre.

La construcción de un modelo digital comprende la definición de diversos elementos esenciales. En primer lugar, se establece la geometría, que abarca las dimensiones del dominio de cálculo e incluye la descripción del fondo en términos de cotas, rugosidad y la presencia de obstáculos. A continuación, se determinan las condiciones de borde, que fijan los caudales circulantes, el régimen de flujo y las cotas de la lámina de agua tanto aguas arriba como aguas abajo. Posteriormente, se desarrolla la discretización o mallado, entendida como la división del dominio en elementos de dimensiones reducidas sobre los cuales se aplicará el procedimiento numérico. Asimismo, deben definirse los parámetros de ejecución, vinculados con la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

elección de algoritmos y opciones adecuadas para la resolución numérica de cada caso. Finalmente, se establece la lista de resultados esperados, entre los que se incluyen velocidades, profundidades, números de Froude u otros parámetros de interés. La correcta definición de todos estos aspectos requiere la aplicación de conocimientos desarrollados en las asignaturas de Hidráulica General y Aplicada e Hidrología y Obras Hidráulicas, correspondientes al tercer y cuarto nivel de la carrera de Ingeniería Civil.

## 3. Resultados y discusión

Entre los resultados más relevantes que se espera obtener se encuentran diversas características del flujo, tales como el perfil de velocidades y de superficie libre en distintas secciones, los patrones de circulación y el régimen hidráulico evaluado a partir del número de Froude, analizando su influencia en el comportamiento del agua. También se estudia el nivel del agua, considerando la variación de tirantes a lo largo del canal, la formación de láminas, resaltos hidráulicos y ondas, así como la determinación de la energía específica y la altura crítica. Del mismo modo, se contempla el análisis de los efectos producidos por estructuras hidráulicas, incluyendo la estimación de coeficientes de descarga en orificios o vertederos, la influencia de distintas rugosidades de fondo y el comportamiento de elementos a escala, como puentes, pilas y obstáculos que inducen procesos de erosión y sedimentación. Finalmente, se busca realizar un balance que permita la comprobación de ecuaciones fundamentales de continuidad y cantidad de movimiento, la validación de modelos matemáticos o numéricos y la obtención de coeficientes empíricos útiles en el diseño hidráulico.

Como ejemplo ilustrativo, presentamos el caso de un obstáculo triangular de 18 cm de longitud y 5,5 cm de altura interpuesto a un caudal de 100 L/s con una pendiente de base de fondo de 0.2%. En la Figura 1 se muestra un fotograma correspondiente a un ensayo en el canal, donde se aprecia el cambio de régimen, de subcrítico a supercrítico, producido por el obstáculo.

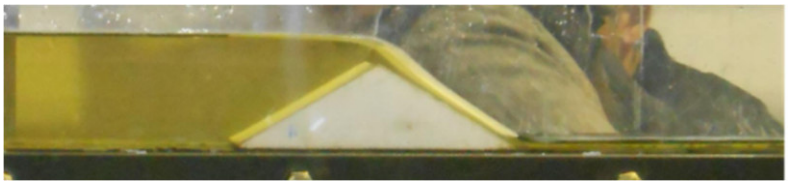


**Figura 2.** Obstáculo triangular interpuesto al flujo. Fuente: Cátedra de Hidráulica General y Aplicada.

El mismo ejemplo fue resuelto mediante el programa Telemac2D, empleando una malla de elementos finitos con tamaños de elementos del orden de los 5mm, sobre la cual se define la variación del fondo. El caso se analiza a lo largo de 120 s, partiendo de un estado inicial de profundidad uniforme de 7cm, que evoluciona hasta el estado mostrado en la Figura 2, representado como mapa de colores (arriba) y con diagrama de líneas (abajo). En la Figura 3, se aprecia el nivel de refinamiento de la malla empleada para la resolución del caso.

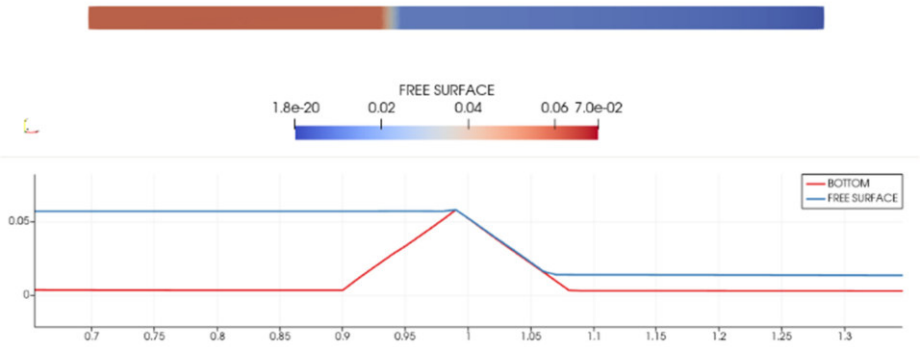



**Figura 3.** Arriba, mapa de colores de altura de superficie libre. Abajo, diagrama de líneas con la traza del fondo y el perfil de superficie libre obtenidos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

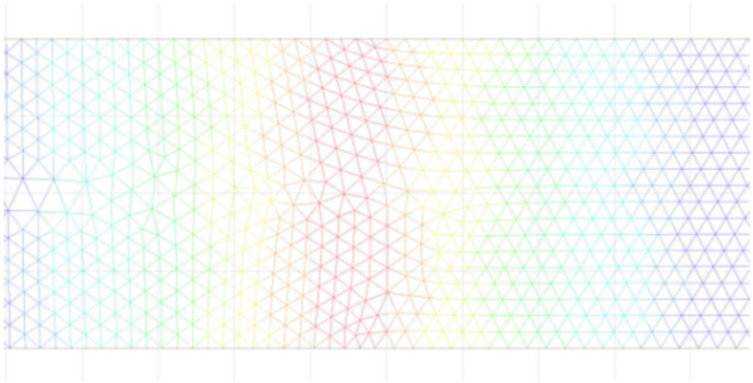


**Figura 4.** Detalle de la malla de elementos finitos en el sector de variación de altura de base de fondo por definición del obstáculo.

Los resultados obtenidos mediante el modelo numérico muestran concordancia cualitativa con el ensayo físico, sobre el cual no se realizaron mediciones de tirantes. En adelante, se propondrá un programa de ensayos a reproducir en el canal y en el gemelo digital (numérico); esta dinámica permitirá, en primera instancia, generar un modelo digital confiable, y a posteriori, diseñar numéricamente los ensayos a proponer en el canal, ahorrando fundamentalmente tiempos de calibración del modelo físico.

## 4. Conclusiones

En conclusión, el proyecto subraya la importancia de vincular la investigación experimental con la simulación digital, fomentando la reciprocidad entre la observación física y la modelación virtual. Se espera que esta estrategia a aplicar en el canal pueda ser extendida a otros modelos a diferentes escalas. De esta manera, se sientan las bases para una gestión hídrica más eficiente, sostenible y alineada con los desafíos actuales de la transición digital.

El desarrollo del presente proyecto permitió reafirmar que los conceptos de transición digital y gemelo digital constituyen pilares fundamentales para la modernización y eficiencia en la gestión de los sistemas hídricos. La incorporación de tecnologías y productos digitales, junto con la recolección de datos representativos, posibilita no sólo la verificación y modelación de los procesos hidráulicos, sino también la creación de escenarios experimentales que enriquecen la toma de decisiones.

En relación con el gemelo digital, se destacó su valor como herramienta dinámica y en evolución, capaz de integrar datos históricos y conocimiento experto para reproducir con fidelidad el comportamiento físico de los sistemas hidráulicos.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario (UTN-FRRo) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), instituciones cuyo respaldo hizo posible la realización de este proyecto. Asimismo, expresamos nuestro especial agradecimiento a la profesora Laura Battaglia, por su constante acompañamiento, orientación académica y compromiso en el desarrollo de este trabajo.

## Referencias bibliográficas

F. L. Fogliatti, M. F. Carrasco, L. B. Beltramini, C. A. Defagot, and R. O. Grether (2023). “Efecto del contenido de pasta y agregados finos sobre las propiedades del hormigón drenante”. Tecnología y Ciencia, 46, pp. 18–40.

Giustolisi, O. (2023). “Digital transition, digital twin and digital water: history, concepts and overview for the application to aqueducts”. Digital Water, 1(1). https://doi.org/10.1080/28375807.2024.2313975

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Hervouet, J.M. (2007). Hydrodinamics of Free Surface Flows. Modelling with the Finite Element Method. London: John Wiley & Sons.

Open TELEMAC (2025). TELEMAC-2D (v8.p4) [Software]. https://www.opentelemac.org/

Ordenanza de Consejo Superior 1853 (2023). “Diseño Curricular de Ingeniería Civil - Plan 2023”.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado.
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Estrategias para optimizar la finalización de Proyecto Final en Ingeniería en Energía Eléctrica

## Strategies to Optimize the Completion of the Final Project in Electrical Energy Engineering

Presentación: 30/10/2025

**Rosario Belén Macor**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
rmacor@ frsf.utn.edu.ar

**Juan Ignacio Salemme**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
jsalemme@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

La culminación de la carrera de Ingeniería en Energía Eléctrica requiere la elaboración de un trabajo final de grado, etapa que muchos estudiantes enfrentan con dificultades. Este proceso suele extenderse, generando sentimientos de frustración y desmotivación. En una investigación previa se identificaron como principales causas de esta demora: obligaciones laborales, dificultad para seleccionar un tema, gestión del tiempo, múltiples responsabilidades y obstáculos personales. Estos factores provocan una desconexión con la universidad y los docentes, incrementando el riesgo de deserción. El presente informe, como continuación de aquel estudio, presenta avances orientados a la sistematización del seguimiento a los estudiantes. Se trabajó una base de datos en Excel que clasifica a los alumnos según su estado de progreso; se diseñaron encuestas y fórmulas para automatizar su envío – en prueba- y se desarrolló un diagrama Ishikawa que organiza las dificultades detectadas. Estas herramientas permiten mejorar la gestión académica y proyectar futuras acciones institucionales.

**Palabras clave**: Proyecto Final, graduación, sistematización, encuesta, seguimiento.

### Abstract

The completion of the Bachelor's degree in Electrical Energy Engineering requires the development of a final thesis project, a stage that many students encounter with considerable challenges. This process frequently becomes protracted, generating feelings of frustration and loss of motivation. A previous study identified the main causes of such delays as work-related obligations, difficulties in selecting an appropriate topic, deficiencies in time management, multiple concurrent responsibilities, and personal constraints. These factors often foster a sense of disconnection from the university and faculty members, thereby increasing the risk of attrition. The present report, as a continuation of that study, outlines advances directed toward the systematization of student progress monitoring. An Excel database was developed to classify students according to their progress status; surveys and automated distribution formulas were designed and are currently under testing; and an Ishikawa diagram was constructed to organize and analyze the difficulties identified. Collectively, these tools contribute to enhancing academic management practices and provide a foundation for the design of future institutional strategies.

**Keywords:** Final Project, Graduation, Systematization, Survey, Monitoring

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

La finalización de la carrera de Ingeniería en Energía Eléctrica en la UTN-FRSF requiere que los estudiantes elaboren un trabajo final de grado, instancia que representa el cierre de su formación. Esta exigencia está establecida en la Ordenanza CSU 1873/2022 “Reglamento de Estudios”, y en la Ordenanza CSU 1874/2022 “Régimen de Correlatividades”, donde se indica expresamente que “es condición para rendir Proyecto Final, aprobar todas las asignaturas previas del Plan de Estudios”.

El trabajo previo de Javier Acosta (2024) analizó la problemática que enfrentan los estudiantes para culminar esta etapa, identificando factores clave que causan demora o interrupción, tales como: obligaciones laborales, dificultad para seleccionar un tema, gestión deficiente del tiempo, múltiples responsabilidades y obstáculos personales. Estos problemas fomentan la desconexión con la universidad, la desmotivación y el riesgo de deserción.

El presente informe, como continuación de aquel estudio, se enfoca en la sistematización del seguimiento y la generación de herramientas prácticas para mejorar la gestión del proceso y acompañar eficazmente a los estudiantes. Para ello, se trabajó en cuatro ejes principales: 1) Una base de datos en Excel que clasifica a los alumnos según hitos de avance (estado de la práctica supervisada, avance de la propuesta, progreso del proyecto y actividad laboral); 2) El diseño de encuestas para el seguimiento individualizado y la profundización de los motivos de retraso; 3) La modelación de fórmulas para la automatización del envío periódico de cuestionarios (actualmente en prueba) ; y 4) El desarrollo de un diagrama de Ishikawa (causa-efecto) para organizar las dificultades detectadas y facilitar la identificación de estrategias de intervención. Estos avances transforman la información dispersa en una herramienta de gestión dinámica que contribuye a un mejor acompañamiento y a la generación de estrategias institucionales.

# 2. Materiales y métodos

En este estudio, se adoptó un enfoque cualitativo-exploratorio, complementado con instrumentos cuantitativos que permiten medir tendencias y realizar un seguimiento individualizado de los estudiantes. Además, se basa en los principios de la investigación-acción educativa retomando la línea metodológica del trabajo previo presentado por Javier Acosta (2024). Esta perspectiva permite intervenir en el contexto educativo, reflexionar sobre los resultados y generar mejoras concretas en la gestión del Proyecto Final.

## 2.1. *Base de datos en Excel*

La organización de la información recolectada en una base de datos en Excel responde a la necesidad de contar con un registro unificado, accesible y fácilmente actualizable, que permita un seguimiento sistemático del proceso de finalización de carrera y aporte insumos para la toma de decisiones. La clasificación de los estudiantes se realizó en base a hitos que condicionan el desarrollo de la tesis como: el estado de la práctica supervisada (sin realizar, en curso o aprobada), el avance de la propuesta (sin efectuar, en elaboración o aprobada), el progreso del proyecto (25%, 50%, >75%), y si se encuentran en actividad laboral. Estos indicadores marcan el ritmo y las posibilidades de cada alumno. Esta estructuración permite no solo sistematizar datos dispersos, sino también orientar acciones específicas.

## 2.2. *Elaboración de encuesta*

Se confeccionó un cuestionario con el propósito de profundizar en los motivos de demora y para tener un seguimiento individual y continuo de cada estudiante, manteniendo actualizada la base de datos.

El contenido pretende indagar en aspectos relacionados a los procesos administrativos, asignaturas pendientes, actividad laboral vinculada a la carrera, contexto personal, y solicita retroalimentación sobre el proceso y la asignatura reglamentaria. Además, incluye preguntas sobre la posibilidad de acreditar el Trabajo Final si la actividad laboral del estudiante está relacionada con Ingeniería en Energía Eléctrica y ofrece un correo de contacto para brindar más información.

La encuesta permite complementar la evidencia obtenida en entrevistas previas, generar datos cuantificables y, a la vez mantener seguimiento individualizado. Esta estrategia combina la perspectiva cualitativa (comprensión de los motivos) con la cuantitativa (medición de tendencias), logrando un abordaje integral del problema, fortaleciendo la gestión de la asignatura y la calidad educativa.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

2.3. *Automatización de encuestas*

Para reducir la carga de gestión manual y optimizar el seguimiento de los estudiantes, se desarrolló un procedimiento de automatización en Excel. Este proceso se estructuro en varias etapas. Primero, se generó una tabla de control. En la misma se resumen los datos claves de cada alumno, incluyendo el estado de avance, última fecha de contacto con la cátedra y la frecuencia deseada de comunicación. Luego, dentro de la tabla, se definió el "Estado de encuesta" que, mediante fórmulas, determina automáticamente si corresponde realizar o no, él envió del cuestionario a cada estudiante. Posteriormente, se desarrolló la automatización del envío, programando un código que recorre la columna de "Estado de encuesta". Cuando una celda figura con el valor "Enviar", el sistema remite automáticamente un correo al alumno correspondiente. Una vez realizado el envío, el código actualiza la fecha del último contacto y limpia el estado de la encuesta, dejando el registro listo para el próximo ciclo. Finalmente, se implementó una interfaz simplificada. Para facilitar su uso, se incorporó un botón dentro de la tabla que ejecuta el código, permitiendo procesar y enviar de forma masiva todos los correos pendientes con solo un clic.

2.4 *Diagrama de Ishikawa*

Se elaboró un diagrama causa-efecto para organizar gráficamente las causas identificadas en la etapa inicial en cuatro dimensiones principales (procesales, académicas, personales e institucionales). Este recurso facilita la priorización de intervenciones para mejorar la calidad educativa. En definitiva, la revisión sistémica que ofrece esta herramienta permite coordinar, modificar o mantener los esfuerzos por comprender este fenómeno.

## 3. Resultados y discusión

De la metodología implementada se obtuvieron los siguientes avances.

3.1. *Consolidación de la base de datos en Excel*

Se organizó la información de 205 estudiantes y graduados en una base dinámica, unificada, actualizada y clasificada según hitos que condicionan el avance. Esta organización permitió tener una visión integral del estado de los alumnos y diferenciar casos críticos, lo que abre la puerta a un seguimiento más focalizado.

| Enviar Correos | Nombre | Correo | Progreso de PF | Estado del alumno | Ultima Presentacio | Frecuencia (dias) | Encuesta | Propuesta de PF | Detalles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 100% | Egresado | 13/5/2024 | 60 | Enviar | Hidroponía 4.0: Automatización y digitalización de un sistema hidropónico | |
| | | | 50% | No Egresado | 14/2/2024 | 60 | Enviar | Reconversión y modernización de hotel como torre de departamentos | |
| | | | 80% | No Egresado | 29/8/2024 | 60 | Enviar | Diseño y cálculo de instalación eléctrica en baja tensión de un edificio de viviendas multifamiliares, oficinas y local comercial con incorporación de generación | |
| | | | 100% | Egresado | 19/2/2024 | 60 | Enviar | Evaluación Técnico - Económica de un Parque Solar para Abastecer un Clúster de Industrias en el Marco del Programa ERA | |
| | | | 100% | Egresado | 2/9/2021 | 60 | Enviar | Análisis de viabilidad técnico y económica de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos en la provincia de Santa Fe | |
| | | | 100% | Egresado | 28/4/2022 | 60 | Enviar | Diseño de una instalación para una planta de selección y acopio de semillas | |
| | | | 90% | No Egresado | 2/12/2024 | 60 | Enviar | Propuesta de Instalación Eléctrica para el centro de distribució | |
| | | | 100% | Egresado | 19/2/2024 | 60 | Enviar | Propuesta de adecuación de una subestación eléctrica 33/0.4 Kv para una industria alimenticia. | |
| | | | 100% | Egresado | 28/4/2022 | 60 | Enviar | Diseño de reactor biológico y sistemas complementarios para aprovechamiento energético de residuos pecuarios en criadero de cerdos | |
| | | | 100% | Egresado | 29/12/2020 | 60 | Enviar | Proyectos de instrumentación y control en complejo petroquímico PGSM | |
| | | | 35% | No Egresado | 13/10/2022 | 60 | Enviar | Análisis de factibilidad técnico y económico de propuesta de expansión de la red de distribución eléctrica de la ciudad de Esperanza de la Provincia de Santa Fe" | |
| | | | 100% | Egresado | 3/5/2022 | 60 | Enviar | Diseño de un sistema fotovoltaico para abastecer consumos productivos en los asentamientos urbanos "Los Jacintos" y | |

**Figura 1.** Captura de la hoja "Correos" de la base de datos de Excel (con datos anonimizados).

3.2 *Depuración y optimización del archivo.*

Se ordenaron y filtraron los registros, lo que redujo el tamaño del archivo y se habilitó la incorporación de nuevas tablas dinámicas y de seguimiento. Como resultado, se cuenta con una herramienta más ágil y flexible para el monitoreo del progreso en los proyectos finales.

3.3 *Resultados de encuestas.*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Se obtuvieron los primeros resultados de la encuesta enviada, con una recepción positiva, por parte de los destinatarios. Hasta el momento se han recibido 66 respuestas, de las cuales 46 corresponden a estudiantes activos y 20 a egresados.

En general, las respuestas reafirman las causas previamente identificadas: competencias deficientes, falta de continuidad, desconocimiento del proceso, factores psicológicos, falta de apoyo y falta de seguimiento. Asimismo, han surgido nuevas problemáticas que están siendo estudiadas en profundidad. A continuación, se presenta la clasificación del estado actual de los estudiantes, obtenida como resultado de la encuesta

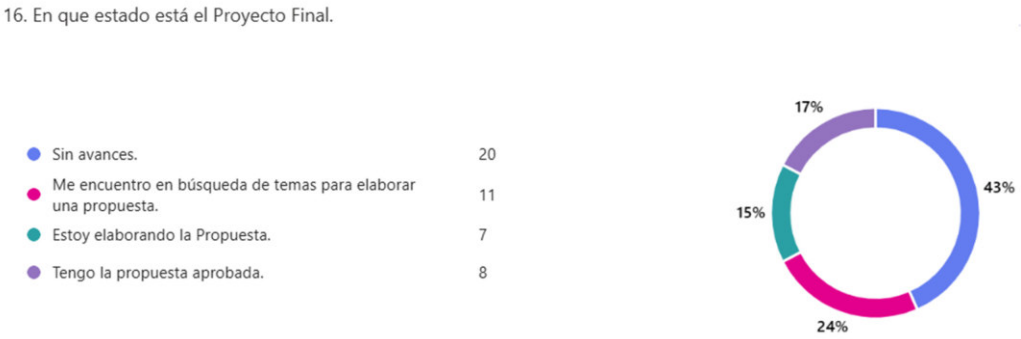



**Figura 3**. Distribución porcentual de la situación laboral de los estudiantes.

3.3 *Automatización de encuestas*.

```
Dim Imagen As String
Dim Adjunto As String
Dim Mensaje As String
Dim MensajeHTML As String
Dim enlaceEncuesta As String
Dim Texto As String
Dim Texto2 As String
Dim Texto3 As String
Dim OutlookApp As Outlook.Application
Dim MItem As Outlook.MailItem

Set OutlookApp = New Outlook.Application

Set Ws = ThisWorkbook.Sheets("Hoja2")
UltimaFila = Ws.Cells(Ws.Rows.Count, "B").End(xlUp).Row

For Each Celda In Ws.Range("B2:B" & UltimaFila)

    If Trim(Celda.Value) <> "" Then
    If Celda.Offset(0, 5).Value = "Enviar" Then

        Correo = Celda.Value
        Nombre = Celda.Offset(0, -1).Value
        MensajeHTML = "" & _
    "<p> ..."
        Set MItem = OutlookApp.CreateItem(olMailItem)

        With MItem
            .Display
            .To = Correo
            .Subject = "Encuesta sobre dificultades en una tardía finalización del proyecto final "
            .HTMLBody = MensajeHTML
            .Send
            Celda.Offset(0, 3).Value = Date

        End With
```

**Figura 4.** Código de Macro en Excel

La automatización del envío de encuestas en Excel representa un aporte innovador, ya que reduce la carga administrativa de la cátedra. El sistema permite identificar automáticamente qué estudiantes requieren recibir un nuevo cuestionario, generar el envío de forma masiva y actualizar la información de contacto en la base de datos. Este avance reduce de manera significativa el trabajo manual, asegura la periodicidad de los envíos y fortalece la confiabilidad del seguimiento individual de los alumnos. Tanto este mecanismo, actualmente en prueba, como la optimización del archivo, constituyen un puente hacia la implementación de herramientas de gestión más robustas, como la migración futura a un tablero de control en Power BI.

3.4 *Diagrama de Ishikawa*

El diagrama causa-efecto organiza las dificultades en cuatro dimensiones principales:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

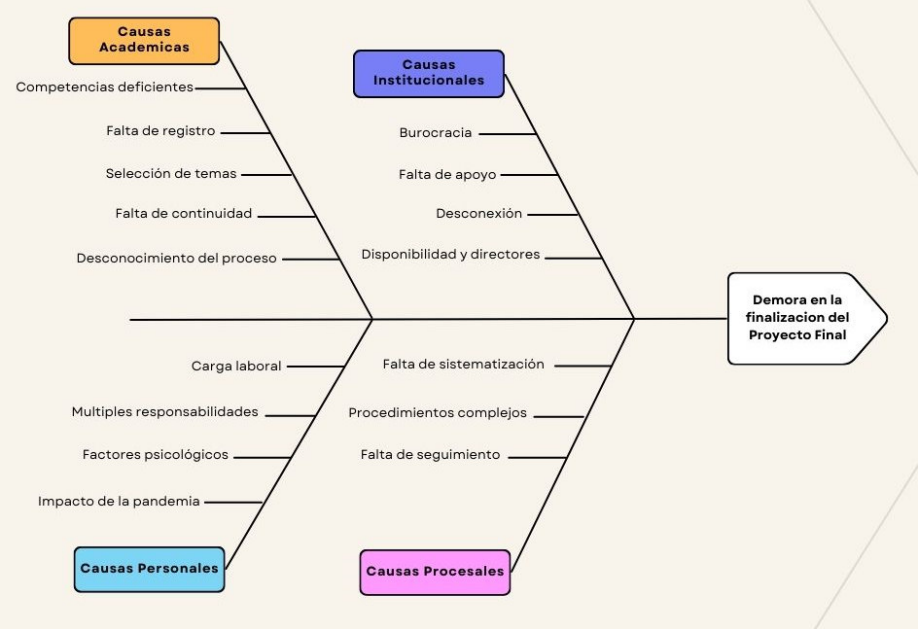



**Figura 5.** Diagrama Ishikawa

Este recurso refuerza los hallazgos del trabajo previo y también refleja las causas identificadas en las encuestas realizadas. Esta herramienta facilita la selección de acciones de mejora y se continuara actualizando con las retroalimentaciones recibidas.

En conjunto estos resultados muestran un avance hacia la sistematización de la gestión del PF. La base de datos y la automatización de encuestas convierten información aislada en un sistema dinámico que permite orientar acciones diferenciadas:

- Estudiantes que trabajan en áreas afines podrían acceder a la acreditación como modalidad alternativa.
- Aquellos estancados en la propuesta requieren acompañamiento académico más cercano.
- Los que acumulan retrasos sin contacto reciente son prioritarios para recibir encuestas o entrevistas personales.

La discusión de estos avances evidencia la necesidad de abordar el problema desde un enfoque integral, tal como señalan Suárez-Montes (2015) y González-Nieto (2023), quienes destacan que las causas de retraso no son únicamente individuales, sino que surgen de la interacción entre factores externos (obligaciones laborales, responsabilidades familiares) e internos (procrastinación, ansiedad), a lo que se suman condicionantes académicos e institucionales. Este panorama confirma la pertinencia de mantener un enfoque cualitativo-exploratorio e investigación-acción educativa (usando como base el trabajo presentado por Javier Acosta (2024)), que no solo describa la situación, sino que intervenga para transformarla.

En esta línea, se proyecta implementar y desarrollar un tablero de control en Power BI, que permitirá transformar la información en visualizaciones dinámicas y accesibles para el seguimiento. Asimismo, se pretende profundizar las estrategias de acompañamiento y explorar la posibilidad de ampliar el sistema de seguimiento hacia otras carreras de la Facultad Regional, adaptando las herramientas según las particularidades de cada plan de estudios.

## 4. Conclusiones

El presente informe representa un avance significativo en la continuidad del trabajo presentado por Javier Acosta (2024), al pasar del diagnóstico inicial a la sistematización del seguimiento del PFG. El trabajo sobre una base de datos organizada, la optimización del archivo, la automatización del envío de encuestas y la elaboración de indicadores constituyen herramientas concretas que permiten transformar información dispersa en insumos útiles para la gestión académica.

Los resultados muestran que la combinación de estas herramientas facilita la identificación de trayectorias críticas, la priorización de acciones de acompañamiento y la generación de estrategias institucionales orientadas a mejorar la finalización de la carrera. Asimismo, el uso del diagrama de Ishikawa refuerza la visión integral de las causas del retraso, ratificando la necesidad de intervenciones que articulen factores personales, académicos, procesales e institucionales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Al tratarse de un trabajo en desarrollo, se prevé continuar explorando y ajustando los mecanismos de automatización para optimizar el seguimiento de estudiantes. Finalmente, se destaca que estos desarrollos abren el camino hacia nuevas etapas, como la incorporación de un tablero de control en Power BI, que potenciará la capacidad de análisis en tiempo real y contribuirá a mejorar el índice de graduación en la UTN-FRSF.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo brindado por la cátedra de Proyecto Final, el Consejo Departamental y los estudiantes que participaron en las entrevistas y colaboraron en la elaboración de la encuesta.

## Referencias

Acosta, J., Scoppa, M., Banegas, J., Macor, P. y Pochettino, N. (2024). “Tesis inconclusas: un análisis de las dificultades que enfrentan los estudiantes de Ingeniería en Energía Eléctrica de la UTN-FRSF”. *Actas del 11° Congreso de Investigaciones y Desarrollos en Tecnología y Ciencia, XI IDETEC 2024 - Docentes e Investigadores*, UTN, Facultad Regional Villa María, Argentina, Villa María, Córdoba, 8 al 10 de octubre, 36-46. ISBN 978-987-8992-45-7.

Ordenanza 1873. (15 de 06 de 2022). DISEÑO CURRICULAR DE INGENIERÍA EN ENERGÍA ELÉCTRICA - Plan 2023 - Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Educación - Universidad Tecnológica Nacional - Rectorado.

Ordenanza 1874. (15 de 06 de 2022). RÉGIMEN DE CORRELATIVIDADES, EQUIVALENCIAS PARA MATERIAS DE LA CARRERA INGENIERÍA EN ENERGÍA ELÉCTRICA - PLAN 2023 - Autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina: Ministerio de educación - Universidad Tecnológica Nacional - Rectorado.

Quecedo, R. y Castaño, C. (2002). “Introducción a la metodología de investigación cualitativa”. *Revista de Psicodidáctica*, 14, 5-39. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, Vitoria-Gasteiz, España.

Suárez-Montes, N., & Díaz-Subieta, L. B. (2015). Estrés académico, deserción y estrategias de retención de estudiantes en la educación superior. Revista de Salud Pública, 17(2), 300–313. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42241778013

González-Nieto, N. A. (2023). Educación superior y retención estudiantil. Education in the Knowledge Society (EKS), 24(2). Universidad de Salamanca. https://revistas.usal.es/tres/index.php/eks/article/view/31018/29543

Munizaga Mellado, F. R. (2018). Retención y abandono estudiantil en la educación superior universitaria en América Latina [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio Académico Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/187777

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Uso de maquetas y software como herramientas didácticas para comprender el comportamiento estructural

## Use of models and software as teaching tools to understand structural behavior

Presentación: 30/10/2025

**Lucía Albano**
Universidad Tecnológica Nacional; Facultad Regional Santa Fe, Grupo de Investigación en Enseñanza de la Ingeniería (GIEDI), Santa Fe, Argentina
lalbano@frsf.utn.edu.ar

**Juan Francisco Cati**
Universidad Tecnológica Nacional; Facultad Regional Santa Fe, Grupo de Investigación en Enseñanza de la Ingeniería (GIEDI), Santa Fe, Argentina
jcati@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

El trabajo aborda el uso de maquetas analógicas y digitales en la enseñanza de Estabilidad en Ingeniería Civil, con el objetivo de facilitar la comprensión del comportamiento estructural y complementar la resolución manual de problemas. La investigación se apoyó en ejercicios aplicados, resueltos de forma tradicional, con maquetas y con software, lo que permitió comparar enfoques y detectar ventajas y limitaciones. Aunque los resultados aún son preliminares, se presentan análisis comparativos y una experiencia piloto con un grupo reducido de estudiantes. Se concluye que estas estrategias potencian el desarrollo de competencias y brindan a los alumnos una visión más integral del análisis estructural.

**Palabras clave:** enseñanza de estructuras, simulación digital, maquetas analógicas.

### Abstract

The study addresses the use of analog and digital models in teaching Structural Stability in Civil Engineering, aiming to improve the understanding of structural behavior and complement manual problem-solving. The research was based on applied exercises solved through traditional methods, models, and software, which allowed comparisons between approaches and the identification of advantages and limitations. Although results are still preliminary, the work presents comparative analyses and a pilot experience with a small group of students. It concludes that these strategies enhance the development of competencies and provide students with a more comprehensive perspective on structural analysis.

**Keywords:** structure education, digital simulation, analog models

## 1. Introducción

La investigación se enmarca en un Proyecto I+D orientado a la implementación de metodologías activas, recursos didácticos y tecnologías que favorezcan el aprendizaje en carreras de ingeniería. Según Labrador y Andreu (2008), las metodologías activas implican transformar el proceso de enseñanza en actividades que promuevan la participación activa del estudiante. En la asignatura Estabilidad del segundo año de Ingeniería Civil se trabaja en la incorporación de maquetas analógicas y digitales como herramientas que favorecen la compresión estructural. Los objetivos específicos incluyen

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

comprender el comportamiento de reticulados y pórticos sometidos a cargas externas, aplicar técnicas prácticas (Kit Mola, maquetas físicas) y digitales (SketchUp, RISA 2D, RFEM) para modelar y analizar estructuras, e interpretar esfuerzos internos, reacciones de vínculo y deformaciones.

Los Trabajos Prácticos Integradores (TP) constituyen una herramienta clave en la materia, ya que permiten aplicar conceptos en problemas reales, integrar conocimientos, promover el trabajo colaborativo y desarrollar competencia de redacción académica. En este contexto, la investigación sobre el uso de maquetas se basa en problemas y TP previamente abordados, adaptados a modelos que pueden ser representados mediante maquetas físicas o digitales.

Tal como señala Jazmany (2021), la estrategia metodológica implementada por el docente constituye un proceso que integra al estudiante en un aprendizaje competente, favoreciendo su desempeño académico y contribuyendo a su futura actuación profesional.

En línea con estas perspectivas, Prince y Felder (2020) sostienen que el aprendizaje activo resulta fundamental para incrementar la participación estudiantil y mejorar la retención de conceptos, mientras que Freeman et al. (2014) demuestran que estas metodologías elevan el rendimiento en disciplinas STEM. A su vez, Lima et al. (2017) destacan la importancia de promover la capacitación docente en el uso de estas estrategias, resaltando su impacto positivo en la enseñanza de la ingeniería. En este marco, el uso de maquetas analógicas y digitales se presenta como un recurso pedagógico actual y adecuado, alineado con las tendencias contemporáneas en educación en carreras de ingeniería.

## 2. Materiales y métodos

En la experiencia piloto se seleccionaron un reticulado plano y otro espacial similar a los dados durante las clases. Estos mismos reticulados fueron construidos físicamente con el Kit Mola (Figura 1), en dónde se aprovechó el proceso para repasar conceptos claves sobre reticulado ideal.

**Figura 1**. Modelos realizados con el Kit Mola.

Posteriormente se modelaron también en los programas RISA 2D y Dlubal RFEM, esquematizando posibles cargas aplicadas y simulando los apoyos utilizados en las maquetas analógicas (Figura 2).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

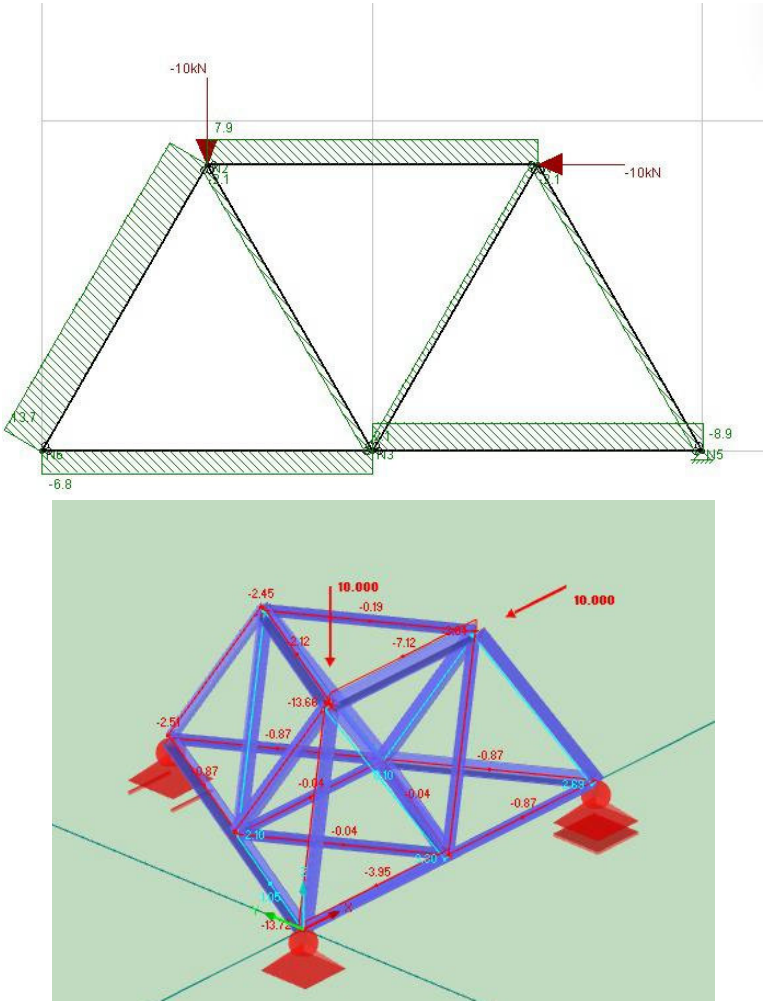



**Figura 2.** Modelo en el programa RISA 2D y Dlubal RFEM 6 de los reticulados.

Por último, los resultados experimentales se compararon con los obtenidos en los programas, seleccionando barras de los reticulados y empleando una tabla de contraste para este análisis (Tabla 1).

**Tabla 1**. Ejemplo de tabla comparativa de resultados empleada

| | Esfuerzo obtenido kit Mola | Esfuerzo obtenido programa de cálculo |
|---|---|---|
| Barra 1 | Tracción | 6.8 kN (tracción) |
| Barra 2 | Compresión | -7,9 kN (compresión) |
| Barra 3 | Compresión | -13.7 kN (compresión) |

En el trabajo práctico del puente 2022, se elaboró un modelo en SketchUp (Figura 3) que permita visualizar todos los elementos intervinientes en el puente, y se realizó la resolución manual de cargas y reacciones. Posteriormente, los resultados se verificaron con RISA, registrando los procedimientos y modelos generados.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

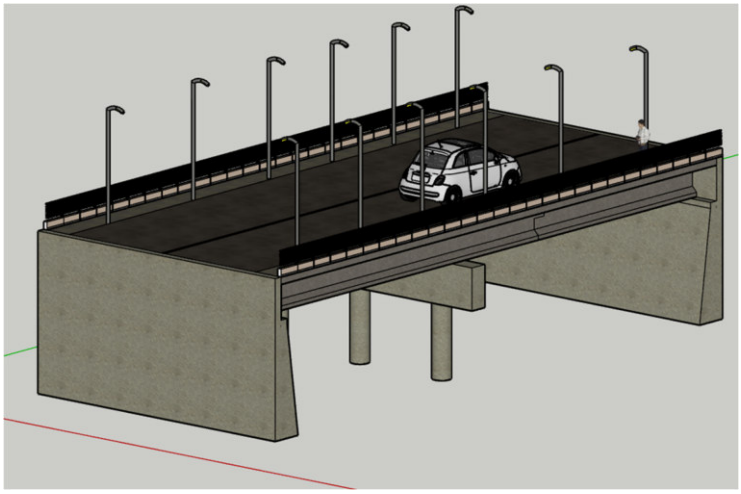


**Figura 3.** Vista en lateral y perspectiva del puente.

En la Figura 4, se puede observar un ejemplo de modelado de la losa del tablero del puente en el programa RISA 2D.

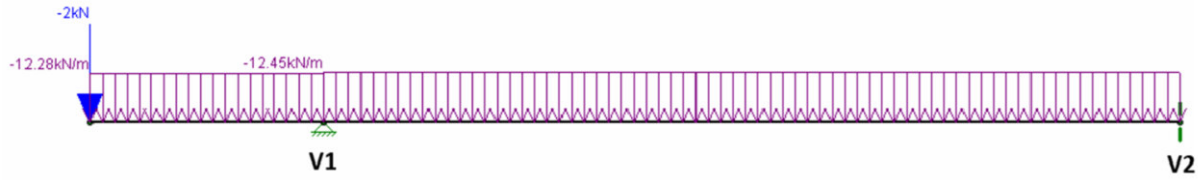



**Figura 4.** Esquema de la losa L01, analizada como una viga simplemente apoyada.

Finalmente, se propone realizar un trabajo práctico a implementar en el año 2025 que involucra la resolución de pórticos planos y espaciales a través de métodos manuales, software de cálculo y maquetas analógicas. Buscando que se refuerce lo aprendido en conceptos de esfuerzos de alma llena.

## 3. Resultados y discusión

La experiencia que se realizó por fuera del horario de clases y de manera optativa, captó la atención de muchos estudiantes lo que permitió también, poder aprovechar el encuentro para resolver dudas sobre los temas dados hasta el momento.

En las distintas etapas de la actividad se pudo “jugar” con el modelo tanto físico como el modelado en el software y se fue comparando los efectos que producían las distintas cargas en las estructuras.

De la experiencia se puede decir que resultó provechosa y tuvo un impacto positivo. Si bien los/as estudiantes estaban más concentrados en el repaso de conceptos que se desprendió de la actividad por estar próxima la fecha de un parcial, se notó interés sobre todo en el modelo realizado con el kit Mola, que desprendió que se acerquen a probar distintas configuraciones posibles de reticulados y experimentar con el mismo por fuera de la actividad propuesta y explicitada en este artículo. Esto permitió a su vez seguir reforzando conceptos como qué herramientas se podían usar para rigidizar el nudo, cuando necesitaríamos aplicar eso para el modelado, por qué había alambres y para qué servían, lo que derivó en ampliar los conocimientos e incorporar conceptos nuevos que luego se profundizarán en los siguientes temas dados por la cátedra a lo largo del año.

A su vez, permitió visualizar de manera más claras los conceptos como los esfuerzos de tracción y compresión en las barras de los reticulados, y asociarlos a los tipos de deformaciones de alargamiento y acortamiento.

En el trabajo práctico del puente que se tomó de ejemplo del año 2022, los resultados manuales coincidieron con los obtenidos en RISA, confirmando que la resolución en RISA será más ágil y rápida que la resolución manual. Sin embargo, es de destacar que los estudiantes deberán tener muy en claro cómo crear la estructura para modelar y la transmisión de cargas sobre los elementos de la estructura. Esto nos confirma la visión de que podría recurrirse al software como una manera de verificar los cálculos que se hayan efectuado manualmente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Respecto a la propuesta de pórticos 2025, todavía no se cuenta con resultados ya que al momento de presentar este trabajo todavía no pudo aplicarse la dinámica en el aula. Sin embargo, se lograron avances en la elección de los pórticos a analizar y se realizó a su vez la maqueta 3D con espuma de polietileno expandido uniendo las piezas mediante encastre y adhesivo de contacto para generar la adherencia necesaria que asemeje los nudos a una configuración del tipo rígida y permita ver la transferencia de esfuerzos que se da en la realidad (Figura 6).

**Figura 6.** Maqueta de pórtico espacial de espuma de polietileno expandido.

## 5. Conclusiones

La incorporación de maquetas analógicas y digitales en la cátedra Estabilidad constituye una estrategia pedagógica eficaz para favorecer la comprensión del comportamiento estructural. La combinación de resolución manual, software y maquetas potencia el interés de los estudiantes y enriquece el aprendizaje.

Se puede observar cómo el software RISA 2D, aunque limitado en algunos aspectos, resulta accesible para estudiantes de segundo año y útil como herramienta de verificación. Sin embargo, no reemplaza la necesidad de comprender los fundamentos del análisis estático.

Como líneas futuras, se propone:

- Mejorar la experiencia con el kit Mola y realizar encuestas para evaluar el impacto en los estudiantes tanto de interés como de conocimientos adquiridos.
- Presentar en el aula una resolución integral de un TP de puente, mediante la incorporación de modelados 3D de los elementos y resolución por software.
- Implementar el Trabajo Práctico N°2 en el año 2025 de pórticos y analizar sus resultados.
- Integrar el uso de software 3D más complejos como el Dlubal RFEM 6 en la resolución de los trabajos.

## Agradecimientos

Se agradece el acompañamiento de la cátedra de Estabilidad y el apoyo de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe. Queríamos mencionar un especial agradecimiento a nuestra directora del Proyecto de Investigación sobre el “Desarrollo de Metodologías activas, con materiales didácticos y tecnología, en el marco de los nuevos diseños curriculares en carreras de ingeniería”, la Mg. Ing. Civil Romina Ferrando, por su acompañamiento y guía durante el armado de las actividades y la confección de este trabajo.

## Referencias bibliográficas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). *Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(23), 8410–8415.

Jazmany, A. (2021). *Estrategias metodológicas en la enseñanza de la ingeniería*. Editorial Académica Española.

Labrador, M., & Andreu, M. (2008). *Metodologías activas*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.

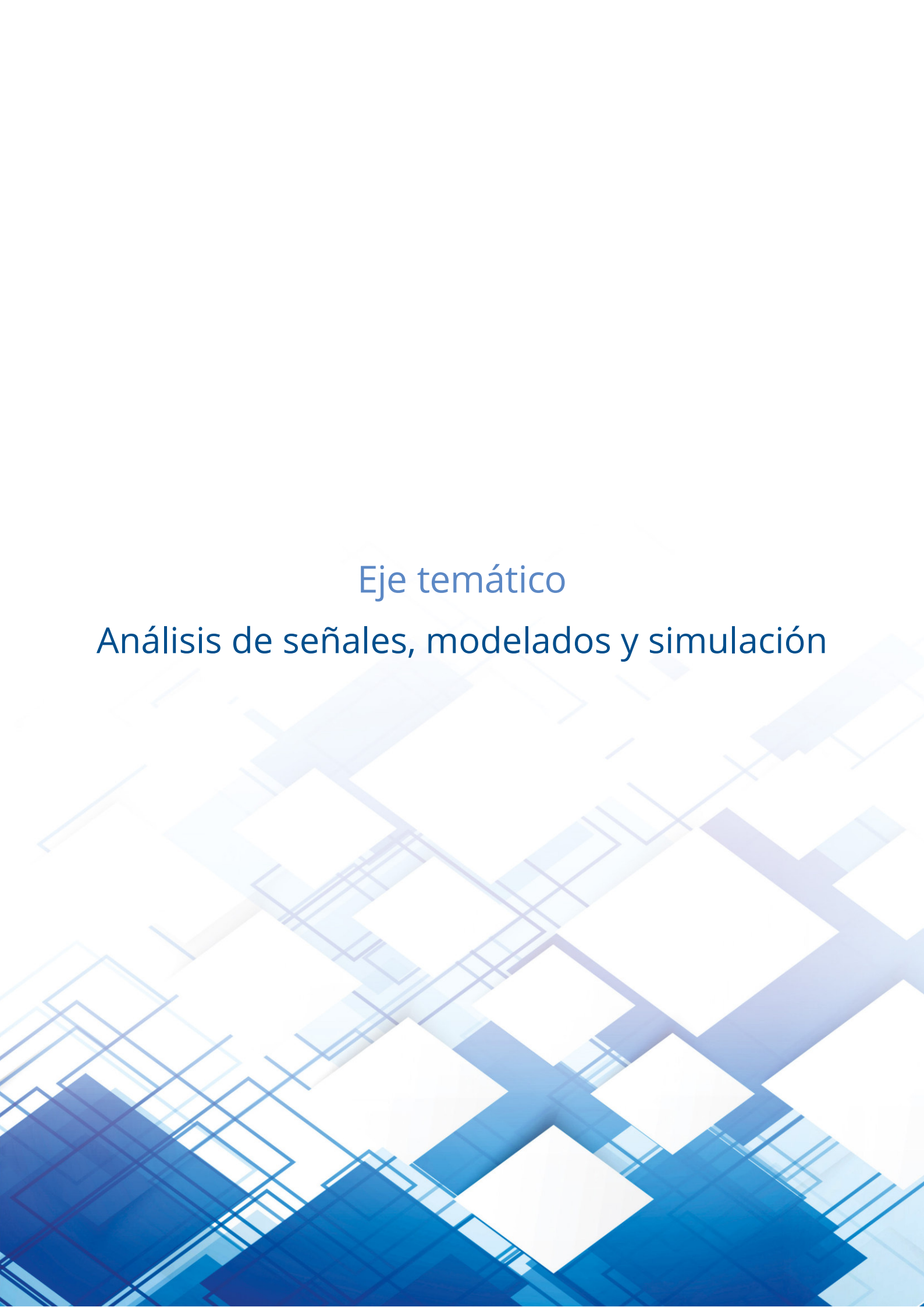
Lima, R. M., Mesquita, D., Dinis-Carvalho, J., & Sousa, R. M. (2017). *Promoting the use of active learning methodologies in engineering education through teacher training.* International Journal of Engineering Education, 33(2), 606–617.

Prince, M. J., & Felder, R. M. (2020). *Active learning: An update and a faculty development guide*. Advances in Engineering Education, 8(4), 1–41.

Zambrano Verdesoto G. (2021). *Metodologías activas generadoras de un aprendizaje significativo en la educación superior.* Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S. L.

Eje temático

# Análisis de señales, modelados y simulación



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Reconquista

# Vibraciones en entramados utilizando series de potencias con teoría de viga de Timoshenko

## Vibrations in trusses using power series with Timoshenko's beam theory

Presentación 30/10/2025

**Marcos Pereson**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Diseño Mecánico (GRUDIM), Reconquista, Argentina.
mpereson1700@comunidad.frrq.utn.edu.ar

**Macarena Caballero**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Diseño Mecánico (GRUDIM), Reconquista, Argentina.
mcaballero902480@comunidad.frrq.utn.edu.ar

**Tiago Speranza**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Diseño Mecánico (GRUDIM), Reconquista, Argentina.
tsperanza3215@comunidad.frrq.utn.edu.ar

### Resumen

El objetivo de este trabajo es hallar las frecuencias naturales de vibración de un entramado plano aplicando la teoría de viga de Timoshenko, la cual considera los efectos de la inercia rotacional y de la deformación por corte; factores ausentes en la teoría clásica de Bernoulli-Euler. Se plantea la formulación energética del sistema a partir del principio de Hamilton y el cálculo variacional, describiendo la energía interna y cinética de cada barra y se resuelve las ecuaciones de vibración mediante el método de series de potencias. Los resultados evidencian que esta metodología constituye una herramienta sólida y flexible para el análisis dinámico y el modelado estructural.

**Palabras clave:** Vibraciones, Timoshenko, Series de Potencia, Entramados Planos.

### Abstract

The objective of this work is to find the natural vibration frequencies of a flat truss by applying Timoshenko's beam theory, which considers the effects of rotational inertia and shear deformation; factors absent in the classical Bernoulli-Euler theory. The energy formulation of the system is based on Hamilton's principle and variational calculus, describing the internal and kinetic energy of each bar, and the vibration equations are solved using the power series method. The results show that this methodology is a robust and flexible tool for dynamic analysis and structural modeling.

**Keywords:** Vibrations, Plane Frame, Power Series,Timoshenko

## 1. Introducción

La teoría clásica de Bernulli-Euler supone que las deformaciones elásticas se deben únicamente a la flexión, sin considerar los efectos de la inercia rotatoria ni los esfuerzos cortantes; lo cual es válido en problemas habituales de ingeniería, pero puede generar errores en vigas cortas y gruesas o sometidas a grandes esfuerzos.

Para dichos casos donde se deba tomar en consideración el efecto debido al corte se utiliza la Teoría de Thimoshenko, que incluye los efectos debido a la inercia rotatoria (relacionado al tiempo de adecuación de la viga al cambio de esfuerzos) y a la deformación transversal por corte; con el fin de hallar las frecuencias naturales de vibración. Para obtener soluciones más

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

precisas, se resuelve la ecuación de vibración utilizando el método de series de potencias. Esta técnica permite abordar ecuaciones diferenciales con coeficientes variables. Este desarrollo proporciona una expresión general para los modos de vibración, truncable según la precisión deseada, y permite analizar la influencia relativa de los distintos términos físicos del modelo de Timoshenko.

## 2. Metodología

*2.1 Formulación de la energía interna y cinética método de viga de Timoshenko*

*2.1.1* Hipótesis básicas y expresiones de energía de deformación

Las hipótesis fueron desarrolladas en la década de 1920 por Stephen Timoshenko, se trata de un modelo matemático que describe la vibración transversal de las vigas teniendo en cuenta el efecto de la deformación por corte. El material del elemento cumple la ley de elasticidad de Hooke, es homogéneo, isotrópico y lineal elástico.

Se considera una viga de longitud “a” sobre un eje “x”, sujeta a cargas distribuidas q(x) dirigidas transversalmente sobre su eje longitudinal; a cargas distribuidas p(x) dirigidas a lo largo del eje, como se muestra en la Figura 1.

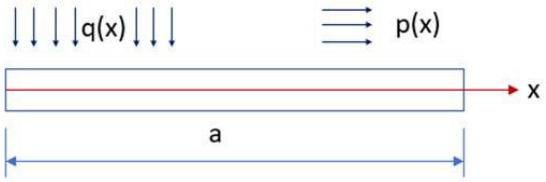



**Figura 1** - Viga de longitud "a" y cargas distribuidas

En la Figura 2 se indica el sistema de coordenadas adoptado, las funciones de desplazamientos son u(x), v(x) y w(x); para las direcciones en los ejes “x”, “y” y “z” respectivamente. En general, siguiendo la teoría de Saint-Venant, se puede considerar que los desplazamientos w(x), son nulos.

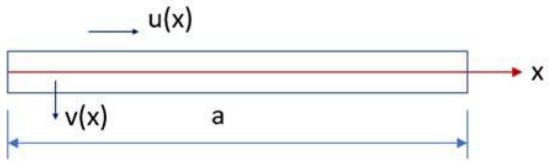



**Figura 2** - Representación de desplazamientos

Las deformaciones vertical y axial de un punto del eje de la viga dependen solo de la variable x. Las secciones normales se conservan planas tras la deformación, pero no necesariamente perpendiculares, sino que giran un ángulo adicional $\psi$, como se muestra en la Figura 3.

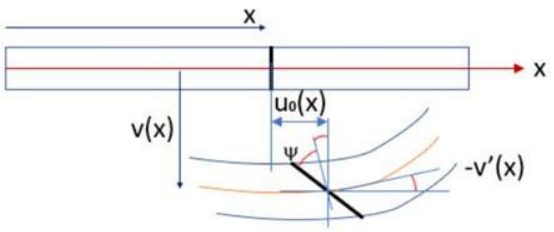



**Figura 3** - Ángulo adicional de rotación de cara plana

De las hipótesis que se acaban de formular, se deduce que una sección recta a la distancia x, de la base izquierda, sufre una reducción $v(x) = v_0(x)$ igual para todos los puntos de la sección, un desplazamiento axial u(x,y) y una rotación $\phi$(x) como se muestra en la Figura 4.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

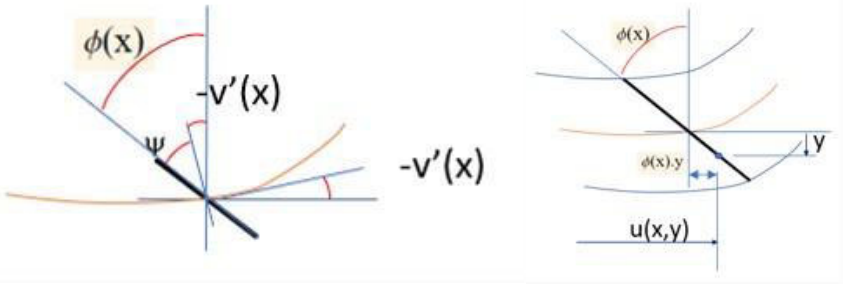



**Figura 4** - Rotación de sección (a) y desplazamiento de un punto de la sección(b)

Las deformaciones se deducen de las leyes que relacionan deformaciones con las primeras derivadas de los desplazamientos, y tras algunos pasos se obtiene la expresión de la energía como suma de los desplazamientos axiales, transversales y al corte.

$$U = \frac{1}{2}\left[\int_0^L EF\left(u_0'(x)\right)^2 dx + \int_0^L EJ\left(\phi'(x)\right)^2 dx + \int_0^L GF\kappa\left(\psi(x)\right)^2 dx\right] \quad (1)$$

2.1.2 Energía cinética

La energía cinética en un sistema de referencia cartesiana (x, y, z), relativa a un cuerpo de volumen S es:

$$K = \frac{1}{2}\rho \int_S \left(\dot{u}_0(x) + \dot{\phi}(x)y\right)^2 + \dot{v}(x)^2\, dV \quad (2)$$

Donde la terna $\{\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}\}$ son las derivadas respecto al tiempo de los desplazamientos en cada dirección. Debido a que todo el análisis es en el plano del entramado, no hay desplazamientos en la dirección "z" entonces $\dot{w}(x) = 0$

Observando los tres términos de la ecuación (2) podemos concluir que la energía cinética se compone de tres partes, la primera es la energía cinética axial $K_a$, la segunda de tipo transversal $K_e$ y la tercera de tipo rotacional $K_r$:

$$K_a = \frac{1}{2}\int_0^L \rho F\left(\dot{u}_0(x)\right)^2 dx \quad (3)$$

$$K_e = \frac{1}{2}\int_0^L \rho F\left(\dot{v}(x)\right)^2 dx \quad (4)$$

$$K_r = \frac{1}{2}\int_0^L \rho J\left(\dot{\phi}(x)\right)^2 dx \quad (5)$$

*2.1.3* Vibraciones transversales de la viga de Timoshenko

Teniendo en cuenta ecuación de la energía de deformación (1), y las ecuaciones relacionadas con la energía cinética. La suma de los componentes representa el Lagrangiano de este sistema:

$$L = K_a + K_e + K_r - U \quad (6)$$

Y la densidad lagrangiana tendrá la siguiente forma:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\left[\rho F\dot{v}^2 + \rho J\dot{\phi}^2 - EJ\phi'^2 - GF_s(v' + \phi) + EFu'^2\right] \quad (7)$$

2.2. *Estudio energético*

A los fines de realizar el estudio dinámico de un entramado general, en la Figura 5 a) se muestra un pórtico plano cerrado, referido a un sistema de coordenadas de referencia global X-Y. Se utiliza en el estudio la siguiente nomenclatura:

| | |
|---|---|
| *nb* | Cantidad total de barras |
| *nn* | Número total de nodos |
| *j* | Subíndice que denota la barra, $j = 1, 2, \ldots, nb$ |
| *n* | Subíndice que denota el nodo, $n = 1, 2, \ldots, nn$ |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La numeración de las barras y los nodos puede realizarse arbitrariamente, ya que se ha diseñado un algoritmo que las reenumera convenientemente, para luego realizar un recorrido del pórtico a los fines de la resolución del mismo.

Las características de cada barra son las siguientes:

| | |
|---|---|
| $E_j$ | Módulo de Young de la barra *j* |
| $\rho_j$ | Densidad uniforme de la barra *j* |
| $F_j$ | Área de la barra *j* |
| $J_j$ | Momento de Inercia de la barra *j* |
| $\alpha_j$ | Ángulo entre la barra *j* y el eje de abscisas |
| $\alpha_{j,k}$ | Ángulo relativo entre la barra *j* y la barra *k* |
| $a_j$ | Longitud de la barra *j* |
| *X*-*Y* | Sistema de coordenadas globales |
| $x_j$ | Coordenada local de la barra *j* |

Para el estudio energético se considera, en cada barra *j* un sistema de coordenadas local $x_j$ en donde cada punto, al vibrar, tendrá un desplazamiento transversal $v_j(x_j)$ y un desplazamiento axial $u_j(x_j)$, como se muestra en la Figura 5 b).

En el sistema local de coordenadas, considerando la variable $x_j$ que recorre la barra *j* ($0 \leq x_j \leq a_j$), se considera $u_j(x_j) \geq 0$ si es en la misma dirección que $x_j$, $v_j(x_j) \geq 0$ si es hacia la derecha en un recorrido en la dirección $x_j$.

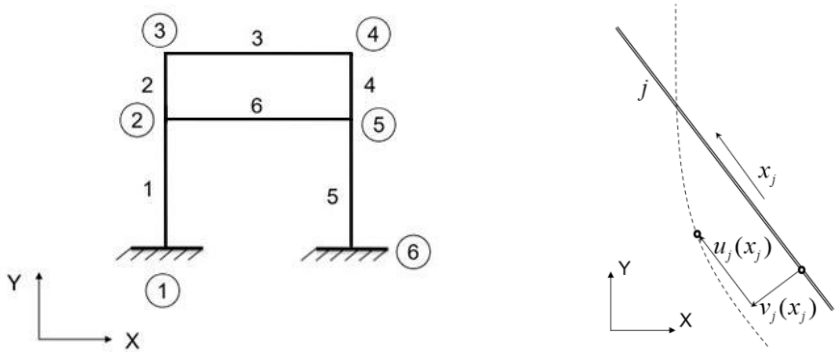



**Figura 5** - Esquema de un entramado con 6 nodos y 6 barras (a), desplazamientos y coordenadas locales de cada barra j (b).

Las energías de deformación U y las cinéticas K serán la suma de la energía de cada una de las barras j:

$$U = \sum_{j=1}^{nb} U_j \quad , \quad K = \sum_{j=1}^{nb} K_j \tag{8}$$

Aplicando el principio de Hamilton:

$$\delta\left(\sum_{j=1}^{nb} U_j - \sum_{j=1}^{nb} K_j\right) = 0 \tag{9}$$

Sustituyendo las ecuaciones (1 a 5) en la ecuación (9) y realizando las variaciones de cada término, agrupando cada elemento y se sacando factor común, la expresión se transforma en tres ecuaciones diferenciales, una para cada elemento.

*2.3 Desarrollo en series de potencia*

Se expresan las funciones de desplazamiento axial $u_j(\xi_j)$ y transversal $v_j(\xi_j)$, de cada barra *j* en series de potencia con **m** términos:

$$v_j(\xi_j) = \sum_{i=0}^{m} A_{j,i}\xi_j^i \quad ; \quad u_j(\xi_j) = \sum_{i=0}^{m} B_{j,i}\xi_j^i \tag{10}$$

Las derivadas, por ejemplo, para $v_j(\xi_j)$ son:

$$v_j'(\xi_j) = \sum_{i=1}^{m} i\, A_{j,i}\xi_j^{i-1} = \sum_{i=0}^{m-1}(i+1)\, A_{j,i+1}\xi_j^i = \sum_{i=0}^{m-1}\psi_{1,i}\, A_{j,i+1}\xi_j^i \tag{11}$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$v_j''(\xi_j) = \sum_{i=2}^{m} i(i-1)\, A_{j,i}\xi_j^{i-2} = \sum_{i=0}^{m-2}(i+2)(i+1)\, A_{j,i+2}\xi_j^{i} = \sum_{i=0}^{m-2}\psi_{2,i}\, A_{j,i+2}\xi_j^{i} \quad (12)$$

$$v_j''''(\xi_j) = \sum_{i=4}^{m} i(i-1)(i-2)(i-3)\, A_{j,i}\xi_j^{i-4} = \sum_{i=0}^{m-4}(i+4)(i+3)(i+2)(i+1)\, A_{j,i+4}\xi_j^{i} = \sum_{i=0}^{m-4}\psi_{4,i}\, A_{j,i+4}\xi_j^{i} \quad (13)$$

Observar que se realiza un pequeño cambio en los índices de las sumatorias a los fines de que todas ellas comiencen en cero, y se define:

$$\psi_{k,i} = (i+1)(i+2)(i+3)\ldots(i+k) = \frac{(i+k)!}{k!} \quad (14)$$

Al reemplazar en las ecuaciones diferenciales $v_j(\xi_j)$ y $u_j(\xi_j)$ con sus correspondientes derivadas expresadas en forma de series de potencias, se obtienen las siguientes recurrencias:

$$A_{j,i+4} = \frac{-\Omega_j^2(-1+\Omega_j^2\beta_j^2\alpha_j^2)A_{j,i} - \Omega_j^2(\beta_j^2+\alpha_j^2)\psi_{2,i}\, A_{j,i+2}}{\psi_{4,i}} \quad (15)$$

$$B_{j,i+2} = -\frac{\Omega_j^2\alpha_j^2\, B_{j,i}}{\psi_{2,i}} \quad (16)$$

Estas ecuaciones son el núcleo central del algoritmo, lo que permite aumentar la precisión de los resultados con solo aumentar la cantidad de elementos de la serie de potencia.

## 3. Resultados

La Tabla 1 muestra las frecuencias de los primeros modos de vibración del pórtico doblemente empotrado de la figura 5a utilizando los siguientes parámetros para cada barra $\chi = 0{,}1;\ E = 2{,}1 \times 10^{11};\ \rho = 7850; F = 0{,}12\,; J = 0{,}0036; G = 7{,}72 \times 10^{10}$.

**Tabla 1.** Frecuencias de los primeros 5 modos de vibración

| | Frecuencias [rad/seg] | | | |
|---|---|---|---|---|
| Modo | m=10 | m=15 | m=20 | m=25 |
| 1 | 88,554 | 88,565 | 88,564 | 88,564 |
| 2 | 565,594 | 605,226 | 605,411 | 605,411 |
| 3 | 615,100 | 878,016 | 882,099 | 881,892 |
| 4 | 703,802 | 996,470 | 1000,700 | 997,55 |
| 5 | 784,832 | 1180,400 | 1177,700 | 1182,2 |

## 4. Conclusiones

La combinación de las series de potencias, el principio de Hamilton y las herramientas computacionales constituye una de las triadas más versátiles y poderosas para abordar problemas complejos en el ámbito físico e ingenieril. Como se observa en la Tabla 1, algunas frecuencias van cambiando al aumentar el número de elementos en la serie de potencias, pero la mayoría tiende a estabilizarse en un valor definido. Esto confirma que, al incrementar el número de términos, se mejora la precisión en la estimación de las frecuencias de resonancia, con la ventaja de que este aumento no supone un cambio en el algoritmo ni la cantidad de incógnitas, solo aumenta el tiempo de ejecución; no obstante, es necesario considerar si la precisión de los cálculos justifica el incremento en el tiempo de cálculo. En comparación con la teoría clásica de Bernoulli–Euler, el método propuesto ofrece una representación más precisa de la dinámica del sistema, especialmente en regímenes donde los supuestos simplificadores de la teoría clásica resultan limitantes. En conjunto, estos enfoques proporcionan un marco robusto para el análisis, la simulación y la optimización de sistemas reales, consolidándose como pilares fundamentales en la investigación científica y el desarrollo tecnológico contemporáneo.

## Referencias Bibliográficas

R. W. CLOUGH 1955 Bull. seism. Sot. Am. 45, 289. Ch the importance of higher modes of vibration in the earthquake response of a tall building

De Rosa M. A., Lippiello M., Armenio G., Biase G. De & Savalli S., (2020) Dynamic analogy between Timoshenko and Euler-Bernoulli beams. *Acta Mechanica*, 231, 4819-4834.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Li X. F., (2008) A unified approach for analyzing static and dynamic behaviors of functionally graded Timoshenko and Euler-Bernoulli beams. *Journal of Sound and Vibration*, 318(4-5), 1210-1229.

Ghorbanpour Arani A. & Niknejad Sh., (2020) Dynamic Stability Analysis of Euler-Bernoulli and Timoshenko Beams Composed of Bi-Directional Functionally Graded Materials, *AUT J. Mech. Eng*., 4(2), 201-214.

Khaji, N., Shafiei, M. & Jalalpour, M. (2009) Closed-form solutions for crack detection problem of Timoshenko beams with various boundary conditions. *Int. J. Mech. Sci*. 51, 667-681.

Negi, Y. K., Balakrishnan, N., & Rao, S. M. (2021). Fast power series solution of large 3-D electrodynamic integral equations for PEC scatterers. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69(12), 8585–8595.

Martín, H. D., Maggi, C., Piovan, M. T., De Rosa, M. A., & Gutbrod, N. M. (2022). "*Exact analytical calculation of natural frequencies and buckling loads of plane frames using power series*". Engineering Structures, 262, 114349.

Martín, H. D., De Rosa, M. A., Pereson, M., & Fantini, S. (2024, octubre 22-24) "*Método intuitivo para el cálculo de entramados planos con reducción en la cantidad de incógnita*s". XVI Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica - CIBIM 24. Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción, Chile.

Wolfram, S. (2010). The Mathematica 8. *Cambridge University Press*, Cambridge.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional**: Venado Tuerto

# Simulación de tránsito en SUMO de intersecciones urbanas como herramienta para la planificación vial

## Traffic simulation in SUMO of urban intersections as a tool for road

Presentación: 30/10/2025

**Sofia Coccolo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
sofiacoccolo20@gmail.com

**Noelia Fladung**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
fladungnoelia@gmail.com

**Julia Heinzen**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
juliheinzen@gmail.com

### Resumen

La creciente complejidad del tránsito exige la aplicación de herramientas tecnológicas que permitan analizar, predecir y optimizar el flujo vehicular en intersecciones urbanas. Este trabajo tiene como objetivo la utilización del software Simulation of Urban MObility (SUMO, por sus siglas en inglés) para modelar intersecciones, reflejando condiciones reales de operación y generando información útil para la toma de decisiones. La metodología consiste en definir la geometría de las intersecciones y añadir flujos vehiculares y peatonales, para luego ser evaluados y añadir propuestas de mejoras. Es posible simular distintos esquemas de control, incluyendo semaforización, cambios de carriles y sentidos de circulación, para así poder comparar alternativas de gestión. Los resultados permiten cuantificar indicadores como colas de espera, posibles colisiones, tiempos de demora, capacidad y niveles de servicio. De esta manera, la simulación se presenta como una herramienta eficaz para identificar problemas, evaluar soluciones y contribuir a una planificación más segura y sostenible del tránsito urbano.

**Palabras clave**: Simulación, Intersecciones urbanas, SUMO.

### Abstract

The increasing complexity of traffic demands the application of technological tools that enable the analysis, prediction, and optimisation of vehicle flow at urban intersections. This study aims to employ the Simulation of Urban MObility software (SUMO) to model intersections, reflecting real operating conditions and generating useful information for decision-making. The methodology consists of defining the geometry of the intersections and incorporating vehicular and pedestrian flows, which are then assessed in order to propose improvements. It is possible to simulate different control schemes, including traffic signalisation, lane changes, and circulation directions, thereby allowing for the comparison of management alternatives. The results make it possible to quantify indicators such as queue lengths, potential collisions, delay times, capacity, and levels of service. In this way, simulation is presented as an effective tool to identify problems, evaluate solutions, and contribute to safer and more sustainable urban traffic planning.

**Keywords:** Traffic simulation, Urban intersections, Road planning.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El crecimiento metropolitano y el incremento del parque automotor generan un aumento sostenido de la congestión en intersecciones urbanas, lo cual repercute de manera negativa en la eficiencia del tránsito, la seguridad vial y el impacto ambiental. La congestión vehicular no solo incrementa los tiempos de viaje, sino que también eleva los niveles de contaminación atmosférica y acústica, al mismo tiempo que aumenta la probabilidad de siniestros viales.

La ingeniería de tránsito dispone actualmente de herramientas de simulación que permiten analizar el comportamiento dinámico del flujo vehicular en escenarios complejos, ofreciendo resultados más precisos que los métodos analíticos tradicionales. Estas metodologías han cobrado relevancia en el marco de políticas internacionales de movilidad sustentable, como el enfoque de “Visión Cero”, que busca reducir a cero las muertes por siniestros viales, y los “Planes de Movilidad Urbana Sostenible” (SUMP, por sus siglas en inglés) aplicados en diversas ciudades del mundo.

En este contexto, la simulación de intersecciones urbanas constituye un recurso fundamental para anticipar conflictos, evaluar alternativas de diseño y mejorar la gestión de la infraestructura vial. Por ejemplo, el estudio “Improving urban intersection safety insights from simulation analysis” analiza la seguridad en las intersecciones urbanas de Sichon, Tailandia, mediante la evaluación de los efectos de modificaciones en la infraestructura utilizando una simulación. En el mismo, se reconoce como crucial la utilización de la misma para la evaluación detallada de diferentes escenarios y la identificación de soluciones efectivas para reducir tanto accidentes como también mejorar el flujo de tráfico.(Chaiwat et al., 2024)

El presente trabajo se enmarca en la necesidad de aplicar dichas herramientas en entornos académicos y profesionales, con el fin de comprender sus alcances y limitaciones, así como de proponer estrategias para la toma de decisiones en la gestión de la movilidad ciudadana.

# 2. Materiales y métodos

*2.1. Software SUMO*

El estudio comprende la utilización del software SUMO (Álvarez López et al., 2025), una herramienta de simulación macroscópica que permite reproducir condiciones reales de circulación en intersecciones urbanas. Se trata de un paquete de simulación de tráfico continuo, altamente portátil y de código abierto, diseñado para gestionar grandes redes viales. Su desarrollo se lleva adelante principalmente por el Instituto de Sistemas de Transporte del Centro Aeroespacial Alemán (DLR), lo que garantiza un soporte científico y técnico de relevancia internacional. (Institute of Transportation Systems, German Aerospace Center, 2025)

SUMO opera mediante un modelo de tiempo discreto, en el cual cada tipo de vehículo es representado de manera distinta, con atributos propios como velocidad y aceleración. El programa incorpora algoritmos de seguimiento vehicular, cambios de carril, interacción con peatones y gestión de prioridades en intersecciones. Entre las principales operaciones que permite se destacan la simulación de planes semafóricos (con fases fijas o adaptativas), la inclusión de transporte público, peatones y ciclistas, así como la evaluación de indicadores como tiempos de demora, longitud de colas, emisiones contaminantes y consumo de combustible. Asimismo, mediante la interfaz TraCI, es posible conectar aplicaciones externas en tiempo real, facilitando el desarrollo de algoritmos de control adaptativo y la integración con otros entornos de programación.

En la práctica, experimentar estrategias de control de tránsito en entornos reales resulta costoso y riesgoso, por lo cual la aplicación de herramientas como SUMO se convierte en un recurso de gran ayuda: ofreciendo un entorno in silico que posibilita diseñar, ensayar y evaluar alternativas de gestión antes de su implementación. Estas capacidades permiten reducir incertidumbres y optimizar la toma de decisiones en materia de planificación y operación vial.

Entre las ventajas más relevantes del software se encuentran: la posibilidad de evaluar medidas de gestión destinadas a reducir la congestión, representar con precisión la topografía urbana (incluyendo intersecciones, edificios, carreteras y puentes), y estimar tiempos y costos de viaje de los usuarios (Guastella et al., 2025). De esta forma, un planificador del transporte puede comparar diversas alternativas de manera eficiente, sin incurrir en costos elevados de material ni de tiempos.

*2.2 Metodología*

La metodología implementada en este trabajo consistirá en relevar la geometría de la intersección a partir de mapas digitales obtenidos del Asistente web de Open Street Map (OSM, por sus siglas en inglés) para SUMO. Posteriormente, se

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

modelará la infraestructura con sus carriles, radios de giro, espacios para estacionamiento y pasos peatonales a través de la herramienta Netedit de SUMO.

Se incorporarán volúmenes representativos de tránsito vehicular y peatonal de distintos rangos horarios. Además, se configurarán planes semafóricos con sus respectivas fases y ciclos de operación, y se realizará un proceso de calibración de parámetros de comportamiento vehicular, como la velocidad, con el fin de reproducir con la mayor fiabilidad posible las condiciones observadas in situ. Los pasos mencionados se encuentran resumidos en la Figura 1

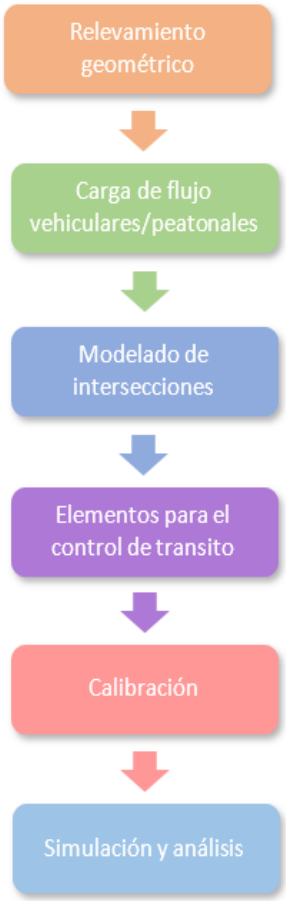



**Figura 1**. Diagrama del proceso.

De este modo, SUMO se emplea no sólo como un entorno de modelado, sino también como una plataforma para evaluar distintas alternativas de gestión, permitiendo validar escenarios y generar información cuantitativa sobre el desempeño de la intersección.

## 3. Resultados y discusión

Los resultados esperados corresponden al análisis y evaluación del desempeño de las intersecciones en función de los volúmenes de tránsito y los esquemas de control aplicados. En escenarios de alta demanda, la simulación permite identificar la formación de colas extensas, problemáticas en la circulación y demoras que superan los niveles aceptables según los criterios del Highway Capacity Manual (HCM, por sus siglas en inglés). En la Figura 2 se muestra como se agrega en el programa el flujo vehicular de la intersección.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

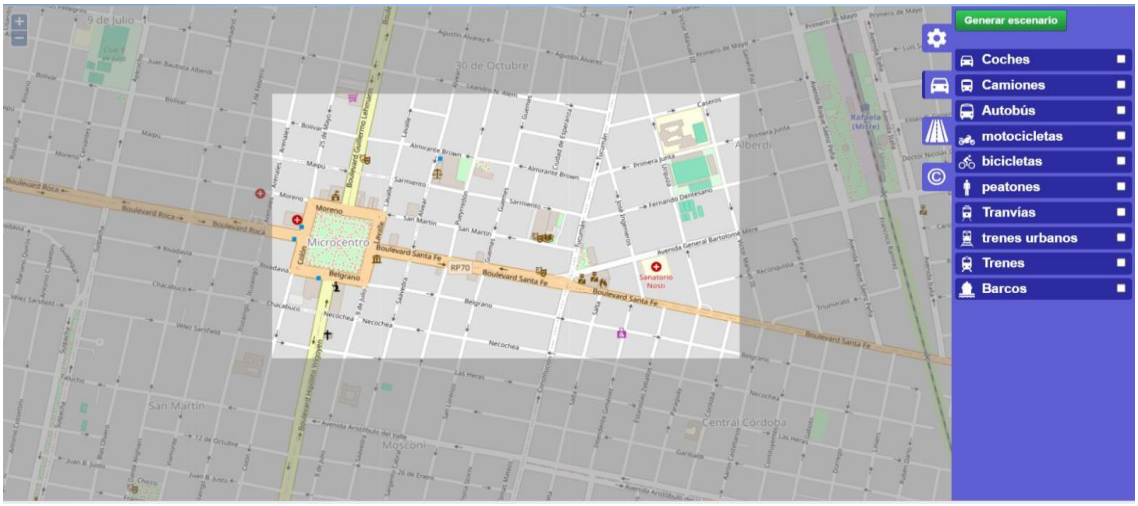



**Figura 2**. Captura de pantalla de modo de exportar zona del tramado urbano a trabajar.

Por otra parte, se prevé que la implementación de modificaciones en los tiempos de ciclo de los semáforos y la incorporación de carriles exclusivos para giros representen mejoras significativas en los tiempos de espera y en el nivel de servicio de la intersección. La capacidad del programa para representar dinámicamente la interacción entre vehículos y peatones aporta una visión más realista, lo que favorece la discusión de alternativas de diseño y operación en entornos urbanos.

La simulación también habilita la proyección de escenarios futuros, considerando el crecimiento vehicular esperado, la integración de transporte público prioritario o la incorporación de ciclovías. Esta capacidad prospectiva constituye una ventaja sustancial frente a los métodos tradicionales, ya que permite anticipar problemas antes de que se materialicen y planificar soluciones sostenibles.

En el marco de la presente investigación, la elección del software SUMO respondió a criterios de conveniencia metodológica. Si bien existen otros programas de simulación de tránsito con funcionalidades avanzadas (por ejemplo, HETEROSIM, SiMTraM), se consideró que SUMO resultaba más adecuado para los fines de este trabajo según lo analizado a partir de la Tabla 1.

Las razones principales radican en su carácter de código abierto y libre acceso, lo que facilita su utilización en entornos académicos sin restricciones de licencias, además de su interfaz intuitiva, que permite un rápido aprendizaje y manejo por parte de los usuarios, con claridad en la interpretación de los resultados, de tal manera que lo convierte en una herramienta accesible incluso para quienes se inician en la simulación de tránsito.

El programa de simulación SUMO dispone de una comunidad activa de desarrolladores y usuarios, lo cual garantiza la disponibilidad de documentación, ejemplos y soporte técnico que complementan su aplicación práctica. En este sentido, la elección de este software no solo responde a criterios de facilidad de uso e interpretación, sino también a su flexibilidad y versatilidad para el modelado de intersecciones urbanas en distintos contextos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| Parámetros | HETEROSIM | SUMO | SiMTraM |
|---|---|---|---|
| Movimiento o movimiento | Menos disciplina en el carril | Disciplina en el carril | Menos disciplina en el carril |
| Red de carreteras | Construida manualmente | Construida manualmente o importada desde mapas de código abierto | Construida manualmente o importada desde mapas de código abierto, las franjas por carril son configurables |
| Descripción del vehículo | Número fijo de categorías de vehículos y los vehículos del mismo tipo tienen los mismos atributos | Se puede añadir una nueva categoría de vehículos y los vehículos del mismo tipo pueden tener diferentes atributos. | Se puede añadir una nueva categoría de vehículos y los vehículos del mismo tipo pueden tener diferentes atributos |
| Descripción de la ruta | La misma ruta para todos los vehículos. para cada vehículo | Ruta personalizada /flujo | Ruta personalizada para cada vehículo/flujo |
| Seguimiento de vehículos y modelo de adelantamiento | Basado en la posición | Basado en carril | Basado en franjas |
| Desventaja en carriles | Funciona para escenarios pequeños | Solo se puede modelar basada tráfico | Errores de tiempo de ejecución al simular escenarios de tráfico grandes |

**Tabla I.** Comparación de simuladores. Adaptada de Table I en (Paten et al., 2016).

Una vez completado, el trabajo permitirá disponer de una herramienta replicable para evaluar intersecciones urbanas en la ciudad de Rafaela y en otras localidades, favoreciendo la toma de decisiones en materia de planificación vial.

Para validar la metodología, se seleccionó como caso de prueba una intersección simple ubicada en la ciudad de Rafaela, conformada por dos calles de doble sentido con un semáforo de tres fases. La geometría fue modelada en SUMO a partir de datos de Open Street Map, incorporando los radios de giro y pasos peatonales.

Se cargaron flujos vehiculares representativos en hora pico (150 vehículos/h en la vía principal y 80 vehículos/h en la secundaria), junto con el cruce de peatones en dos pasos semaforizados. La simulación se ejecutó durante un lapso de 30 minutos, repitiéndose tres escenarios:

- Escenario 1: tiempos de semáforo iguales para ambas calles.
- Escenario 2: prioridad a la vía principal (tiempo verde mayor).
- Escenario 3: incorporación de carril exclusivo para giro a la izquierda.

Los resultados mostraron que en el Escenario 1 se formaron colas de hasta 12 vehículos en la vía principal, con demoras promedio de 65 segundos. En el Escenario 2, la cola máxima se redujo a 7 vehículos y el tiempo promedio de espera descendió a 40 segundos, aunque la vía secundaria presentó mayores demoras. El Escenario 3 evidenció la mejor performance global, con demoras promedio de 30 segundos y reducción del 40 % en los tiempos de giro a la izquierda.

## 4. Conclusiones

La simulación de tránsito en intersecciones urbanas se presenta como una herramienta fundamental para la planificación y toma de decisiones en la gestión de la movilidad ciudadana. Los resultados esperados evidencian que el uso de programas especializados como SUMO permiten identificar problemáticas, evaluar alternativas de solución y optimizar el funcionamiento de la red vial.

El análisis del caso simple permitió comprobar que SUMO no solo reproduce de manera realista el comportamiento del flujo vehicular, sino que también ofrece una base cuantitativa para comparar alternativas de gestión. Los resultados evidenciaron que ajustes relativamente sencillos, como modificar la duración de fases semafóricas o incorporar carriles exclusivos, generan mejoras significativas en la reducción de colas y tiempos de espera. En conclusión, la aplicación práctica de SUMO aporta un sustento empírico a las decisiones de planificación vial. Aunque los resultados presentados corresponden a un escenario simple, demuestran el potencial del software para analizar situaciones más complejas, anticipar conflictos y proponer soluciones.

En términos prácticos, la metodología brinda apoyo tanto a organismos públicos como a profesionales de la ingeniería, favoreciendo una gestión más eficiente, segura y sustentable del tránsito urbano. Como limitación, se reconoce la dependencia del modelo respecto de la calidad de los datos disponibles.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Actualmente, el proyecto se encuentra en una etapa inicial: se ha alcanzado un conocimiento importante del software y de sus herramientas de modelado, lo cual permite plantear y simular diferentes escenarios de circulación. Sin embargo, aún resta avanzar en la selección de una intersección específica dentro del área urbana de estudio y realizar el conteo vehicular in situ para obtener flujos reales de tránsito. Con esta información, podrá ser posible cargar datos precisos al programa y evaluar la intersección bajo distintas alternativas que incluyen la instalación de semáforos, la incorporación o eliminación de carriles, la modificación de radios de giro, el cambio de sentidos de circulación, entre otras opciones que el software permite explorar.

De este modo, el proyecto se encuentra en condiciones de avanzar hacia una fase intermedia de aplicación, en la cual el modelo calibrado permitirá validar hipótesis, analizar problemáticas tanto actuales como posibles a surgir y generar resultados concretos para la optimización del tránsito urbano. Esto garantizará que las conclusiones no solo tengan un sustento teórico, sino también un respaldo empírico derivado del análisis de un caso real. Ya se está en contacto con la Municipalidad de Rafaela, para el planteo desde el observatorio de seguridad vial de la ciudad para relevar las zonas más conflictivas desde el punto de vista de los accidentes de tránsito y simular las diferentes alternativas de soluciones para cada caso, elevando estas conclusiones al municipio como una herramienta más para futuras decisiones en cuanto a seguridad vial se trate.

## Agradecimientos

Se agradece a los directores Mg. Ing. Eduardo Monier y Mg. Ing. Sergio Pairone por el apoyo científico brindado, y al Grupo de Investigación de Aplicaciones en Métodos Numéricos en Ciencia e Ingeniería (GIAMNCI) por el acompañamiento institucional en el desarrollo de este trabajo.

## Referencias bibliográficas

Álvarez López, P., Banse, A., Barthauer, M., Behrisch, M., Couéraud, B., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Nippold, R., Wagner, P. (2025). Simulación de Movilidad Urbana (SUMO) (1.24.0). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.13907886

Guastella, D. A., Montero-Porras, E., Morales-Hernández, A., & Bontempi, G. (2025). Traffic modeling with SUMO: A tutorial [Preprint]. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.05982

Institute of Transportation Systems, German Aerospace Center. (2025). SUMO documentation. In Simulation of Urban Mobility (SUMO). https://sumo.dlr.de/docs/index.html

Patel, V., Chaturvedi, M., Srivastava, S. (2016) Comparison of sumo and simtram for Indian traffic scenario representation. *Transportation Research Procedia*, 17, pp. 400–407. doi:10.1016/j.trpro.2016.11.081.

Chaiwat Y., Piyapong S., Thaksakorn P., Chollada K., Paramet L., Atsushi Fukuda (2024) Improving urban intersection safety insights from simulation analysis. IATSS Research. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0386111224000530

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelado y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación - estudiante de grado
**Facultad Regional:** Reconquista

# Control predictivo basado en modelo como sistema de gestión de energía en microrredes

## Model Predictive Control as energy management system in microgrids

Presentación 30/10/2025

**Ezequiel Robert**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control (GIPEC), Reconquista, Santa Fe, Argentina
erobert3122@comunidad.frrq.utn.edu.ar

**Franco Germán Guardiani**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control (GIPEC), Reconquista, Santa Fe, Argentina
fguardiani2780@comunidad.frrq.utn.edu.ar

**Macarena Caballero**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control (GIPEC), Reconquista, Santa Fe, Argentina
mcaballero902480@comunidad.frrq.utn.edu.ar

**Melani Faulkner**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control (GIPEC), Reconquista, Santa Fe, Argentina
mfaulkner2699@comunidad.frrq.utn.edu.ar

### Resumen

El objetivo de este trabajo es proponer un Sistema de Gestión de Energía (EMS) para la implementación en una microrred estándar en una zona residencial. La energía renovable se obtiene a través de paneles solares, se almacena en baterías de iones de litio y abastece una demanda genérica acorde a un perfil residencial. La microrred se conecta a la red permitiendo abastecer la demanda de forma conjunta o alternada con el banco de baterías. El EMS se diseña mediante Control Predictivo basado en Modelos, considerado los costos de los diferentes componentes de la microrred. Se utiliza el lenguaje Python para programar el modelo y generar una simulación. Como resultado, se obtuvieron dos gráficas que describen y verifican el comportamiento del sistema en tiempo real en función de las restricciones operacionales establecidas.

**Palabras clave:** Microrred, Sistema de Gestión de Energía, Control Predictivo basado en Modelo, Simulación

### Abstract

The objective of this work is to propose an Energy Management System (EMS) for the implementation in a standard microgrid in a residential area. Renewable energy is obtained through solar panels, stored in lithium-ion batteries, and supplies a generic demand in line with a residential profile. The microgrid is connected to the grid, allowing it to supply demand jointly or alternately with the battery bank. The EMS is designed using Model Predictive Control, considering the costs of the different components of the microgrid. The Python language is used to program the model and generate a simulation. As a result, two graphs were obtained that describe and verify the behavior of the system in real time based on the established operational constraints.

**Keywords:** Microgrid, Energy Management System, Model-Based Predictive Control, Simulation

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El incremento de la demanda de la energía eléctrica a nivel global, en contraposición a los problemas derivados del consumo dependiente y la explotación de los combustibles fósiles -indispensables para la generación de energía- ha impulsado a la comunidad científica a investigar y desarrollar una matriz energética basada en Recursos de Energía Renovables. Sin embargo, el comportamiento errático que poseen supone un desafío para la gestión de la energía. Como una solución admisible, surgió el concepto de microrred (Lasseter, 2001) que es un sistema eléctrico con la capacidad de gestionar sus recursos, coexistiendo fuentes de generación eléctrica, elementos para su almacenamiento y una demanda de energía, pudiendo operar conectada a una red o de forma aislada permitiendo asegurar la calidad y la continuidad del servicio debido a su naturaleza adaptativa.

La propuesta de este trabajo consiste en implementar y simular el Control Predictivo por Modelo Económico (EMPCT) (Rawlings et al., 2012) como sistema de gestión de energía (EMS), pudiendo controlar el flujo energético entre los distintos elementos de la microrred optimizando sus parámetros, considerando los costos de energía y la vida útil del sistema de almacenamiento. Además, el uso de esta estrategia permite tener en cuenta distintas restricciones sobre las variables de interés.

El contenido del artículo se organiza de la siguiente forma: en la Sección 2 se construye el modelo en espacio de estados para el controlador y se desarrolla el problema de EMPCT; en la Sección 3 se presentan los resultados de la simulación del problema, mientras que en la Sección 4 se dan las conclusiones y se enuncian futuras líneas de investigación.

# 2. Metodología

## 2.1. *Modelo del sistema de control*

La microrred representa un nodo donde se conectan los recursos, renovables o no renovables, que serán controlados y optimizados en tiempo real con el objetivo de satisfacer la demanda, manteniendo la calidad y la continuidad del suministro de energía. Además, en una configuración de microrred general se encuentran conectados los sistemas de almacenamiento, la red eléctrica, otra microrred y, por último, la demanda. La conexión con la red eléctrica puede no estar contemplada; sin embargo, debe garantizarse un suministro suficiente de recursos renovables para cubrir la potencia demandada.

El EMS es el encargado de relacionar todas estas variables y tomar decisiones en tiempo real, teniendo en cuenta en los valores de carga de los sistemas de almacenamiento y las predicciones sobre las perturbaciones del sistema. Por lo tanto, se propone un modelo lineal de tiempo discreto en espacio de estados para ser utilizado por el EMS:

$$x_{k+1} = A\,x_k + B\,u_k \tag{1.a}$$

$$B_u\,u_k + E_w\,w_k = 0 \tag{1.b}$$

siendo $x_k \in R^{n_x}$ y $u_k \in R^{n_u}$ los estados y las variables manipuladas, $w_k \in R^{n_w}$ las perturbaciones, mientras que A $\in R^{n_x \times n_x}$, B $\in R^{n_x \times n_x}$, $B_u \in R^{1 \times n_x}$ y $E_w \in R^{1 \times n_x}$ son matrices numéricas. La ecuación (1.a) define el comportamiento de los sistemas de almacenamiento y la (1.b) representa el balance energético del nodo.

Como sistema de almacenamiento para la microrred, se considera apropiado utilizar baterías debido a su buena capacidad de almacenamiento que permite suministrar energía por largos períodos de tiempo. Sin embargo, tienen la desventaja de que no toleran bien las fluctuaciones bruscas de carga, como los picos de corriente en el arranque de motores. Para gestionar este recurso es necesario conocer el estado de carga $(soc)$ de la batería para mantenerlo en un rango óptimo y, así, maximizar su vida útil. La dinámica de una batería se determina por:

$$soc_{k+1} = soc_k + \frac{\eta^*_{bat}\,T}{C_{bat}} P_{bat,k} \tag{2}$$

siendo $T$ el tiempo de muestreo, $C_{bat}$ la capacidad nominal de almacenamiento de la batería y $P_{bat}$ la potencia asociada a la carga o descarga. El rendimiento $\eta^*_{bat}$ depende si la batería está cargando o descargado, pudiendo tomar los siguientes valores si la energía entra o sale del nodo:

$$\eta^*_{bat} = \begin{cases} \eta_{bat} & si\ \ P_{bat,k} > 0\ \ (carga), \\ -\frac{1}{\eta_{bat}} & si\ \ P_{bat,k} < 0\ \ (descarga). \end{cases} \tag{3}$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

*2.2. Controlador EMPCT*

Un Controlador Predictivo Económico basado en Modelo para el seguimiento de un criterio económico variable (EMPCT) (Ferramosca et al., 2014) resuelve en cada periodo de muestreo un problema de optimización compuesto por un funcional de costo $V_N$ y sujeto a restricciones sobre las variables que definen la dinámica del sistema.

En el funcional de costo $V_N$ se tiene en cuenta la función de *costo económico* que considera el criterio económico a optimizar (para el caso de una microrred, por ejemplo, los precios de compra y venta de energía, etc). El *costo de etapa* tiene en cuenta la dinámica del sistema, es decir, se agregan las restricciones que establecen los límites de la evolución en las variables manipuladas y en las entradas y, por último, una penalización por *costo de offset* que restringe la distancia entre el punto de equilibrio óptimo deseado $x_e$ y $x_{N-1}$ (Alarcón et al., 2022).

$$V_N(x_k, C_{e,k}; u_k) = \ell_{eco}(x_k - x_{N-1} + x_e, u_k - u_{N-1} + u_e, c_{e,k}) + ||x_k - x_{N-1}||_Q^2 + ||u_k - u_{N-1}||_R^2 + ||x_{N-1} - x_e||_F^2 \quad (4)$$

El problema de optimización se resuelve minimizando el funcional de costo obteniendo las $N-1$ (siendo N el horizonte de control) acciones de control en cada tiempo de muestreo $T$ establecido, siendo $x_k$ y $u_k$ las predicciones para los estados y las entradas realizadas en el instante de tiempo $k$ y $C_{e,k}$ el parámetro económico variable.

$$\min_u \sum_{i=1}^{N-1} V_N(x_k, C_{e,k}; \boldsymbol{u}), \quad (5)$$

sujeto a las restricciones sobre los estados y acciones de control del sistema. En cada instante de tiempo, se genera $N-1$ acciones de control en las entradas, de las cuales únicamente la primera es aplicada al sistema y las demás se descartan.

El funcional de costo requiere información previa sobre un punto equilibrio óptimo $(x_e, u_e)$. Este se calcula utilizando un optimizador en tiempo real (RTO), este punto le provee al EMPCT una referencia óptima a la cual el controlador debe guiar al sistema (Alarcón et al., 2022).

$$(x_e, u_e) = arg \min_{x,u} \ \ell_{eco}(x_k, u_k, c_{e,k}) \quad (6)$$

2.3. Formulación del EMPCT sobre la microrred

Para formular el EMPCT apto para el seguimiento de un criterio económico variable como EMS, se propone una microrred con la estructura mostrada en la Figura 1. Esta cuenta con generación renovable a través un arreglo de paneles solares, un sistema de almacenamiento por medio de baterías iones de litio y opera conectada a una red eléctrica. El perfil de la demanda de la carga residencial es uno genérico supuesto para la implementación del controlador. La barra horizontal representa el nodo de la microrred, donde están conectados todos los componentes que absorben o entregan energía.

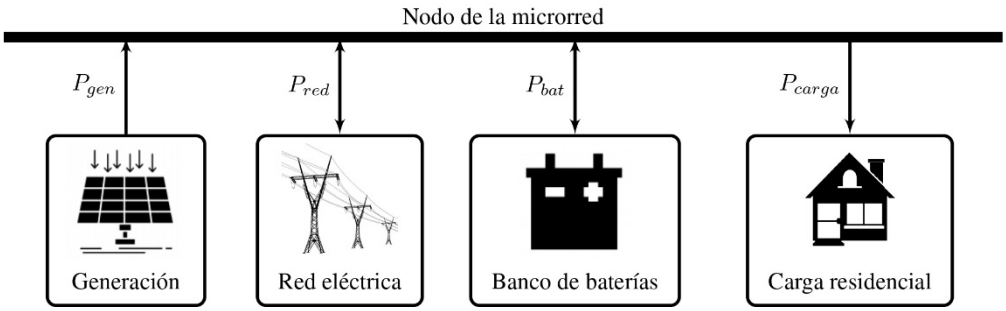



**Figura 1.** Esquema de la microrred propuesta. Donde $P_{gen}$: potencia generada por los paneles solares; $P_{red}$: potencia intercambiada con la red eléctrica; $P_{bat}$: potencia intercambiada con el banco de baterías; $P_{carga}$: potencia consumida;

Se considera como potencia de generación instalada un total de 3 [kW]. En cuanto al banco de baterías, la capacidad de este es de $C_{bat} = 20000$[Wh], con un rendimiento $\eta_{bat} = 0.96$, y el costo de reposición de este es de $C_{bat} = \$31.294$. El

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

controlador decide si comprar, vender o no utilizar energía de la red eléctrica. Se considera como parámetro económico $C_{e,k}$ un costo de energía variable: el cual se divide en tres rangos horarios diarios. Este corresponde a *Horas pico* [18-23 h] = 0.2, *Horas valle* [23-06 h] = 0.08 y *Resto* [06-18 h] = 0.12 [$/kWh]. Finalmente, el rendimiento del flujo de energía a través del nodo (inversor = nodo microrred) se debe considerar. Su valor es $\eta_{inv} = 0.95$, y dependiendo si la potencia $P$ entra o sale del nodo:

$$\eta_{inv}^{*} = \begin{cases} \eta_{inv} & si\ \ P > 0\ \ (entra\ potencia), \\ \dfrac{-1}{\eta_{inv}} & si\ \ P < 0\ \ (sale\ potencia). \end{cases} \tag{7}$$

Teniendo en cuenta el sistema descripto y las ecuaciones (1.a) y (1.b), el vector $x_k = [soc_k]$ representa el estado actual del sistema (nivel de carga del banco de baterías), $u_k = \begin{bmatrix} P_{bat,k} & P_{red,k} \end{bmatrix}^T$ representa las variables manipuladas, es decir, potencia intercambiada con el banco de baterías o la red eléctrica y finalmente, $w_k = \begin{bmatrix} P_{gen,k} & P_{carga,k} \end{bmatrix}^T$ son las perturbaciones del sistema (potencia generada y consumida).

$$x_{k+1} = [1]\,[soc_k] + \begin{bmatrix} -\dfrac{\eta_{bat}^{*}\,T}{C_{bat}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{bat,k} \\ P_{red,k} \end{bmatrix} \tag{8.a}$$

$$\begin{bmatrix} \eta_{inv}^{*} & \eta_{inv}^{*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{bat,k} \\ P_{red,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_{inv} & -\dfrac{1}{\eta_{inv}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{gen,k} \\ P_{carga,k} \end{bmatrix} = 0 \tag{8.b}$$

Se imponen restricciones sobre el estado de la batería (*soc*), que puede fluctuar entre un 30% y 80% de su capacidad nominal, mientras que la potencia de carga o descarga no debe pasar los 2400 [W]. En cuanto al flujo de potencia de la red, se puede vender una potencia máxima de 3000 [W] y para la compra un máximo de 4000 [W].

Para la batería que intercambia energía de forma bidireccional, el costo se compone por un término de amortización y un término de degradación. El primero considera el valor de reposición de la batería $c_{bat}$ y su capacidad de almacenamiento nominal $C_{bat}$, mientras que el segundo busca minimizar su ciclo de envejecimiento, penalizando con un término cuadrático un valor de potencia cercano a su límite de funcionamiento. Para la red se considera el costo de intercambio de energía.

$$\ell_{eco}(u_k, c_{e,k}) = \left[\frac{c_{bat}\,T}{C_{bat}} \cdot P_{bat,k} + \left(\frac{P_{bat,k}}{P_{nom,bat}}\right)^2\right] \lambda_{bat} + \left(\frac{c_{e,k}\,T}{3600} \cdot P_{red,k}\right) \lambda_{red} \tag{9}$$

En la Tabla 1 se muestran los valores seleccionados para los parámetros del funcional de costo $V_N$. Las primeras dos constantes definen el comportamiento del costo económico; en este caso, se le da más importancia a minimizar el costo de la compra/venta de energía utilizando una ponderación mayor. Además, se especifican aleatoriamente las matrices que determinan la dinámica del sistema.

**Tabla 1.** Ponderaciones del funcional de costo.

| Parámetro | Descripción | Valor |
|---|---|---|
| $\lambda red$ | Intercambio de energía con la red | 100 |
| $\lambda bat$ | Baterías de la microrred | 20 |
| $R$ | Acciones de control | *diag* (2,15) |
| $Q$ | Variables de estado | *diag* (5,5,5,5) |
| $C$ | Variaciones abruptas del soc | *diag* (10,10,10,10) |
| $F$ | Costo de offset | *diag* (25,25,25,25) |

## 3. Simulación y Resultados

### *3.1. Simulación*

Para respaldar la factibilidad matemática de este controlador, se realizó una simulación. La cual se cargó un perfil típico de generación y consumo, y se analizaron las acciones de control realizadas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La simulación se realizó con ayuda del lenguaje de programación Python 3.11.1, el cual se modeló el sistema, el optimizador y el funcional de costo descripto anteriormente. Utilizando la herramienta CasADi (Andersson et al., 2019) se resolvió el problema de optimización, para calcular las acciones de control y el estado de la batería. La Tabla 2 muestra los parámetros de la simulación.

**Tabla 2**. Características de simulación

| Parámetro | Descripción | Valor |
|---|---|---|
| T_sim | Tiempo de simulación | 24h |
| T | Tiempo de muestreo | 300s |
| Tot | Total de muestras | 288 |
| N | Horizonte de control | 95 |

3.2. Resultados

Los resultados de la simulación se observan en la Figura 2, donde en el grafico superior se muestran las variables manipuladas elegidas por el controlador y las perturbaciones; mientras que en el inferior aparece el estado de carga para las baterías de iones de litio.

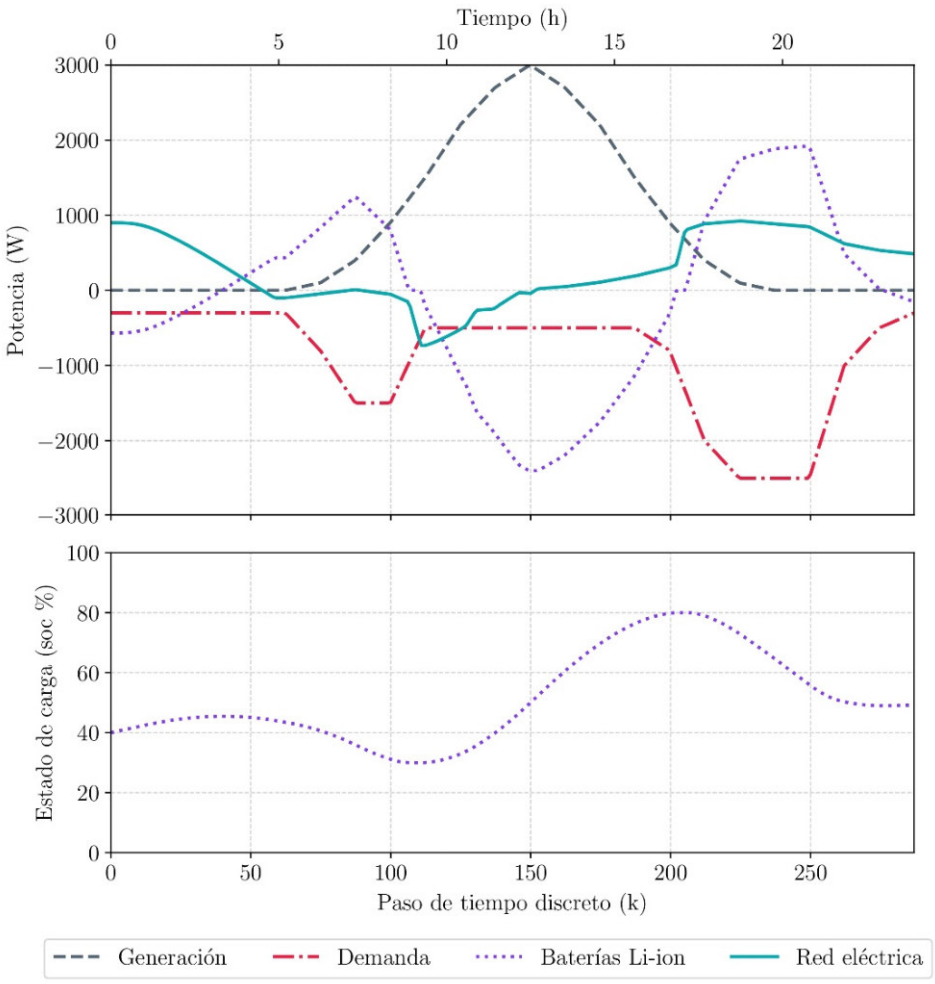



**Figura 2.** Resultados de la simulación.

En un primer análisis, se observa que el controlador utiliza energía de la batería y generación para compensar la carga, y simultáneamente vende energía a la red (primer pico de consumo entre 5h y 10h). Cuando el nivel de carga de la batería llega al 30%, donde el flujo de potencia cambia de positivo a negativo, el controlador comienza a cargar la batería hasta una tasa máxima de 2400[W] (restricción impuesta) aprovechando el pico de generación, la carga se detiene cuando el nivel alcanza el 80%.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Ante un aumento repentino en la demanda de carga, el controlador prioriza el uso de la red eléctrica para compensar la potencia. Esta acción protege la batería, evitando descargas bruscas y manteniendo un flujo de energía más gradual. Finalmente, durante el segundo pico de demanda de energía (aproximadamente 20h), el controlador prioriza la energía almacenada en la batería por sobre la de la red, respondiendo a la ponderación mayor que se dio al uso de la red. Además, el proceso de carga/descarga para las baterías se realiza respetando los límites nominales de sus variables y con una dinámica suave en la evolución de su estado de carga, lo cual minimiza el proceso de degradación.

Se aprecia un correcto funcionamiento del sistema propuesto como EMS, manteniendo siempre todas las variables dentro de los rangos fijados por las restricciones y logrando cumplir con los objetivos de gestión.

## 4. Conclusiones

En este trabajo, se implementó un controlador sobre una microrred aplicando una estrategia de EMPCT como EMS. De esta forma, se logró gestionar de manera óptima los recursos y elementos a disposición, considerando restricciones tanto económicas como del diseño del sistema. La simulación realizada en Python, por otra parte, fue satisfactoria para el escenario de generación y demanda supuesto, demostrando la viabilidad de la estrategia para aplicaciones reales.

Como futuras líneas de trabajo, se propone expandir la microrred agregando elementos como estaciones de carga de vehículos eléctricos, puestos de generación y almacenamiento de hidrógeno; para su posterior conversión en energía eléctrica, y el uso de generación eólica como alternativa a la ausencia de radiación solar.

También, es posible aplicar aprendizaje maquinal para predecir el comportamiento de perturbaciones en el consumo y la generación de los paneles fotovoltaicos.

## Referencias bibliográficas

Alarcón, M. A., Alarcón, R. G., Gonzalez, A. H., & Ferramosca, A. (2022). Economic model predictive control for energy management of microgrid connected to the main electrical grind. *Journal of Process Control*(117), 40-51.

Andersson, J. A., Gillis, J., Horn, G., Rawlings, J. B., & Diehl, M. (2019). CasADi – A software framework for nonlinear optimization and optimal control. *Mathematical Programming Computation, 1*(11), 1-36.

Ferramosca, A., Limón, D., & Camacho, E. (2014). Economic MPC for a changing economic criterion for linear systems. *IEEE Trans. Automat. Control, 59*(10), 2657-2667.

Lasseter, B. (2001). Microgrids [distributed power generation]. *IEEE, power engineering society winter meeting*, 146-149.

Rawlings, J., Angeli, D., & Bates, C. (2012). Fundamentals of economic model predictive control. *Conference on Decision and Control, IEEE*(51), 3851-3861.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo – estudiante de grado
**Facultad Regional:** Reconquista

# Identificación de objetos tipo industrial por medio de análisis de imágenes con técnicas de aprendizaje profundo

## Identification of industrial objects through image analysis using deep learning techniques

Presentación 30/10/2025

**Melani Fátima Faulkner**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control, Reconquista, Santa Fe, Argentina.
mfaulkner2699@comunidad.frrq.utn.edu.ar

### Resumen

La identificación de imágenes en el ámbito industrial se ha vuelto una herramienta esencial para realizar inspecciones visuales rápidas y precisas en la línea de producción. Permite reemplazar el trabajo de las personas en tareas repetitivas, mejorando la calidad del producto y reduciendo costos a largo plazo. El objetivo de este trabajo es proponer un sistema embebido de clasificación de imágenes de objetos tipo industrial, a través de plataformas de hardware sencillo como Raspberry Pi. Estos sistemas son económicos y versátiles, lo que facilita implementar una red neuronal convolucional (CNN) con alta exactitud y eficiencia. Además, se explican las técnicas de aumento de datos aplicadas para incrementar la robustez y la precisión del modelo. El desarrollo se realizó en Python y generó como resultado una gráfica que registra la evolución de la exactitud durante el proceso de entrenamiento y un programa de prueba para comprobar los resultados de la predicción.

**Palabras clave:** sistema embebido, red neuronal convolucional, EfficientNet, Raspberry Pi

### Abstract

Image identification in the industrial field has become an essential tool for performing quick and accurate visual inspections on the production line. It allows the replacement of human labor in repetitive tasks, improving product quality and reducing long-term costs. The objective of this work is to propose an embedded system for classifying images of industrial objects, using simple hardware platforms such as Raspberry Pi. These systems are economical and versatile, making it easy to implement a convolutional neural network (CNN) with high accuracy and efficiency. In addition, the data augmentation techniques applied to increase the robustness and accuracy of the model are explained. The development was carried out in Python and resulted in a graph that records the evolution of accuracy during the training process and a test program to verify the prediction results.

**Keywords:** embedded system, convolutional neural network, EfficientNet, Raspberry Pi

## 1. Introducción

Los sistemas embebidos son dispositivos electrónicos diseñados para cumplir funciones específicas con recursos de procesamiento limitados. Estas restricciones de hardware, en términos de cómputo y memoria, exigen aplicaciones de clasificación de objetos eficientes. Sin embargo, pese a estas limitaciones, constituyen una solución económica y versátil para diversas aplicaciones industriales. En particular, mediante la implementación de plataformas como la Raspberry Pi (Halfacree, 2020) con una cámara integrada, es posible desarrollar aplicaciones de visión artificial con alta exactitud y bajo costo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La propuesta de este trabajo consiste en el desarrollo de una aplicación académica basada en un sistema embebido que clasifique imágenes de objetos tipo industrial transportados en una cinta modelo ubicada en el laboratorio de automatización de la universidad. Este proyecto busca introducir a los participantes en el desarrollo de pipelines de AIoT “on the edge” para sistemas industriales.

Los pipelines de AIoT “on the edge” son flujos de procesamiento que integran dispositivos de Internet de las Cosas con algoritmos de inteligencia artificial. Estos ejecutan la captura de datos, su análisis y la generación de decisiones directamente sin depender de servidores externos.

El contenido del artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe la toma de datos, las técnicas empleadas para el procesamiento de imágenes y el entrenamiento del modelo; en la Sección 3 se presentan los resultados del entrenamiento mediante una gráfica y un programa de prueba. Finalmente, en la Sección 4 se exponen las conclusiones y se plantean futuras líneas de investigación.

## 2. Metodología

La Figura 1 muestra un resumen esquemático de las principales etapas del desarrollo. En primer lugar, se construyó la base de datos utilizando una Raspberry Pi 4 MB y una PiCamera. Con estos dispositivos se capturaron imágenes de los potes en distintas posiciones. Estas imágenes se clasificaron en dos categorías, fueron sometidas a aumento de datos (*data-augmentation*) y se dividieron en conjuntos de entrenamiento y validación.

**Figura 1**. Esquemático del desarrollo del sistema de clasificación de potes

Posteriormente, se entrenó un modelo basado en EfficientNetB0, aplicando las técnicas de aprendizaje por transferencia (*transfer learning*) y ajuste fino (*fine tuning*) en las capas superiores. Este procedimiento se realiza a través de un aprendizaje supervisado ya que el modelo aprende a partir de ejemplos previamente clasificados.

En la tercera etapa, se implementó un programa de prueba con una interfaz gráfica para verificar el funcionamiento del modelo con imágenes cargadas manualmente. Esta herramienta se utilizó como paso previo de verificación antes de su integración con el hardware.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Finalmente, se definió la puesta en marcha del sistema sobre la cinta transportadora. Esta etapa incluyó la detección de potes mediante sensor infrarrojo, captura automática de fotografías, predicción del modelo y comunicación de resultados hacia el PLC en un esquema cliente-servidor. Las señales se replicaron en un conjunto de LEDs conectados a la Raspberry Pi, lo que facilitó la visualización de los eventos.

*2.1. Diseño del Soporte*

Se construyó un único soporte para los dispositivos *Raspberry Pi 4 Modelo B* y *PiCamera Rev. 1.3*. El diseño de basó en planos oficiales del fabricante y consideró los siguientes criterios: (i) Ranuras de ventilación en la parte inferior para la Raspberry Pi; (ii) El soporte de la cámara funciona como una "tarjeta" que se inserta en el soporte inferior, lo que facilita su manipulación; (iii) Una ranura en la parte superior para la salida de la cámara; (iv) Una tapa para proteger el cuerpo de la cámara.

En las Figuras 2 y 3 se muestra el ensamblaje en Autodesk Inventor y el soporte impreso en 2D ya montado en la Raspberry Pi.

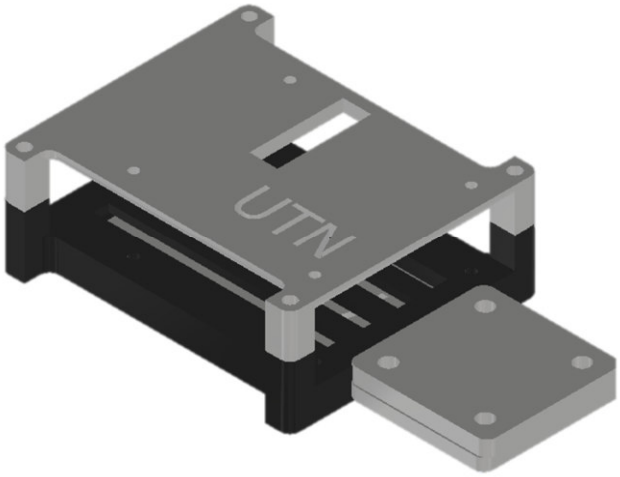



**Figura 2**. Ensamble del soporte de Raspberry Pi en Autodesk Inventor

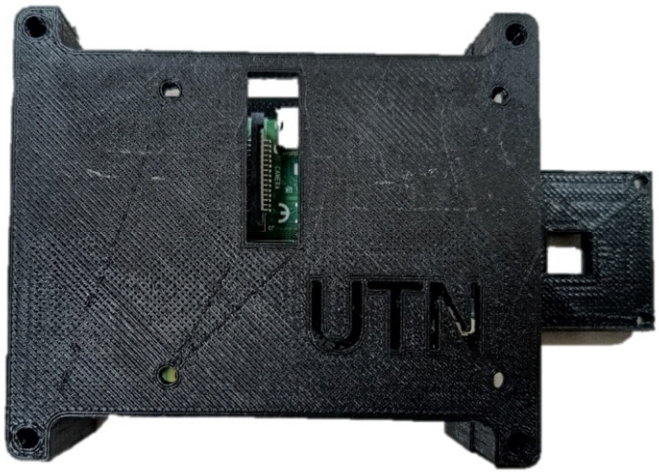



**Figura 3**. Soporte realizado en Impresión 3

2.2. *Base de datos*

El sistema clasifica potes de helado transportados en la cinta en dos categorías: "bien posicionados" o "mal posicionados". Para pasar al proceso de tapado, los potes deben estar centrados en la banda, con su boca hacia arriba y sin inclinaciones. Esta condición asegura que puedan ingresar al mecanismo de tapado correctamente.

Para crear la base de datos se capturaron 158 fotografías con un teléfono celular, divididas en las dos categorías mencionadas. Posteriormente, se aplicó la técnica de aumento de datos (Majida Kazmi, 2023), que consiste en ampliar artificialmente la cantidad de imágenes para el entrenamiento. El procedimiento se programó en Python 3.9.13 con la librería de TensorFlow.

En total, se aplicaron seis transformaciones aleatorias: cambios de iluminación, ruido, contraste, saturación, tonalidad y rotación. Las imágenes generadas se guardaron junto a las originales, lo que expandió la base a 948 fotografías.

La aplicación de esta técnica previene el sobreajuste (*overfitting*) del modelo. Esto se debe al incremento en la cantidad y variabilidad de los datos. Además, las transformaciones aumentan la robustez del modelo, haciéndolo menos sensible a las imperfecciones en las fotografías.

2.3. *Selección del modelo de entrenamiento*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Las redes neuronales convolucionales (CNN) (Zhao y otros, 2024) son un tipo de arquitectura de aprendizaje profundo diseñada para procesar datos en forma de imágenes. Estas utilizan capas convolucionales que extraen las características o patrones de los datos de entrada, como bordes, texturas o formas.

En modelos anteriores, los hiperparámetros de una red neuronal (ancho, profundidad y resolución) se escalaban de forma independiente para aumentar la exactitud, lo que incrementaba el costo computacional. Con EfficientNet (Mingxing Tan, 2019) se descubrió que escalar los tres parámetros de forma balanceada ofrece una mayor precisión con un costo similar. Este método se denominó escalado compuesto (*compound scaling method*).

EfficientNetB0 es la primera versión de esta familia. Su arquitectura combina capas de convolución inicial, bloques MBConv con conexiones residuales y convoluciones separables. Finalmente, incluye capas de batch nomalization, average pooling y una densa de clasificación.

En este proyecto se utilizó el aprendizaje por transferencia congelando las capas iniciales y medias para conservar las características generales de la red. Posteriormente, se aplicó la técnica de ajuste fino en las capas superiores, donde se ajustaron los pesos para especializar el modelo en la clasificación de potes de helado. Estas ventajas lo convierten en una opción adecuada para dispositivos de recursos limitados, como la Raspberry Pi, donde es necesario optimizar tanto la precisión del modelo como el consumo computacional.

### *2.4. Entrenamiento del modelo*

El entrenamiento del modelo se llevó a cabo utilizando las librerías PIL y TensorFlow en Python. Dado que las imágenes provenían de un dispositivo móvil, fue necesario eliminar la información contenida en el *Exchangeable Image Format (EXIF)*, que contiene metadatos sobre la orientación de la imagen. Esta información provocaba que, al cargar el conjunto de datos, las imágenes se rotaran automáticamente, generando problemas durante el proceso de entrenamiento.

Una vez corregido este inconveniente, se procedió a cargar la base de datos correspondiente a cada categoría, reservando un 20 % de las muestras para el proceso de validación. Antes del entrenamiento, se realizó una verificación visual de las primeras nueve imágenes de la base de datos para corroborar que la orientación se corrigió correctamente y se definió una función de aumento de datos en memoria (*on-the-fly data augmentation*) lo que permitió incrementar la variabilidad de las muestras sin necesidad de generar ni almacenar nuevas imágenes en las carpetas.

Los datos de entrada son redimensionados a una resolución de 224x224 píxeles, requerida por el modelo seleccionado, y se procesaron en lotes (*batches*). Para mejorar la eficiencia del entrenamiento, se implementaron técnicas de procesamiento paralelo de las imágenes, almacenamiento en caché y precarga de lotes en segundo plano, lo que aceleró significativamente el entrenamiento y optimizó el uso de memoria.

Se aplicó aprendizaje por transferencia con pesos preentrenados y ajuste fino en las capas superiores. El entrenamiento se ejecutó durante 10 épocas *(epochs)*. Finalmente, se guardaron los pesos del modelo para reutilizarlos en pruebas posteriores.

### *2.5. Programa de prueba para el modelo*

Previo a la puesta en marcha del sistema en la cinta transportadora, se desarrolló un programa de prueba con el paquete Tkinter que permite realizar el testeo del modelo con fotografías de los potes. La interfaz se muestra en la Figura 4.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

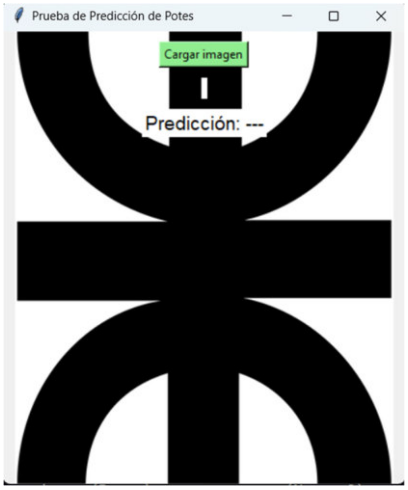



**Figura 4**. Interfaz de prueba para el modelo

Esta permite seleccionar imágenes almacenadas, mostrar la fotografía y visualizar al resultado de la clasificación, lo que facilitó verificar los pesos entrenados, el preprocesamiento de imágenes y la coherencia entre la fotografía y la etiqueta resultante de la predicción.

Una vez validado el funcionamiento del sistema de predicción, este puede trasladarse a la Raspberry Pi e integrarse con la cinta transportadora.

## 3. Resultados

Durante el entrenamiento, se registró la evolución de la exactitud tanto en el conjunto de entrenamiento en cada época. En la Figura 5 se visualiza la gráfica resultante.

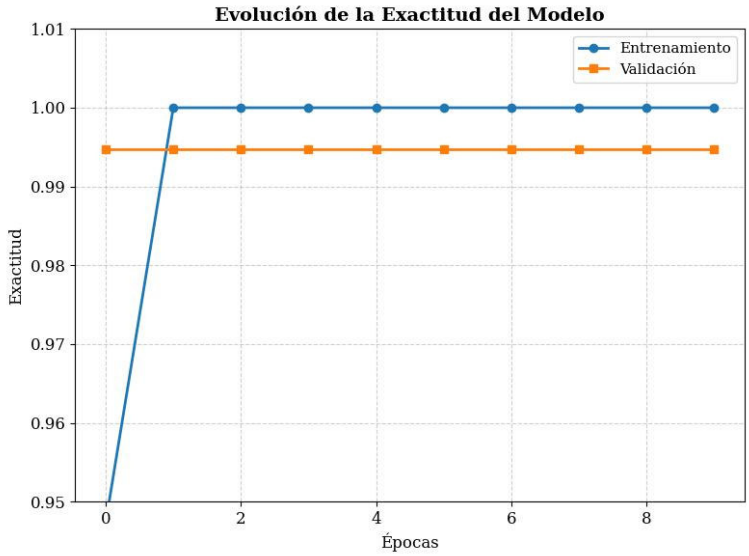



**Figura 5**. Gráfica de exactitud por época de entrenamiento

Durante el entrenamiento, el modelo alcanzó una exactitud cercana al 100% desde las primeras épocas, manteniéndose estable en ese valor. En paralelo, la exactitud sobre el conjunto de validación se mantuvo alrededor del 99% sin mostrar caídas ni fluctuaciones. La estabilidad en ambas curvas refleja una adecuada generalización del modelo, sin indicios de sobreajuste.

Además, en la Figura 6 se pueden ver los resultados de la predicción en el programa de prueba desarrollado. Estos son satisfactorios lo que permite continuar con la puesta en marcha final del sistema.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 6**. Resultado en el programa de verificación

## 4. Conclusiones

En este trabajo se implementó un sistema de clasificación de imágenes aplicando técnicas de aumento de datos y optimización durante el entrenamiento.

Las simulaciones y pruebas realizadas en el entorno de entrenamiento fueron satisfactorias, evitando el sobreajuste y reduciendo errores en el reconocimiento. Esto demuestra la viabilidad del sistema para su futura puesta en marcha en la cinta transportadora.

La etapa de integración con la cinta aún no se realizó y forma parte de los próximos pasos del proyecto. En particular, se considera desarrollar un programa que capture nuevas fotografías mediante un pulsador en una protoboard. Dichas imágenes conformarán una nueva base de datos obtenida directamente desde la cinta, aplicando nuevamente la técnica de aumento de datos.

El sistema completo se conectará con un PLC mediante el paquete pymodbus, incluyendo un sensor infrarrojo para la detección de potes y LEDs de notificación. El procedimiento propuesto contempla la detección del pote, la detención de la cinta, la captura de la imagen, la ejecución de la predicción y, en función del resultado, el avance hacia el proceso de tapado o descarte.

Este plan de puesta en marcha constituye la línea de trabajo inmediata. Además, se plantean desarrollos futuros de otros sistemas embebidos para su implementación en líneas de producción industriales, como la integración de cámaras termográficas para monitorear en tiempo real la temperatura de preformas, evaluando su aptitud antes del proceso de moldeo.

## Referencias bibliográficas

Halfacree, G. (2020). *The official Raspberry Pi Beginner's Guide*. Raspberry Pi Press.

Majida Kazmi, B. H. (2023). *A deep learning-based framework for visual inspection of plastic bottles*, 5. https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3329565

Mingxing Tan, Q. V. (2019). EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. *International Conference on Machine Learning*, 2-6. https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11946

TensorFlow Developers. (2015). *TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems*. https://www.tensorflow.org/about/bib?hl=es-419

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Zhao, X., Wang, L., Zhang, Y., Han, X., & Parmar, M. D. (2024). A review of convolutional neural networks in computer vision. *Aritf Intell Rev 57*, 1-15. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Estudiante de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Modelo de generación de vientos basados en datos históricos

## Wind generation model based on historical data

Presentación: 30/10/2025

**Leonel Abuin**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina
leonelabuin2002@gmail.com

### Resumen

Este trabajo tiene como fin desarrollar una herramienta que genera datos sintéticos de vientos a partir de distribuciones empíricas obtenidas mediante datos calculados para luego ser integrado como entrada al software CEIBO, sistema orientado al análisis de riesgo tecnológico en plantas industriales. Esta herramienta, codificada en Python, utiliza información estadística sobre velocidad y dirección del viento previamente procesada para simular escenarios representativos mediante técnicas de muestreo probabilísticos. A partir de las distribuciones de frecuencia por sectores de dirección y rangos de velocidad, se producen datos verosímiles de vientos, que luego serán utilizados por CEIBO para evaluar condiciones atmosféricas en distintos contextos probables. En una primera evaluación, se ejecutó el programa para obtener datos simulados sobre la velocidad y dirección de vientos en un punto geográfico cercano a Rosario, tomando como muestra los datos medidos entre el 21/12/23 y el 20/03/24, tomando únicamente aquellas mediciones realizadas sobre las horas diurnas.

**Palabras clave:** Velocidad de Vientos, Dirección de Vientos, Riesgo Industrial, CEIBO, Distribución Empírica

### Abstract

This work aims to develop a tool that generates synthetic wind data from empirical distributions obtained from calculated data, to be integrated as input into CEIBO software, a system oriented towards technological risk analysis in industrial plants. This tool, coded in Python, uses pre-processed statistical information on wind speed and direction to simulate representative scenarios through probabilistic sampling techniques. Based on frequency distributions by directional sectors and speed ranges, credible wind data are produced, which will then be used by CEIBO to evaluate atmospheric conditions in various probable contexts. In an initial evaluation, the program was executed to obtain simulated data of wind speed and direction at a geographical point near Rosario, using as a sample the data measured between 21/12/23 and 20/03/24, considering only those measurements taken during daylight hours.

**Keywords:** Wind Speed, Wind Direction, Industrial Risk, CEIBO, Empirical Distribution

## 1. Introducción

El desarrollo industrial y su crecimiento requiere de metodologías que logren reducir al máximo la cantidad y severidad de posibles accidentes que puedan ocurrir. Por esto se están consolidando diferentes metodologías, siendo una de ellas el Análisis Cuantitativo de Riesgo (ACR, o en inglés Quantitative Risk Assessment–QRA). Para realizar el ACR, existen diversos softwares que simulan escenarios o eventos accidentales en industrias químicas tales como fugas de sustancias tóxicas, incendios y/o explosiones, y permiten el cálculo de las consecuencias sobre las personas y el entorno, la evaluación del riesgo, y su posterior graficado. Sin embargo, suelen utilizar modelos de simulación complicados y requieren de una gran cantidad de información; por ejemplo, sustancias químicas involucradas, condiciones ambientales, detalles de la liberación o

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

pérdida de contenido, entre otros. Esto limita su utilización en aplicaciones como, especialmente, el proceso de diseño, que abarca desde la ingeniería conceptual hasta la de detalle.

En el centro de investigación CAIMI de la Facultad Regional Rosario de la Universidad Tecnológica Nacional se está desarrollando un software denominado, en su actual versión, CEIBO 2.0, sistema informático integral para el análisis de riesgos y diseño seguro de procesos que ha evolucionado respecto de su versión original (Ponzone et al., 2015). El motivo principal de su desarrollo es hacer frente a los impedimentos mencionados anteriormente y permitir al usuario el estudio de riesgo tecnológico de una planta a instalar o ya instalada de una manera flexible y simple. Dentro de las mejoras planteadas se encuentra el módulo de análisis estadísticos de parámetros meteorológicos, anexada al módulo de datos ambientales, que permite el cálculo de parámetros meteorológicos mediante la generación de valores estadísticos en base a un conjunto relevado de las variables requeridas sobre un punto geográfico y un rango de fechas determinados (Vacchino, 2024).

Ahora, como nueva mejora, se espera contar con un submódulo que logre generar un conjunto de datos simulados que represente diferentes condiciones ambientales acordes al lugar geográfico donde se ubica el establecimiento a analizar (por ejemplo un análisis de riesgos de un layout de una planta industrial); dotando de dicha información a los módulos de cálculo de las distancias de seguridad del software CEIBO, a los efectos de calcular el mapa de riesgos y su graficado.

## 2. Materiales y métodos

*2.1 Datos Meteorológicos*

Para el desarrollo de este trabajo, se tomó como base los datos meteorológicos históricos provenientes del proyecto Predicción de los Recursos Energéticos Mundiales (POWER, por sus siglas en inglés) del Centro de Investigación Langley (LaRC) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) financiado a través del Programa de Ciencias de la Tierra/Aplicado de la NASA. Esto se debe a que el proyecto POWER-NASA ofrece datos fiables con una resolución precisa del lugar geográfico estudiado y con una gran accesibilidad tanto por la gran cantidad de datos disponibles para un período dado como por la disponibilidad de una API que ayuda al desarrollo del modelo planteado (Vacchino, 2024).

*2.2 Distribuciones en la velocidad y dirección de vientos*

En primer lugar, se llevó a cabo un estudio sobre los distintos enfoques disponibles para modelar la distribución de la velocidad y dirección del viento, con el objetivo de generar datos sintéticos representativos. Entre las opciones consideradas se tomaron como candidatas la Distribución de Weibull y la Distribución Empírica construida a partir de los datos históricos.

La distribución de Weibull es una distribución de probabilidad contínua utilizada en problemas de confiabilidad y de prueba de vida como los de tiempo de operación antes de la falla o la duración de la vida de un componente (Walpole, 2012). Su función de densidad de probabilidad está dada por la ecuación:

$$f(x;\ \alpha,\beta) = \begin{cases} \alpha\beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^{\beta}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \tag{1}$$

Donde $\alpha > 0$ y $\beta > 0$.

Esta misma distribución se aplica también en la modelización de datos de velocidad de vientos para el desarrollo de diversos estudios, como por ejemplo el cálculo de la producción de energía eólica mediante la evaluación del diseño de un parque eólico (Pérez Montes et al. 2022; Liu et al, 2023).

A su vez, la distribución empírica no asume una forma funcional predefinida. Se construye directamente a partir de los datos históricos observados, representando la probabilidad de cada valor o intervalo de valores en función de su frecuencia relativa de ocurrencia. Su función de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \begin{cases} x_1, & 0 \leq x \leq F_r(x_1) \\ x_2, & F_r(x_1) \leq x \leq F_r(x_2) \\ & \vdots \\ x_n, & F_r(x_{n-1}) \leq x \leq 1 \end{cases} \tag{2}$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Siendo:

- *f(x)* la variable aleatoria uniforme en [0,1].
- $F_r(x_n)$ la frecuencia relativa acumulada de $x_n$.
- $x_n$ los valores observados ordenados de los datos históricos ($x_1 \leq x_2 \leq \ldots \leq x_n$)

Esta distribución al no estar limitada por una forma funcional predefinida, replica exactamente las características del dataset histórico incluyendo modas múltiples, sesgos, colas de distribución y la frecuencia real de eventos de baja probabilidad, pero alto impacto como los vientos extremos.

En conclusión, tomando en cuenta los puntos aquí tratados, para la generación de datos sintéticos de vientos, se seleccionó el método de la distribución empírica. A pesar de que la distribución de Weibull es ampliamente utilizada para representar la velocidad de vientos, no permite representar las condiciones de vientos de cualquier zona geográfica. Según Wais (2017), la distribución de Weibull de dos parámetros no se ajusta adecuadamente en presencia de una frecuencia significativa de vientos en calma (con velocidades menores a 2 m/s), lo que puede llevar a errores en la generación de datos verosímiles. En esos casos, Wais propone el uso de una función de distribución de Weibull definida por tres parámetros, lo que conlleva a introducir mayor complejidad sin asegurar la replicación de características como asimetrías extensas o modas múltiples.

Por el contrario, al disponer de una muestra grande de datos históricos que se puede adquirir con facilidad para construir la distribución de probabilidad mediante técnicas empíricas, se garantiza su representación fiel y precisa, minimizando el riesgo de sobreajuste y asegurando que el muestreo probabilístico refleje de forma realista las condiciones específicas del sitio. Además, permite sencillamente el análisis de la velocidad del viento junto a la dirección del mismo como una relación bivariada.

### 2.3 *Lenguajes de programación, módulos y librerías*

El módulo ha sido desarrollado en lenguaje Python, haciendo uso del módulo "Análisis estadístico de parámetros meteorológicos" (Vacchino, 2024), junto con un conjunto de librerías tanto estándar como externas. A continuación, se detallan las principales librerías y módulos externos empleados, así como sus respectivas funciones:

- módulo de análisis estadístico de parámetros meteorológicos: Permite obtener los datos históricos sobre la velocidad y dirección de vientos de una ubicación requerida.
- pandas: permite estructurar datos y trabajarlos de manera fácil e intuitiva
- matplotlib: permite crear gráficos de calidad en una variedad de formatos.
- numpy: permite realizar cálculos complejos y trabajar con arreglos de N dimensiones.

### 2.4 *Estructura del programa*

El módulo desarrollado consiste en un conjunto de funciones, donde a partir de un conjunto de valores, se devuelve un conjunto de datos de salida. La función principal tiene como parámetros de entrada la muestra de datos históricos de los vientos, la frecuencia relativa de cada rango de velocidad por cada sector y la cantidad de datos sintéticos que se desea generar.

La Tabla 1 presenta el detalle de los parámetros de entrada requeridos por la función principal.

**Tabla 1**. Definición y especificación de parámetros de entrada de la función principal

| Nombre | Tipo | Formato | Ejemplo | Límites |
|---|---|---|---|---|
| wind_data | Diccionario | {sector: {FREC: x}} | { "0": {"FREC": 120},..., "15": {"FREC": 80} } | Sector de 0 a 15 |
| sector_range_distribution | DataFrame | Índice:sectores, columnas: rangos | Sector 0: [0.1, 0.3, 0.4, 0.2] | probabilidad [0-1] |
| n_samples | Entero | # | 50 | > 0 |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Como resultado de la ejecución del módulo, se obtiene un conjunto de datos simulados en formato tabla, representado mediante un DataFrame de pandas. Este contiene, para cada muestra generada, el sector de dirección de viento (codificado del 0 al 15) y el rango de velocidad correspondiente.

2.5 Procedimiento

El módulo desarrollado lleva a cabo una serie de tareas específicas. A continuación, se detalla el propósito y funcionamiento de cada una de estas tareas:

1. **Solicitud y obtención de datos:** Para obtener la muestra de los datos históricos de los vientos, se utiliza el módulo "Análisis estadístico de parámetros meteorológicos". Luego de realizar la petición junto a los parámetros solicitados, se obtiene como resultado los sectores de direcciones. Como valor asociado a cada clave, se tiene los estadísticos de la velocidad del viento para esa dirección, incluyendo:
    a. 'FREC' : frecuencia relativa
    b. 'MIN': velocidad mínima.
    c. 'MAX': velocidad máxima.
    d. 'MEAN': promedio.
    e. 'SD': desviación estándar.

    Para obtener los resultados de las velocidades, se utilizan los datos obtenidos de la API de Nasa. De aquí, se obtienen las velocidades y direcciones de cada dato de la muestra.
2. **Segmentación de la muestra:** Una vez obtenido el conjunto de datos, la muestra original es segmentada en función de la dirección y velocidad del viento.
    a. Dirección del viento: Los valores angulares son clasificados en 16 sectores equidistantes de 22,5º cada uno, representando las principales orientaciones del viento.
    b. Velocidad del viento: En primera instancia, se segmenta la variable de velocidad del viento en cuatro rangos, dividiéndose en cuartiles. Luego cada valor de la muestra es asignado a uno de estos rangos.
3. **Construcción de la tabla de probabilidades mediante distribución empírica:** A partir de la muestra segmentada, se construye una tabla que relaciona cada dirección del viento con sus probabilidades de tener diferentes velocidades utilizando la distribución empírica derivada directamente de las frecuencias observadas.
4. **Generación de datos sintéticos del viento:** Finalmente, el módulo genera los datos de velocidad y dirección del viento. Para ello, primero seleccionará una dirección de viento aleatoria basándose en la frecuencia con la que ocurrió históricamente. Luego, para esa dirección específica y contemplando las velocidades históricas registradas para dicha dirección, asignará una velocidad aleatoria definida mediante un determinado rango.

## 3. Resultados y discusión

3.1 *Ejemplo de ejecución*

Como ejemplo de ejecución, se muestra la siguiente llamada a la función:

```
generate_synthetic_wind_data(df_wind, sector_range_frequency, 200)
```

Esta llamada aporta los siguientes parámetros:

- df_wind: DataFrame que contiene los datos históricos de velocidad y dirección del viento procesados, previamente obtenidos del módulo de análisis estadístico.
- sector_range_frequency: Matriz de frecuencia conjunta que contiene las probabilidades empíricas de cada rango de velocidad para cada sector de dirección.
- 200: Número de muestras sintéticas a generar.

El sistema devuelve un DataFrame con los 200 datos sintéticos generados, donde cada registro contiene la dirección del viento (representada por el sector del 0 al 15) y el rango de velocidad correspondiente; en este caso;

- rango 0: [0.05-1.77]
- rango 1: [1.78-2.4]
- rango 2:[2.41-3.4125]

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- rango 3: [3.4125-8.86]

En la tabla 2 se muestra un extracto de los 10 primeros registros obtenidos.

**Tabla 2**. Extracto de los datos sintéticos generados por el módulo

| | Sector | Rango |
|---|---|---|
| 0 | 6 | 1 |
| 1 | 3 | 1 |
| 2 | 5 | 3 |
| 3 | 1 | 3 |
| 4 | 4 | 2 |
| 5 | 4 | 2 |
| 6 | 0 | 2 |
| 7 | 3 | 2 |
| 8 | 7 | 3 |
| 9 | 7 | 2 |

3.2 *Comparación de resultados obtenidos con API NASA vs Simulador*

En la figura 1 se presentan las rosas de los vientos basados en datos históricos y en los datos generados por el simulador. Estas gráficas permiten visualizar las distribuciones de velocidad y dirección de vientos en los diferentes sectores.

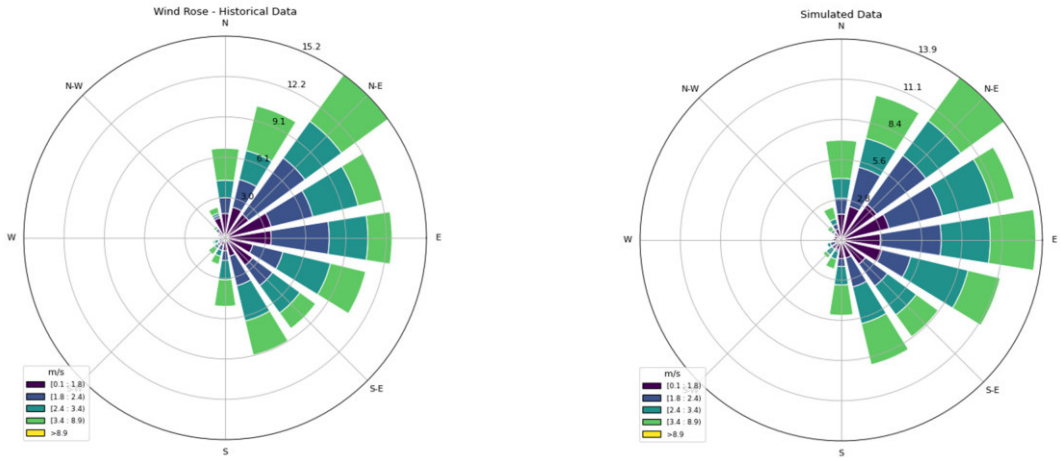



**Figura 1**. Rosas de los vientos sobre los resultados obtenidos de datos históricos (izquierda) y sobre los resultados obtenidos del simulador (derecha).

La comparación mediante rosas de viento demuestra que el simulador genera con éxito las características principales del comportamiento de los vientos reales en coordenadas puntuales. El modelo captura adecuadamente la distribución en la dirección y los rangos de velocidad frecuentes, validando la distribución empírica empleada.

## 4. Conclusiones

El módulo desarrollado demuestra ser una herramienta efectiva para la simulación de condiciones atmosféricas representativas. La metodología implementada logra capturar satisfactoriamente la relación bivariada entre dirección y velocidad del viento, pudiendo mantener su eficacia sin considerar previamente las características de vientos del terreno analizado. Esto supera la particularidad del modelo de dos parámetros de Weibull que suele presentar desviaciones cuando los vientos calmos son notablemente frecuentes. Los resultados obtenidos validan que el enfoque empírico, basado en el muestreo probabilístico de frecuencias observadas, genera datos sintéticos que replican correctamente los vientos.

Como trabajo futuro se plantea extender el modelo para generar valores continuos de velocidad en lugar de rangos discretos, lo que permitiría una representación más fina y realista en los datos generados.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Agradecimientos

Se agradece al CAIMI, a Nicolas Jose Scenna y a Lucas Nehuén Vacchino por el aporte que realizaron al trabajo final presentado.

## Referencias bibliográficas

Liu, R., Peng, L., Huang, G., Zhou, X., Yang, Q. y Cai, J. (2023) A Monte Carlo simulation method for probabilistic evaluation of annual energy production of wind farm considering wind flow model and wake effect, *Energy Conversion and Management*, 292, 117355, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117355

Pérez Montes, D., De Ávila Solano, A., y Jimenez Cardozo, J. (2022), Análisis del potencial eólico a través de la función de distribución de Weibull y Rosa de los vientos, *Latin American Developments in Energy Engineering*, 3(1), https://doi.org/10.17981/ladee.03.01.2022.4

Ponzone, D., Viscusso, S., Biscotti, P., Rodriguez, N., Godoy, S. & Scenna, N. (2015). CEIBO: un sistema informático para el diseño inherentemente seguro de procesos. Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, San Rafael, Mendoza, Argentina, 667-673, https://bdigital.uncu.edu.ar /11337

Vacchino, L. N. (2024). Módulo de análisis estadístico de parámetros meteorológicos, JIT 2024, publicación pendiente en AJEA, Rosario, Santa Fe, Argentina, 18 de octubre

Wais, P. (2017) “A review of Weibull functions in wind sector”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1099-1107, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.014

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. y Ye, K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Novena edición. Naucalpan de Juárez, Estado de México: Pearson Educación, 203-205

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Reconquista

# Programación en lenguaje Python de un MPC utilizando Casadi

## MPC programming in Python language using Casadi

Presentación: 30/10/2025

**Brian Bournissent**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control, Reconquista, Santa Fe, Argentina.
brianbournissent@gmail.com

**Enzo Corgniali**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control, Reconquista, Santa Fe, Argentina.
enzo.ivan01@gmail.com

**Erik Goldberger**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control, Reconquista, Santa Fe, Argentina.
erikarielgoldberger@gmail.com

**Malena Ribatto**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control, Reconquista, Santa Fe, Argentina.
malenaribatto@gmail.com

**Marcos Rossi**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control, Reconquista, Santa Fe, Argentina.
rossimarcos2002@gmail.com

**Ramiro Ayala**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Investigación en Programación, Electrónica y Control, Reconquista, Santa Fe, Argentina.
ramiayala2013@gmail.com

### Resumen

El objetivo de este trabajo es desarrollar un tutorial para programar en el lenguaje Python un MPC utilizando el marco de programación simbólica CasADi. La metodología permite formular problemas de control óptimo en tiempo discreto y aprovechar la diferenciación automática de CasADi para lograr alto rendimiento computacional. El enfoque se aplicó a un sistema masa–resorte–amortiguador; los resultados de simulación validan la robustez del controlador, guiando los estados $x_1$ y $x_2$ desde una condición inicial desplazada hasta el equilibrio xe = [0, 0] en 50 pasos, mientras la variable manipulada u se mantiene dentro de los límites de [-2, 2]. El tutorial obtenido es adaptable para futuros desarrollos de MPC más complejos.

**Palabras clave:** Control Predictivo Basado en Modelo (MPC), Optimización, Python, CasADi, Sistema masa-resorte

### Abstract

The objective of this work is to develop a tutorial for implementing a Model Predictive Control (MPC) strategy in Python using the CasADi symbolic programming framework. The proposed methodology enables the formulation of discrete-time optimal control problems and leverages CasADi's automatic differentiation capabilities to achieve high

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

computational performance. The approach was applied to a mass–spring–damper system; simulation results confirm the controller's robustness by driving the states $x_1$ and $x_2$ from an initial offset to the equilibrium point $x_e = [0, 0]$ within 50 time steps, while keeping the manipulated variable u within the predefined limits of [–2, 2], providing an adaptable tutorial for future developments of more complex MPC formulations.

**Keywords:** Model Predictive Control (MPC), Optimization, Python, CasADi, Mass-spring system

## 1. Introducción

En este trabajo se estudia el Control Predictivo Basado en Modelo (MPC) (Ferramosca et al., 2014) aplicado a un sistema masa-resorte. El MPC es una estrategia de control avanzado que utiliza un modelo matemático del sistema para predecir estados futuros y optimizar las acciones de control, teniendo en cuenta las restricciones del sistema. A diferencia de los controladores clásicos, que solo reaccionan al estado presente, el MPC incorpora un horizonte de predicción. El problema de control se formula como una optimización matemática que busca determinar la secuencia óptima de acciones de control. Dicha secuencia debe minimizar una función de coste predefinida, como la reducción del error de posición, la minimización del consumo energético o la disminución del desgaste del actuador. De este modo, el MPC ofrece una alta eficacia y precisión, y también permite incluir restricciones sobre los estados y las entradas, lo cual es fundamental en aplicaciones reales.

Se utilizó Python para la implementación, porque tiene bibliotecas variadas y es un lenguaje versátil. Se empleó la librería CasADi (Anderson et al., 2019) por su capacidad de cálculo automático de derivadas y su potencia en optimización numérica. Esta herramienta ofrece la flexibilidad necesaria para simular diferentes lazos de control y facilita la implementación de métodos de control numérico óptimo. Además, presenta una ventaja en la comprensión del lazo de control frente a herramientas como do-mpc (Felix et al., 2023) o hilo-mpc (Pohlodek et al., 2025), orientadas a formulaciones más robustas y estandarizadas. La herramienta se puede aplicar en escenarios fuera de línea y en aplicaciones de control predictivo no lineal (NMPC), lo que demuestra la aplicabilidad del MPC en sistemas dinámicos complejos.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2: Control predictivo basado en modelo, mientras en la Sección 3: Programación en lenguaje Python, continuando con la Sección 4: Ejemplo de simulación y en Sección 5: Conclusiones.

## 2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un tutorial en Python para implementar un controlador predictivo basado en modelo (MPC) con CasADi, como guía adaptable a formulaciones más complejas. Considerando como objetivos específicos formular el modelo discreto del sistema masa–resorte–amortiguador; implementar el MPC en Python usando CasADi; y, simular y analizar el desempeño del controlador.

## 3. Control predictivo basado en modelo

El Control Predictivo basado en Modelo (MPC), es la técnica de control avanzado que mayor aceptación e implementación tuvo a nivel industrial que se basa en un enfoque tratable para poder aplicar a procesos reales la teoría de Control Óptimo, donde la acciones para lograr el objetivo de control son elegidas dentro de un conjunto factible, en un horizonte de tiempo finito.

La formulación de un lazo de control mediante MPC se basa en varios elementos fundamentales: el modelo de predicción, que es una representación matemática —lineal o no lineal— utilizada para anticipar la evolución temporal del sistema bajo determinadas acciones de control; el horizonte de predicción y control, que define los pasos futuros en los que se predice la evolución del sistema y cuyo valor depende del objetivo de control y del tipo de sistema, valores elevados de este tipo de horizonte nos facilita una mejor resultado pero a costa de un mayor procesamiento de cómputo, la función objetivo, que constituye la expresión matemática del criterio que se busca minimizar dentro del problema de optimización, reflejando el desempeño deseado del lazo de control; y finalmente las restricciones, que establecen los límites dentro de los cuales debe evolucionar el sistema, tanto en sus estados como en sus salidas y acciones de control, asegurando que la dinámica permanezca

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

dentro de márgenes preestablecidos a lo largo del horizonte de predicción. Una forma general de escribir el problema de optimización asociado a una estrategia de MPC es el siguiente:

$$\underset{u}{mín} \quad \sum_{i=0}^{N-1} V_N(x_{i|k}; \boldsymbol{u}) = \sum_{i=0}^{N-1} \ell(x_{i|k}, u_{i|k}) + V_f(x_{N|k}) \tag{1}$$

sujeto a: $x_{0|k} = x_k$ ; $x_{i+1|k} = Ax_{i|k} + Bu_{i|k} + Ew_{i|k}$ ; $y_{i|k} = Cx_{i|k} + Du_{i|k}$ ; $x_{i|k} \in \mathbb{X}, u_{i|k} \in \mathbb{U}$ ; $i \in \mathbb{I}_{0:N-1}$ ; $x_{N|k} \in \Omega$ .

En donde, $x_k$ es el comportamiento dinámico asociado al estado, mientras que $y_k$ se asocia a la salida del sistema; $u_k$ son las acciones de control; $V_N$ es la función objetivo; $\mathbb{X}$ es un conjunto convexo, y $\mathbb{U}$ es convexo y acotado. Además, $x_{i|k}$ y $u_{i|k}$ representan las predicciones y planificaciones para los estados y entradas de control para el tiempo k hacia i pasos en el futuro.

## 4. Programación en lenguaje Python

La programación del modelo matemático, presentado en el diagrama de flujo de la Figura 1, se divide en los siguientes tres bloques: (3.1) Modelo matemático del sistema; (3.2) Lazo de control; (3.3) Simulación.

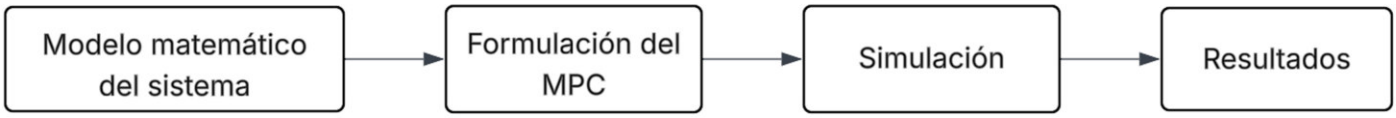



**Figura 1.** Diagrama de flujo de la metodología de implementación del MPC.

### 4.1 *Modelo matemático del sistema*

En CasADi las variables se declaran de forma simbólica, para que el software pueda realizar las operaciones de optimización, por ejemplo, para definir las variables de estado del sistema se utiliza la siguiente sintaxis:

```
x = SX.sym('x', 2)   ;   nx=2   # Estados del sistema
```

donde nx indica el número estados del sistema. Se continúa definiendo la variable de control u, que representa la entrada aplicada al sistema.

```
u = SX.sym('u', 1)   ;   nu=1   # Acciones de control
```

Para cargar las matrices de un modelo lineal de tiempo continuo en espacio de estados, también se utiliza el lenguaje simbólico de Casadi:

```
# Matrices del sistema en tiempo continuo (SX)
A = SX([[0, 1],[-k/m, -b/m]])   ;   B = SX([[0],[1/m]])
```

La matriz A describe como los estados del sistema evolucionan naturalmente sin control externo. Por otro lado, la matriz B describe como la acción del control afecta a los estados del sistema.

Como el control predictivo de modelo opera en tiempo discreto, se debe discretizar el modelo en tiempo continuo:

```
def f(x, u):
    return A @ x + B @ u
# Integración RK4 simbólica (RungeKutta Orden 4)
k1 = f(x, u)   ;   k2 = f(x + Ts/2 * k1, u)   ;   k3 = f(x + Ts/2 * k2, u)
k4 = f(x + Ts * k3, u)
x_next = x + Ts/6 * (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)
# Función discreta del modelo
F = Function('F', [x, u], [x_next], ['x', 'u'], ['x_next'])
```

Se utiliza la discretización por método Runge – Kutta 4 (RK4) en lugar de Euler, porque es un método de integración numérica más preciso para predecir la trayectoria futura del sistema; lo que permite tomar decisiones de control más efectivas y fiables.

### 4.2 *Formulación del MPC – Lazo de control*

Esta sección define el problema de optimización que el controlador debe resolver en cada paso de tiempo. El código utiliza la clase Opti de CasADi, que simplifica la formulación de problemas de optimización:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

```
MPC = casadi.Opti()  ;  N=5 # Horizonte de control  ; Tsim=50 # Tiempo de
simulación
```

Crea un objeto de optimización llamado MPC. Este objeto contiene todas las variables, restricciones y el objetivo de nuestro problema de optimización. Por otro lado, *N* define el horizonte de predicción, es decir, cuántos pasos de tiempo futuros debe mirar el controlar para tomar una decisión. Mientras que Tsim es el número total de pasos que durará la simulación.

En MPC el problema de control se formula como una optimización matemática, para resolverlo es necesario definir explícitamente las variables de decisión, que son las incógnitas que el optimizador ajustará:

```
xr = MPC.variable(nx, N+1)  # estados
ur = MPC.variable(nu, N)    # entrada manipulada
```

donde xr y ur son esas variables en forma de matriz que representan las incógnitas del problema. xr representa los estados futuros que el controlador predice, mientras que ur son las acciones de control. Se definen los parámetros del problema, es decir, valores que se actualizan en cada instante de tiempo pero que no son optimizados:

```
# Condicion inicial (feedback de estado)
xk = MPC.parameter(nx, 1)  ;  xe = MPC.parameter(nx, 1)  ; ue = MPC.parameter(nu,
1)
```

donde xk es la condición inicial del sistema para cada momento (condición variable), mientras que xe y ue son los puntos de equilibrio que se quieren alcanzar (condición fija o referencia del sistema).

Continuando con la definición de variables, se definen las restricciones en entradas y estados como un arreglo de matrices:

```
umin = np.array([-2])  ;  umax = np.array([2])       #Restricciones para los
estados
xmin = np.array([-5, -5])  ;  xmax = np.array([5, 5])
```

Estas variables definen los límites del sistema, tanto para las acciones de control (u) como para la de estado (x). En el ejemplo mostrado se tiene una acción de control y dos estados:

```
Q = np.array([[ 2 , 0 ],[ 0 , 2 ]])  ;  R = np.array([[ 0.2 ]])
T = np.array([[ 1 , 0 ],[ 0 , 1 ]])
```

Se establecen las matrices de ponderación utilizadas en la función de costo cuadrática, las cuales asignan la importancia relativa a los errores de estado, al esfuerzo de control y al estado terminal en la función de costo cuadrática del MPC. Q, R y T son variables en forma de matrices, donde Q y T buscan mantener valores cercanos al de equilibrio, R intenta encontrar una solución más eficiente energéticamente, ponderando las acciones de control. Se construye el funcional de costo cuadrático ponderado estándar del MPC, que suma las penalizaciones a lo largo del horizonte:

```
V = 0
for j in range(0, N-1):
    costo = (
        (ur[:, j] - ue).T @ (R @ (ur[:, j] - ue)) +
        (xr[:, j] - xe).T @ (Q @ (xr[:, j] - xe)) +
        (xr[:, N-1] - xe).T @ (T @ (xr[:, N-1] - xe)) )
    V += costo
VN = V
MPC.minimize(VN)
```

Se define la función de costo del MPC, donde V es la suma de los costos en cada paso del horizonte, y MPC.minimize(VN) indica al solver que minimice ese valor total. Continuando, se definen las restricciones:

```
for j in range(0, N-1):
    MPC.subject_to(xr[:, j+1] == F(xr[:, j], ur[:, j])) # Modelo del sistema
  # Restricciones en los estados y las variables manipuladas
    MPC.subject_to(xmin <= xr[:,j])  ;  MPC.subject_to(xr[:,j] <= xmax)
    MPC.subject_to(umin <= ur[:,j])  ;  MPC.subject_to(ur[:,j] <= umax)
MPC.subject_to(xr[:, 0] == xk) # condición inicial
p_opts = {'expand': True}
s_opts = {
    'max_iter': 1500, 'print_level': 5 # Detalle de impresión en consola,
    'file_print_level': 5 # Detalle de impresión en archivo,
```

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

```
    'output_file': 'ipopt_log.txt'  # Nombre del archivo de salida
}
```

Donde primero se restringe el modelo, donde se le dice al optimizador que su predicción de estados futuros debe representar la física del sistema. Posteriormente, se aplican restricciones físicas, con la finalidad de asegurarse que los estados y las acciones de control se mantengan dentro de los límites físicos del sistema. Por último, se tienen en cuenta las restricciones que son propias de las condiciones iniciales, fijando el punto de partida de la predicción al estado actual del sistema. Y, por último, adjuntan líneas para la solución y configuración del Solver para poder llamarlo al MPC al momento de la simulación:

```
MPC.solver('ipopt', p_opts, s_opts)  # Asignar solver IPOPT con opciones
MPC = MPC.to_function(
    'MPC',
    [xk, xe, ue]  ;  [ur, xr]  ;  ['xk', 'xe', 'ue']  ;  ['uf_opt', 'xf_opt'] )
```

En la primera línea de esta imagen selecciona el motor o el solucionador que hará el trabajo, mientras que en la siguiente línea se asigna una función de compilación reutilizable, es decir que para cada paso de la simulación solo tiene que llamar a la función con el estado actual (xk).

4.3 *Simulación*

En este apartado comienza la sección donde se realiza la simulación del sistema con el controlador MPC. En primer lugar, se crean listas vacías para ir guardando valores en cada iteración:

```
vx = []  ;  vu = []
```

En vx almacena los estados y vu almacena las acciones de control durante la simulación. A continuación, se definen los puntos de equilibrio:

```
xe = np.array([[ 0 ],[ 0 ]]) ; ue = np.array([[ 0 ]])
```

Esto establece la *condición inicial* del sistema:

```
xk = np.array([5, 5])  # Condición inicial en formato de array
```

Este es el bucle principal de la simulación del MPC, a continuación, se detalla brevemente como es su forma de operación:

```
for j in range(Tsim):
    uf_sol, xf_sol = MPC(xk, xe, ue) ; uf = uf_sol.full()  ;  xf = xf_sol.full()
    uf = uf_sol.full()  ;  xf = xf_sol.full()
    uk = uf[:, 0]  # Se aplica solamente la primera acción de Control
    vu.append(uk.flatten())  ;  vx.append(xk.flatten())
    xk = F(xk, uk).full()  # Calcula el estado x(k+1)
vu = np.array(vu) ; vx = np.array(vx)
```

El *MPC* opera en un ciclo continuo donde, primero, resuelve un problema de optimización para predecir la secuencia óptima de acciones y estados futuros a partir del estado actual del sistema, luego aplica solo la primera acción de esta secuencia (el concepto de *horizonte deslizante*), simula el siguiente estado basándose en la acción aplicada y el modelo del sistema, y finalmente almacena los resultados para su posterior análisis, permitiendo así que el controlador corrija errores y se adapte en cada iteración.

## 5. Ejemplo de simulación

Se tiene un sistema Masa-Resorte amortiguado como el mostrado en la Figura 2.

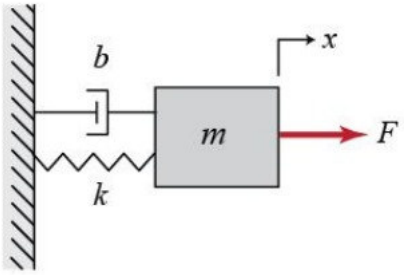



**Figura 2.** Sistema Masa-Resorte. m: masa, x: posición de la masa, F: fuerza externa (variable manipulada), b: coeficiente de amortiguamiento y k: constante del resorte.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

El sistema esquematizado describe mediante la siguiente ecuación diferencial de segundo orden:

$$m\,\ddot{x}(t) + b\,\dot{x}(t) + k\,x(t) = F(t) \tag{2}$$

donde $m$ es la masa, $b$ el coeficiente de amortiguamiento, $k$ constante del resorte, $F(t)$ la fuerza externa $x(t)$ es posición de la masa, $\dot{x}(t)$ la velocidad y $\ddot{x}(t)$ la aceleración.

Definiendo el vector de estados como $\boldsymbol{x}(t) = [\,x(t)\dot{x}(t)]^{\mathrm{T}}$, se tiene la siguiente ecuación de estado de tiempo continuo:

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = A\boldsymbol{x}(t) + Bu(t) \tag{3}$$

donde $u(t) = F(t)$ es la variable manipulada. Las matrices de estados (A) y entrada (B) se definen la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Se considerarán además restricciones para el estado y la entrada: $x \in \mathbb{X}: \{x \in \mathbb{R}^2: -5 \leq x \leq 5\}$; $u \in \mathbb{U}: \{x \in \mathbb{R}: -2 \leq x \leq 2\}$. El valor de la masa y la constante del resorte son $m = 1$ y $k = 1$, respectivamente. Dependiendo de los valores que asuma la constante b se tendrán distintos comportamientos del sistema.

Se propone un controlador MPC estándar con función de costo cuadráticas ponderadas para regular el sistema a un punto de equilibrio (el origen). El problema de optimización asociado a la estrategia de MPC es el siguiente:

$$\underset{\boldsymbol{u}}{mín} \quad V_N(x_k; \boldsymbol{u})$$

subject to: $x_0 = x;\ \ x_{j+1} = Ax_j + Bu_j; x_j \in \mathbb{X}, u_j \in \mathbb{U};\ j \in \mathbb{I}_{0:N-1}$, donde el funcional de costo es el indicado debajo:

$$V_N(x_k; \boldsymbol{u}) \coloneqq \left\|x_N - x_e\right\|_T^2 + \sum_{j=0}^{N-1} \left\|x_j - x_e\right\|_Q^2 + \left\|u_j - u_e\right\|_R^2 \tag{5}$$

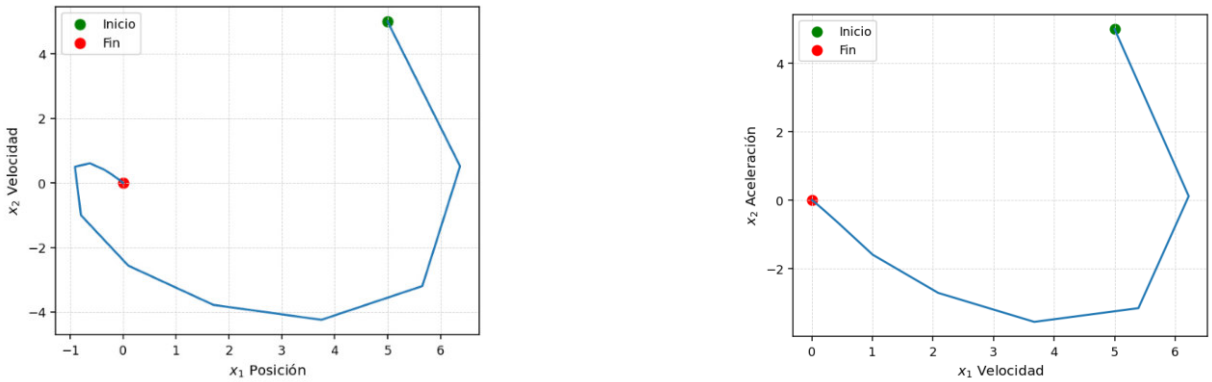



**Figura 3 (a) y (b).** Diagrama de fases: representación gráfica de la velocidad en función de la posición.

Los resultados de la simulación que describen la dinámica del sistema se muestran en la Figura 3, considerando tiempo de muestreo de 0,5, un valor de b = 0,4 para la figura 2 (a), y un valor de b = 0,8 para la figura 2 (b).

En la Figura 3 se aprecia la evolución de la dinámica del sistema desde la condición inicial hasta alcanzar el equilibrio. El objetivo principal de desarrollar un *tutorial de MPC en Python con CasADi se ha cumplido totalmente*. Se proporciona una *guía didáctica integral* que detalla el modelo discreto RK4, la implementación del MPC con código funcional y los resultados de simulación, sentando una base sólida para futuras extensiones a problemas más complejos.

## 6. Conclusiones

El trabajo cumple su objetivo al entregar un tutorial de MPC en Python con CasADi de alto valor didáctico. La metodología presentada permite formular problemas de control óptimo en tiempo discreto, aprovechando la capacidad de CasADi para la diferenciación automática, lo que se traduce en un notable rendimiento computacional.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

El enfoque de control desarrollado se aplicó con éxito a un sistema de masa-resorte-amortiguador. Los resultados de la simulación validan la robustez y la eficacia del controlador MPC. Se observa que el controlador es capaz de guiar los estados del sistema, $x_1$ y $x_2$, desde una condición inicial desplazada hasta el punto de equilibrio deseado, xe = [0, 0], en un horizonte de tiempo de simulación de 50 pasos, manteniendo la variable manipulada, y dentro de los límites predefinidos de [-2, 2]. Además, la implementación es una plantilla clara que desmitifica la formulación del lazo de control óptimo. En esencia, este trabajo sienta una base adaptable inmediata para que el usuario explore y desarrolle formulaciones de control predictivo más complejas.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Reconquista.

## Referencias bibliográficas

Felix et al. (2023). Towards FAIR nonlinear and robust model predictive control. *Control Engineering Practice.*

Ferramosca et al. (2014). Economic mpc for a changing economic criterion for linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2657–2667.

Pohlodek et al. (2025). Flexible development and evaluation of machine-learning-supported optimal control and estimation methods via HILO-MPC. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2835-2859.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Simulación de amplitud y frecuencia de oleaje para estructuras offshore

## Simulation of wave amplitude and frequency for offshore structures

Presentación: 30/10/2025

**Nicolás Leonel Ledesma**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería (GIMNI), Santa Fe, Argentina
nledesma@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

En este trabajo se presenta la puesta a punto de un canal de olas numérico con el cual se determinarán a futuro solicitaciones producidas por el oleaje sobre estructuras fijas o móviles en zonas offshore. Para ello, se selecciona un perfil típico de olas de escasa amplitud, de solución analítica conocida, que luego será abordado mediante un programa de análisis mediante el método de volúmenes finitos con representación de la superficie libre empleando la técnica de volumen de fluido. La comparación entre los resultados numéricos y los analíticos servirá para validar el modelo numérico, realizar el refinamiento necesario en el mismo para obtener resultados más representativos y disminuir posibles discrepancias. De esta forma, se podría aplicar el mismo modelo numérico para problemas más complejos, donde las soluciones analíticas ya no son válidas.

**Palabras clave:** ecuaciones de Navier-Stokes, volúmenes finitos, oleaje, energía undimotriz, offshore.

### Abstract

This work presents the development of a numerical wave channel designed to determine, in future studies, the loads generated by wave action on fixed or floating offshore structures. For this purpose, a typical small-amplitude wave profile with a known analytical solution is selected. The case is then addressed using a finite volume method–based analysis program, where the free surface is represented with the volume of fluid technique. The comparison between numerical and analytical results will serve to validate the numerical model, refine it as needed to achieve more representative outcomes, and reduce possible deviations. In this way, the same numerical model could later be applied to more complex problems, where analytical solutions are no longer available.

**Keywords:** Navier-Stokes equation, finite volume, waves, wave energy, offshore.

## 1. Introducción

En los últimos años, ha surgido una corriente en busca de energías más amigables con el medio ambiente. Entre ellas, se encuentran la energía eólica y la energía mareomotriz. Las torres de aerogeneradores eólicos son una excelente opción que aprovechan la energía producida por el movimiento de las masas de aire. La idea de emplazar los mismos en el océano, trae consigo un aprovechamiento de la mayor velocidad del viento en zonas oceánicas, y, además, evita el uso de suelos que podrían ser productivos y aprovechados para otras actividades. Por otro lado, los generadores de energía undimotriz se están estableciendo como un prototipo que aprovecharía la energía producida por el movimiento de masas de agua.

Para tener un diseño eficiente de las estructuras, es necesario tener un conocimiento acerca de las velocidades y presiones producidas por el oleaje en zonas costeras, así como también el efecto de la interacción fluido estructura. Diferentes autores

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

han presentado diversas metodologías para la simulación de olas. Estos trabajos han validado los resultados numéricos obtenidos mediante diversos softwares tales como REEF 3D (Kamath et al., 2016) o el que se utilizará en el presente trabajo, OpenFOAM (Chen, 2015; Jin et al., 2018). Estos trabajos han comparado sus modelos numéricos con mediciones experimentales. Por otro lado, otros trabajados han corroborado resultados de OpenFOAM con ecuaciones analíticas (Mostafa, 2010).

Este proyecto englobado dentro de un macroproyecto denominado "Dinámica de fluidos computacional para resolución de flujo y transporte en interfases", y tiene como objetivo la determinación de las solicitaciones, presiones y velocidades que tendrán lugar en la interacción fluido estructura, considerando su aplicación futura a fustes de aerogeneradores y otras estructuras offshore.

## 2. Materiales y métodos

La metodología propuesta consistirá en un primer cálculo de un modelo de ola regular progresiva, que se pueden observar en la bibliografía (Dean & Dalrymple, 1984), partiendo estas mismas de hipótesis simplificadoras.

En paralelo, se utilizará la plataforma OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation, 2025), que consiste en un software programado en C++, que, mediante el método de volúmenes finitos, resuelve las ecuaciones de Navier – Stokes. La misma cuenta en su biblioteca con numerosos modelos de olas regulares, de los cuales aplicaremos el denominado StokesI.

El objetivo final de esta primera instancia será el de comparar y validar los resultados numéricos con las soluciones analíticas de referencia. De esta forma, se podrá continuar en un futuro con la aplicación del modelo numérico para situaciones más complejas, donde las hipótesis simplificadoras no se cumplan.

En primer lugar, se comenzará con el caso de una ola regular, con una superficie libre de la forma (Chen, 2015).

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \phi) = \frac{H}{2} \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t) \tag{1}$$

Siendo, $H$ la amplitud de la ola, $k$ el número de ola, $\omega$ la frecuencia angular y $\emptyset$ el desfase inicial.

Se parte de las ecuaciones de gobierno para un fluido irrotacional e incompresible (Dean & Dalrymple, 1984).

$$\nabla^2\phi = \nabla^2\psi = 0 \tag{2}$$

Siendo, $\varphi$ la función potencial de velocidad y $\psi$ la función de corriente.

Para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema físico, se plantean las siguientes condiciones de borde:

- Condición de borde en fondo: velocidad w (vertical) nula.

$$w = -\frac{\partial\phi}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

- Condiciones de bordes en la superficie libre:
  - Condición cinemática:

$$-\frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{\partial\eta}{\partial t} - \frac{\partial\phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial\eta}{\partial x} \tag{4}$$

  - Condición dinámica: ecuación de Bernoulli.

$$G(t) = -\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)^2\right] + g \cdot \eta \tag{5}$$

- Condiciones laterales y condición inicial: consecuencia de la naturaleza oscilante de la perturbación

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$\phi(x,t) = \phi(x+\lambda,t) \tag{6}$$

$$\phi(x,t) = \phi(x,t+T) \tag{7}$$

Siendo λ y *T* la longitud de onda y el periodo, respectivamente.

Una de las soluciones a la función potencial de velocidad resulta ser la siguiente:

$$\phi(x,z,t) = \frac{H \cdot g}{2 \cdot \omega} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (h+z)]}{\cosh[k \cdot h]} \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) \tag{8}$$

Como resultado, se pueden determinar el valor de las velocidades horizontales y verticales, en cada par (x,z) y para un instante de tiempo *t* determinado:

$$u(x,z,t) = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{H \cdot g \cdot k}{2 \cdot \omega} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (h+z)]}{\cosh[k \cdot h]} \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t) \tag{9}$$

$$w(x,z,t) = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{H \cdot g \cdot k}{2 \cdot \omega} \cdot \frac{\sinh[k \cdot (h+z)]}{\cosh[k \cdot h]} \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) \tag{10}$$

Siendo, *g* la aceleración de la gravedad, y h la profundidad o tirante de agua.

Adicional a la velocidad, es posible determinar a partir de la función potencial de velocidad y las condiciones de borde, el valor de la presión en cada par (x,z), para un tiempo t determinado:

$$\frac{p}{\rho}(x,z,t) = -g \cdot z + \frac{H \cdot g}{2} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (h+z)]}{\cosh[k \cdot h]} \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t) \tag{11}$$

De esta manera, se puede obtener el valor de las velocidades y presiones en cada punto P(x,z), para un determinado instante de tiempo t. Para determinar estos valores, se programó y ejecutó un script en Octave (GNU Project, 2025), de forma tal de determinar las componentes de velocidades $u$ y $w$, y, en consecuencia, la magnitud de la velocidad.

Por otro lado, se ejecutó el ejemplo StokesI, de la biblioteca de OpenFOAM. OpenFOAM es un software que se encarga de resolver las ecuaciones diferenciales de Navier – Stokes mediante el Método de Volúmenes Finitos (Versteeg & Malalasekera, 1995), La representación del flujo a dos fases se lleva a cabo mediante el método de volumen de fluido, que consiste en definir una fracción de líquido α en cada celda, correspondiendo α = 1 a celdas de líquido, α = 0 a celdas de aire, y 0 < α < 1 a celdas en las adyacencias de la interfase.

Para ejecutar la simulación, el modelo de StokesI aplica las siguientes condiciones de borde:

- Como función de la superficie libre, utiliza la misma Ecuación 1 que hemos usado para la solución analítica.
- Condición de borde en el fondo, velocidades horizontales u y verticales w nulas (denominado *wall* en OpenFOAM).

Además, debido a que OpenFOAM resuelve los modelos en 3D, se aplican condiciones de borde tipo empty en las caras laterales del modelo, para forzar un modelo 2D.

Estos valores luego son comparados con los obtenidos mediante las soluciones analíticas del mismo problema, obtenidas mediante Octave.

El problema de ola a modelar consistirá en una ola de amplitud $H$ = 0,05 m, una profundidad del canal de $h$ = 0,60 m y un período de $T$ = 3 s.

## 3. Resultados y discusión

Para la solución analítica, se programó y ejecutó un script de Octave, en donde se obtuvieron los valores de las componentes $u$ y $w$ de la velocidad, cada un intervalo de 0,50m en x, y un intervalo de 0,10m en z, para el instante t=10 s,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

con una dimensión longitudinal del dominio de 20 m. Posteriormente, se realizó la gráfica de las velocidades obtenidas en cada punto, tal como se muestra en la Figura 1**.**

Las velocidades obtenidas en la superficie libre en reposo, correspondiente a z = 0,00 m, mostrando valores oscilantes, en el tiempo y la distancia, lo cual es esperable debido a la naturaleza oscilante de las funciones senos y cosenos. Esta velocidad oscila entre los 0,10 m/s y los -0,10 m/s, disminuyendo de forma hiperbólica hasta el fondo, donde solo existirá una componente horizontal de velocidad, menor al valor en su superficie. Estas velocidades obtenidas se deben exclusivamente al avance progresivo de la ola, ya que no se impusieron valores iniciales de velocidad en el fluido.

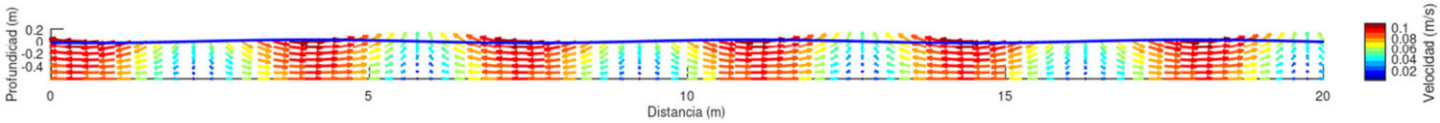



**Figura 1.** Gráfico obtenido mediante Octave.

La longitud de onda completa de la ola se puede determinar con la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{k} = 6{,}94\ m \tag{12}$$

Paralelamente, se ejecutó la simulación en OpenFOAM del mismo problema físico, y se obtuvieron los siguientes resultados, como se indica en la Figura 2, para el mismo $t$ = 10 s.

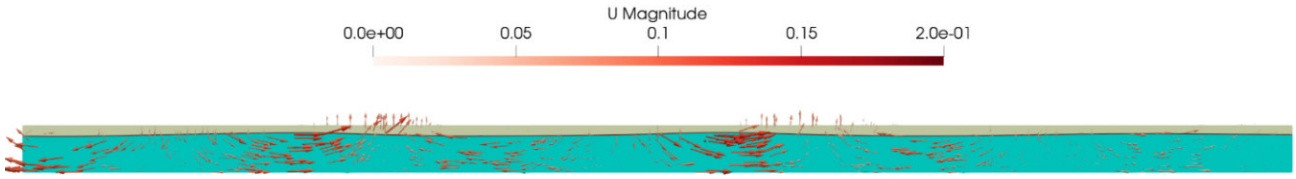



**Figura 2.** Gráfico obtenido mediante simulación en OpenFOAM para t = 10s.

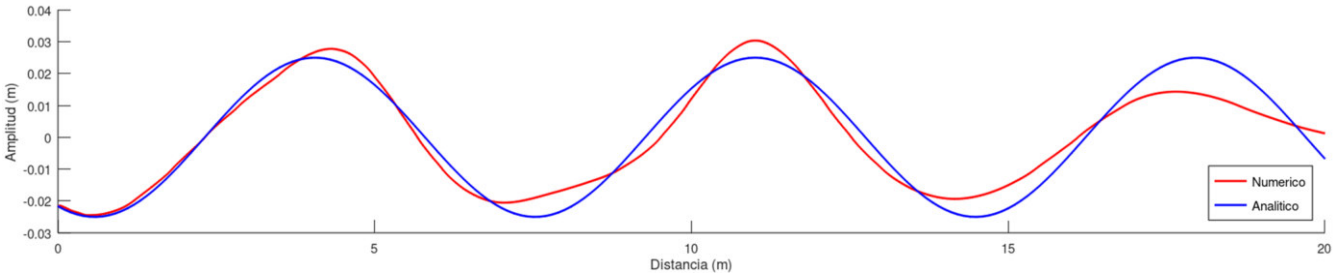



**Figura 3.** Comparación de la superficie analítica con la superficie numérica en tiempo t = 10s.

Para una primera comparación de ambas metodologías, se observa que, fundamentalmente, la forma de las líneas de corriente coincide en ambos casos. Además, algo importante a destacar, es que se observa que la longitud de onda también coincide en ambos casos.

A partir de los valores obtenidos en OpenFOAM, se graficó la superficie en el tiempo t = 10s, tal como se puede observar en la Figura 3**,** y se la comparó en la misma figura con la superficie obtenida mediante la Ecuación 1. En estas gráficas, se puede apreciar una disminución en la amplitud a medida que avanza la ola, del 42,74% respecto al valor teórico, y, como consecuencia, producirá variaciones en las velocidades y presiones al final del canal, respecto a los valores analíticos. Esto parece ser un valor elevado, pero se debe también tener en cuenta la profundidad del canal (0,60 m). Considerando la profundidad, se obtiene, por lo tanto, una disminución del 1,71% respecto al punto máximo analítico.

En cuanto a las magnitudes de velocidad, se observa que los valores obtenidos mediante OpenFOAM, son muy similares a los obtenidos de manera analítica, siendo levemente menores en la solución numérica a medida que avanza la ola, mientras que la analítica mantiene su naturaleza regular.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Además, es importante mencionar lo que ocurre en la interfaz aire – agua: en este punto, en la fase del aire, se producen velocidades altas de manera espuria, principalmente en las zonas correspondientes a los valles y las crestas de las olas. Esto se debe fundamentalmente a las limitaciones del modelo numérico, con los valores por defecto (Pedersen et al., 2017), pero que no afectan a las velocidades en el agua, a excepción de las velocidades en celdas adyacentes a la interfaz.

Otra observación importante, es el hecho de que, en el modelo numérico, las velocidades disminuyen hasta ser nulas en el fondo, en ambas componentes, a diferencia de la solución analítica, donde solo era nula la componente vertical **w**. Esto se debe a la condición de borde impuesta en el modelo numérico de StokesI, ya que la condición *wall* representa velocidades nulas para ambas componentes. Esta condición se puede observar con facilidad en la Figura 4.

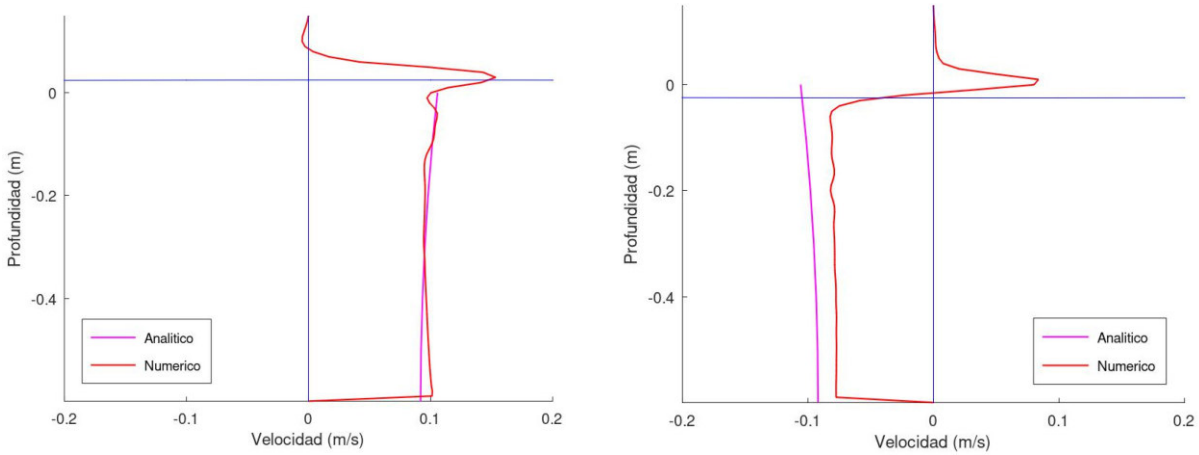



**Figura 4.** Comparación de las velocidades horizontales, en la progresiva 4,00 m (izquierda, correspondiente a un pico de la ola) y 7,50 m (derecha, correspondiente a un valle de la ola) en tiempo t = 10s.

Por otro lado, también se ha ejecutado en Octave, un script que permite conocer las presiones para los mismos puntos donde se calcularon las velocidades. Como resultado, se logró graficar las distintas isolíneas, como se muestra en la Figura 5.

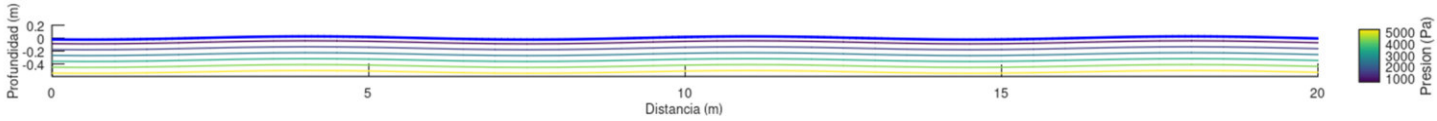



**Figura 5.** Presiones obtenidas en Octave

De la misma forma, se graficaron las presiones obtenidas en OpenFOAM, como se ve en la Figura 6.

Las presiones muestran una naturaleza oscilante, sincronizadas con la oscilación de la ola, y tendrán una componente hidrostática y una componente hidrodinámica, siendo la primera, considerablemente la de mayor aporte a la presión total. Para realizar la comparación de valores, se graficaron las presiones en la Figura 7, a 10 cm por encima del fondo, de la solución analítica y de los valores obtenidos mediante el modelo numérico en tiempo t = 10 s. En estas, se observa que las presiones, como se mencionó anteriormente, oscilan de manera consistente con forma de la ola y, mientras la solución analítica mantiene su forma periódica, se puede observar en el modelo numérico una disminución de la amplitud en la curva de presiones.

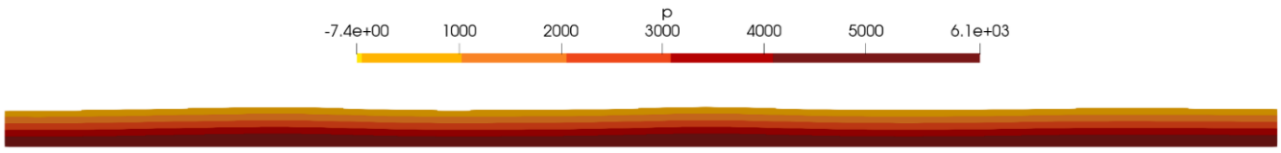



**Figura 6.** Presiones obtenidas en OpenFOAM, en tiempo t = 10s.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

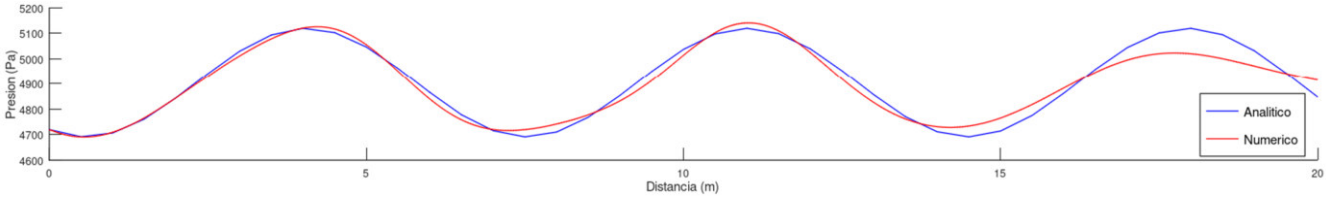



**Figura 7.** Comparación de las presiones analíticas y numérica, a 10 cm por encima del fondo.

## 4. Conclusiones

Como conclusiones de esta primera etapa del proyecto, se puede apreciar que el modelo numérico utilizado provee de soluciones que se ajustan a las soluciones analíticas de la bibliografía, observando una disminución en la amplitud del 42,74%, respecto a la altura de la ola y una disminución del 1,71% en relación con la profundidad media, como ya se mencionó previamente. Por tal motivo, se buscará estudiar los efectos del refinamiento de la malla y el modelo numérico, sobre todo en la interfase agua – aire, donde se pudieron observar las mayores discrepancias en la velocidad, respecto a las soluciones analíticas. El siguiente paso, será modificar los parámetros numéricos del modelo de Stokes I, con la finalidad de lograr valores mucho más confiables, eliminando discrepancias debidas al modelo numérico. Este trabajo y su resolución resultará apropiada para la implementación del modelo con la finalidad de determinar solicitaciones en estructuras offshore.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la UTN-FRSF, al PID UTN 10015, a los investigadores y al personal del Centro de Investigación en Métodos Computacionales (CIMEC).

## Referencias bibliográficas

Chen, L. (2015). *Modelling of Marine Renewable Energy* [Thesis (PhD)]. University of Bath.

Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific Publishing.

GNU Project. (2025). *GNU Octave* [Software]. https://octave.org/

Jin, Q., Hudson, D., & Temarel, P. (2018). Simulation of non-breaking and breaking waves with OpenFOAM. *21s Numerical Towing Tank Symposium*, 88-93.

Kamath, A., Chella, M. A., Bihs, H., & Arntsen, O. A. (2016). Breaking wave interaction with a vertical cylinder and the effect of breaker location. *Ocean Engineering*, *128*, 105-115.

Mostafa, A. A. (2010). *Numerical Wave Generation in OpenFOAM* [Thesis (Master of Science)]. Chalmers University of Tecnology.

Pedersen, J. R., Bjarke Eltard Larsen, Bredmose, H., & Jasak, H. (2017). A New Volume of Fluid Method in Openfoam. *MARINE 2017 Computational Methods in Marine Engineering VII*, *VII*, 266-278.

The OpenFOAM Foundation. (2025). *OpenFOAM* [Software]. https://www.openfoam.com/

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *Computational Fluid Dynamics*. Longman Scientific & Technical.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa fe

# Análisis de confiabilidad en redes de distribución de media tensión para la planificación de la expansión: caso de estudio en Esperanza, Argentina

## Reliability Analysis in Medium Voltage Distribution Networks for Expansion Planning: Case Study in Esperanza, Argentina

Presentación 30/10/2025

**Luis Andreotti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina
landreotti@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

La confiabilidad de las redes de distribución eléctrica es un factor clave para la calidad del servicio y la planificación de inversiones. Aunque los índices tradicionales permiten evaluar el desempeño global, no identifican con precisión los tramos más vulnerables ni los costos asociados a interrupciones específicas. En este trabajo se aplica el método de análisis de modos y efectos de fallas (FMEA) a la red de media tensión de la ciudad de Esperanza, Santa Fe, como herramienta técnica y económica para la toma de decisiones. La metodología incluye el modelado de distribuidores en tramos definidos por dispositivos de protección y maniobra, la clasificación de estados ante fallas y la construcción de matrices de confiabilidad que permiten calcular indicadores orientados al usuario y la energía no suministrada. Los resultados indican que, si bien los valores globales cumplen con la normativa vigente, las salidas rurales concentran los mayores riesgos de interrupción, demostrando que el método mejora la precisión del análisis y fortalece la planificación estratégica.

**Palabras clave:** Confiabilidad, FMEA, Energía no suministrada, SAIDI y SAIFI, Redes de distribución.

### Abstract

The reliability of electric power distribution networks is a key factor in service quality and investment planning. Although traditional indices allow assessment of overall performance, they do not accurately identify the most vulnerable sections or the costs associated with specific outages. This study applies the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method to the medium-voltage network of the city of Esperanza, Santa Fe, as a technical and economic decision-making tool. The methodology includes modeling feeders in segments defined by protection and switching devices, classifying operating states under fault conditions, and constructing reliability matrices that enable the calculation of user-oriented indicators and unsupplied energy. The results show that, although global values comply with current regulations, rural feeders concentrate the highest interruption risks, demonstrating that the method improves analytical precision and strengthens strategic planning.

**Keywords:** Reliability, FMEA, Energy Not Supplied, SAIDI and SAIFI, Distribution networks.

## 1. Introducción

La calidad de servicio en redes de distribución eléctrica es un desafío creciente, especialmente en un contexto de incremento de la demanda y de mayores exigencias regulatorias. Los indicadores tradicionales, como SAIDI (duración promedio de interrupción) y SAIFI (frecuencia promedio de interrupción), son herramientas reconocidas por los entes

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

reguladores y las distribuidoras (Enre, 2022). Sin embargo, su aplicación global sobre la red ofrece una visión agregada que no siempre refleja la realidad de los sectores más vulnerables, en particular en áreas rurales.

En este sentido, la metodología de análisis de modos y efectos de fallas o FMEA (del inglés, "*Failure Modes and Effects Analysis*") representa una innovación en el análisis de confiabilidad (Akula et al., 2022). Originalmente aplicada en sistemas industriales e ingeniería aeroespacial, en este trabajo se adapta a redes de media tensión para detectar con precisión los modos de falla, evaluar sus consecuencias en el suministro y priorizar acciones de mejora (Wolfram et al., 2012). El valor agregado del FMEA radica en su capacidad de conectar el análisis técnico con el análisis económico, transformando la confiabilidad en un argumento cuantitativo para justificar decisiones de inversión.

El objetivo de este trabajo es demostrar, a través del caso de estudio de la red de distribución de la ciudad de Esperanza, cómo la aplicación de FMEA permite detectar salidas críticas, cuantificar la Energía No Suministrada (ENS) y justificar obras de expansión orientadas a mejorar la resiliencia de la red.

## 2. Metodología

### 2.1. *Red en estudio*

La ciudad de Esperanza se abastece desde la Estación Transformadora Esperanza (ET ESP), con dos transformadores 132/33/13,2 kV (30 y 40 MVA). De allí parten nueve distribuidores en 13,2 kV: cinco urbanos (4,62 km), uno semiurbano (11,85 km) y tres rurales (16,33 km). El sistema alimenta unos 24.000 clientes en baja tensión (BT) y 7 en media tensión (MT), cubriendo 324 km² con una demanda máxima de 36 MVA. La Figura 1(a) muestra la imagen satelital con las líneas de MT y las SETs. La Figura 1(b) presenta la configuración de la ET ESP: doble juego de barras en 132 kV para las LAT y transformadores, mientras que en 33 y 13,2 kV hay barras simples. Cada transformador alimenta una barra en cada nivel. Existen 5 alimentadores en 33 kV y 9 en 13,2 kV.

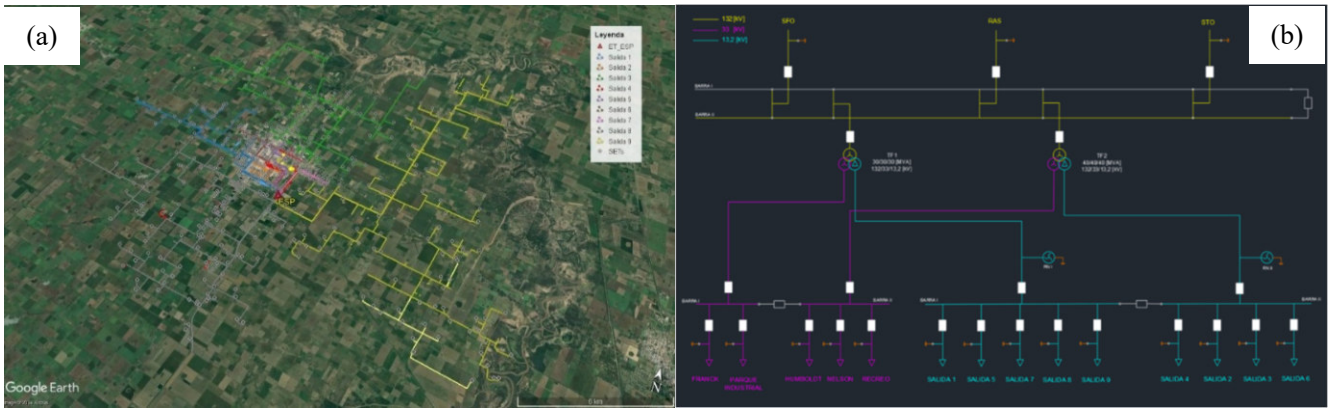



**Figura 1**. (a) Imagen satelital de la red en estudio y (b) esquema unifilar de la ET ESP.

En este sentido, si una de las líneas sale de servicio, los usuarios aguas abajo del transformador, hasta la solución y/o reconexión del sistema eléctrico, poseerán ENS que afectará la calidad de energía percibida. Es menester encontrar un modelo de confiabilidad que permita, a partir de la toma de decisiones, minimizar los efectos de las fallas en redes de distribución.

### 2.2. *Metodología FMEA y modelado de la red*

La metodología FMEA se resume en la Figura 2. Los objetivos principales son: identificar los modos de fallas: determinar los componentes del sistema eléctrico que son susceptibles a fallar, evaluar el impacto de las fallas: analizar cómo cada falla afecta la operación de la red eléctrica, priorizar riesgos: establecer cuales fallas requieren atención inmediata en función de su criticidad, y proponer acciones correctivas: desarrollar estrategias para reducir la probabilidad de fallas o mitigar sus efectos.

Para llevar a cabo la metodología, en primer lugar, se realiza un modelado de la red y la caracterización de elementos y estados. Esto implica dividir cada salida en tramos, siendo estos determinados a partir de la ubicación de aparatos de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

protección y maniobra (APM), como reconectadores, seccionadores y fusibles. Existen también en el modelado puntos abiertos (OP, del inglés "Open Point"), donde es posible realimentar desde otros distribuidores vecinos.

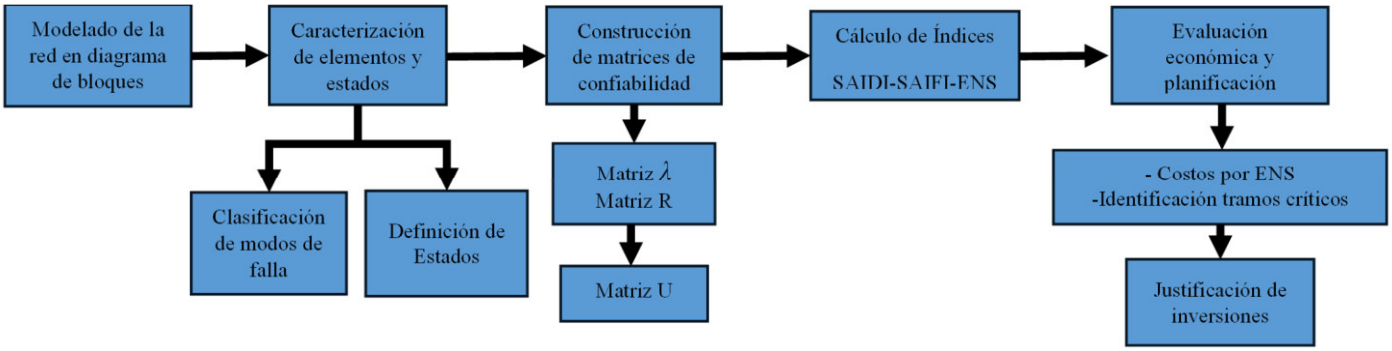



**Figura 2.** Diagrama de bloques de metodología FMEA.

En base a la topología de la red y los AMP existentes, así como de las posibles alternativas de alimentación, se procede a la clasificación de los denominados estados, en donde se refleja el comportamiento de la red ante cada falla. Existen 4 estados posibles para cada tramo del sistema, a saber: normal (*N*), sin afectación; irrestablecible (*I*), corte hasta reparación; restablecible (*R*), servicio recuperado mediante maniobras internas; y, transferible (*T*), servicio recuperado mediante transferencia de carga a distribuidores vecinos

A partir de allí, se derivan el cálculo de la matriz de indisponibilidad (*U*). Para obtenerla es necesario definir anteriormente la de tasa de falla ($\lambda$), y la de restauración (*R*). Para la caracterización de estas matrices se consideran los siguientes indicadores los cuales fueron proporcionados por la empresa distribuidora, siendo: $\lambda = 0{,}5$ (fallas/100 km), el tiempo de restauración $T_r$ = 5 h., el tiempo de switching $T_s = 1$ h. y el tiempo de transferencia $T_t = 0{,}5$ h.

Con esta información, es posible obtener los índices SAIDI, SAIFI y ENS, para finalmente evaluar el impacto económico de la falta de suministro de energía.

## 3. Resultados y discusión

3.1. *Diagrama y matriz de estados*

En primer lugar, se modela el diagrama de bloques de las salidas a fines de realizar el análisis de confiabilidad. Aunque la metodología se aplica a todas las salidas, por cuestiones de espacio, en esta sección se presentan los resultados solo de la Salida 1. La Figura 3**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el diagrama de bloques de a la Salida 1. S e destacan dos reconectadores (R1 y R2), dos puntos OP, un interruptor (I), tres tramos (T1, T2 y T3), y tres demandas (D1, D2 y D3).

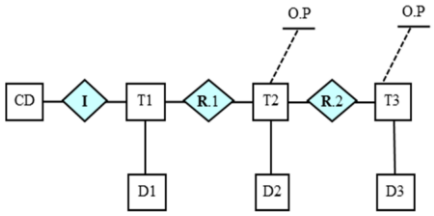



**Figura 3.** Modelo de bloques de Salida 1

Con el modelo de bloques, es posible armar la matriz de estados, donde las filas son "Fallas", y las columnas son los "Efectos" de esa falla en los elementos del bloque. La matriz de estados de la Salida 1 se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Matriz de estados de los elementos ante fallas

| Falla \ Efecto | T1 | T2 | T3 | D1 | D2 | D3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T1 | I | T | T | I | T | T |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T2** | N | I | T | N | I | T |
| **T3** | N | N | I | N | N | I |
| **D1** | I | T | T | I | T | T |
| **D2** | N | I | T | N | I | T |
| **D3** | N | N | I | N | N | I |

A modo explicativo, se detalla la construcción de los primeros elementos de la fila 1, que analiza los efectos de una falla en T1. En primer lugar, el efecto en T1 se clasifica como Irrestablecible (I), ya que al ser el tramo donde ocurre la falla, su suministro no puede restablecerse hasta que se complete la reparación. En cuanto a T2, aunque la falla se localiza en T1, su carga puede ser transferida a un distribuidor vecino mediante la acción del reconectador existente en el sistema (R1); por ello se considera Transferible (T). Del mismo modo, la carga de T3 también puede ser realimentada mediante el mismo mecanismo de transferencia, por lo que este tramo se clasifica como Transferible (T). Finalmente, al analizar la segunda fila, correspondiente a una falla en T2, se observa que esta no afecta el suministro de T1, por lo que su estado se define como Normal (N). Este análisis permite visualización de como los diferentes tramos y derivaciones de la red reaccionan ante una falla en un punto especifico, identificando cuales pueden mantener el suministro mediante maniobras y cuales dependen exclusivamente de la reparación para ser reenergizados.

3.2. *Matrices de falla, restauración e indisponibilidad*.

En base a datos suministrados por la empresa distribuidora de energía eléctrica se elabora la Tabla 2 y la Tabla 3 donde se presentan las matrices R y λ de la Salida 1. Se considera como falla más severa a la acontecida en T1, por tratarse de la troncal vinculada a la fuente de red, encargada de evacuar todo el flujo de carga. Este distribuidor cuenta con la posibilidad de realimentar el T2 y T3 desde distribuidores vecinos. Cabe destacar que los valores de los tiempos serán los correspondientes a la red en 13,2 kV de la ciudad de Esperanza.

**Tabla 2.** Matriz de tiempo de restauración (R) [hs/falla]

| FM \ EA | T1 | T2 | T3 | D1 | D2 | D3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 5,0 | 0,5 | 0,5 | 5,0 | 0,5 | 0,5 |
| **T2** | 0,0 | 5,0 | 0,5 | 0,0 | 5,0 | 0,5 |
| **T3** | 0,0 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 5,0 |
| **D1** | 5,0 | 0,5 | 0,5 | 5,0 | 0,5 | 0,5 |
| **D2** | 0,0 | 5,0 | 0,5 | 0,0 | 5,0 | 0,5 |
| **D3** | 0,0 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 5,0 |

**Tabla 3.** Matriz de tasas de falla (λ) [fallas/año]

| FM \ EA | T1 | T2 | T3 | D1 | D2 | D3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| **T2** | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| **T3** | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,04 |
| **D1** | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| **D2** | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **D3** | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,08 |
| **Total** | **0,03** | **0,05** | **0,16** | **0,03** | **0,05** | **0,16** |

A fines explicativos, se presenta la construcción de los primeros elementos de la matriz R considerando una falla en T1. En este caso, T1 requiere el mayor tiempo de restauración, estimado en 5 horas, por ser el tramo directamente afectado. La carga de T2 puede transferirse a un distribuidor vecino, por lo que su tiempo de restablecimiento es de 0,5 horas, correspondiente a las maniobras necesarias. Del mismo modo, la carga de T3 también es transferible y su tiempo de restauración es de 0,5 horas. Si se analiza la segunda fila, correspondiente a una falla en T2, el reconectador del sistema actúa aislando el tramo afectado sin interrumpir el suministro en T1, por lo que su tiempo de restauración es de 0 horas. En base al índice de tasa de falla por kilómetro y por año (proporcionado por la empresa distribuidora) de cada circuito (troncales y derivaciones), se elabora la matriz de tasa de fallas por año para cada tramo, relacionado con el punto de falla y según el estado del elemento durante la falla (ver Tabla).

La indisponibilidad por tramo se obtiene del producto de las matrices R y λ. En la Tabla 4 se muestran los resultados, donde se advierte que T3 y D3 constituyen los tramos más comprometidos con respecto a sus hs/año de indisponibilidad frente a los valores del resto de los tramos; resultando el tiempo de indisponibilidad anual de la Salida 1 igual a 1,71 horas/año.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 4.** Matriz de indisponibilidad (U) [horas/año]

| FM \ EA | T1 | T2 | T3 | D1 | D2 | D3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 0,091 | 0,009 | 0,009 | 0,091 | 0,009 | 0,009 |
| **T2** | 0,000 | 0,045 | 0,005 | 0,000 | 0,045 | 0,005 |
| **T3** | 0,000 | 0,000 | 0,188 | 0,000 | 0,000 | 0,188 |
| **D1** | 0,078 | 0,008 | 0,008 | 0,078 | 0,008 | 0,008 |
| **D2** | 0,000 | 0,019 | 0,002 | 0,000 | 0,019 | 0,002 |
| **D3** | 0,000 | 0,000 | 0,397 | 0,000 | 0,000 | 0,397 |
| **Total** | **0,169** | **0,080** | **0,608** | **0,169** | **0,080** | **0,608** |

3.3. *Cálculo de índices y ENS*

A fines de valorizar las interrupciones y la ENS, se obtienen índices específicos orientados al consumidor. Estos se calculan para un sistema o red y para un tiempo dado; en este caso, anual. Los indicadores escogidos son:

a) Frecuencia media de interrupción del sistema (SAIFI), que es el número medio de interrupciones por consumidor y por unidad de tiempo (interrupciones/año), dada por,

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{N°total de consumidores interrumpidos}}{\text{N°total de consumidores del sistema}} = \frac{\sum(N_j \cdot \lambda_j)}{\sum N_j} \quad (1)$$

b) Duración media de interrupción del sistema (SAIDI), la duración media de interrupción por consumidor y por unidad de tiempo (horas/año), que puede calcularse mediante:

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{Suma de duraciones de interrupc. a consum.}}{\text{N°total de consumidores en el sistema}} = \frac{\sum(N_j \cdot U_j)}{\sum N_j} \quad (2)$$

El límite máximo admisible de SAIFI se establece en 12 fallas por cliente por año. Mientras que para el SAIDI el límite es de 10 horas de interrupción por cliente por año (ENRE, 2022). Se obtuvieron estos indicadores, pero para todas las Salidas, de manera de realizar un análisis completo de la red.

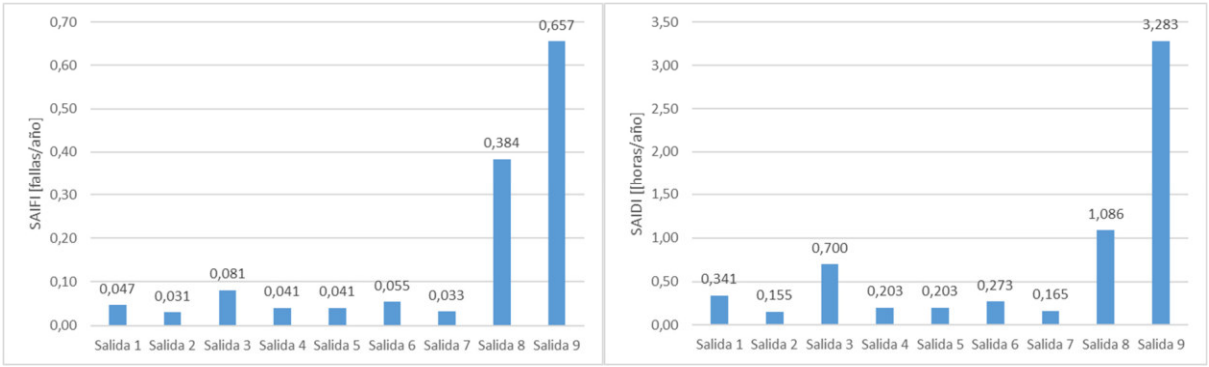



**Figura 4.** (a) Duración media de interrupción por usuario y unidad de tiempo (SAIFI) y (b) tiempo total de interrupción por usuario y por año (SAIDI).

A partir de la Ec (3) se calcula la Energía No Suministrada (ENS):

$$\text{ENS} = \sum U_j x L_{aj} \quad (3)$$

donde Laj es la energía consumida asociada a cada tramo (kW), y Uj es el tiempo de indisponibilidad de cada tramo (hs). Finalmente, se valoriza en términos económicos (en función al indicador PENS) las penalizaciones debido a la ENS según la Ec (4)**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$P_{ENS} = ENS \cdot C \quad (4)$$

donde C es el valor de la penalización medida en 1.500 U$S/MWh. La Figura 5 presenta el valor de este indicador por cada salida.

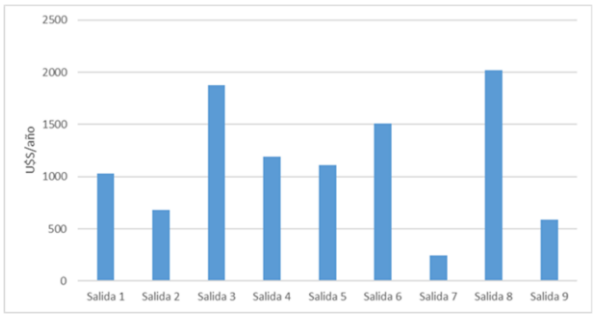



**Figura 5.** Costos por energía No Suministrada de la red en 13,2 kV de la ciudad de Esperanza.

Se observa que, a pesar de que en general, las Salidas de 1 a 7 han presentado bajos valores de interrupción, al ser de tipo urbanas, poseen gran cantidad de usuarios. Esto se traduce en mayores pérdidas económicas para la distribuidora y los usuarios. En contraparte, el efecto sí se ve en forma marcada para la Salida 8 que, aunque sea de tipo rural, con pocos usuarios, posee alto valor de pérdida económica. Esto no se ve reflejado en la Salida 9, que, con altos valores de indicadores SAIDI y SAIFI, al contar con menor demanda conectada, posee menor costo por ENS.

## 4. Conclusiones

El método FMEA representa una innovación en el análisis de confiabilidad de redes de distribución, al combinar precisión técnica con criterios económicos. Su aplicación en la red de Esperanza demuestra que en términos de SAIDI y SAIFI, aunque los valores globales cumplen la normativa, las salidas rurales concentran los riesgos más altos de interrupciones. Pero en cuanto a ENS se puede analizar que las que las Salidas urbanas (4, 5 y 6), como también las urbano/rurales (1 y 3) presentan altos costos por penalizaciones. Esta cuantificación económica de la ENS fortalece la justificación de nuevas obras, haciendo que la planificación de la expansión sea más eficiente y alineada con las necesidades reales del sistema considerando cada tramo de cada distribuidor en el análisis. El FMEA se presenta como una herramienta replicable en otras distribuidoras, contribuyendo a mejorar la resiliencia de los sistemas eléctricos y la calidad de servicio percibida por los usuarios.

## Referencias bibliográficas

Akula, S. K., Salehfar, H., & Behzadirafi, S. (2022). *Comparison of Traditional and Fuzzy Failure Mode and Effects Analysis for Smart Grid Electrical Distribution Systems*. arXiv. doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.04720

Wolfram, C., Shelef, O., & Gertler, P. (2012). “How Will Energy Demand Develop in the Developing World?”. *Journal of Economic Perspectives*, 26 (1), 119-138.

Ente Nacional Regulador de la Electricidad – ENRE. (2022). *Calidad de servicio en la distribución de energía eléctrica*. Buenos Aires: ENRE.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiante de grado
**Facultad Regional:** Venado Tuerto

# Resultados preliminares de la medición de ozono en el interior de envases sellados empleando una descarga no–térmica a presión atmosférica para el tratamiento de alimentos

## Preliminary Results on Ozone Measurement Inside Sealed Packages Using a Non-Thermal Atmospheric Pressure Discharge for Food Processing

Presentación: 30/10/2025

**Facundo Ordoñez**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Descargas Eléctricas (GDE), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
facundordonez05@gmail.com

### Resumen

El objetivo de este trabajo es evaluar la generación y medición de ozono en envases sellados mediante una descarga no-térmica (PNT) a presión atmosférica, orientada al tratamiento de alimentos. Se presentan los resultados preliminares obtenidos con un reactor tipo alambre-plano operado con aire ambiente (HR 55%) y oxígeno. Se envasaron frutillas en 12 bolsas Ziploc® (LPDE, tamaño mediano), siendo expuestas al PNT con tiempos de procesamiento de hasta 180 s. La concentración de ozono se midió por espectroscopía de absorción UV. La potencia activa a partir de las curvas características carga-voltaje fue de (55 ± 2) W para aire y (67 ± 6) W para oxígeno. Se alcanzaron concentraciones de ozono de 250 y 500 ppmv a 60 y 180 s en aire, y más de 700 ppmv con oxígeno. El decaimiento posdescarga puede atribuirse a la humedad del gas y/o a las características superficiales del fruto. El reactor operó en modo ozono, mostrando potencial para aplicaciones en alimentos.

**Palabras clave:** plasma no-térmico, envase sellado, frutilla, ozono, procesamiento de alimentos

### Abstract

The objective of this work is to evaluate the generation and measurement of ozone in sealed containers through a non-thermal discharge (NTD) at atmospheric pressure, aimed at food treatment. Preliminary results are presented using a wire-to-plate type reactor operated with ambient air (RH 55%) and oxygen. Strawberries were packaged in 12 Ziploc® bags (LDPE, medium size) and exposed to the NTD with processing times of up to 180 s. Ozone concentration was measured by UV absorption spectroscopy. The active power obtained from the charge–voltage characteristic curves was (55 ± 2) W for air and (67 ± 6) W for oxygen. Ozone concentrations of 250 and 500 ppmv were reached at 60 and 180 s in air, and more than 700 ppmv with oxygen. Post-discharge decay can be attributed to the gas humidity and/or the surface characteristics of the fruit. The reactor operated in ozone mode, showing potential for food applications.

**Keywords:** Non-thermal plasma, sealed package, strawberry, ozone, food processing

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

Un plasma es un gas parcial o totalmente ionizado consistente en una mezcla de electrones, iones y partículas neutras. Un gas ionizado se considera como un plasma, únicamente si la cantidad de carga positiva y negativa se balancea mutuamente (el plasma debe ser aproximadamente neutro en su conjunto (Raizer, 1991)). El modo más usual de generación de plasmas a escala de laboratorio es a través de la utilización de descargas eléctricas en un gas. En particular, las descargas no–térmicas en gases a presión atmosférica se caracterizan por marcados desequilibrios térmico y la presencia de electrones energéticos ($T_e$ ~ 1–5 eV, 1 eV ≈ 11600 K) y un gas neutro relativamente frío ($T_g$ ~ 300–1000 K) con un grado de ionización muy pobre (Bruggeman y col., 2017). Los plasmas no–térmicos de alta presión se producen a través de una variedad de descargas eléctricas (Fridman y col., 2005). Aquí, una descarga ampliamente utilizada debido a que pueden operar a presión atmosférica con un alto grado de desequilibrio térmico (y por lo tanto apta para el tratamiento de sustratos termosensibles) con niveles de potencia razonablemente elevadas, es la DBD tipo volumétrica (Kunhardt, 2000; Fridman y col., 2005; Brandenburg, 2017).

La industria alimentaria se encuentra en constante búsqueda de nuevas tecnologías que permitan garantizar la seguridad microbiológica, la sostenibilidad y la extensión de la vida útil de la frutilla. Estos frutos, por lo general, son cosechados y envasados directamente en contenedores para su posterior distribución y comercialización. Sin embargo, el deterioro postcosecha se atribuye, en gran medida, a la proliferación de levaduras y mohos presentes en su superficie (Lacombe et al., 2015; Zhou et al., 2019). Ante este desafío, surge la necesidad de implementar tecnologías capaces de inactivar patógenos en alimentos frescos envasados sin comprometer sus propiedades nutricionales ni sensoriales (Niemira, 2012). En este contexto, los plasmas no-térmicos (PNT) generados en el interior de recipientes sellados han demostrado reducir significativamente la carga microbiológica de diversos microorganismos —incluyendo bacterias, mohos, hongos y levaduras— sin afectar la calidad del producto (Misra et al., 2014; Ziuzina et al., 2019), principalmente debido a la generación de especies reactivas del oxígeno y del nitrógeno, entre ellas el ozono (Pankaj y col., 2018; López y col., 2019; Misra y col., 2019).

En este trabajo se reportan los resultados preliminares de la medición de ozono en el interior de recipientes sellados empleando un reactor a escala de laboratorio para la generación de una descarga DBD a presión atmosférica para dos tipos de gases de confinamiento: aire ambiente y oxigeno; empleando tiempo de procesamiento de hasta 180 s.

# 2. Materiales y métodos

2.1. *Reactor DBD. Esquema eléctrico y configuración de tratamiento.*

En la Figura 1 se presenta un esquema del arreglo experimental empleado para la generación de la descarga de barrera dieléctrica (DBD, por sus siglas en inglés). Se utilizó un reactor a escala de laboratorio con una configuración de electrodos tipo alambre-plano.

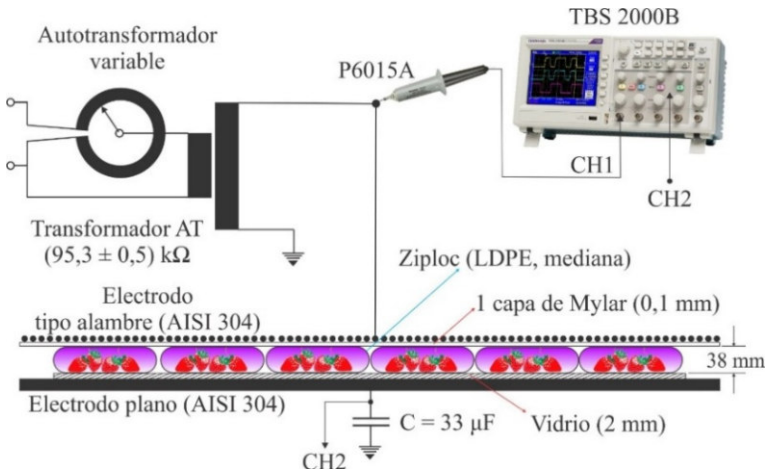



**Figura 1**. Esquema del reactor DBD y circuito eléctrico empleado.

El electrodo tipo alambre, con un tamaño de 1000 × 500 mm, estaba constituido por un arreglo de alambres de acero inoxidable AISI 304 (0,2 mm de diámetro) con una separación de 20 mm en dirección transversal. Debajo de este se colocó una capa de Mylar® de 0,1 mm de espesor. Por otro lado, el electrodo plano (aterrizado) también se construyó en AISI 304 y

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

tamaño resultó ser mayor que el electrodo superior. Además, sobre este, también se colocó una segunda barrera dieléctrica (vidrio, 2mm). El espacio de aire entre las barreras dieléctricas fue fijado en 38 mm. Por otro lado, para la medición de ozono en recipientes sellados bajo condiciones estándar de operación del reactor, se posicionaron simultáneamente 12 bolsas Ziploc® (LDPE, tamaño mediano), cada una conteniendo 90 g de frutillas (equivalente a 6 unidades). Las frutillas (las cuales fueron compradas en el mercado local) fueron medidas y observadas, de forma tal de que no superen el tamaño de 38 mm y no cuenten con algún daño superficial. Antes de introducir el gas de trabajo —oxígeno de pureza industrial o aire ambiente con 55 % de humedad relativa—, el gas residual dentro de las bolsas fue evacuado cuidadosamente. Posteriormente, se introdujo el gas correspondiente a la atmósfera de descarga, y las bolsas fueron selladas herméticamente utilizando una máquina termoselladora. El volumen de gas confinado se estimó en 790 ± 70 $cm^3$ y los tiempos de operación del reactor seleccionados fueron de 60 y 180 s.

La fuente de alimentación de corriente alterna consistía en un transformador de alta tensión (25 kV, 100 mA y 50 Hz) con una reactancia de alta dispersión $(95{,}3 \pm 0{,}5)$ kΩ conectado a un autotransformador variable para controlar la corriente de descarga. Los parámetros eléctricos de la descarga fueron monitoreados utilizando un osciloscopio de cuatro canales (Tektronix TBS 2000B con una tasa de muestreo de 1 GS $s^{-1}$ y un ancho de banda analógico de 70 MHz). El voltaje de descarga fue medido con una sonda de alta impedancia (Tektronix P6015A, 1000×, 3 pF, 100 MΩ).

2.2 *Medición de potencia eléctrica*

El consumo de potencia activa media en la descarga durante el funcionamiento del reactor fue medido mediante el método de las figuras de Lissajous, insertando un capacitor $C$ de 33 µF en serie con la descarga. La potencia media $P$ se halló de acuerdo con:

$$P = f\,C \oint V_{(t)}\, dV_{C(t)}. \tag{1}$$

Donde $f$ es la frecuencia (= 50 Hz), $V_{(t)}$ el voltaje de la descarga y $V_{C(t)}$ el voltaje en el capacitor.

2.2 *Medición de ozono*

En la Figura 2 se muestra un esquema del arreglo óptico empleado para la medición de ozono en el interior de uno de los recipientes sellado mediante espectroscopía de absorción UV en condición de operación del reactor (para mayor claridad se omitieron los electrodos).

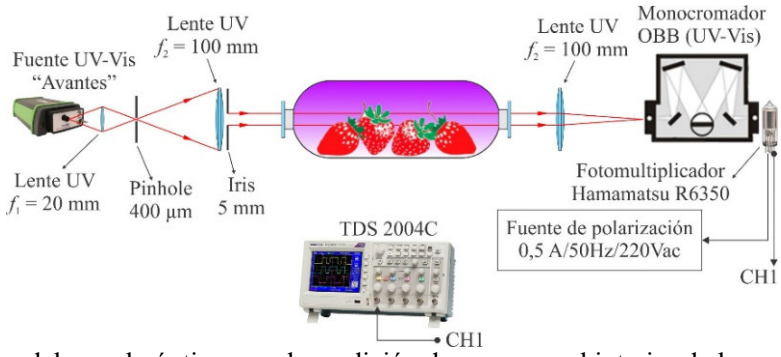



**Figura 2**. Esquema del arreglo óptico para la medición de ozono en el interior de los recipientes sellados.

La radiación ultravioleta fue proporcionada por una lámpara de argón/mercurio (Avantes AvaLight–CAL–Mini, rango 253,6–922,5 nm). Para obtener una fuente puntual, el haz UV se enfocó con una lente condensadora de 20 mm de distancia focal ($f_1$ = 20 mm) sobre un pinole de 400 µm de diámetro. Posteriormente, el haz atravesó un iris de 5 mm y se colocó en el plano focal de una lente UV con $f_2$= 100 mm, la cual generó un haz colimado que ingresó al recipiente estanco, que en cada uno de sus extremos contenía acoples estancos con ventanas de cuarzo para permitir el paso del haz UV a través del espacio gaseoso confinado y, por ende, de la región de descarga. A la salida, un segundo lente UV de $f_2$ = 100 mm dirigió el haz hacia la ranura de entrada del monocromador UV-Vis (OBB, rejilla de 2400 líneas/mm, ajustado a 300 nm). La radiación transmitida fue detectada por un fotomultiplicador (Hamamatsu R6350) acoplado al monocromador, que transformó la señal óptica en señal eléctrica, que se midió empleando un osciloscopio de cuatro canales (Tektronix TDS 2004C). La concentración de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

ozono se obtuvo a partir de la absorbancia medida a 254 nm, aplicando la ley de Lambert-Beer. Para el cálculo se utilizó una sección transversal de absorción de $1{,}147 \times 10^{-21}$ m² y una trayectoria óptica de 110 mm, equivalente a la longitud entre ventanas de cuarzo. Las mediciones presentaron una resolución temporal cercana a 0,5 s y un límite de detección de 3 ppm. No se detectaron concentraciones de ozono en el reactor operando sin recipientes y la temperatura ambiente se ubicó entre los 16 °C y 18°C (medido con termohigrómetro TESTO 605 H-1).

## 3. Resultados y discusión

Las curvas características de carga-voltaje de la descarga para los dos gases utilizados en los experimentos se muestran en la Figura 3. Se observa que la forma de las curvas carga-voltaje se asemeja a una elipse, en lugar de un paralelogramo ideal, similar a lo que ocurre en los ozonizadores. En el caso de aire ambiente (ver Figura 3(a)) la potencia activa medida fue de (55 ± 2) W. En cambio, cuando se empleó oxigeno como gas de generación de la descarga, la potencia consumida fue (67 ± 6) W. Si bien es esperable que al emplear oxigeno la potencia consumida sea menor que en aire (que contiene 20% de oxígeno) debido al aumento en las pérdidas de electrones por un incremento de los procesos de attachment, aunque en principio se esperaría que el consumo de potencia al emplear oxígeno fuera menor debido al incremento de los procesos de attachment, en este trabajo se observó un valor superior al registrado con aire. Esta discrepancia podría deberse a la falta de uniformidad en el tamaño de las frutillas envasadas, lo que genera variaciones en las longitudes efectivas de la descarga. En futuras etapas experimentales se considera conveniente trabajar con lotes de frutos de tamaño más homogéneo, a fin de reducir este tipo de incertidumbres

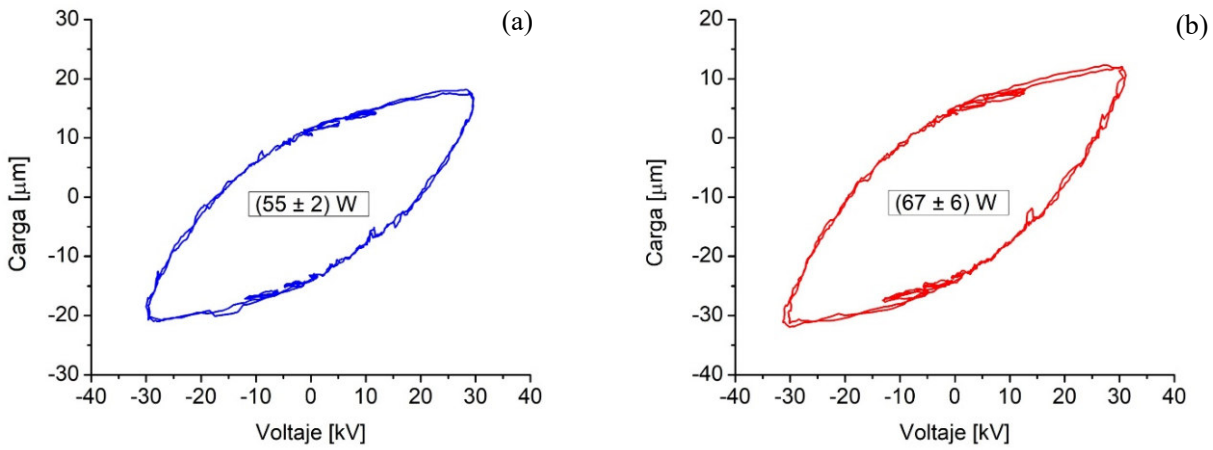



**Figura 3.** Curvas características carga-voltaje. (a) aire ambiente y (b) oxigeno.

La Figura 4 muestra los perfiles de evolución temporal de la densidad de ozono dentro del envase durante los tiempos de tratamiento de 60 y 180 s con la descarga activada, así como durante el postratamiento (descarga apagada) en el interior del envase sellado, para las diferentes atmósferas gaseosas empleadas en los experimentos. En condiciones de aire ambiente (Figura 4(a)), la densidad de ozono alcanza concentraciones aproximadas de 250 ppmv y 500 ppmv para tiempos de procesamiento de 60 y 180 s, respectivamente. En contraste, cuando se utiliza oxígeno como gas de trabajo (Figura 4(b)), se observan concentraciones superiores a 700 ppmv. No obstante, debido a limitaciones experimentales, principalmente asociadas con la longitud de absorción, no fue posible registrar la evolución completa hasta alcanzar la concentración máxima. Adicionalmente, se observa un incremento en la pendiente inicial (t = 0) del perfil de densidad de ozono en presencia de oxígeno, lo cual indica un aumento en la tasa neta de generación de ozono. Este comportamiento puede atribuirse a una mayor densidad de átomos de oxígeno (O) en la descarga, ya que dicha especie es determinante en la formación de ozono a través de la reacción: $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$, donde M es un tercer cuerpo (Kossyi y col., 1992). Asimismo, tanto la producción de ozono durante la descarga como su destrucción en la etapa de postratamiento podrían estar influenciadas por factores como las propiedades superficiales del producto (Ziuzina y col., 2014), la humedad del gas de trabajo y la introducida por el propio producto, ya que estas condiciones afectan la cinética química tanto del plasma como de la fase posdescarga. Cabe destacar que no fue posible cuantificar experimentalmente otras especies reactivas, como el $NO_2$, debido a sus bajas secciones eficaces de absorción y a sus concentraciones significativamente menores en comparación con el $O_3$. En conjunto, estos resultados sugieren que la descarga en barrera dieléctrica (DBD) operó predominantemente en modo ozono.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

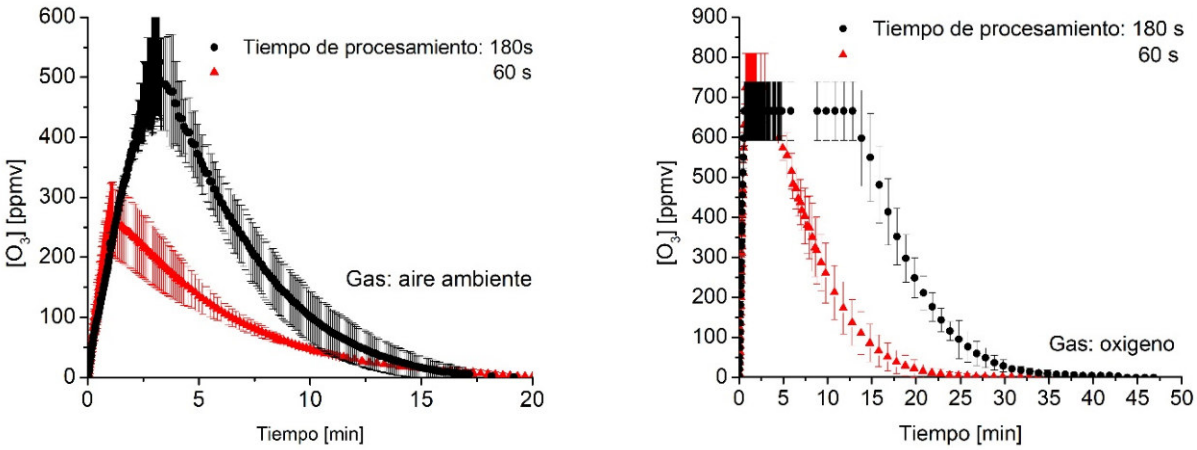



**Figura 4.** Evoluciones temporales de las concentraciones de ozono dentro del recipiente sellado empleando (a) aire ambiente y (b) oxigeno.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se reportan los resultados preliminares de la medición de ozono en el interior de recipientes sellados empleando una descarga DBD a presión atmosférica para dos tipos de gases de confinamiento. Del análisis de los resultados pueden derivarse las siguientes conclusiones:

(1) La potencia activa medida al emplear aire ambiente ((55 ± 2) W) resultó menor que al emplear oxígeno ((67 ± 6) W). En particular, si bien es esperable que la potencia para oxigeno resulte menor por la presencia de mayores niveles de procesos de attachment, la diferencia puede atribuirse a una falta de uniformidad en el tamaño de frutas contenidas en los envases.

(2) Se obtuvieron niveles de ozono de 250 ppmv y 500 ppmv aproximadamente cuando la descarga operó durante 60 y 180 s, respectivamente; siendo el gas de confinamiento era aire ambiente. En cambio, al emplear oxígeno, las concentraciones obtenidas fueron mayores a 700 ppmv. En particular, en este último, limitaciones experimentales no permitieron obtener la evolución temporal hasta los máximos alcanzables. Por último, el decaimiento en la concentración de ozono en la posdescarga puede estar asociado con la humedad del gas y/o del fruto y de sus características superficiales.

## Agradecimientos

Se agradece la dirección del Dr. Ezequiel Cejas y el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional a través del PID UTN VTPAPP301.

## Referencias bibliográficas

Brandenburg R (2017) Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments. *Plasma Sources Sci. Technol*., **26**(5), 053001.

Bruggeman P, Iza F, Brandenburg R (2017). Foundations of atmospheric pressure non-equilibrium plasmas. *Sources Sci. Technol*., **26**(12), 123002.

Fridman A, Chirokov A, Gutsol A (2005). Non-thermal atmospheric pressure discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys*. 38. 1-24.

Garcia LC, Pereira LM, deLuca Sarantópoulos CIG, Dupas Hubinger M (2011) Effect of Antimicrobial Starch Edible Coating on Shelf-Life of Fresh Strawberries. *Packag. Technol. Sci*., 25(7), 413–425.

Kossyi IA, Kostinsky AY, Matveyev AA, Silakov VP (1992). Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen–oxygen mixtures. *Plasma Sources Sci Technol* **1**:207–220.

Kunhardt E (2000) Generation of large-volume, atmospheric-pressure, nonequilibrium plasmas. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 28(1), 189-200.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Lacombe A, Niemira BA, Gurtler JB, y col. (2015). Atmospheric cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effects on quality attributes. *Food Microbiol*., 46, 479–484.

López M, Calvo T, Prieto M, Mugica-Vidal M y col. (2019). A Review on Non-thermal Atmospheric Plasma for Food Preservation: Mode of Action, Determinants of Effectiveness, and Applications. *Front. Microbiol*., 10: 622.

Misra NN, Patil S, Moiseev T, Bourke P, Mosnier JP, Keener, KM., Cullen, PJ (2014). In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries, *J. Food Eng.*, 125, 131e138.

Misra NN, Yepez X, Xu L, Keener K (2018). In-package cold plasma technologies. *J. Food Eng*. 244, 21–31.

Niemira B (2012). Cold Plasma Decontamination of Foods. *Annu. Rev. Food Sci. Technol*., 3(1), 125–142.

Y Raizer (1991) Gas discharge physics. Springer: Berlin.

Zhou D, Wang Z, Tu S, Chen S, Peng J, Tu K (2019). Effects of cold plasma, UV-C or aqueous ozone treatment on Botrytis cinerea and their potential application in preserving blueberry. *J Appl Microbiol*., 127(1):175-185.

Ziuzina D, Misra NN, Han L y col (2019). Investigation of a large gap cold plasma reactor for continuous in-package decontamination of fresh strawberries and spinach. Innovative Food Science and Emerging Technologies, https://doi.org/ 10.1016/j.ifset.2019.102229

Ziuzina D., Patil S., Cullen PJ, Keener KM, Bourke P (2014). Atmospheric cold plasma inactivation of Escherichia coli, Salmonella enterica serovar Typhimurium and Listeria monocytogenes inoculated on fresh produce. *Food Microbiology*, **42**, 109–116.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Impacto de la vibración sinusoidal en la descarga granular de una tolva bidimensional mediante el Método de Elementos Discretos

## Impact of sinusoidal vibration on granular discharge in a two-dimensional hopper using the Discrete Element Method

Presentación: 30/10/2025

**Leandro Chiabrando**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Rafaela, Sant Fe, Argentina
leo_chiabrando@hotmail.com

**Roxana Godoy**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Rafaela, Sant Fe, Argentina
Roxi_14_55@hotmail.com

### Resumen

El flujo de partículas granulares en tolvas presenta fenómenos complejos como bloqueos y variaciones en la tasa de descarga. En este trabajo se estudió, mediante simulaciones con el Método de Elementos Discretos (DEM), la descarga de una tolva bidimensional cargada con partículas de plomo y sometida a vibración vertical sinusoidal de 15 Hz y amplitud 0,012 m. Se comparó el comportamiento con y sin vibración, analizando la relación entre velocidad y posición vertical de las partículas. Los resultados muestran que, en ausencia de vibración, la descarga sigue un patrón gravitacional de tipo Torricelli. Bajo vibración se identifican dos modos de vaciado: uno gravitacional y otro acelerado asociado a la excitación externa. Además, se observa un efecto de fluidización durante la fase descendente del ciclo de vibración. Estos hallazgos aportan al entendimiento del efecto combinado de frecuencia y amplitud en la descarga de materiales de alta densidad, con potencial aplicación industrial.

**Palabras clave:** descarga granular, tolvas vibratorias, simulación DEM

### Abstract

The flow of granular particles in hoppers exhibits complex phenomena such as blockages and variations in discharge rate. In this work, the discharge of a two-dimensional hopper filled with lead particles and subjected to vertical sinusoidal vibration at 15 Hz and 0.012 m amplitude was studied using the Discrete Element Method (DEM). The behavior with and without vibration was compared by analyzing the relationship between particle velocity and vertical position. Results show that, in the absence of vibration, the discharge follows a gravitational pattern consistent with Torricelli's law. Under vibration, two discharge modes were identified: a gravitational mode and an accelerated mode associated with the external excitation. In addition, a fluidization effect was observed during the descending phase of the vibration cycle. These findings contribute to understanding the combined effect of frequency and amplitude on the discharge of high-density materials, with potential applications in industrial hopper design and process optimization.

**Keywords:** granular discharge, vibrating hoppers, DEM simulation

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El estudio del flujo de sólidos a granel en tolvas es de gran importancia tanto en la investigación como en la industria. La descarga de partículas granulares exhibe un comportamiento complejo, resultado de las interacciones entre las partículas y entre estas con las paredes del recipiente, produciendo fenómenos como la formación de arcos, embudos de flujo y bloqueos intermitentes (Janssen, 1895).

Diversos autores han abordado el flujo granular usando enfoques experimentales y numéricos. En el ámbito experimental, la aplicación de vibraciones externas ha demostrado ser una estrategia eficaz para modificar los patrones de flujo y reducir la formación de obstrucciones en tolvas de laboratorio. Estos estudios, realizados con materiales como esferas de vidrio y fertilizantes, han permitido establecer relaciones preliminares entre frecuencia, amplitud y tasa de descarga. Por otro lado, el avance en técnicas de simulación numérica ha impulsado el uso de Modelos de Elementos Discretos (DEM) para el estudio del comportamiento granular (Cundall y Strack, 1979). Las simulaciones DEM han mostrado eficacia en la predicción de patrones de flujo y tiempos de descarga (Bertone et al., 2023), validándose experimentalmente en investigaciones recientes con fertilizantes y otros materiales granulares (Zhu et al., 2008).

DEM permite modelar y analizar el comportamiento de partículas individuales dentro de la tolva, proporcionando una comprensión detallada de cómo las vibraciones mecánicas influyen en el flujo de sólidos a granel. Una de las ventajas destacadas del uso del DEM radica en su capacidad para revelar características del flujo de partículas que son difíciles o incluso imposibles de observar experimentalmente. A través de simulaciones DEM, se puede obtener información detallada sobre trayectorias de partículas, fuerzas transitorias y otros aspectos microscópicos del flujo granular que están más allá del alcance de las técnicas experimentales convencionales. Además, DEM brinda la capacidad de simular condiciones extremas que pueden ser inalcanzables en experimentos prácticos. Estas capacidades únicas de DEM permiten profundizar en el entendimiento de cómo las vibraciones mecánicas afectan la eficiencia de la descarga en una tolva bidimensional.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en el análisis de simulaciones DEM de la descarga de partículas de plomo en una tolva sometida a vibraciones verticales con patrón sinusoidal. La elección del plomo permite evaluar la influencia de las propiedades del sólido en la dinámica del vaciado. Para ello, se realizaron ensayos con vibraciones de 15 Hz y amplitud de 12 mm con el propósito de determinar cómo estas condiciones afectan la tasa de descarga y los patrones de flujo. El objetivo general es aportar al entendimiento del efecto combinado de frecuencia y amplitud de vibración en la descarga de partículas de alta densidad, proporcionando datos que sirvan como base para futuros estudios comparativos con modelos DEM.

# 2. Materiales y métodos

Para este trabajo se simuló una tolva bidimensional de fondo plano, diseñada con dimensiones que permiten un flujo estable y minimizan los efectos de pared. La abertura inferior, de 20 mm, corresponde a más de cinco veces el diámetro medio de las partículas, lo que reduce la probabilidad de formación de arcos. Se implementó un modelo DEM de partículas blandas (Cundall y Strack, 1979), permite que estas partículas experimenten deformaciones que son utilizadas para calcular las fuerzas elásticas, plásticas y de fricción que surgen entre ellas. En un flujo granular, las partículas pueden experimentar tanto traslación como rotación, lo que les permite interactuar con partículas vecinas o con las superficies del entorno. El movimiento de traslación y rotación de estas partículas se describe usando las leyes del movimiento de Newton. Para una partícula $i$ de masa $m_i$ y momento de inercia $I_i$, las ecuaciones de gobierno para el movimiento son:

$$m_i \frac{d\vec{v_i}}{dt} = \sum_j \vec{F}_{ij}^{c} + \vec{F}_i^{g} \ ;$$

$$I_i \frac{d\vec{w}_i}{dt} = \sum_j \vec{M}_{IJ} \ ;$$

donde $\vec{v_i}$ y $\vec{w}_i$ son las velocidades de traslación y angular de la partícula $i$, respectivamente, $\vec{F}_{ij}^{c}$ y $\vec{M}_{IJ}$ son las fuerzas de contacto y torque actuando en la partícula $i$ a través de la partícula $j$ o las paredes, y $\vec{F}_i^{g}$ es la fuerza gravitacional.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Para resolver este sistema de ecuaciones utilizando el método de elementos discretos, se seleccionó un paso de tiempo numérico menor que un valor crítico, lo que asegura que las perturbaciones no puedan propagarse más allá de las partículas vecinas inmediatas durante cada paso de tiempo.

El método DEM emplea modelos simplificados para calcular las fuerzas y torques de contacto entre las partículas. En este estudio, se optó por utilizar el modelo no lineal de Hertz-Mindlin (Hertz, 1882; Mindlin y Deresiewicz, 1953).

Las partículas fueron modeladas como esferas con distribución de tamaños en el rango de 2,4 a 2,7 mm, con el fin de evitar cristalización. Los parámetros DEM (densidad, coeficientes de rozamiento, coeficiente de restitución) se establecieron siguiendo referencias previas (Pascot et al., 2020), y se detallan en la Tabla 1. Las simulaciones se realizaron en LIGGGHTS (Kloss et al., 2012), el cual es un software de código abierto basado en DEM especialmente diseñado para el estudio de partículas de este tipo.

Partiendo de la tolva completamente cargada (6540 partículas). En primer lugar, se determinó un caudal de referencia sin vibración, y posteriormente se evaluó la influencia de diferentes frecuencias y amplitudes aplicadas en dirección vertical. Para cada condición se ejecutaron réplicas con semillas aleatorias, y el caudal se midió a partir del conteo de partículas que atravesaban un plano ubicado 20 mm por debajo de la salida.

**Tabla 1**. Valores de los parámetros adoptados para el modelo DEM

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Diámetro de partícula [mm] | 2,4 − 2,7 |
| Número de partículas (unidades) | 6540 |
| Densidad [Kg/m$^3$ ] | 11400 |
| Módulo de Young [Pa] | $5 \times 10^6$ |
| Coeficiente de Poisson | 0,3 |
| Coeficiente de restitución part/part | 0,3 |
| Coeficiente de restitución part/pared | 0,3 |
| Coeficiente de fricción part/part $\mu_{pp}$ | 0,3 |
| Coeficiente de fricción part/pared $\mu_{pw}$ | 0,3 |

## 3. Resultados y discusión

La Figura 1A muestra la descarga de la tolva sin vibración, obtenida mediante DEM, en la cual las partículas se descargan por efecto de la gravedad. Se observa una relativa uniformidad en la distribución de velocidades verticales dentro de la tolva. La Figura 1B presenta la relación entre velocidad de las partículas y posición vertical para un instante particular de la descarga, donde se aprecia que las partículas se ubican por encima de la base de la tolva (z=0) y presentan velocidades negativas que siguen un patrón de tipo Torricelli para fluidos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

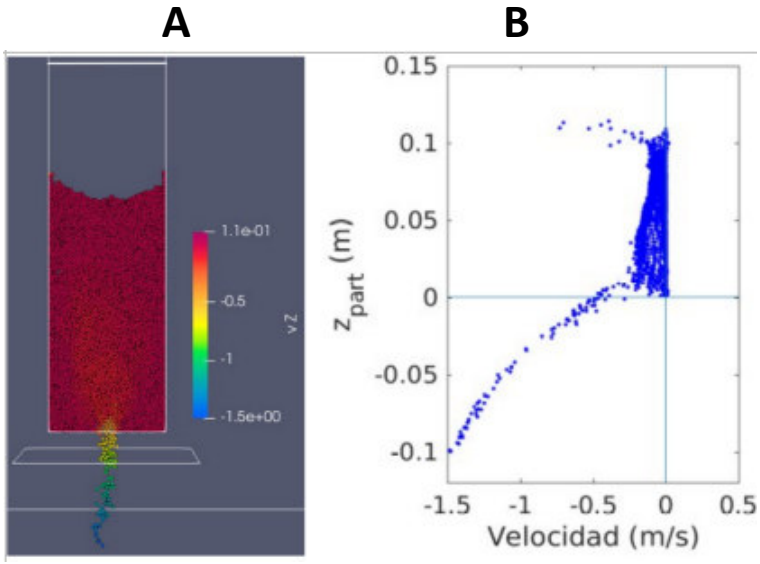



**Figura 1.** A: Simulación DEM de la descarga de la tolva sin vibración. B: Velocidad de las partículas en función de la posición vertical.

Posteriormente, se aplicaron vibraciones verticales (90°) con un patrón sinusoidal de 15 Hz y amplitud 12 mm. En la Figura 2 se muestran seis instantáneas de la descarga obtenidas durante un período de vibración, en intervalos de tiempo iguales. En las tres primeras instantáneas la tolva se encuentra en fase ascendente, lo que induce una aceleración adicional en las partículas. En las tres instantáneas inferiores, correspondientes a la fase descendente, las partículas presentan una mayor altura debido al efecto de fluidización inducido por la vibración.

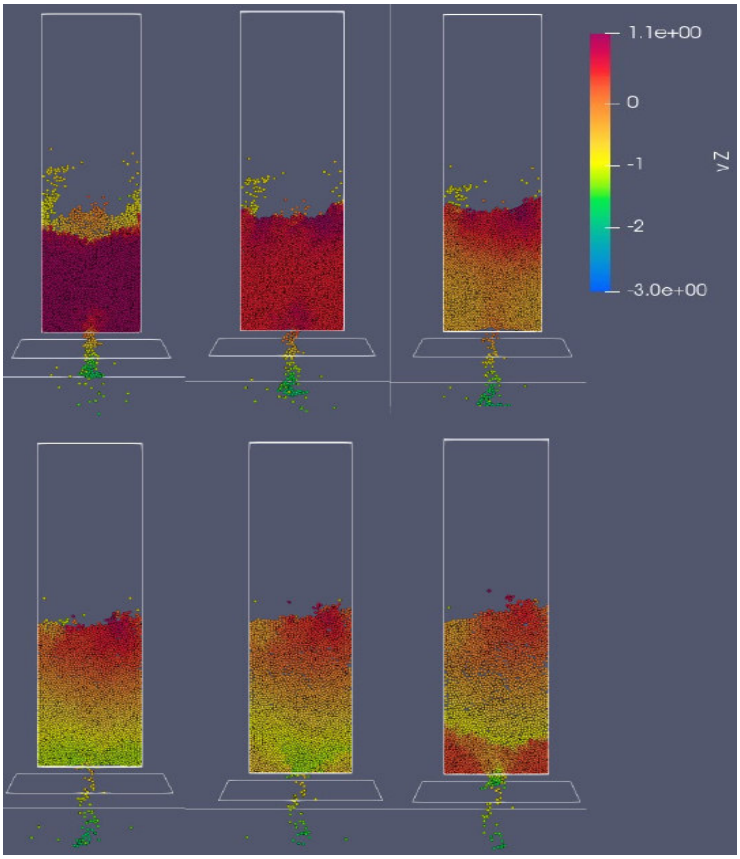



**Figura 2.** Simulación DEM de la descarga de la tolva con vibración sinusoidal (Frecuencia: 15 Hz, Amplitud: 12 mm).

La Figura 3 presenta la distribución de velocidad de las partículas en función de la posición vertical de la tolva vibrante, para los mismos instantes de la Figura 2. En comparación con la Figura 1B, se identifican dos modos de descarga. El primero corresponde a la descarga gravitacional siguiendo el patrón de Torricelli, representado por el ajuste en color verde. El segundo modo muestra partículas con velocidades significativamente superiores, asociadas al forzado vibratorio. Adicionalmente, se

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

observa que la distribución de partículas presenta un frente que se desplaza hacia la izquierda (hacia los valores negativos de velocidad) en las primeras cinco instantáneas. En la última vista comienza a recuperarse el frente ascendente, evidenciando la alternancia entre ambos modos de descarga.

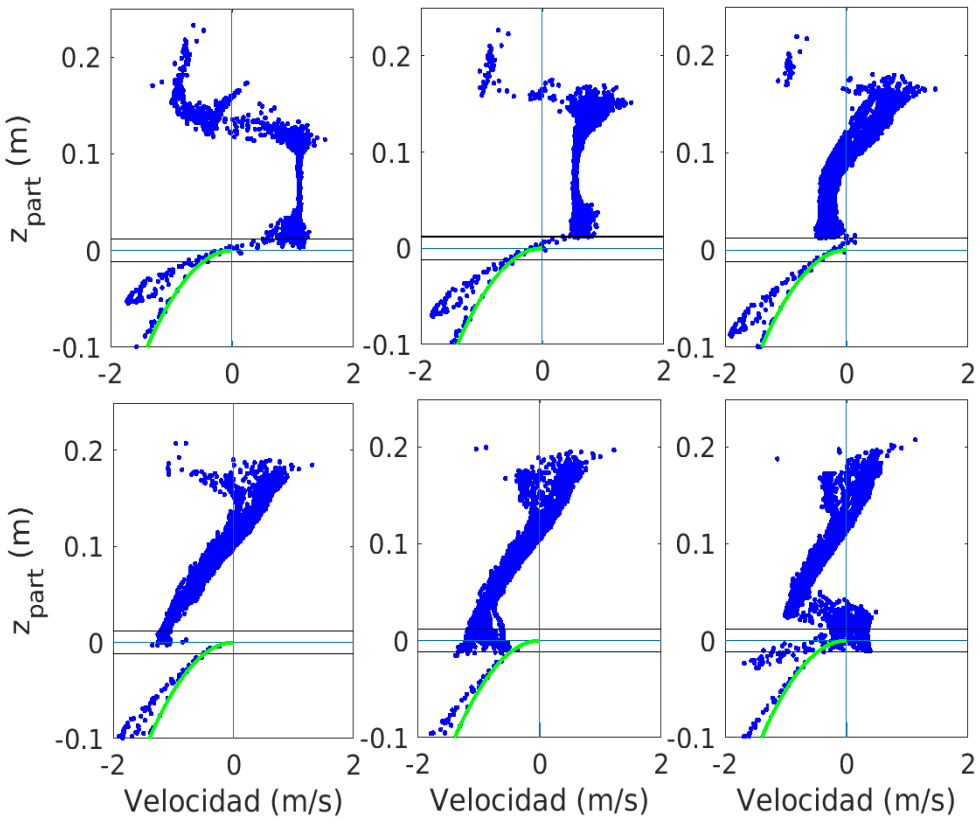



**Figura 3.** Velocidades verticales de las partículas en función de la posición z. Las líneas horizontales superior e inferior en torno a z = 0 indican las posiciones máximas alcanzadas por la tolva debido a la amplitud de la vibración.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se analizó, mediante simulaciones DEM, la descarga de una tolva bidimensional de partículas de plomo bajo vibración vertical sinusoidal de 15 Hz y amplitud 12 mm. Los resultados permiten concluir que la descarga sin vibración presenta un comportamiento gravitacional estable, con un perfil de velocidades que se ajusta al patrón de Torricelli. Por otro lado, la aplicación de una vibración sinusoidal genera un segundo modo de descarga, caracterizado por velocidades superiores a la descarga gravitacional, inducidas por la aceleración periódica de la tolva. Durante la fase descendente del ciclo de vibración se observa un efecto de fluidización que incrementa temporalmente la altura de la columna de partículas. La coexistencia de ambos modos de descarga muestra la relevancia de la frecuencia y amplitud de la vibración en la dinámica granular, implicando que la vibración no solo aumenta el caudal, sino que también modifica los patrones internos de flujo.

Estos resultados contribuyen a comprender el efecto de vibraciones externas en sistemas granulares de alta densidad, proporcionando una base cuantitativa para futuros trabajos que busquen optimizar el diseño de tolvas y establecer comparaciones experimentales con fertilizantes y otros materiales industriales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Gabriel Puccini y al Ing. Sergio Bertone del Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales de la Facultad Regional Rafaela, Universidad Tecnológica Nacional, por su orientación y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Referencias bibliográficas

Bertone, S., Puccini, G., Bonetti, C., Denardi, M., Bianchotti, J. (2023) “Impacto de las vibraciones mecánicas en la descarga de sólidos a granel en una tolva bidimensional: un análisis basado en modelos de elementos discretos”, Mecánica Computacional Vol XL, págs. 1285-1292.

Cundall, P. A. y Strack, O. D. L. (1979). “A discrete numerical model for granular assemblies”, Géotechnique, 29(1), 47-65.

Janssen, H. A. (1895). “Versuche über Getreidedruck in Silozellen”, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 39, 1045-1049.

Kloss, C., Goniva, C., Hager, A., Amberger, S. y Pirker, S. (2012). “Models, algorithms and validation for open-source DEM and CFD–DEM”, Progress in Computational Fluid Dynamics, 12(2-3), 140–152.

Mindlin, R. D. y Deresiewicz, H. (1953). “Elastic spheres in contact under varying oblique forces”, Journal of Applied Mechanics, 20, 327–344.

Pascot, F., et al. (2020). “Numerical investigation of granular flow using DEM: effect of material and contact parameters”, Powder Technology, 364, 123-132.

Venier, J., Bertone, G. y Godoy, R. (2021). “Aplicación del método DEM al estudio de la descarga de fertilizantes en tolvas agrícolas”, Revista de Ingeniería Mecánica, 12(1), 33-42.

Zhu, H. P., Zhou, Z. Y., Yang, R. Y. y Yu, A. B. (2008). “Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments”, Chemical Engineering Science, 63(23), 5728–5770.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Estudio sistemático de texturas en cojinetes hidrodinámicos y su influencia en la capacidad portante

## Systematic study of textures in hydrodynamic bearings and their influence on load-carrying capacity

Presentación: 30/10/2025

**Franco Cragnolino**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
francocragnolino44@gmail.com

**Santiago Zamateo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
santiagozamateo@gmail.com

### Resumen

La utilización de texturas superficiales en cojinetes hidrodinámicos constituye una estrategia eficaz para incrementar la capacidad de carga a menores velocidades de rotación y en geometrías reducidas. En este trabajo se presenta un estudio sistemático de texturas diseñadas para potenciar el efecto de bombeo característico de la geometría tipo chevron. Además, se demuestra que es posible mejorar la capacidad de carga considerando los efectos térmicos, los cuales, a pesar de su importancia, han recibido escasa atención en la literatura. Los resultados obtenidos son alentadores y superan los valores reportados en el estado del arte.

**Palabras clave:** Cojinetes hidrodinámicos, Texturas superficiales, Método de Volúmenes Finitos, Lubricación hidrodinámica, Cavitación.

### Abstract

The introduction of surface texturing in hydrodynamic bearings is an effective approach to increase load-carrying capacity at lower rotational speeds and in smaller geometries. This work presents a systematic study of textures specifically designed to enhance the pumping effect observed in chevron geometries. Furthermore, it is shown that load capacity can be improved by accounting for thermal effects, which, despite their relevance, have received limited attention in the literature. The results obtained are promising, exceeding those reported in the state of the art.

**Keywords:** Hydrodynamic bearings, Textured surfaces, Finite Volume Method, Cavitation, film lubrication.

## 1. Introducción

Los cojinetes hidrodinámicos permiten el movimiento rotativo entre dos superficies cilíndricas mediante la formación de una película de lubricante que separa los sólidos evitando el contacto [1]. Este proceso es iniciado cuando el eje comienza a girar, arrastrando consigo el lubricante hacia el espacio convergente entre las superficies del cojinete generando un incremento en la presión y permitiendo soportar la carga aplicada (Fig. 1.a).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

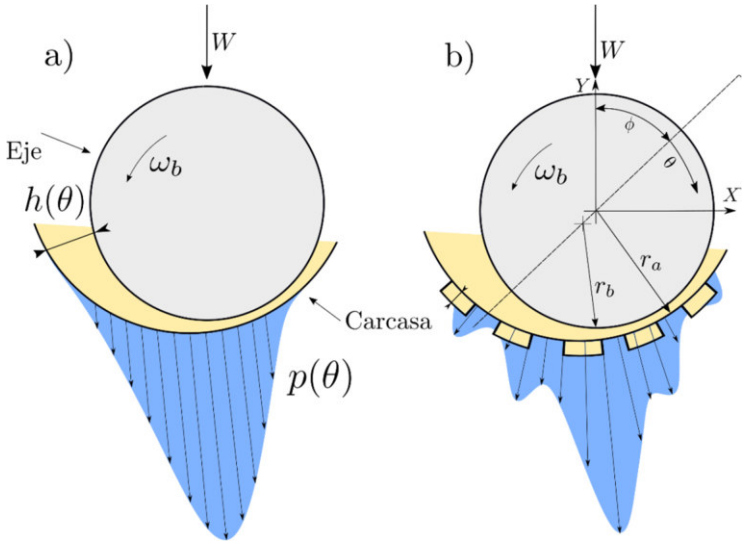



**Figura 1**. Parámetros característicos de cojinetes

**Tabla 1**. Nomenclatura de los parámetros y valores utilizados

| Designación | Parámetro característico | Valor |
|---|---|---|
| $W$ | Carga externa | Variable |
| $b$ | Largo del cojinete | 25 mm |
| $h$ | Huelgo medio | 0,05 mm |
| $e$ | Excentricidad relativa | Variable |
| $\omega_a$ | Velocidad angular | Variable |
| $r_a$ | Radio de la carcasa | 25 mm |
| $r_b$ | Radio del muñón | 24,95 mm |

Estudios preliminares [2, 3] indican que la introducción de texturas superficiales en la carcasa genera perturbaciones en la distribución de presiones aumentando la capacidad portante (Fig. 1.b). Sin embargo, también se reporta un aumento en la fricción y en la temperatura media del lubricante. Generalmente, el estudio de texturas que presentan beneficios en la capacidad de carga se realiza de forma isotérmica.

El presente trabajo se ha enfocado en la influencia de las texturas en la capacidad de carga utilizando una herramienta de cálculo numérico conservativa que permite considerar los efectos térmicos y de fricción. Este análisis se reconoce como único dentro del estado del arte.

## 2. Metodología

Para el cálculo del campo de presiones y las regiones de cavitación presentes en el lubricante se hace uso de una herramienta previamente desarrollada en Octave mediante el Método de Volúmenes Finitos, denominada dynCav [4]. Este código permite además tener en cuenta los efectos de fricción y temperatura del lubricante sobre la capacidad de carga final del cojinete. Para ello se resuelven la ecuación de Reynolds bifásica (1), la ecuación de distribución de fases (2) y la variación de viscosidad con la temperatura por medio de la ley de Vogel (3).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(-\frac{h^3}{12\,\mu_m}\frac{\partial p}{\partial x}-\frac{u_s}{2}\,h\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(-\frac{h^3}{12\,\mu_m}\frac{\partial p}{\partial x}\right)=S_{\alpha 1}\left(\frac{1}{\rho l}-\frac{1}{\rho v}\right)h-\omega_s \tag{1}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x}\,h+\vec{\nabla}_{x,y}\cdot\left(\alpha\,\vec{V}_{x,y}\right)+\alpha\,\omega_s=\frac{S_{\alpha l}}{\rho l}\,h \tag{2}$$

$$\mu(T)=\alpha_\mu \exp\left(-\beta_\mu\,(T-T_0)\right) \tag{3}$$

Se desarrolló un módulo para dicho código que permite la lectura de archivos de superficies estereolitográficas trianguladas (STL) para representar las superficies texturadas. Este módulo permitió aumentar la complejidad de las texturas que pueden utilizarse en la simulación siendo esta una contribución significativa en el campo de aplicación de la herramienta. A los fines

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

de interpolar correctamente los datos de la STL en la malla de dynCav se implementó la interpolación baricéntrica a partir de polinomios de Lagrange logrando la captura más apropiada de las aristas de las texturas respecto a la interpolación lineal.

En primera instancia, se validó el modelo a partir de los resultados obtenidos por Tala-Ighil [2]. Luego, se propusieron texturas alternativas con el objeto de optimizar la distribución de presiones. El punto de partida fueron las texturas del tipo Chevron de forma que focalice el flujo hacia el centro del cojinete. Posteriormente, se modificaron los parámetros geométricos de las texturas. Se evaluó la influencia de una profundidad constante, así como también el efecto que produce que la variación sea abrupta o suave.

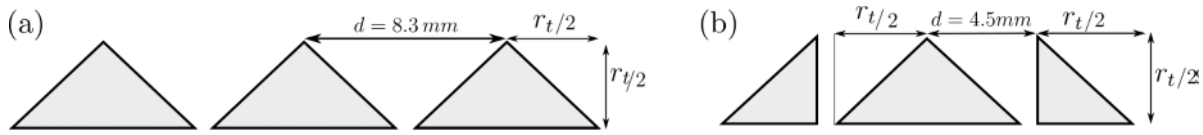



**Figura 2**. Características geométricas de las texturas con mejores resultados de carga.

## 3. Resultados y discusión

Dentro de las texturas propuestas, demostraron una mejor capacidad de carga aquellas que presentan morfologías rectas y triangulares, simetría y profundidad constante. Estas texturas fueron simuladas en estado estático isotérmico, donde la excentricidad y la velocidad son valores conocidos. De cada una de estas simulaciones se obtuvo el valor de la capacidad portante del cojinete, la cual se comparó con la de un cojinete liso de iguales dimensiones. Se realizó un análisis del comportamiento del cojinete variando la velocidad y la posición a fin de obtener una superficie de respuesta (Fig. 5). Con aquellas texturas que presentaron un incremento en la capacidad de carga respecto del cojinete liso, se repitió el análisis considerando el efecto de la fricción en la elevación de la temperatura.

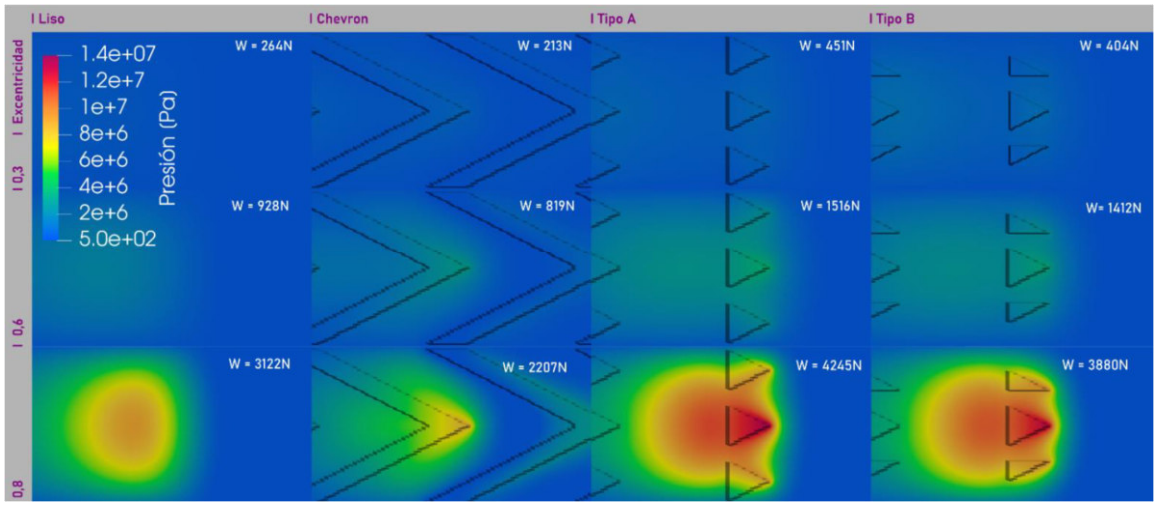



**Figura 3**. Campo de presiones de cojinetes liso y texturados para velocidad de giro = 3000 RPM.

En la Figura 3 se observa como la presencia de las texturas genera un aumento del campo de presión focalizado en el vértice del triángulo. Analizando los vectores de flujo puede verse el efecto de bombeo en bajas excentricidades. Al aumentar esta y, por ende, la presión, el flujo Poiseuille adquiere una mayor importancia relativa, disminuyendo la influencia del efecto de bombeo (Fig. 4)

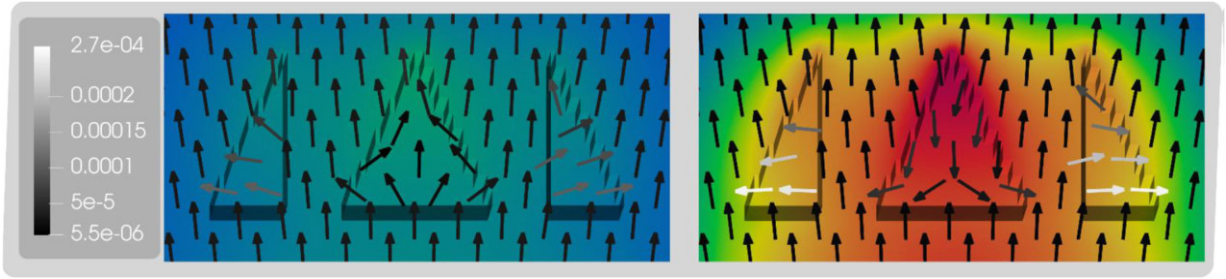



**Figura 4.** Vectores de flujo para cojinete propuesto tipo B, excentricidades relativas 0,6 y 0,8 respectivamente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En la Figura 5 se evidencia que, para excentricidades bajas (<0.7), un aumento de la velocidad de giro causa un mayor incremento en la carga en el cojinete texturado tipo B que en el liso. Al estudiar excentricidades mayores se muestra que el incremento de la relación de carga presenta menor sensibilidad a la variación de la velocidad de giro. Dado que el rango de excentricidades de trabajo usuales para cojinetes hidrodinámicos es de 0.7-0.9 y teniendo en cuenta velocidades entre 1500-3000 RPM se concluye que la ganancia es siempre superior al 19%.

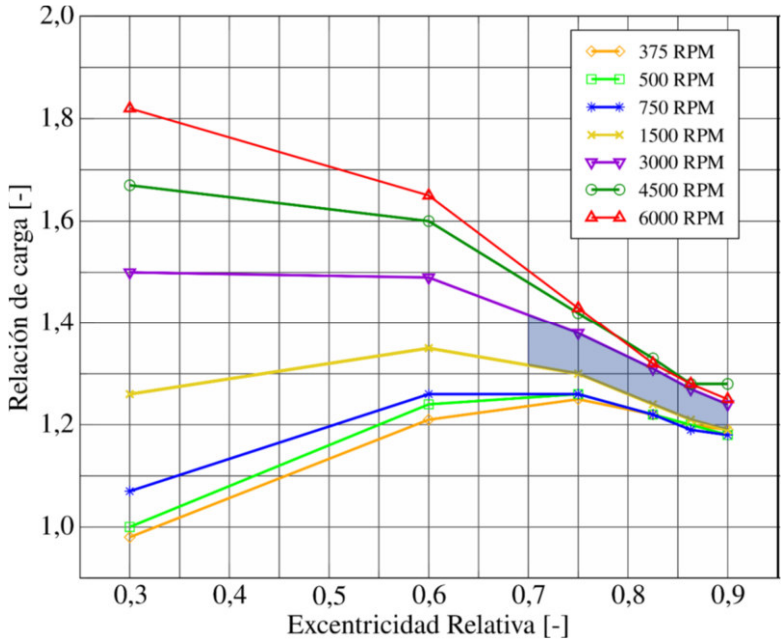



**Figura 5.** Relación de carga entre textura tipo b y liso.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un estudio parametrizado de texturas en cojinetes hidrodinámicos, incluyendo propuestas superadoras a las que se encuentran en la literatura. Para ello se realizó un estudio integral de la película lubricante incluyendo cavitación, fricción y temperatura. Los resultados muestran que el diseño de textura obtenido permite lograr ganancias mayores al 19% para los rangos de trabajo usuales en cojinetes hidrodinámicos, resaltando el potencial que posee el uso de texturas en cojinetes y presentando resultados que no han sido reportados previamente.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Santiago Márquez Damián y el Dr. Federico Cavalieri, en el marco del proyecto 2025-I-M-8685 “Métodos numéricos para flujos a bajos números de Reynolds”. El trabajo cuenta con el aporte de Valentina Onyszczyk becaria SCyT en el proyecto en el año 2024, y de Jorge Palavecino becario doctoral en el Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC), CONICET/UNL. Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## Referencias bibliográficas

[1] Hamrock, B., 1994. Fundamentals of fluid film lubrication. McGraw-Hill.

[2] Tala-Ighil, N., Fillon, M., 2015. A numerical investigation of both thermal and texturing surface effects on the journal bearings static characteristics. Tribology International 90, 228–239.

[3] Dos Anjos, L., Jaramillo, A., Buscaglia, G., Nicoletti, R., 2023. Improving the load capacity of journal bearings with chevron textures on the shaft surface. Tribology International 185, 108561.

[4] Palavecino, J., Cavalieri, F., Márquez Damián, S., 2024. A second-order in time and space model to solve the coupled Reynolds–Rayleigh–Plesset equations for the dynamics of cavitated hydrodynamic journal bearings. Tribology International 192, 109206.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

MENCIÓN ESPECIAL

**1Eje temático:** Análisis de señales, modelados y simulación
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Gestión de presión en redes de distribución de agua mediante aprendizaje por refuerzo y redes neuronales gráficas

## Pressure Management in Water Distribution Networks using Reinforcement Learning and Graph Neural Networks

Presentación: 30/09/2025

**Melina Denardi**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Rafaela, Santa Fe, Argentina.
melina.denardi@frra.utn.edu.ar

**Tamara Ghirardotti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Rafaela, Santa Fe, Argentina.
tamara.ghirardotti@frra.utn.edu.ar

### Resumen

Las redes de distribución de agua requieren un control eficiente de las presiones para garantizar la calidad del servicio, reducir los costos energéticos y minimizar las pérdidas asociadas a fugas y roturas. En este trabajo se presentan los avances en el desarrollo de una metodología que integra redes neuronales gráficas (GNNs) y aprendizaje por refuerzo (RL) con simulaciones hidráulicas de EPANET para la gestión de presiones nodales. El enfoque modela la red de agua como un grafo, permitiendo a la GNN aprender una política de control que ajusta los diámetros de tuberías, simulando el comportamiento de válvulas reductoras de presión (PRVs). Aplicada a una red real, la metodología logró reducciones de presión de hasta 15 m asegurando el cumplimiento de la presión mínima requerida. Los resultados muestran el potencial de esta estrategia para disminuir pérdidas de agua y extender la vida útil de la infraestructura.

**Palabras clave:** redes de agua potable, redes neuronales gráficas, gestión de presiones

### Abstract

Water distribution networks require efficient pressure control to ensure service quality, reduce energy costs and minimize losses from leaks and bursts. This work presents an advanced methodology that integrates graph neural networks (GNNs) and reinforcement learning (RL) with EPANET hydraulic simulations for nodal pressure management. The approach models the water network as a graph, allowing the GNN to learn a control policy that adjusts pipe diameters, simulating the behavior of pressure-reducing valves (PRVs). When applied to a real network, the methodology achieved pressure reductions of up to 15 m while ensuring the minimum required pressure was met. The results demonstrate the potential of this strategy to decrease water losses and extend infrastructure lifespan.

**Keywords:** water distribution networks, graph neural networks, pressure management

## 1. Introducción

Las redes de distribución de agua (Water Distribution Networks, WDNs) son sistemas complejos conformados por nodos (conexiones de consumo, uniones, reservorios y/o tanques) y enlaces (tuberías). Su diseño tiene como objetivo garantizar el

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

suministro continuo de agua potable a los consumidores, manteniendo las presiones dentro de rangos operativos y seguros. Niveles excesivos de presión incrementan las pérdidas de agua por fugas y roturas de tuberías, además de elevar los costos energéticos asociados al bombeo; mientras que presiones insuficientes comprometen la calidad y la continuidad del servicio a los usuarios. En este contexto, la gestión óptima de las WDNs para mantener la presión en valores adecuados constituye un desafío de gran relevancia.

En la última década, la aplicación de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático ha surgido como una alternativa prometedora para abordar la complejidad inherente a las WDNs. En particular, el aprendizaje por refuerzo (Reinforcement Learning, RL) ha demostrado ser una herramienta eficaz para la toma de decisiones secuenciales en entornos dinámicos, como el control de válvulas o bombas en tiempo real (Hu et al., 2020). Paralelamente, las redes neuronales gráficas (Graph Neural Networks, GNNs) han cobrado protagonismo por su capacidad para procesar datos estructurados en forma de grafos, lo que las hace especialmente adecuadas para representar la topología de las redes de agua (Zhou et al., 2020; Ashraf et al.,2023; Li & Wu, 2024; Vittori et al., 2025). La combinación de RL y GNNs permite no solo aprender políticas de control óptimas, sino también incorporar información espacial y topológica en el proceso de decisión, superando así las limitaciones de los enfoques tradicionales (Fan et al., 2023).

En este trabajo se presentan los avances de un proyecto orientado al desarrollo de una metodología que integra GNNs con algoritmos de RL y simulaciones hidráulicas en EPANET para la gestión de presiones nodales. El método se centra en la modificación de los parámetros de funcionamiento de un conjunto de válvulas reductoras de presión (PRVs), simuladas mediante la variación virtual del diámetro de ciertas tuberías. Este enfoque constituye una alternativa innovadora en el control de presiones, ya que permite generar estrategias de gestión que reducen las sobrepresiones, con el objetivo final de disminuir las pérdidas de agua y extender la vida útil de la infraestructura hidráulica.

## 2. Materiales y métodos

En la ingeniería de redes de agua, las PRVs se utilizan para ajustar el flujo y gestionar las presiones en puntos específicos. En el presente trabajo, la metodología propuesta adopta un enfoque similar, pero en lugar de instalar y operar válvulas, el modelo manipula directamente los diámetros de los tubos. Cada segmento de tubería se considera como una válvula de control ajustable donde reducir el diámetro de un tubo es análogo a cerrar parcialmente una válvula. Esto restringe el flujo de agua, lo que aumenta la pérdida de carga y, por ende, reduce la presión aguas abajo. Este mecanismo es crucial para mitigar los picos de presión excesiva en la red.

La red de distribución de agua se modela como un grafo no dirigido $G = (V, E)$ donde $V$ representa los nodos (uniones, depósitos, tanques) y $E$ los enlaces (tuberías). Cada nodo tiene asociadas dos características: la elevación y la demanda. Cada enlace tiene asociadas tres características: longitud, rugosidad y diámetro. Para capturar las relaciones espaciales y topológicas, se utiliza una red neuronal gráfica (GNN) del tipo GraphSAGE (Sample and Aggregate), que permite agregar información de los vecinos de cada nodo. La arquitectura GraphSAGE implementada consta de dos capas de convolución gráfica. La primera capa SAGEConv transforma las características de cada nodo (elevación y demanda) en un espacio latente de 64 dimensiones, utilizando una función de activación ReLU. La segunda capa SAGEConv agrega información de los vecinos de cada nodo y produce una representación latente final de 64 dimensiones para cada nodo. Estas representaciones latentes capturan tanto las características propias del nodo como las de su entorno en el grafo.

Posteriormente, para cada tubería se concatenan las representaciones latentes de los nodos extremos de esa tubería junto sus características (longitud, rugosidad y diámetro actual). Esta información combinada se pasa a través de una red neuronal fully-connected (MLP) de dos capas con 128 neuronas y activación ReLU, que produce un vector de puntuaciones (scores) de tamaño igual al número de diámetros disponibles. Estos scores representan las preferencias del modelo para cada posible diámetro para esa tubería. Luego se aplica una función softmax para convertir los scores en probabilidades, lo que permite seleccionar el diámetro de manera probabilística.

En este enfoque las decisiones se toman a nivel de enlaces (tuberías) en lugar de nodos. El modelo aprende a asignar scores a cada posible diámetro para cada tubería, considerando tanto las características locales de la tubería como el contexto global de la red a través de las representaciones de sus nodos conectados. Esta arquitectura GraphSAGE no solo aprende a identificar qué “válvulas” (tubos) deben ser ajustadas, sino que también determina el grado óptimo de ajuste (el diámetro final). A través

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

de un proceso de prueba y error simulado, el modelo aprende la relación causa-efecto entre los cambios de diámetro y las presiones resultantes en toda la red. Esta estrategia permite encontrar una configuración de tuberías que equilibre de manera eficiente la funcionalidad y el costo.

Así, el modelo de optimización aprende a través de un ciclo de aprendizaje por refuerzo, guiado por una función de recompensa diseñada para evaluar la calidad de las modificaciones. En un solo episodio de entrenamiento el sistema modifica un conjunto de tubos y la función de recompensa penaliza o recompensa al modelo en función de los siguientes criterios:

- Presión Insuficiente: Una penalización cuadrática por cada nodo con presión media que esté por debajo de un umbral mínimo.
- Costo de Intervención: Una penalización fija por cada tubo modificado.
- Costo de Cambio de Diámetro: Una penalización proporcional a la magnitud de los cambios.

La función de costo ($J$) que debe ser minimizada se define como:

$$J = \lambda_{deficit} \sum_{i \in N} max\left(0, P_{req} - P_i\right)^2 + \lambda_{mods} C_{mods} + \lambda_{cambios} C_{cambios} \quad (1)$$

Donde $N$ es el conjunto de nodos en la red, $P_i$ es la presión del nodo i, $P_{req}$ es la presión mínima requerida, $\lambda_{deficit}$, $\lambda_{mods}$ y $\lambda_{cambios}$ son los factores de ponderación, $C_{mods}$ es el número total de tubos modificados y $C_{cambios}$ es la suma de los cambios absolutos en los diámetros de los tubos modificados.

El algoritmo de optimización utiliza la mejora de la estrategia de selección para ajustar las decisiones de la red, aprendiendo de la recompensa que recibe. En cada episodio, se seleccionan hasta $k$ acciones, que representan las tuberías a modificar ($k_{max} = 10$, en este trabajo), ajustando las probabilidades de elegir cada diámetro según los resultados obtenidos. Para promover la exploración, se utiliza una estrategia de búsqueda aleatoria. La actualización de los parámetros de la red se realiza mediante descenso de gradiente, utilizando el optimizador Adam y la ventaja normalizada como señal de refuerzo.

El proceso de entrenamiento consiste en múltiples episodios. En cada uno, se simula la red con las modificaciones propuestas y se calcula la recompensa. Las modificaciones que conduzcan a una mayor recompensa se almacenan como la mejor solución encontrada. El entrenamiento se detiene después de un número fijo de episodios (500), y la mejor configuración de diámetros se guarda en un archivo INP de EPANET.

La implementación se realizó en Python, utilizando las bibliotecas PyTorch y PyTorch Geometric para las GNN, y WNTR para la simulación hidráulica.

## 3. Resultados y discusión

La metodología desarrollada se aplicó a una red real cuyo sistema hidráulico posee 199 nodos de demanda, 287 tubos y 3 reservorios (ver Figura 1). El diámetro nominal de cada tubo, $D_N$ , es igual a 500 mm. La presión requerida se estableció en 7 m y el análisis hidráulico se realizó para un único paso de tiempo. La red anteriormente descripta se denominó *red original*.

La Figura 1 ilustra la red con los 10 tubos, marcados en anaranjado, cuyos diámetros fueron modificados luego de la aplicación de la metodología propuesta. Los detalles sobre los diámetros optimizados ($D_{OPT}$) y el porcentaje de reducción del área nominal ($R_A$), calculado respecto al diámetro original $D_N$ se presentan en la Tabla 1. Los resultados muestran que el tubo con la mayor reducción de diámetro fue el '10', ubicado estratégicamente a la salida de un reservorio. Esta disminución implica una restricción significativa del flujo, similar a la reducción del grado de apertura de una válvula, lo que valida la analogía de control propuesta. La red resultante, con sus diámetros ajustados, fue denominada *red optimizada*. Esta configuración final asegura el cumplimiento de las restricciones operativas al tiempo que reduce las presiones excesivas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

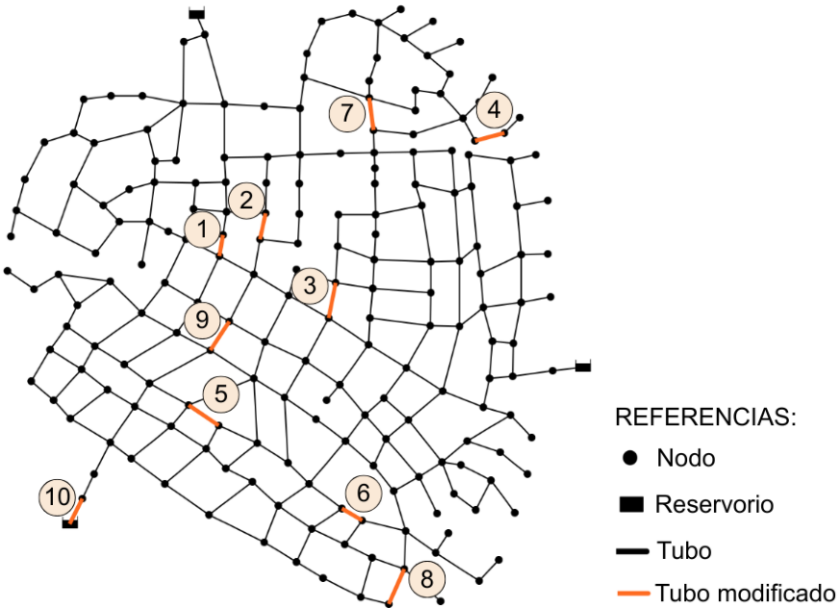



**Figura 1**. Red de distribución de agua y ubicación de los 10 tubos (marcados en color anaranjado) cuyos diámetros fueron optimizados por el método propuesto.

**Tabla 1**. Diámetro modificado ($D_{OPT}$) y reducción porcentual de la sección ($R_A$) de los tubos intervenidos

| ID | $D_{OPT}$ (mm) | $R_A$ (%) | ID | $D_{OPT}$ (mm) | $R_A$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 150 | 91 | 6 | 300 | 64 |
| 2 | 200 | 84 | 7 | 375 | 44 |
| 3 | 225 | 80 | 8 | 125 | 94 |
| 4 | 150 | 91 | 9 | 200 | 84 |
| 5 | 250 | 75 | 10 | 25 | 99 |

La Figura 2.a presenta un análisis comparativo de las presiones nodales entre la red *original* y la red *optimizada*. Los resultados demuestran que la metodología propuesta logra una reducción significativa de las presiones nodales, con una disminución cercana a los 15 m. Este ajuste no compromete la calidad del servicio; por el contrario, asegura que las presiones en todos los nodos de la red se mantengan por encima del mínimo requerido. Es importante notar que los nodos con valores de presión igual a cero, que se corresponden con los reservorios, han sido excluidos de este análisis ya que no representan puntos de consumo. En la Figura 2.b se muestra un histograma asociado con los datos de presión de la Figura 2.a. Se observa un desplazamiento significativo en la distribución de presiones. En la red original, las presiones se distribuyen ampliamente entre 27 m y 34 m, con una moda alrededor de los 30 m. Por el contrario, la red optimizada muestra una concentración de presiones entre 9 m y 20 m, con la mayor frecuencia en torno a los 12 m. Este cambio demuestra la eficacia del método para reducir y estrechar el rango de presiones, lo que indica una red más estable y eficiente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

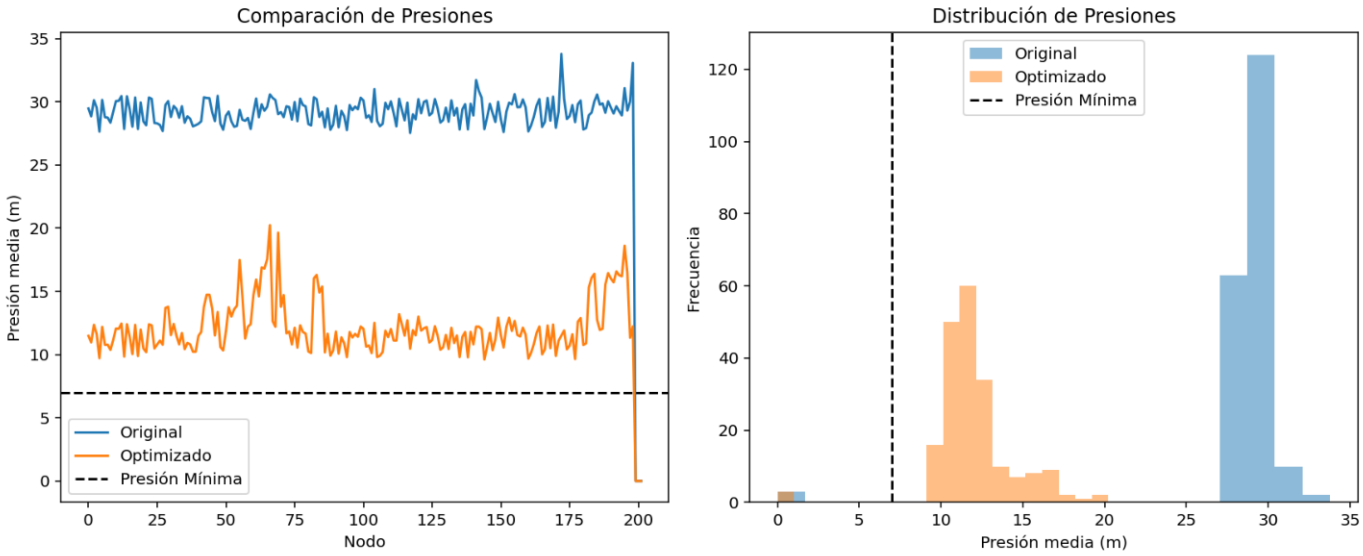



**Figura 2**. Comparación entre las presiones de la red original y la red optimizada e histograma de presiones.

## 4. Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología en desarrollo que utiliza aprendizaje por refuerzo (RL) y redes neuronales gráficas (GNNs) para gestionar presiones nodales en redes de distribución de agua. La estrategia principal consiste en simular el comportamiento de válvulas reductoras de presión (PRVs) mediante la optimización de los diámetros de un número óptimo de tuberías. Aplicada a una red de tamaño medio, el método propuesto demostró su capacidad para reducir significativamente las presiones con el propósito de minimizar las fugas causadas por la sobrepresión en el sistema. Esto se logró con la intervención de un número reducido de tubos, garantizando al mismo tiempo la calidad del servicio al mantener la presión mínima requerida para los consumidores.

Para perfeccionar la metodología, en trabajos futuros se planean los siguientes pasos. Primero, se implementará un ajuste más riguroso de los parámetros del modelo para evitar la asignación de diámetros que se desvíen excesivamente del valor original. Esto permitirá penalizar las soluciones que propongan un grado de "cierre" de la PRV que resulte excesivo, especialmente en tuberías adyacentes a reservorios, donde su implementación práctica podría ser compleja. Segundo, se desarrollará una formulación explícita que relacione los cambios de diámetro propuestos con un parámetro operativo de la PRV. Esto no solo mejorará la interpretabilidad del modelo, sino que también facilitará su aplicación en escenarios de la vida real.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a los doctores Gabriel Puccini y Jezabel Bianchotti, del Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales de la Facultad Regional Rafaela, Universidad Tecnológica Nacional, por su orientación y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

## Referencias bibliográficas

Ashraf, I., Hermes, L., Artelt, A., & Hammer, B. (2023). “Spatial graph convolution neural networks for water distribution systems”. *International symposium on intelligent data analysis*. Cham: Springer Nature Switzerland, 29-41.

Fan, X., Zhang, X., & Yu, X. (2022). “Development of a graph convolutional neural network-integrated deep reinforcement learning (GCN-DRL) model to support optimal repair decisions to improve WDN resilience after earthquakes”. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37(12), 1547–1565.

Hu, C., Cai, J., Zeng, D., Yan, X., Gong, W., & Wang, L. (2020). “Deep reinforcement learning based valve scheduling for pollution isolation in water distribution network”. *Math. Biosci. Eng*, 17(1), 105-122.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Li, X., & Wu, Y. (2024). “A Convolutional Graph Neural Network Model for Water Distribution Network Leakage Detection Based on Segment Feature Fusion Strategy”. *Water*, 16(24), 3555.

Vittori, G., Falkouskaya, Y., Jimenez-Gutierrez, D. M., Cattai, T., & Chatzigiannakis, I. (2025). “Graph neural networks to model and optimize the operation of Water Distribution Networks: A review”. *Journal of Industrial Information Integration*, 100880.

Zhou, J., Cui, G., Hu, S., Zhang, Z., Yang, C., Liu, Z., ... & Sun, M. (2020). “Graph neural networks: A review of methods and applications”. *AI open*, 1, 57-81.

Eje temático

# Aplicaciones mecánicas y mecatrónica

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

MENCIÓN ESPECIAL

**Eje temático:** Aplicaciones mecánicas y mecatrónica
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Reconquista

# Mejora de la calidad laboral en el sector ladrillero del norte de la provincia de Santa Fe

## Improving Labor Quality in the Brickmaking Sector of Northern Santa Fe Province

Presentación: 30/10/2025

**Agustín Muñoz**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
agustinmunoz116@gmail.com

**Elías Jones**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
eliasjonea122@gmail.com

**Gerardo Cintes**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
gerardocintes@gmail.com

**Nicolás Faccioli**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
nicofaccioli243@gmail.com

### Resumen

Este proyecto de la UTN - Facultad Regional Reconquista abordó los desafíos del sector ladrillero artesanal en el norte de Santa Fe, caracterizado por baja productividad, altos costos, variabilidad en la calidad y condiciones laborales precarias que aumentan el riesgo de lesiones. Como respuesta, se diseñó y construyó un prototipo digital de máquina automática para el moldeo y corte de ladrillos, integrando en un único sistema las dos etapas principales del proceso. La metodología se basó en una articulación académica entre las cátedras de Diseño Mecánico Asistido por Computadora, Tecnologías de Fabricación Digital y el Grupo de Diseño Mecánico (GRUDIM). Se aplicaron principios de ergonomía y diseño paramétrico para reducir el esfuerzo físico y optimizar posturas. Los resultados demuestran la viabilidad técnica del prototipo y su potencial para mejorar la eficiencia, calidad y sostenibilidad, reafirmando el rol de la universidad como agente de cambio social e innovación tecnológica.

**Palabras clave:** Diseño Mecánico Asistido por Computadora, Ergonomía, Vinculación Tecnológica, Producción Artesanal, UTN-FRRq.

### Abstract

This FRRq project addressed the challenges of the artisanal brickmaking sector in northern Santa Fe. The local industry suffered from low productivity, prohibitive costs, and precarious working conditions, which generated an elevated risk of injury for workers. In response, a digital prototype of an automatic machine for molding and cutting bricks was designe. The methodology was based on a constructive collaboration between the Computer-Aided Mechanical Design and Digital Manufacturing Technologies (GRUDIM) departments. Ergonomics and parametric design principles were applied to optimize movements and postures, reducing physical strain. The results demonstrate the viability of the prototype and its potential to improve efficiency and quality, as well as contribute to sustainability and improved working conditions. This work reaffirms the university's role as an agent of social change, creating technological solutions that strengthen the local industry.

**Keywords:** Computer-Aided Mechanical Design, Ergonomics, Technological Linkage, Artisan Production, UTN-FRRq.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

La vinculación entre academia y sector productivo es clave para el desarrollo sostenible regional. Este proyecto de la Facultad Regional Reconquista (UTN-FRRq) aborda una problemática central del norte santafesino: la industria del ladrillo artesanal. Pese a su importancia local, el sector enfrenta baja productividad, altos costos y variabilidad en la calidad, además de condiciones laborales precarias que generan riesgos musculoesqueléticos.

Para responder, se diseñó y construyó un prototipo de máquina automática de moldeo y corte que integra ambas etapas del proceso. El proyecto articuló las cátedras de Diseño Mecánico y Tecnologías de Fabricación Digital con el GRUDIM-UTN-FRRq, aplicando ergonomía y diseño paramétrico para reducir el esfuerzo físico.

Así, se propone una solución que mejora eficiencia y sostenibilidad de la industria, dignifica el trabajo y reafirma a la universidad como agente de cambio social mediante transferencia de conocimiento, fortaleciendo la producción local y promoviendo un crecimiento equitativo y sostenible.

# 2. Materiales y métodos

Se propuso una solución tecnológica desarrollada íntegramente en la UTN-FRRq, con un equipo integrado por GRUDIM y estudiantes avanzados. El proyecto se estructuró en cátedras de 2º año de Ingeniería Electromecánica como trabajos prácticos que incluyeron relevamiento, análisis, diseño y validación técnica.

## 2.1 *Materiales*

Se seleccionaron insumos accesibles y duraderos con base en la cátedra de Materiales. La estructura se construyó con perfiles de acero; el accionamiento incluyó motorreductores eléctricos, ejes, rodamientos y cinta de caucho reforzado; el corte, con cuchillas de acero templado. Para diseño y validación virtual se usaron SolidWorks, Inventor y Blender, con análisis estructurales y de movimiento basados en la cátedra de Estabilidad.

## 2.2 *Metodología*

- Diagnóstico: Relevamiento de campo y entrevistas a productores de ladrillos del norte santafesino, identificando problemas productivos y ergonómicos. Se realizó además un análisis comparativo de máquinas nacionales, detectando brechas en costos, repuestos y ergonomía.
- Diseño y modelado: Desarrollo conceptual de subsistemas (mezclado, extrusión, transporte y corte), priorizando robustez, eficiencia y simplicidad. Se generaron prototipos paramétricos en Inventor con despiece y lista de materiales.
- Simulación y documentación: Validación estructural y cinemática de los modelos; evaluación de alternativas de corte (manual, motorizada, por cadena), seleccionando la más viable. Se elaboraron planos, listado de proveedores y manual preliminar de operación.

# 3. Resultados y discusión

En el marco de las cátedras de Tecnologías de Fabricación Digital y Diseño Mecánico Asistido por Computadora, dirigidas por los ing. Walter Ariel Soto y Alejandro Fabbro (GRUDIM-UTN-FRRq), se desarrolló una máquina semiautomática de moldeo de ladrillos, considerando diseño funcional, viabilidad local y necesidades del mercado nacional.

## 3.1. *Contribuciones ergonómicas*

- Productividad: Posturas cómodas reducen fatiga y mantienen ritmo constante.
- Prevención: Se evitan lesiones por posturas forzadas, movimientos repetitivos y cargas pesadas.
- Condiciones laborales: Se eliminan tareas físicas obsoletas y se dignifica el trabajo mediante automatización.
- Sostenibilidad: Menos ausencias, rotación y accidentes, asegurando viabilidad económica y social.

En conjunto, la ergonomía convierte el diseño en una herramienta que mejora eficiencia, seguridad y bienestar, reafirmando el compromiso del proyecto con innovación y justicia social.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

3.2 *Medidas Ergonómicas para el Puesto de Trabajo*

Se aplicaron medidas ergonómicas en la máquina y el puesto de trabajo para mejorar postura, seguridad y productividad. La altura de la superficie se ajusta según la tarea: por encima del codo para precisión, a la altura del codo para tareas ligeras y por debajo para trabajos pesados, minimizando tensión en hombros, cuello y espalda.

El puesto permite alternar posturas, incluye reposapiés y alfombras antifatiga, y facilita la manipulación de cargas usando piernas y manteniendo materiales entre cadera y hombro, reduciendo el riesgo de lesiones según el Manual de NIOSH.

La mecanización de mezclado y extrusión reemplaza esfuerzos manuales y uso de animales mediante tolvas y cintas elevadoras, aumentando seguridad y eficiencia del operario.

3.3 *Configuración de la línea de producción*

El diseño propuesto se basa en un enfoque de flujo de trabajo secuencial, donde cada componente desempeña un rol específico en la transformación de la arcilla en ladrillos. La línea de producción se compone de las siguientes unidades operacionales, cada una diseñada para optimizar una fase del proceso:

- Unidad de Mezclado (Mezclador): Etapa inicial donde la arcilla se prepara para la extrusión. Se evaluaron dos conceptos: mezclador de eje horizontal (fig. 1), acoplado a la extrusora, y mezclador de tambor con paletas (fig. 2), que homogeniza mediante rotación. Su objetivo, según la ingeniería de procesos, es obtener consistencia uniforme y adecuada humedad, esenciales para la calidad del ladrillo.

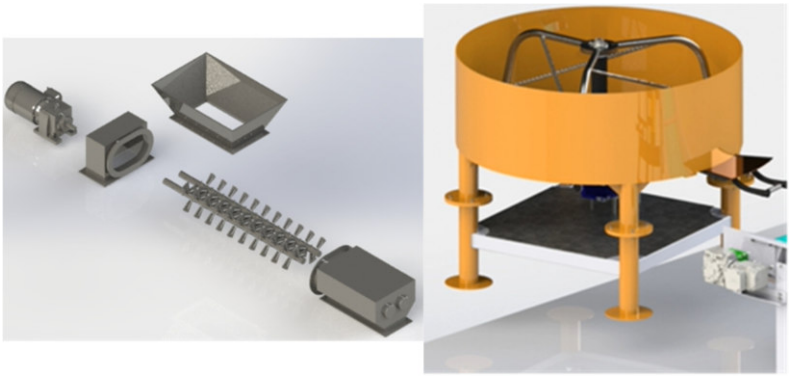


**Figura 1 y 2.** Sistemas de mezclado de eje horizontal/Sistema de mezclado a tambor y paletas

- Extrusora: En esta unidad, la masa de arcilla se moldea a través de una boquilla o matriz (figura 3), creando un "bloque" de material continuo (figura 4). Este proceso se basa en los principios de la extrusión de materiales cerámicos, donde la presión y la fricción son controladas para obtener la forma deseada.

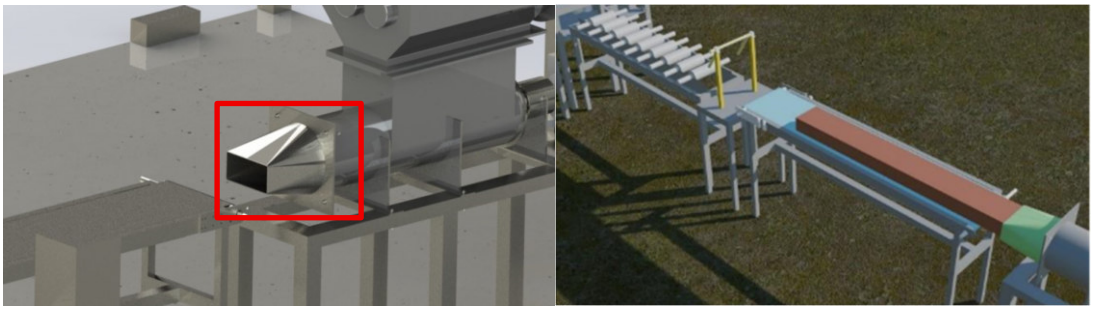


**Figura 3 y 4.** Conjunto extrusor moldeador de arcilla

- Sistema de Transporte por Cinta (Cinta Transportadora): Esta actúa como componente logístico que recibe la arcilla extruida y la traslada de forma continua y constante a la siguiente estación. Se emplea caucho reforzado por su durabilidad y resistencia a la abrasión, según estudios de ingeniería de materiales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- Unidad de corte por bloques: Esta estación tiene como función dividir la masa de arcilla en bloques discretos y regulares. De esta manera, se facilita su manipulación y se prepara el material para el corte final, asegurando un proceso más ordenado y eficiente.

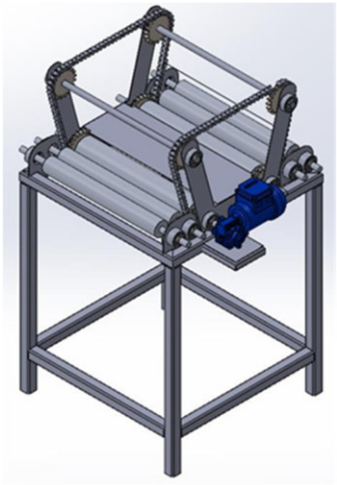


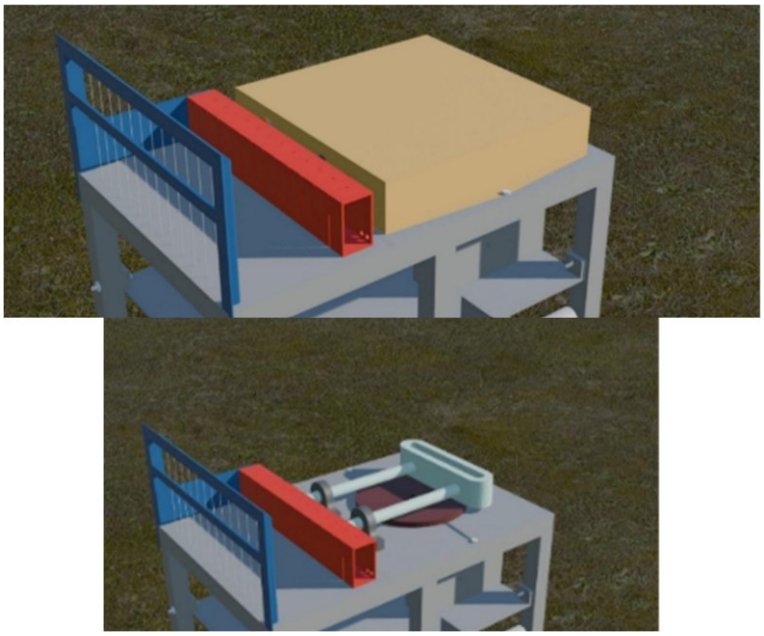
**Figura 5.** Unidad de corte modular

- Mecanismo de Rodillos de Deslizamiento: Tras segmentar la arcilla en bloques, asegura su movimiento controlado y preciso hacia el corte final. Con rodillos motorizados o pasivos, minimiza fricción y posiciona cada pieza, siguiendo criterios de automatización industrial.

3.4. *Desarrollo de los sistemas de corte*

Una parte clave del proyecto fue el desarrollo de sistemas de corte, liderado por GRUDIM junto con la cátedra de Tecnologías de Fabricación Digital, generando modelos digitales de corte y otros componentes.

- Sistema de Corte de Accionamiento Alternativo: Basado en motorreductor y excéntrico (figs. 6 y 7), convierte la rotación en movimiento lineal alternativo, adecuado para cortar arcilla. Su diseño se fundamenta en la cinemática de mecanismos, garantizando precisión y eficiencia.



**Figuras 6 y 7.** Sistema mecánico compuesto por motorreductor y mecanismo excéntrico.

- Sistema de Corte de Operación Manual: Accionado por palancas (fig. 8), aplica principios de máquinas simples para amplificar la fuerza del operario y facilitar el corte. Cumple la misma función que el sistema automatizado, pero como alternativa robusta y de bajo costo para preparar el material en la unidad de corte modular.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

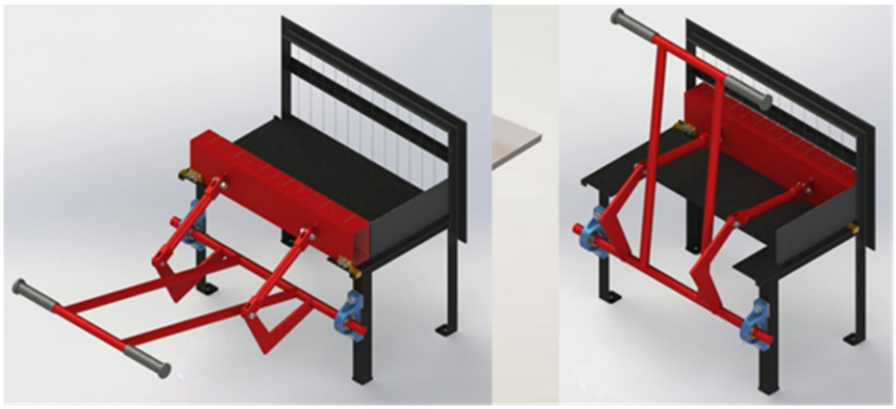


**Figura 8.** Sistema de corte manual

3.5. *Análisis estático y funcional con elementos finitos*

Este trabajo propone aplicar la metodología de Elementos Finitos (FEA) en SolidWorks para analizar la máquina cortadora de ladrillos, predecir su comportamiento estructural, validar el diseño y proponer mejoras que fortalezcan la seguridad y competitividad de la industria. El uso de ingeniería asistida por computadora resulta indispensable, ya que el FEA ofrece una herramienta predictiva más ágil y económica que el prototipado físico tradicional.

Una vez realizada la simulación por elementos finitos, se obtuvieron los siguientes resultados:

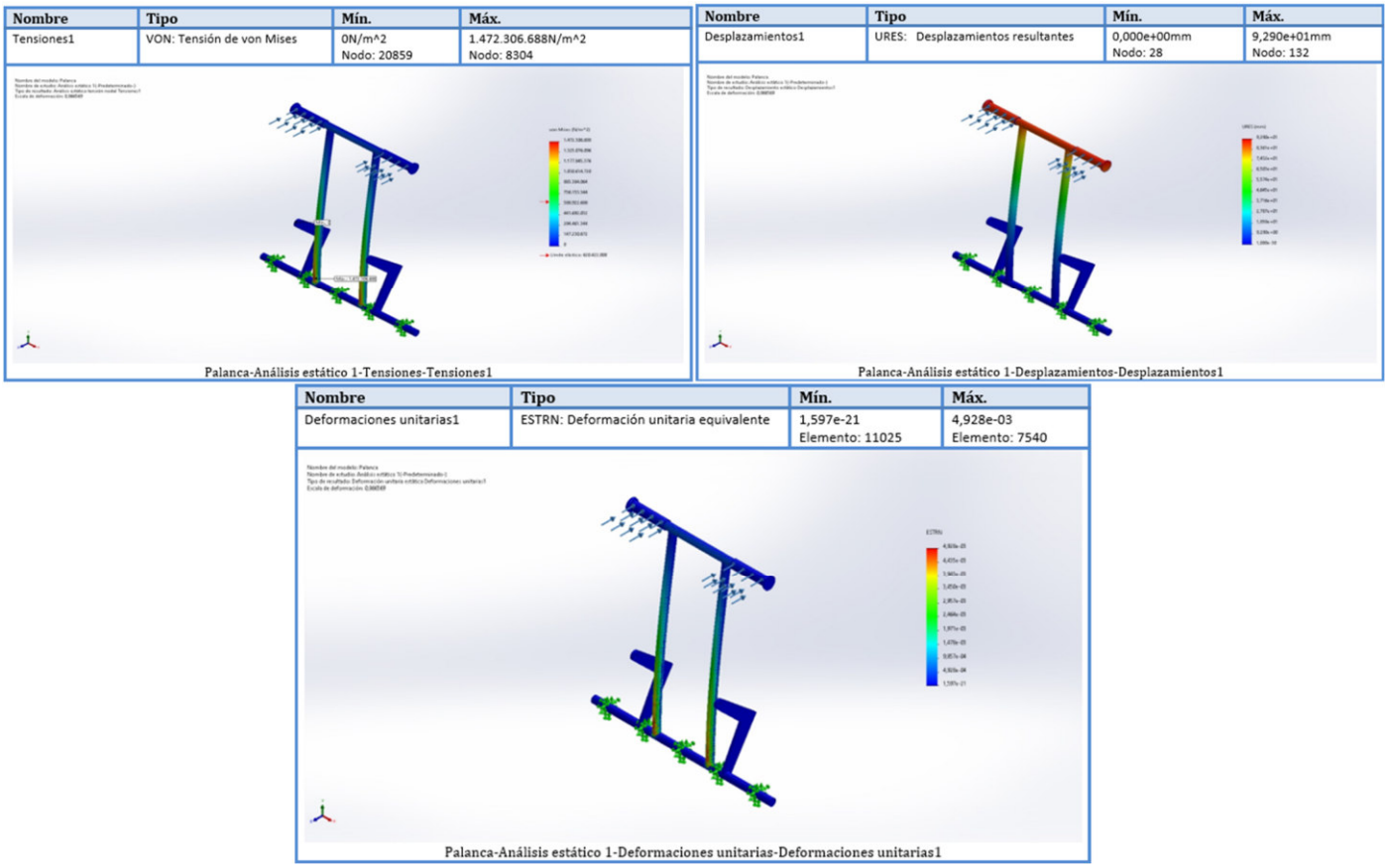



**Figura 9, 10 y 11.** Resultados Von Mises, desplazamientos y deformación unitaria equivalente brazo

3.6 *Resultados*

- Modelo computacional integrando mezclado, extrusión, transporte y corte.
- Prototipos virtuales con despiece técnico y especificaciones de mecanizado.
- Renders 3D y simulaciones que validan funcionalidad.
- Análisis ergonómico que reduce esfuerzo físico de operarios.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- Listado de proveedores nacionales que disminuye costos y dependencia de importados.

3.7 *Discusión*

La mecanización propuesta es viable frente a métodos artesanales, mejora productividad, calidad y condiciones laborales, y resulta competitiva frente a máquinas importadas sin elevar costos.

## 4. Conclusiones

El desarrollo de la máquina de moldeo de ladrillos comunes integra ingeniería académica, investigación aplicada y extensión socio productiva mediante la colaboración entre las cátedras de la UTN y el GRUDIM, abordando necesidades reales del sector ladrillero. La solución es innovadora, sustentable y accesible, al integrar las etapas de mezclado, extrusión y corte en un sistema automatizado que optimiza la producción, reduce la mano de obra manual, elimina prácticas rudimentarias como la tracción animal y mejora las condiciones laborales. Se priorizó el uso de materiales y componentes nacionales, lo que reduce costos y dependencia de importaciones, favorece la sostenibilidad y fortalece la cadena de valor local, con perspectivas de futura transferencia tecnológica a pequeños y medianos productores. Además, las simulaciones por elementos finitos identificaron zonas críticas en el brazo de palanca que superan el límite de fluencia, evidenciando la necesidad de rediseño para garantizar la durabilidad, confiabilidad y desempeño seguro del sistema. En conjunto, el proyecto no solo desarrolla un prototipo, sino que demuestra cómo la investigación académica puede generar tecnología con impacto social y económico, fortaleciendo la competitividad local y consolidando a la universidad como agente de cambio en el desarrollo regional.

## Referencias bibliográficas

American Psychological Association. (2020). *Publication Manual of the American Psychological Association* (7th ed.). American Psychological Association.

Hibbeler, R. C. (2014). *Mecánica de materiales* (8a ed.). Pearson Education.

Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2017). *Mecánica de materiales* (7a ed.). McGraw-Hill.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Science and Engineering of Materials: An Introduction* (10th ed.). Wiley.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (5th ed.). SAGE Publications.

Blessing, L. T. M., & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a design research methodology: A study on research into design* (2nd ed.). Springer.

Norton, R. L. (2019). *Diseño de máquinas: Un enfoque integrado* (5a ed.). Pearson Education.

Shigley, J. E., & Budynas, R. G. (2012). *Mechanical Engineering Design* (9th ed.). McGraw-Hill Education.

Smith, W. F., & Hashemi, J. (2015). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales* (5a ed.). McGraw-Hill Education.

Eje temático

# Energía

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Energía
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiante de grado
**Facultad Regional**: Santa Fe

# Caracterización de demanda eléctrica de usuarios industriales mediante técnicas de redes neuronales

## Characterization of Industrial Electricity Demand Using Neural Network Techniques

Presentación 30/10/2025

**Axel Timoteo Smith**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina.
asmith@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

Este proyecto desarrolla una herramienta de caracterización de la demanda eléctrica para apoyar la planificación y operación de la red en el Parque Industrial Sauce Viejo, en Santa Fe, Argentina. A partir de series temporales de consumo con resolución de 15 minutos y metadatos de clientes se realizan depuración y normalización, extracción de indicadores horarios como hora promedio del pico, duración del pico y magnitud desnormalizada, y asociación con variables climáticas y situaciones específicas del calendario (como feriados). Se aplican técnicas de clustering para agrupar perfiles y se calculan métricas de simultaneidad y factor de coincidencia junto con matrices de correlación cruzada entre usuarios para evaluar la superposición de picos y las horas de mayor riesgo. Los hallazgos muestran diferencias entre baja y media tensión, variaciones por estación y tipo de día, y ventanas horarias críticas.

**Palabras clave:** Caracterización de la Demanda, Clustering KMeans, Factor de Simultaneidad.

### Abstract

This project develops a demand profiling tool to support network planning and operation in the Sauce Viejo Industrial Park, in Santa Fe, Argentina. Using a consumption time series with a 15-minute resolution, and client's metadata, data cleaning and normalization methods are applied; hourly indicators such as average peak hour, peak consumption duration and denormalized magnitude values are extracted, and these are associated with climatic variables and specific calendar situations such as holidays. Clustering techniques are applied to group clients; simultaneity metrics and a coincidence factor are calculated along with cross correlation matrices between users to evaluate peak overlap and hours of greatest risk. The findings show differences between low and medium voltage segments, seasonal and day type variations, and the presence of critical time windows.

**Keywords:** Demand Profiling, KMeans Clustering, Simultaneity Factor.

## 1. Introducción

La caracterización de perfiles de carga en usuarios industriales se ha visto potenciada por la disponibilidad de mediciones de alta resolución y por el avance de técnicas de aprendizaje profundo, capaces de extraer patrones temporales, estacionales y de operación a partir de series de consumo y metadatos. En la última década, múltiples revisiones sistematizan cómo arquitecturas como CNN, RNN/LSTM/GRU, autoencoders y modelos más recientes basados en bloques residuales han mejorado la representación de la demanda y su previsión, estableciendo un marco robusto para tareas de perfilado, segmentación y detección de anomalías (Eren y Küçükdemiral, 2024; Akhtar et al., 2023). Estas contribuciones enfatizan

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

también la integración de covariables (clima, calendario) y la conveniencia de pipelines reproducibles con métricas estandarizadas de validación.

Dentro del ámbito de perfilado y segmentación, los enfoques de clustering siguen siendo un pilar para agrupar comportamientos de consumo, con K-Means, K-Medoids, HAC y DBSCAN como opciones habituales, más recientemente complementadas con marcos comparativos, ensambles explicables y evaluaciones multicriterio (Michalakopoulos et al., 2024; Sarmas et al., 2024). Para datos industriales y fabriles, se combinan caracterización de picos, duración e indicadores horarios con modelos neuronales que capturan regularidades de proceso, apoyando decisiones de operación y gestión de la demanda (Walser et al., 2021; Ungureanu et al., 2021). En el plano metodológico, se observa una convergencia entre aprendizaje de representaciones (autoencoders, variational autoencoders) y clustering, buscando reducir la dimensionalidad preservando la morfología diaria/semanal del consumo y habilitando análisis de similitud entre usuarios y periodos (Lin et al., 2024; Luna-Romero et al., 2024).

La literatura reciente también subraya la caracterización bajo riesgo y simultaneidad, donde matrices de correlación cruzada, factores de coincidencia y mapas de picos permiten cuantificar ventanas críticas y superposición de cargas. Ello se apoya tanto en modelos de previsión—útiles para estimar exposición a corto y mediano plazo—como en técnicas de perfilado que explican la estructura del consumo más allá de la predicción puntual (Oreshkin et al., 2021; Eren and Küçükdemiral, 2024). En el sector industrial, estos recursos son especialmente relevantes por la sincronización de turnos, la estacionalidad productiva y la sensibilidad a condiciones climáticas o de calendario (Walser et al., 2021; Ungureanu et al., 2021).

En síntesis, los avances actuales respaldan un enfoque que combine: (i) depuración y normalización de series de 15 minutos; (ii) extracción de features orientadas a picos y variabilidad intradiaria; (iii) aprendizaje de representaciones (autoencoders/VAEs) para preservar la forma del perfil; (iv) clustering y ensambles explicables para segmentar usuarios; y (v) métricas de simultaneidad, coincidencia y correlaciones con clima/calendario para priorizar ventanas horarias de riesgo y usuarios críticos (Michalakopoulos et al., 2024; Sarmas et al., 2024; Lin et al., 2024). Este trabajo se sitúa en esa intersección, utilizando técnicas neuronales y clustering para caracterizar (no solo predecir) la demanda industrial, con énfasis en interpretabilidad operativa y soporte a la planificación de red.

## 2. Materiales y métodos

Los datos utilizados consisten en series de consumo con resolución de 15 minutos correspondientes a Grandes Usuarios y metadatos de clientes del Parque Industrial Sauce Viejo (PISV) de la provincia de Santa Fe que incluyen identificación, rubro industrial, potencia contratada y nivel de tensión, con las mediciones provistas por la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe (EPESF) y archivos auxiliares de salida como las tablas anexas que contienen los resultados intermedios.

El preprocesamiento abarcó el tratamiento de los archivos de medición, por medio de código Python, limitando lo más posible las revisiones manuales de casos puntuales; también se realizó la imputación y control de casos con datos faltantes según criterios de exclusión y la normalización de series por cliente mediante estandarización o escalado cuando correspondió, todo implementado en entornos Python, con librerías como pandas y NumPy para cálculos simples y ordenar y crear Data Frames, con la inclusión de librerías como “Scikit-learn” (principalmente para trabajar con K-Means) y funciones de “tslearn”.

Para la extracción de características en la etapa de determinación de picos se calcularon por cliente la hora pico promedio, la duración del pico definida como cantidad de intervalos por encima del percentil 90, convertida a horas y la magnitud desnormalizada del pico en kW. Estos atributos quedaron almacenados en la tabla de archivo Excel que entrega el código, llamada de forma predeterminada: “Features para Clustering”, la cual sirvió de entrada al proceso de agrupamiento. El algoritmo principal de agrupamiento empleado fue el de KMeans sobre la matriz de características normalizadas, aplicando ponderaciones específicas para Minutos Pico, Duración del Pico y Magnitud Desnormalizada; se complementó con reducción dimensional por PCA, análisis WCSS para el método del codo y validación por Silhouette Score para determinar soluciones aceptables de clústeres. Los resultados y las visualizaciones por periodo se registran en archivos Excel y en la carpeta de gráficas generadas automáticamente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

El análisis de picos y simultaneidad se desarrolló detectando primero los picos horarios individuales por cliente y luego construyendo la curva de pico global mediante la suma de consumos de todos los usuarios. A partir de esos datos se calcula el Factor de Coincidencia (FC) según la Ecuación (1) y el Factor de Simultaneidad (FS) según la Ecuación (2).

$$FC = \frac{\sum Demandas\ pico\ individuales}{Demanda\ total\ coincidente\ en\ la\ misma\ hora} \quad (1)$$

$$FS = {}^{1}/_{FC} \quad (2)$$

Estos valores se analizan por nivel de tensión (Baja y Media Tensión), por período estacional definido en el estudio (verano, invierno o resto), y por tipo de día (diferenciando entre días hábiles y no hábiles). Además, se generaron matrices "usuario versus horario", para visualizar la ocurrencia y la simultaneidad entre usuarios de los picos, para localizar franjas horarias críticas.

La relación entre los indicadores de simultaneidad y variables externas se exploró mediante tablas climatológicas asociadas al periodo de estudio y cálculos de correlación simples por día, conservando cautela en la interpretación cuando las muestras por caso eran limitadas como en días feriados. Los criterios de calidad final incluyeron métricas internas de cohesión y separación de clústeres, inspección visual de perfiles promedio y registro de series excluidas o con errores para garantizar trazabilidad.

## 3. Resultados

Los resultados muestran dos realidades operativas diferenciadas (ver Tabla 1), en media tensión (MT) la simultaneidad es alta y estable, con valores promedio que oscilan entre 93% y 98% en la mayor parte de los períodos analizados, lo que refleja una operación industrial sincronizada y predecible. En baja tensión (BT) se observó mayor variabilidad, con FS típicos entre 77% y 87% que cambian según estación y tipo de día, y caídas puntuales nocturnas en primavera y otoño. Estas conclusiones se obtienen de los promedios por turno y por período incluidos en las tablas de la etapa.

**Tabla 1.** Promedio de FS por Turno

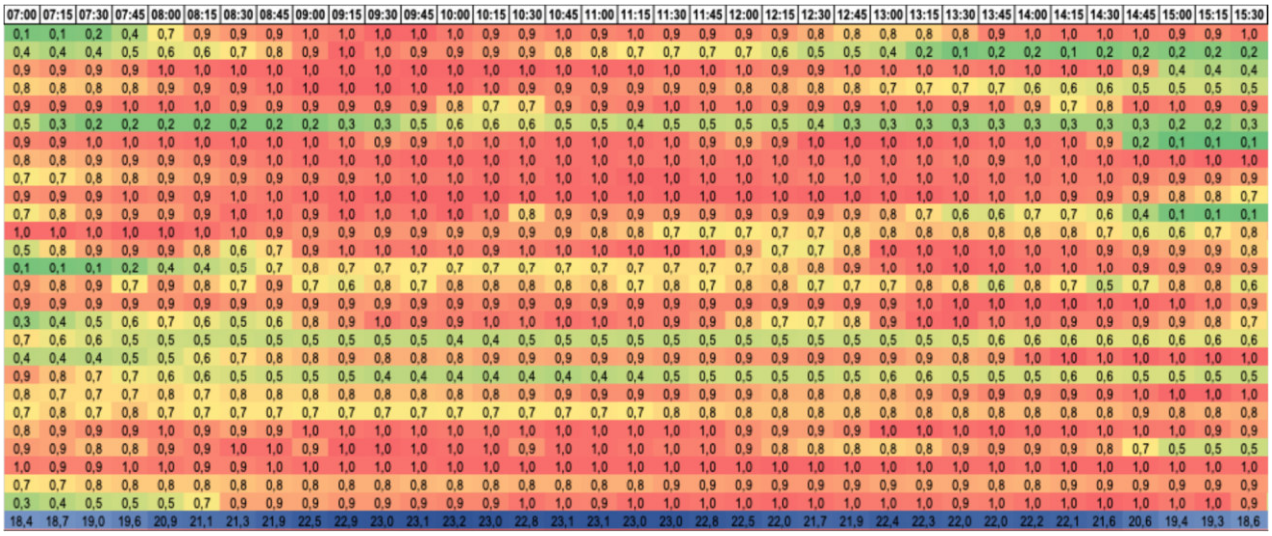
| Grupo | Período | Tipo de Día | Promedio Turno 1 | Promedio Turno 2 | Promedio Turno 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| Baja Tensión | Invierno | Día Hábil | 0,82 | 0,85 | 0,79 |
| | | Día No Hábil | 0,84 | 0,87 | 0,86 |
| | Resto | Día Hábil | 0,84 | 0,86 | 0,77 |
| | | Día No Hábil | 0,84 | 0,85 | 0,86 |
| | Verano | Día Hábil | 0,83 | 0,85 | 0,82 |
| | | Día No Hábil | 0,82 | 0,87 | 0,86 |
| Media Tensión | Invierno | Día Hábil | 0,95 | 0,96 | 0,96 |
| | | Día No Hábil | 0,98 | 0,96 | 0,95 |
| | Resto | Día Hábil | 0,96 | 0,95 | 0,95 |
| | | Día No Hábil | 0,98 | 0,97 | 0,95 |
| | Verano | Día Hábil | 0,96 | 0,93 | 0,94 |
| | | Día No Hábil | 0,97 | 0,95 | 0,93 |

El mapeo horario de picos y la matriz usuario versus horario permiten identificar ventanas críticas concretas. En clientes en BT durante periodos de actividad se registraron saturaciones relevantes entre las 10:00 y 11:00 horas, donde se detectaron hasta 18 clientes operando cerca del 90% de su capacidad simultáneamente, mientras que en días no hábiles los picos se desplazan hacia la mañana temprana en varios períodos estudiados. Estos hallazgos emergen directamente de las tablas que entrega el código Python de forma automática (ver Figura 1 y 2).

Para las Figura 1 y Figura **2**, se tienen parte de las tablas que el archivo Python entrega para esos períodos específicos analizados dentro del PISV. La Figura 1 muestra las horas entre 07:00 y 15:30 hs; mientras que la Figura 2 toma entre las 03:30 y 12:00. Esto con el fin de demostrar la afirmación que se hizo previamente sobre el horario en el que ocurren los picos de consumo simultáneos de todos los clientes. Cabe notar que el resto del consumo diario, cae a valores considerablemente

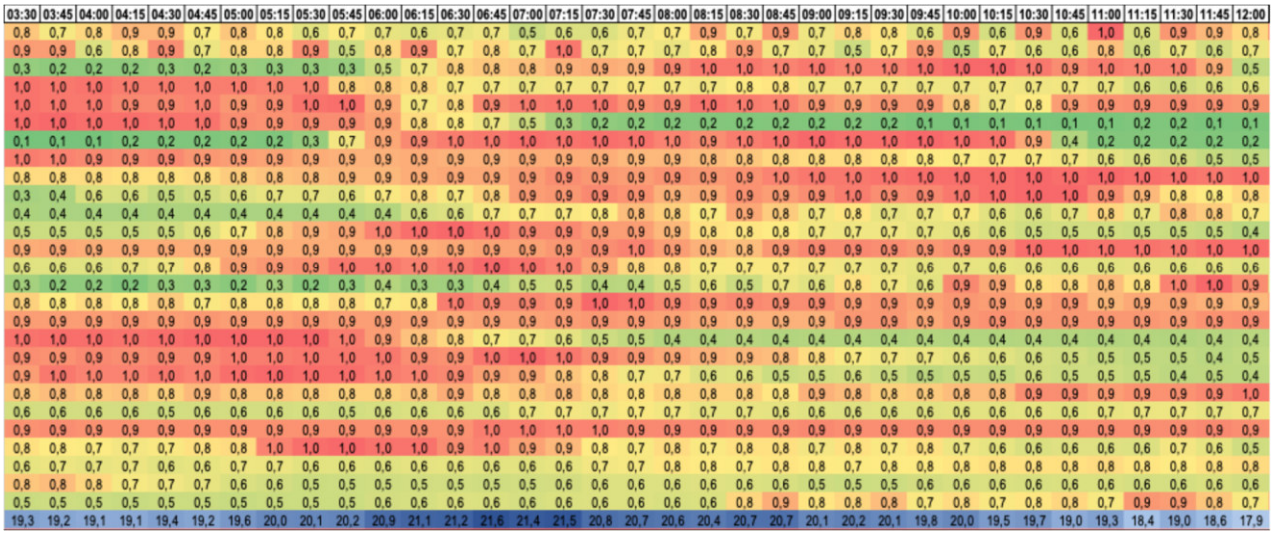
AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

más bajos que los que se ven en la última fila de ambas imágenes para el resto del día (una baja de simultaneidad global del PISV de hasta “12” para días hábiles y de hasta “15” para días no hábiles en el período de resto).



| 07:00 | 07:15 | 07:30 | 07:45 | 08:00 | 08:15 | 08:30 | 08:45 | 09:00 | 09:15 | 09:30 | 09:45 | 10:00 | 10:15 | 10:30 | 10:45 | 11:00 | 11:15 | 11:30 | 11:45 | 12:00 | 12:15 | 12:30 | 12:45 | 13:00 | 13:15 | 13:30 | 13:45 | 14:00 | 14:15 | 14:30 | 14:45 | 15:00 | 15:15 | 15:30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 |
| 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 |
| 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 |
| 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 |
| 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,6 |
| 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 |
| 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 |
| 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 |
| 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 |
| 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 |
| 18,4 | 18,7 | 19,0 | 19,6 | 20,9 | 21,1 | 21,3 | 21,9 | 22,5 | 22,9 | 23,0 | 23,1 | 23,2 | 23,0 | 22,8 | 23,1 | 23,1 | 23,0 | 23,0 | 22,8 | 22,5 | 22,0 | 21,7 | 21,9 | 22,4 | 22,3 | 22,0 | 22,0 | 22,2 | 22,1 | 21,6 | 20,6 | 19,4 | 19,3 | 18,6 |

**Figura 1.** Extracto de ~8 horas de Día Hábil en periodo de Resto, para la Tabla Excel generada por el código Python.



| 03:30 | 03:45 | 04:00 | 04:15 | 04:30 | 04:45 | 05:00 | 05:15 | 05:30 | 05:45 | 06:00 | 06:15 | 06:30 | 06:45 | 07:00 | 07:15 | 07:30 | 07:45 | 08:00 | 08:15 | 08:30 | 08:45 | 09:00 | 09:15 | 09:30 | 09:45 | 10:00 | 10:15 | 10:30 | 10:45 | 11:00 | 11:15 | 11:30 | 11:45 | 12:00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 1,0 | 0,6 | 0,9 | 0,9 | 0,8 |
| 0,9 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 1,0 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,7 |
| 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,5 |
| 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 |
| 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 0,3 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 |
| 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 |
| 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 0,9 |
| 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,5 |
| 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,4 |
| 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 |
| 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 |
| 19,3 | 19,2 | 19,1 | 19,1 | 19,4 | 19,2 | 19,6 | 20,0 | 20,1 | 20,2 | 20,9 | 21,1 | 21,2 | 21,6 | 21,4 | 21,5 | 20,8 | 20,7 | 20,6 | 20,4 | 20,7 | 20,7 | 20,1 | 20,2 | 20,1 | 19,8 | 20,0 | 19,5 | 19,7 | 19,0 | 19,3 | 18,4 | 19,0 | 18,6 | 17,9 |

**Figura 2.** Extracto de ~8 horas de Día No Hábil en periodo de Resto, para la Tabla Excel generada por el código Python.

El agrupamiento por similitud de picos mediante KMeans sobre los datos obtenidos de los archivos, permitió segmentar comportamientos distintivos. Se aplicaron ponderaciones específicas a las variables de hora pico, duración y magnitud, y la validación combinó el método del codo, Silhouette Score y finalmente gráficos de distribución de Clústeres y de proyecciones PCA para analizar de forma visual si el procedimiento se realizaba de forma correcta. En las Figura 3 y Figura ***4***, se muestran análisis de segmentación con K = 5 y Silhouette ≈ 0,663 para BT en invierno no hábil y otros casos con K = 7 y Silhouette ≈ 0,652, lo cual evidencia tanto grupos mayoritarios como clústeres muy aislados que identifican perfiles atípicos.

Cabe notar que se optó por elegir valores mayores de 5 para K (y no tan altos), debido a que, como se observa en el gráfico de puntaje WCSS de la Figura 3, el lugar óptimo en general que se encontraba “el codo”, era alrededor de K = 5 a K = 10, por lo que, aunque en algunos casos se hallaban valores altos de “Silhouette Score” para valores de K muy bajos o muy altos, al no ser valores óptimos según WCSS, no se los eligió finalmente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

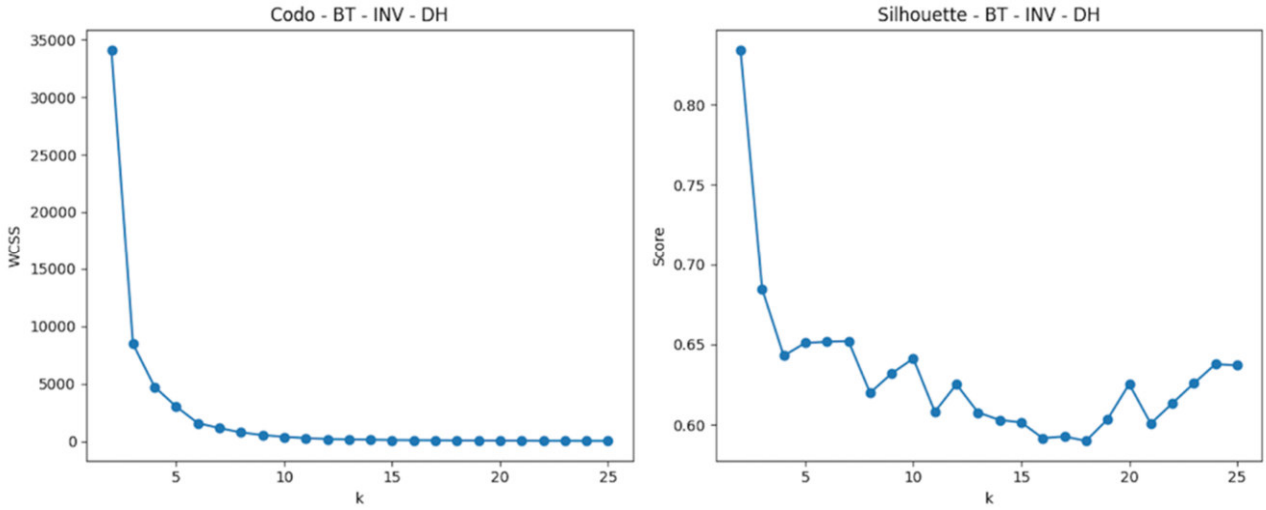



**Figura 3.** Puntaje WCSS para método del Codo, y Silhouette Score, en período de BT – Invierno – Días Hábiles.

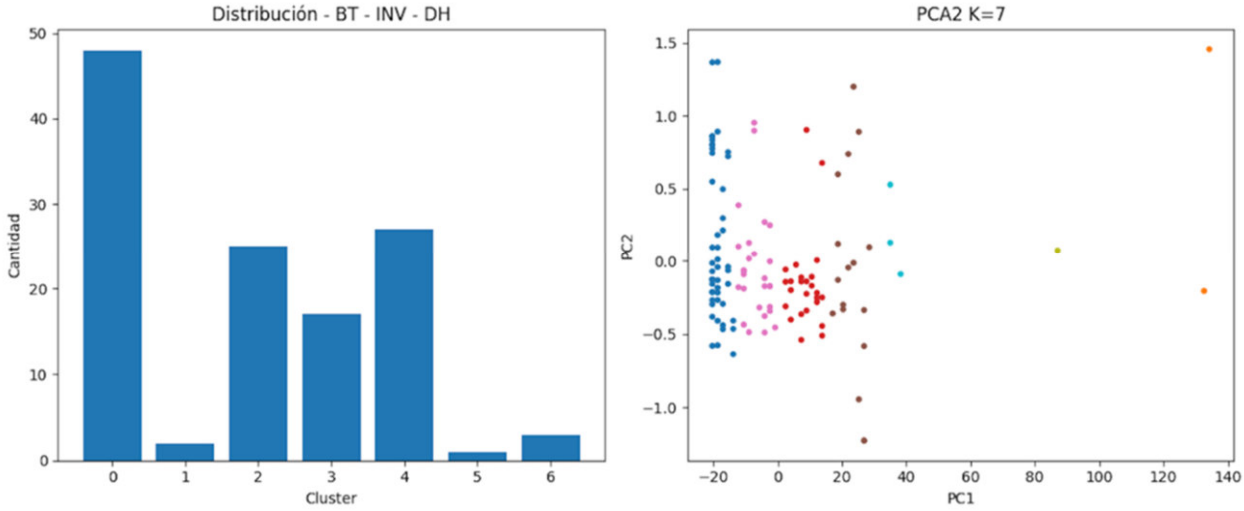



**Figura 4.** Clientes por clúster, y análisis con Componentes PCA, en período de BT – Invierno – Días No Hábiles.

La relación entre Simultaneidad y Variables Climáticas presentó comportamientos heterogéneos según segmento y periodo. En BT se observaron correlaciones positivas en verano entre temperatura y simultaneidad en ciertos turnos, mientras que en MT surgieron correlaciones negativas notables en algunos subperíodos. Estas correlaciones y su variabilidad temporal se documentan en tablas de correlación y de análisis por temporada (ver Tabla 2).

**Tabla 2.** Tabla de Correlación entre Factor de Simultaneidad y Temperaturas Diarias para Baja Tensión.

| Grupo | Período | Tipo de Día | Turno | Promedio Turno 1 | Promedio Turno 2 | Promedio Turno 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Baja Tensión | Invierno | Día Hábil | 1 | -0,09 | -0,05 | -0,15 |
| | | | 2 | 0,09 | 0,03 | 0,11 |
| | | | 3 | -0,09 | 0,05 | -0,18 |
| | | Día No Hábil | 1 | 0,24 | 0,26 | 0,11 |
| | | | 2 | 0,01 | -0,05 | 0,06 |
| | | | 3 | 0,18 | 0,19 | 0,11 |
| | Resto | Día Hábil | 1 | 0,32 | 0,34 | 0,24 |
| | | | 2 | 0,30 | 0,27 | 0,23 |
| | | | 3 | 0,21 | 0,10 | 0,25 |
| | | Día No Hábil | 1 | 0,08 | 0,06 | 0,09 |
| | | | 2 | 0,33 | 0,31 | 0,25 |
| | | | 3 | 0,26 | 0,21 | 0,28 |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Verano | Día Hábil | 1 | 0,39 | 0,36 | 0,34 |
| | | | 2 | 0,29 | 0,28 | 0,22 |
| | | | 3 | 0,45 | 0,37 | 0,44 |
| | | Día No Hábil | 1 | 0,06 | 0,10 | 0,04 |
| | | | 2 | 0,06 | -0,11 | 0,10 |
| | | | 3 | 0,04 | 0,10 | 0,05 |
| Media Tensión | Invierno | Día Hábil | 1 | 0,10 | 0,02 | 0,14 |
| | | | 2 | 0,09 | 0,09 | 0,11 |
| | | | 3 | -0,08 | -0,10 | -0,04 |
| | | Día No Hábil | 1 | 0,10 | 0,16 | 0,02 |
| | | | 2 | 0,03 | 0,02 | -0,03 |
| | | | 3 | -0,29 | -0,27 | -0,31 |
| | Resto | Día Hábil | 1 | 0,25 | 0,21 | 0,26 |
| | | | 2 | 0,11 | -0,02 | 0,15 |
| | | | 3 | 0,22 | 0,20 | 0,18 |
| | | Día No Hábil | 1 | 0,32 | 0,21 | 0,40 |
| | | | 2 | 0,24 | 0,16 | 0,35 |
| | | | 3 | 0,32 | 0,16 | 0,39 |
| | Verano | Día Hábil | 1 | -0,07 | -0,13 | -0,03 |
| | | | 2 | -0,20 | -0,26 | -0,17 |
| | | | 3 | -0,30 | -0,38 | -0,25 |
| | | Día No Hábil | 1 | -0,03 | -0,13 | -0,03 |
| | | | 2 | -0,36 | -0,50 | -0,23 |
| | | | 3 | -0,16 | -0,12 | -0,14 |

Se observa que, en general, las correlaciones oscilan entre -0,50 y +0,45, con una amplia gama de relaciones débiles a moderadas (tanto positivas como negativas). Ninguna correlación supera el valor absoluto de 0,5, lo que sugiere que no hay correlaciones muy extremas en ningún escenario.

A simple vista se puede realizar un Análisis Estacional, donde se observa que para Clientes de BT existen correlaciones predominantemente positivas en “Verano” y "Resto", un poco más débiles en invierno; mientras que los Clientes de MT, experimentan correlaciones generalmente negativas en invierno y mucho más pronunciadas en ese sentido, en verano (según el bloque analizado), mientras que para "Resto" poseen una tendencia como en los clientes de BT, con una correlación positiva.

## 4. Conclusiones

La herramienta desarrollada en Python para este proyecto ha demostrado su capacidad para cuantificar contrastes significativos en la simultaneidad de la demanda eléctrica entre segmentos de diferentes rubros de grandes usuarios en el PISV. En MT, se observa una operación estable con FS que oscilan entre el 93% y el 98%, lo que refleja patrones industriales sincronizados y predecibles. Por el contrario, en BT predomina una mayor variabilidad, con valores típicos del 77% al 87% que fluctúan según la estación y el tipo de día, incluyendo caídas nocturnas durante transiciones climáticas como primavera y otoño. Estas diferencias operativas demandan estrategias adaptadas, como el diseño de tarifas diferenciadas y la programación de mantenimientos que consideren ventanas horarias críticas. Para BT, resultaría óptimo realizar intervenciones en las tardes de días no laborales, en tanto que, para MT, al mantener una continuidad operativa similar independientemente del día, las tardes representan un horario indiferente pero efectivo.

La implementación de técnicas de clustering mediante KMeans, aplicada sobre atributos ponderados como la hora promedio del pico, su duración y la magnitud desnormalizada, ha permitido segmentar perfiles de consumo representativos y detectar comportamientos atípicos que requieren monitoreo especial. La validación de estos agrupamientos se basó en criterios cuantitativos, incluyendo el método del codo para seleccionar un número óptimo de clústeres entre 5 y 10 según el subperíodo, junto con proyecciones PCA y valores de Silhouette Score que confirman la identificación de patrones reales y reproducibles, evitando posibles errores derivados del muestreo.

En cuanto a las relaciones con variables climáticas, se identifican patrones bien diferenciados por segmento. Para usuarios de BT, emergen correlaciones positivas moderadas entre temperatura y simultaneidad, especialmente en turnos matutinos y vespertinos de días hábiles durante el verano y períodos intermedios, alcanzando valores de hasta +0,45. Esto implica que

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

temperaturas más altas intensifican la coincidencia operativa en este grupo. En MT, sin embargo, prevalecen correlaciones negativas, con picos de $-0{,}50$ en verano, sugiriendo que el calor tiende a reducir la simultaneidad en instalaciones de mayor escala. Estas dinámicas exhiben variaciones estacionales, siendo más débiles para el caso del período de invierno. Se observa en todos los casos que en general las correlaciones no superan el 0,5 en valor absoluto, indicando que el clima explica solo parcialmente las fluctuaciones y que factores operativos internos, como procesos productivos y hábitos diarios, juegan roles igualmente relevantes.

Desde una perspectiva práctica, los indicadores de FC y FS, apoyados por matrices usuario-horario, facilitan la identificación de franjas críticas y la priorización de refuerzos en la red. Esto incluye la optimización de mantenimientos en momentos de baja simultaneidad, y el desarrollo de programas de gestión de demanda dirigidos a clientes clave detectados mediante clustering. Para asegurar decisiones robustas, estos elementos deben tener un seguimiento continuo apuntado hacia consumos inusuales, reconociendo que la influencia climática, aunque verificable, es secundaria a aspectos no meteorológicos. Ampliar las series temporales y adquirir aún más registros, fortalecería aún más la capacidad del código Python para obtener mejores conclusiones, con el fin de aumentar la resiliencia de la red eléctrica en entornos industriales.

## Referencias Bibliográficas

Akhtar, S., Shafiq, M., & Wang, X. (2023). “Short-Term Load Forecasting Models: A Review of Machine Learning and Deep Learning Approaches”, Energies, 16(10), 4060. https://doi.org/10.3390/en16104060.

Eren, Y., & Küçükdemiral, İ. B. (2024). “A Comprehensive Review on Deep Learning Approaches for Short-Term Load Forecasting”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189, 114031. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114031.

Lin, R., Huang, C., & Hsu, C. (2024). “Electricity Behavior Modeling and Anomaly Detection Using Deep Variational Autoencoders”, Energies, 17(16), 3904. https://doi.org/10.3390/en17163904.

Luna-Romero, S. F., García, C., & Galván-Tejada, C. E. (2024). “Enhancing Anomaly Detection in Electrical Consumption Through Computational Intelligence Methods”, Sustainable Energy, Grids and Networks, 38, 101287. https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101287.

Michalakopoulos, V., Sarmas, E., Papias, I., Skaloumpakas, P., Marinakis, V., & Doukas, H. (2024). “A Machine Learning-Based Framework for Clustering Residential Electricity Load Profiles to Enhance Demand Response Programs”, Applied Energy, 361, 122943. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122943.

Oreshkin, B. N., Carpov, D., Chapados, N., & Bengio, Y. (2021). “N-BEATS Neural Network for Mid-Term Electricity Load Forecasting”, Applied Energy, 293, 116918. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116918.

Sarmas, E., Papias, I., Michalakopoulos, V., et al. (2024). “Explainable AI-Based Ensemble Clustering for Load Profile Analysis”, Energies, 17(22), 5559. https://doi.org/10.3390/en17225559.

Ungureanu, S., Hossu, D., & Bizon, N. (2021). “Deep Learning for Short-Term Load Forecasting of Industrial Electric Usage”, Applied Sciences, 11(21), 10126. https://doi.org/10.3390/app112110126.

Walser, T., Ringbeck, F., & Kuhnle, A. (2021). “Typical Load Profile-Supported Convolutional Neural Networks for Factory-Level Energy Forecasting”, Energy Reports, 7, 3756–3767. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.074.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Energía
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiante de grado
**Facultad Regional**: Santa Fe

# Influencia de los usuarios de baja tensión en la calidad de la energía eléctrica

## Influence of low voltage users on electrical power quality

Presentación 30/10/2025

**Ciro Toscano Ruffinatto**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Santa Fe, Argentina
cirotoscano1@hotmail.com

### Resumen

Este trabajo analiza la influencia de los usuarios de baja tensión sobre la calidad del suministro eléctrico en la ciudad de Santa Fe. Se estudiaron instalaciones residenciales, educativas e industriales livianas, con foco en parámetros como tensión, corriente y distorsión armónica. Las mediciones se realizaron durante una semana en cada sitio, registrando datos cada cinco minutos mediante un analizador de redes portátil. Los resultados muestran que cargas electrónicas no lineales, aun con baja demanda, generan altos niveles de distorsión en la corriente, mientras que algunas variaciones de tensión superan los límites normativos. Se identificaron diferencias según el tipo de carga y la zona de consumo. El estudio evidencia cómo el desarrollo tecnológico impacta negativamente en la calidad de energía eléctrica, y resalta la importancia de implementar estrategias de mitigación, monitoreos periódicos y medidas correctivas para garantizar un servicio eléctrico más estable y eficiente.

**Palabras claves:** Calidad de energía eléctrica, cargas no lineales, distorsión armónica.

### Abstract

This study analyzes the influence of low-voltage users on the quality of the electrical supply in the city of Santa Fe. Residential, educational, and light industrial installations were examined, focusing on parameters such as voltage, current, and harmonic distortion. Measurements were carried out over one week at each site, recording data every five minutes using a portable network analyzer. The results show that nonlinear electronic loads, even with low demand, generate high levels of current distortion, while some voltage variations exceed regulatory limits. Differences were identified based on the type of load and the consumption area. The study highlights how technological development negatively impacts power quality and emphasizes the importance of implementing mitigation strategies, periodic monitoring, and corrective measures to ensure a more stable and efficient electrical service.

**Keywords**: Power quality, nonlinear loads, harmonic distortion

## 1. Introducción

La calidad de tensión es un término usado para describir la relativa cantidad de disturbios o variaciones de tensión, particularmente en lo que se refiere a: armónicos, fluctuaciones de tensión, transitorios y factor de potencia (Ramirez Castaño et al., 2006).

En la actualidad, las computadoras, los dispositivos electrónicos y la tecnología LED han transformado la vida cotidiana, ofreciendo mayor eficiencia, menor consumo energético y nuevas posibilidades de aplicación en el ámbito residencial, comercial e industrial. Sin embargo, junto a estos beneficios también surgen nuevos desafíos para la calidad del suministro eléctrico. El estudio de cargas no lineales, ósea, de forma no continuas en el transcurso del tiempo, ha tomado un interés especial en los estudios de flujo de cargas armónicas ya que se requieren de conocimientos especializados para establecer los armónicos inyectados por las cargas no lineales al sistema (Yupanqui Rodríguez, 2021).

La calidad de energía resulta de la combinación de varios factores en el sistema eléctrico. En general, la electricidad se produce, transmite y distribuye con un alto nivel de calidad a través de los sistemas de corriente alterna. Sin embargo, la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

proliferación de aparatos electrónicos modernos, que introducen importantes componentes armónicos en las formas de onda de corriente y tensión, junto con el uso de electrodomésticos de baja eficiencia, ha dado lugar a sistemas energéticos de baja calidad en las instalaciones residenciales (Ramirez et al., 2019).

En este informe se examina cómo los usuarios de baja tensión, a través del uso masivo de estas tecnologías, no solo actúan como receptores de energía, sino que también introducen perturbaciones eléctricas en la red. Estas perturbaciones, caracterizadas por el incremento de armónicos y la alteración de parámetros fundamentales como la tensión y la corriente, pueden afectar negativamente a otros usuarios y a los propios elementos de la infraestructura eléctrica, como transformadores y sistemas de protección.

Estos factores representan un punto crítico en el debate sobre calidad de energía, ya que impactan tanto en la energía que recibimos como en la que devolvemos al sistema. Comprender y cuantificar estos efectos resulta esencial para implementar estrategias de mitigación que garanticen un suministro eléctrico más estable, eficiente y confiable.

## 2. Metodología y alcance

El presente trabajo tiene como objetivo analizar cómo los usuarios de baja tensión influyen en la calidad de la energía eléctrica en distintos entornos reales del departamento La Capital, provincia de Santa Fe. Para ello, se realizaron mediciones en viviendas, industrias livianas e instituciones educativas, registrando durante una semana completa por sitio parámetros de tensión (diferencia de potencial entre dos puntos, en V), corriente (flujo de carga eléctrica en un circuito, en A), armónicos (componentes de frecuencia múltiplos de la fundamental de 50 Hz que distorsionan la onda senoidal, desde el 2.º hasta el 7.º) y distorsión armónica total (THD, porcentaje que cuantifica la desviación de la señal de tensión o corriente respecto de su forma ideal). El análisis se desarrollará tomando como referencia técnica las normativas ENRE 14/93 para márgenes de tensión en baja tensión (±8%), ENRE 184/2000 para límites de distorsión armónica de tensión (5%), IEC 61000-4-7 para la metodología de medición de armónicos e IEC 61000-3-2 para los límites de emisión de corriente armónica en cargas conectadas a redes de baja tensión (20%). A través de este estudio se busca caracterizar el impacto que los usuarios ejercen sobre la red, identificar puntos críticos de distorsión y proponer líneas de acción orientadas a mejorar la calidad del suministro eléctrico; los niveles de sobretensión se incluyen como información complementaria para reforzar el análisis, aunque no constituyen el eje temático principal del informe.

### 2.1 *Impacto y efecto de los armónicos*.

La calidad de la energía eléctrica es un factor esencial para garantizar el funcionamiento confiable y seguro de las redes de distribución. La presencia de armónicos en la red, generados principalmente por cargas no lineales, puede provocar múltiples efectos negativos que afectan tanto a la infraestructura como a los usuarios finales.

En las líneas de distribución, los armónicos generan sobrecarga térmica, pérdidas adicionales y fenómenos de interferencia electromagnética, lo que incrementa los costos de operación y reduce la eficiencia del sistema. En los transformadores, estos efectos se traducen en un calentamiento excesivo, desmagnetización parcial de los núcleos y, en consecuencia, una disminución significativa de su vida útil.

Por otro lado, los usuarios conectados a la red también sufren las consecuencias, ya que los armónicos pueden causar interferencia en equipos electrónicos sensibles, provocar fallas en las protecciones e incluso comprometer la calidad de la energía que reciben otros consumidores.

### 2.2 *Metodología para la medición y análisis de datos*.

Para llevar a cabo las mediciones se utilizó un analizador de redes portátil HT Italia 9093, el cual permitió registrar y almacenar en tiempo real los datos de distintas magnitudes eléctricas para su posterior transferencia a un software específico del fabricante. Las mediciones se realizaron con una periodicidad semanal en diversos puntos del departamento de Santa Fe, incluyendo espacios residenciales, industriales e instituciones educativas. La instalación del equipo requirió el uso de 1 o 3 pinzas amperométricas y 2 o 4 pinzas cocodrilo, dependiendo del tipo de suministro presente en cada sitio (monofásico o trifásico con neutro). El instrumento se configuró para efectuar registros cada 5 minutos durante un período continuo de 7

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

días, obteniendo valores mínimos, medios y máximos de tensión, corriente y de la distorsión armónica total (THD) tanto de tensión como de corriente.

**Figura 1**. Analizador de redes HT Italia 9093 utilizado.

Una vez finalizado el periodo de medición se desconecta el instrumento y se procede a bajar los datos almacenados a una computadora con el software especializado para esa marca. Posteriormente se trasladan a un Excel para un correcto y completo análisis.

3.3 *Alcance.*

Las mediciones se llevaron a cabo en un amplio sector que abarca la ciudad de Santa Fe y sus alrededores, incluyendo Santo Tomé y Sauce Viejo, con el objetivo de obtener un registro representativo y variado de los valores relevados. Estas se realizaron en distintos tipos de usuarios de baja tensión, tales como residenciales, pequeñas industrias e instituciones educativas. En la siguiente tabla (Tabla 1) se detallan los lugares de medición y las fechas en las que se efectuaron.

**Tabla 1**. Lugares y fechas de medición.

| Numero de medición | Tipo de usuario | Localidad de medición | Dirección | Fecha de inicio | Fecha de fin |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Institución educativa | Santa Fe | Lavaisse 610 (UTN FRSF) | 21/11/2024 | 27/11/2024 |
| 2 | Institución educativa | Santa Fe | Lavaisse 610 (UTN FRSF) | 28/11/2024 | 04/12/2024 |
| 3 | Institución educativa | Santa Fe | Lavaisse 610 (UTN FRSF) | 16/12/2024 | 23/12/2024 |
| 4 | Residencial | Santa Fe | Cardenal Fasolino 28 | 14/02/2025 | 20/02/2025 |
| 5 | Residencial | Santo Tome | Pasaje Guerrero 1130 | 21/03/2025 | 28/03/2025 |
| 6 | Residencial | Santo Tome | Barrio cerrado "El Paso" | 14/09/2024 | 22/09/2024 |
| 7 | Industrial | Sauce Viejo | Parque industrial Sauce Viejo | 10/04/2025 | 16/04/2025 |
| 8 | Industrial | Sauce Viejo | Parque industrial Sauce Viejo | 16/04/2025 | 23/04/2025 |
| 9 | Residencial | Santa Fe | Pasaje Gianello 695 | 01/05/2025 | 08/05/2025 |

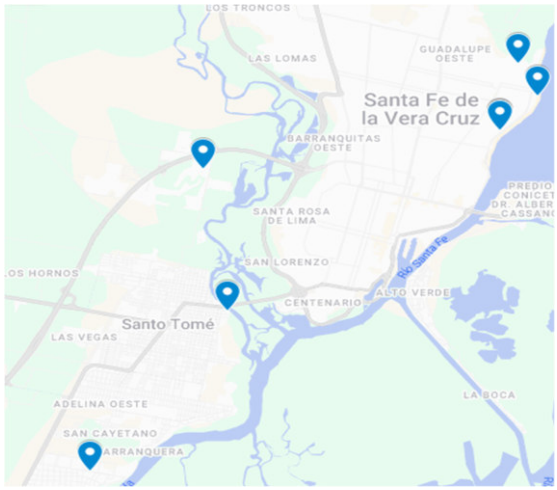



**Figura 2**. Mapa de los lugares de medición.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 3. Resultados y discusión.

3.1 *Graficas de los resultados*.

El dispositivo de medición nos suministra los datos que luego se pasan a un Excel para ser procesados y luego generar graficas en función del tiempo de las distintas variables en las que nos enfocamos. Ahora se muestra un ejemplo de las gráficas de tensión, corriente, THD de tensión y de THD de corriente (figura 3).

**Figura 3**. Ejemplo de graficas obtenidas tras la recopilación de datos

Luego con estas gráficas y los datos se realizan tablas con la cantidad de sobretensiones y de distorsiones armónicas de tensión y corriente.

3.2 *Síntesis de los resultados*.

**Tabla 2**. Límites establecidos por la normativa.

| | |
|---|---|
| Tensión máxima | 237,8 (V) |
| Porcentaje de THD de tensión máximo | 5 (%) |
| Porcentaje de THD de corriente máximo | 20 (%) |

**Tabla 3**. Resumen de los resultados obtenidos y su comparacion con los maximos establecidos.

| Numero de medición | Tipo de usuario | Fase | THD tensión prom. | THD corriente prom. | Sobrepasa limite THD tensión | Sobrepasa limite THD corriente | Numero de sobretensiones | Porcentaje de sobretensiones |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Institución educativa | R | 1,9 | 74,64 | NO | SI | 0 | 0.00% |
| | | S | 2,03 | 2,85 | NO | NO | 0 | 0.00% |
| | | T | 1,95 | 69,86 | NO | SI | 0 | 0.00% |
| 2 | Institución educativa | R | 2,45 | 33,06 | NO | SI | 0 | 0.00% |
| | | S | 2,63 | 47,41 | NO | SI | 0 | 0.00% |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | T | 2,5 | 36,29 | NO | SI | 0 | 0.00% |
| **3** | Institución educativa | R | 2,16 | 28,15 | NO | SI | 0 | 0.00% |
| | | S | 2,05 | 29,61 | NO | SI | 0 | 0.00% |
| | | T | 2,02 | 30,9 | NO | SI | 0 | 0.00% |
| **4** | Residencial | R | 2,43 | 45,64 | NO | SI | 13 | 0.70% |
| | | S | 2,05 | 35,62 | NO | SI | 907 | 49.11% |
| | | T | 2,44 | 46,58 | NO | SI | 15 | 0.81% |
| **5** | Residencial | UNICA | 2,43 | 55,62 | NO | SI | 535 | 4.48% |
| **6** | Residencial | R | 3,55 | 43,17 | NO | SI | 681 | 5.71% |
| | | S | 3,28 | 40,74 | NO | SI | 1381 | 11.57% |
| | | T | 3,3 | 95,48 | NO | SI | 616 | 30.63% |
| **7** | Industrial | R | 2,2 | 10,13 | NO | NO | 0 | 0.00% |
| | | S | 2,03 | 11,95 | NO | NO | - | - |
| | | T | 2,07 | 10,78 | NO | NO | 0 | 0.00% |
| **8** | Industrial | R | 1,99 | 10,22 | NO | NO | 0 | 0.00% |
| | | S | 2,15 | 15,58 | NO | NO | 0 | 0.00% |
| | | T | 1,97 | 40,94 | NO | SI | 0 | 0.00% |
| **9** | Residencial | R | 2,76 | 75,45 | NO | SI | 5413 | 53.72% |
| | | S | 2,63 | 68,8 | NO | SI | 4612 | 41.84% |
| | | T | 2,77 | 67,37 | NO | SI | 3373 | 33.47% |

**Tabla 4**. Tipos de usuarios frente a la generación de armónicos.

| | **Porcentaje** | **Observaciones** |
|---|---|---|
| **Usuarios con THD tensión > 5%** | 0,00% | - |
| **Fases de usuarios residenciales con THD corriente > 20%** | 100,00% | - |
| **Fases de usuarios de inst. ed. con THD corriente > 20%** | 88,89% | Medición 1 fase S no supera |
| **Fases de usuarios industriales con THD corriente > 20%** | 16,67% | Medición 8, fase T supera |
| **Cantidad de fase con THD corriente > 20% del total** | 76,00% | Mayormente las mediciones industriales no superan |

Los resultados obtenidos a lo largo de las mediciones realizadas en distintos usuarios de baja tensión permiten evidenciar el impacto que tienen las características propias de cada instalación sobre la calidad del suministro eléctrico. En particular, se observa que la presencia de cargas electrónicas no lineales, aún en condiciones de baja demanda, genera niveles de distorsión armónica de corriente elevados, superando en varios casos los valores de referencia sugeridos por normativas.

Este fenómeno se hace especialmente evidente en instalaciones residenciales con cargadores, iluminación LED o electrodomésticos en espera, donde el THD de corriente resultó ser alto incluso en momentos de bajo consumo. Esto sugiere que no es el nivel de potencia demandada el principal factor, sino la naturaleza de la carga conectada. En entornos industriales, se identificó un comportamiento más variable, donde ciertos equipos como variadores o rectificadores introducen perturbaciones puntuales, pero de mayor intensidad. En cuanto a la tensión, si bien en la mayoría de los casos se mantuvo dentro del rango admitido por la normativa ENRE 14/93 (±8 %), se detectaron sobretensiones sostenidas en algunas fases, en usuarios residenciales puntualmente. Los niveles de THD de tensión se mantuvieron generalmente dentro del 5 % permitido, salvo en ocasiones especiales en la que se midió en los usuarios industriales, esto debido a la naturaleza del proceso de fabricación que estén haciendo. Por otro lado, se comprobó que la ubicación geográfica, la densidad de carga y el horario de consumo influyen en el comportamiento eléctrico observado. Este punto sugiere la conveniencia de realizar estudios zonales y no generalizar las condiciones de calidad para toda una ciudad o red.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En resumen, los resultados confirman que el uso cada vez más extendido de tecnología moderna, sin una adecuada planificación ni compensación, puede generar un deterioro progresivo en la calidad del suministro. Esto resalta la necesidad de implementar estrategias de mitigación, como la instalación de filtros pasivos o activos, protecciones por sobretensión y campañas de concientización sobre el impacto de las cargas en la red.

3.3 *Posibles medidas de reducción de armónicos*.

La mitigación de armónicos requiere acciones tanto de los usuarios como de la empresa distribuidora. A nivel residencial, es fundamental la elección de equipos certificados, el uso de lámparas y cargadores de buena calidad y, en casos específicos, la incorporación de filtros pasivos o activos en las instalaciones de alta de grandes usuarios. Por su parte, la empresa proveedora debe implementar sistemas de monitoreo, aplicar filtros en subestaciones, utilizar transformadores adecuados y establecer normativas que limiten la distorsión admitida. De esta manera, se logra reducir el impacto de las cargas no lineales y preservar la calidad del suministro eléctrico.

## 4. Conclusiones.

El análisis realizado a partir de mediciones en usuarios de baja tensión permitió identificar de forma clara la influencia que tienen las cargas conectadas sobre la calidad del suministro eléctrico. Se observó que, más allá del nivel de consumo, la naturaleza de las cargas es el factor determinante en la aparición de perturbaciones, especialmente en lo que respecta a distorsión armónica de corriente.

En múltiples instalaciones, incluso en condiciones de baja demanda, se registraron niveles elevados de THD de corriente, lo que evidencia que las cargas no lineales, presentes de forma permanente en los hogares e industrias modernas, generan efectos negativos sobre la red. Este fenómeno también puede contribuir, en algunos casos, a la distorsión de la tensión, especialmente cuando hay presencia simultánea de múltiples equipos distorsionantes.

A baja demanda, la presencia de una alta cantidad de cargas no lineales genera un elevado THD de corriente, debido a que los armónicos tienen un mayor peso relativo frente a la corriente total. Sin embargo, debido al bajo nivel de corriente en esos momentos, el impacto negativo que estas distorsiones pueden causar en la red y en los equipos es limitado. En contraste, cuando la demanda es mayor y el THD de corriente disminuye, aunque la distorsión relativa sea menor, el efecto sobre la calidad del suministro y el posible daño a los equipos es más significativo debido a que la corriente total es más alta, amplificando el impacto de los armónicos presentes. Además, se detectaron variaciones de tensión fuera de los márgenes establecidos por la normativa, sobretensiones, pero nunca se observo por debajo del límite, subtensiones. Estas sobretensiones se observaron únicamente en el sector residencial.

En conjunto, estos resultados demuestran que los usuarios de baja tensión no son solo receptores de energía, sino que también pueden actuar como fuentes de perturbación, afectando la calidad del suministro tanto para sí mismos como para otros usuarios conectados a la misma red. Además, estos resultados evidencian la alta necesidad en la implementación de medidas para mitigar o reducir estos efectos contraproducentes, tanto como con filtros, concientización y monitoreo continuo.

## Referencias bibliográficas

Ramírez-Ramírez, A., Jiménez-Reyes, V. F., Vélez-Enríquez, J. A., Leal-Ortiz, S., & García-Guzmán, J. (2019). Study of harmonic content and influence of common electrical appliances used in residential installations. En 2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV) (pp. 1–8). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICEV.2019.8920620

Ramírez Castaño, S., & Cano Plata, E. A. (2006). Calidad del Servicio de energía eléctrica. Ingeniería Eléctrica.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Yupanqui Rodriguez, C. (2021). Selección de un sistema de filtros de armónicos para el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica–UNPRG.

Ente Nacional Regulador de la Electricidad. (1993). Resolución ENRE N.º 14/93: Condiciones de calidad de servicio y suministro en baja tensión. Buenos Aires, Argentina.

Ente Nacional Regulador de la Electricidad. (2000). Resolución ENRE N.º 184/2000: Calidad del producto técnico del servicio público de distribución de energía eléctrica. Buenos Aires, Argentina.

International Electrotechnical Commission. (2002). IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. *Geneva,* Switzerland.

International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 61000-3-2: Electromagnetic compatibility (EMC) – Limits – Limits for harmonic current emissions. Geneva, Switzerland.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Energía
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Estudio y selección de corredores de subtransmisión de energía eléctrica 33 kV de la provincia de Santa Fe para instalación de parques fotovoltaicos de mediana escala.

## Study and selection of medium voltage subtransmission corridors in Santa Fe province for the installation of medium-scale photovoltaic parks

Presentación: 30/10/2025

**Matias Maglianesi**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina
mmaglianesi@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

Este trabajo presenta una metodología para la selección de corredores de subtransmisión de 33 kV en la provincia de Santa Fe, con el objetivo de identificar emplazamientos óptimos para la instalación de parques fotovoltaicos de 8 a 12 MW. A partir de la preselección de 90 alimentadores, se realizó un análisis de datos históricos y un modelado de red mediante software para evaluar el desempeño del sistema. Se formuló un índice de aptitud multicriterio que integra indicadores técnicos de cargabilidad, indisponibilidad, tensión mínima, cantidad de usuarios, potencia instalada y crecimiento de la demanda, otorgando mayor ponderación a la descarga de líneas y la confiabilidad del servicio. Los resultados destacaron a los corredores de Carcarañá, Carreras y Las Toscas con los mayores puntajes. El estudio concluye que la inyección de potencia en estos puntos críticos permite mejorar los perfiles de tensión y la eficiencia operativa.

**Palabras clave:** Energía Eléctrica, Subtransmisión, Parques Fotovoltaicos, Planificación, Energía Renovable

### Abstract

This work presents a methodology for the selection of 33 kV sub-transmission corridors in the Santa Fe province, aiming to identify optimal sites for the installation of 8 to 12 MW photovoltaic parks. Based on the pre-selection of 90 feeders, historical data analysis and grid modeling via software were conducted to evaluate system performance. A multicriteria aptitude index was formulated integrating technical indicators of loadability, unavailability, minimum voltage, number of users, installed power, and demand growth, prioritizing line unloading and service reliability. The results highlighted the Carcarañá, Carreras, and Las Toscas corridors with the highest scores. The study concludes that power injection at these critical points improves voltage profiles and operational efficiency.

**Keywords:** Electric Power, Subtransmission, Photovoltaic Plants, Planning, Renewable Energy

## 1. Introducción

Las redes eléctricas convencionales se caracterizan por una estructura vertical y segmentada en tres niveles funcionales: generación, transporte y distribución. La ubicación remota de las centrales de generación respecto a los centros de consumo

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

masivo requiere de complejas redes de transmisión, las cuales conllevan una pérdida de eficiencia asociada a la disipación de potencia en sus elementos (Soria, 2024). En respuesta a estos inconvenientes y en línea con la transición hacia energías renovables, Ngouloubi et al. (2025) postulan la necesidad de un cambio de paradigma, particularmente en las redes de media tensión, para satisfacer las metas de confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad. Dentro de este nuevo esquema, la generación distribuida a partir de fuentes renovables, principalmente los parques fotovoltaicos (PFV), se presenta como una solución técnica y económica de alta viabilidad.

En el caso de la provincia de Santa Fe, el desarrollo y modernización de los sistemas eléctricos de potencia enfrenta importantes desafíos asociados al crecimiento de la demanda y la necesidad de mantener la calidad del servicio. La construcción de nuevas líneas de subtransmisión y estaciones transformadoras constituye una solución tradicional para atender estas exigencias; sin embargo, estos proyectos implican elevados costos de inversión y prolongados plazos de ejecución, debido a procesos complejos de ingeniería, adquisición de servidumbres, tramitaciones ambientales y disponibilidad presupuestaria.

Ante estas limitaciones, surge la necesidad de adoptar estrategias que permitan mejorar la confiabilidad y capacidad de la red sin recurrir inmediatamente a obras de gran magnitud. En este contexto, la incorporación de PFV de mediana escala de potencia, se presenta como una estrategia viable.

Este trabajo propone una metodología para identificar corredores de subtransmisión en 33 kV con alto potencial para la instalación de PFV de entre 8 y 12 MW. La metodología se basa en indicadores técnicos que permiten priorizar aquellos puntos de la red donde la inyección de generación renovable aporte beneficios en términos de calidad del servicio, eficiencia operativa y postergación de inversiones en infraestructura.

## 2. Materiales y métodos

La metodología desarrollada para este trabajo se estructuró en diferentes etapas orientadas a identificar los corredores eléctricos con mayor potencial para la instalación de PFV en redes de subtransmisión de 33 kV. El proceso comenzó con la preselección de 90 alimentadores pertenecientes a la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe (EPESF) representados en la Figura 1, priorizando aquellos cuya traza atraviesa zonas rurales o suburbanas, donde la disponibilidad de terrenos facilita la construcción de plantas fotovoltaicas.

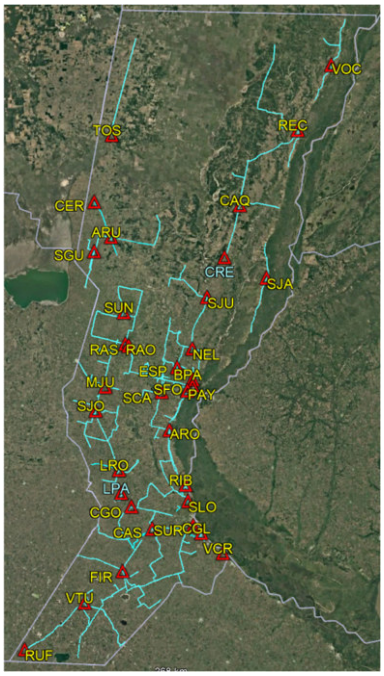



**Figura 1**. Red bajo estudio.

Posteriormente, se realizó un relevamiento exhaustivo de datos históricos para cada alimentador, recopilando información sobre niveles de carga en escenarios de pico, valle y pico nocturno, potencias contratadas, cantidad de usuarios, potencia

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

instalada en transformadores, calidad del servicio, donde se incluyeron fallas, duración y frecuencia de estas, y tasas de crecimiento de la demanda durante el período 2013-2023. Este análisis histórico constituyó la base para la caracterización técnica de cada corredor.

A continuación, se desarrolló un modelo eléctrico de la red de subtransmisión utilizando el software PSSE, dividiendo la red en 12 subsistemas operativos según la configuración operativa real de la EPESF en su zona de cobertura del suministro eléctrico en la provincia. Sobre estos modelos se llevaron a cabo simulaciones de flujos de carga y estudios de cortocircuito para los escenarios mencionados, ajustando las demandas conforme a los datos históricos. Estas simulaciones permitieron obtener parámetros clave como la cargabilidad del elemento más exigido y las tensiones mínimas en las barras de cada alimentador.

Para realizar una evaluación cuantitativa y jerarquizar los corredores eléctricos, se formularon una serie de indicadores técnicos. Estos indicadores se integraron en un Índice de Aptitud (IA) multicriterio, diseñado para ponderar la idoneidad de cada alimentador para la instalación de un parque fotovoltaico.

La valoración de cada corredor se calcula mediante:

$$IA = I_C \cdot \omega_C + I_i \cdot \omega_i + I_v \cdot \omega_v + I_u \cdot \omega_u + I_t \cdot \omega_t \quad (1)$$

Donde $I$ Corresponde a los indicadores normalizados (con valores de 0 a 1), siendo $I_c$ la cargabilidad de la línea, $I_i$ la indisponibilidad anual del servicio, $I_v$ la tensión mínima registrada, $I_u$ La cantidad de usuarios conectados al alimentador, $I_p$ la potencia instalada total, $I_t$ la tasa de crecimiento interanual de la demanda, y $w$ corresponde a los factores de ponderación asignados a cada indicador.

Finalmente, con la información procesada se formularon indicadores técnicos que sirvieron como base para la evaluación. Se definieron indicadores de cargabilidad, indisponibilidad anual, tensión mínima, cantidad de usuarios, potencia instalada y tasa de crecimiento, los cuales fueron ponderados según su relevancia para el objetivo del trabajo. Esta ponderación de los indicadores resultó de priorizar los que colaboren a descargar las líneas (30%), aumentando el horizonte de crecimiento y retrasando la necesidad de obras de nuevas líneas o de repotenciaciones. Que la indisponibilidad sea reducida (25%) para que el parque pueda colaborar con la mayor cantidad de energía. Luego que reduzca las depresiones de tensión (20%), mejorando la calidad del servicio local. Luego la cantidad de usuarios (15%), el cual busca que se beneficie a la mayor cantidad de usuarios posible, y la potencia instalada (5%) el cual busca que este beneficio sea donde mayor consumo existe. Finalmente, la tasa de crecimiento interanual (5%), beneficiando a alimentadores en zonas de mayor crecimiento. Para cada indicador, se asignó un valor entre 0 y 1, en función de su orden en una lista de mérito, de modo que los indicadores que reflejen ventajas producto de la instalación del parque sean mayores, y aquellos que lo desincentiven sea menores.

Estos indicadores se integraron en la Ec.(1), de modo de elaborar un ranking de alimentadores y generar una tabla de mérito para priorizar los corredores más adecuados para la incorporación de generación fotovoltaica.

La asignación de los pesos para cada ponderador se justificó con el objetivo de maximizar el impacto positivo del parque fotovoltaico en la red. La distribución fue la siguiente:

- $w_c$ (Cargabilidad) = 30%: Se le asignó la mayor prioridad para seleccionar alimentadores que operan cerca de su límite. La inyección de potencia fotovoltaica en estos puntos permite descargar las líneas, aumentando su horizonte de crecimiento y retrasando la necesidad de costosas obras de repotenciación.
- $w_i$ (Indisponibilidad) = 25%: Se busca garantizar que el PFV se conecte a un corredor confiable. Una baja indisponibilidad es fundamental para maximizar la cantidad de energía que el PFV puede inyectar a la red anualmente.
- $w_v$ (Tensión Mínima) = 20%: Se priorizan los corredores que presentan perfiles de tensión bajos. La generación distribuida puede ayudar a regular y elevar los perfiles de tensión, mejorando directamente la calidad del servicio local.
- $w_u$ (Cantidad de Usuarios) = 15%: Este criterio busca maximizar el impacto social del proyecto, beneficiando a la mayor cantidad de usuarios posible.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- $w_p$ (Potencia Instalada) = 5%: Se da una ponderación menor para orientar el beneficio hacia zonas con un alto nivel de consumo concentrado.
- $w_t$ (Tasa de Crecimiento) = 5%: Finalmente, se busca apoyar a los alimentadores ubicados en zonas de mayor crecimiento de la demanda energética.

Para cada indicador, los datos técnicos de cada corredor se normalizaron a un valor entre 0 y 1. Este proceso se realizó en función de su orden en una lista de mérito, de modo que los valores que reflejaban condiciones más ventajosas para la instalación del parque (ej. alta cargabilidad, baja tensión) recibieran un puntaje mayor.

La aplicación de la Ec.(1) a cada alimentador permite calcular su IA, generando así un ranking final para priorizar los corredores más adecuados para la incorporación de generación fotovoltaica.

## 3. Resultados y discusión

A partir de la aplicación de la metodología propuesta se elaboró una tabla de mérito que permitió jerarquizar los alimentadores según su potencial para la instalación de PFV. Los resultados evidenciaron que los corredores mejor posicionados fueron Carcarañá, Carreras, Las Toscas, Soldini, San Carlos Norte, Vera, Los Cardos, Totoras, Humboldt y Los Quirquinchos. Estos alimentadores presentan combinaciones particulares de indicadores que los destacan frente al resto: altos niveles de cargabilidad, tensiones mínimas reducidas en condiciones de máxima demanda y una cantidad significativa de usuarios asociados, lo que implica un impacto positivo en la calidad del servicio al incorporar generación distribuida.

**Tabla 1**. Resultados de los 10 alimentadores mejor puntuados.

| Estación Transformadora | Salida | Puntaje Total |
|---|---|---|
| Casilda | Carcarañá | 81,9 |
| Firmat | Carreras | 80,9 |
| Villa Ocampo Centro | Las Toscas | 79,8 |
| Rosario Sur | Soldini | 78,5 |
| San Carlos | San Carlos Norte | 78,2 |
| Calchaqui | Vera | 77,3 |
| Las Rosas | Los Cardos | 76,8 |
| Cañada de Gómez | Totoras | 75,7 |
| Esperanza | Humboldt | 75,2 |
| Firmat | Los Quirquinchos | 74,7 |

El análisis detallado de los indicadores de la Figura 2 mostró que la cargabilidad y la tensión mínima son factores fuertemente correlacionados, constituyendo los principales impulsores del puntaje total. En muchos casos, la indisponibilidad anual influyó en la posición final dentro del ranking, dado que las líneas con menor confiabilidad fueron penalizadas para priorizar aquellas donde la generación renovable pueda aportar beneficios sin comprometer la estabilidad del sistema. Asimismo, indicadores como la cantidad de usuarios y el crecimiento de la demanda contribuyeron a resaltar corredores ubicados en zonas de expansión demográfica, lo que refuerza la importancia de planificar proyectos en áreas estratégicas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

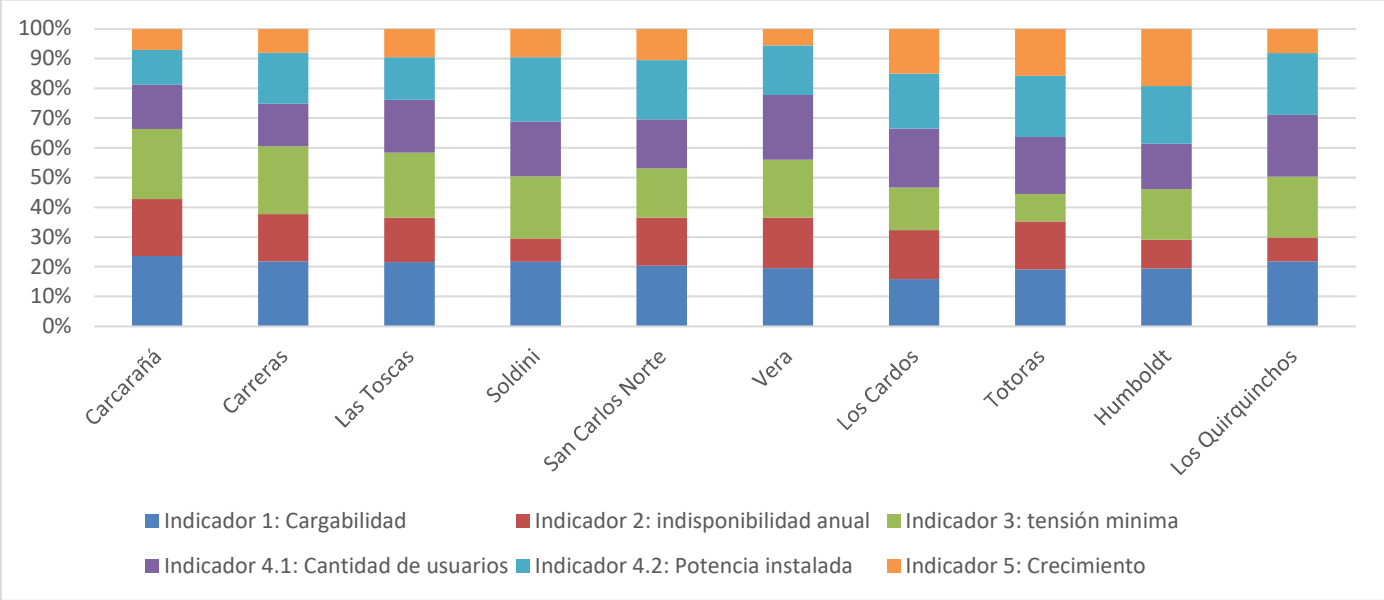



**Figura 2**. Distribución del puntaje por indicador.

## 4. Conclusiones

Los gráficos de distribución de la Figura 2, evidencian la variabilidad entre corredores y la contribución de cada indicador en el puntaje final, destacando que, si bien algunos alimentadores presentan niveles de cargabilidad elevados, sus deficiencias en otros aspectos limitan su potencial. Esta evaluación integral demuestra que la simple observación de un parámetro aislado no resulta suficiente para la toma de decisiones. En conjunto, los resultados confirman que la metodología multicriterio propuesta constituye una herramienta eficaz para orientar inversiones en generación renovable, priorizando zonas donde la incorporación de PFV podría contribuir a la sostenibilidad y a la eficiencia operativa del sistema.

## Agradecimientos

Se agradece al Ing. Ulises Manassero por su guía y acompañamiento durante el desarrollo del proyecto, brindando orientación técnica y profesional en cada etapa del trabajo. Asimismo, se reconoce a la EPESF por la provisión de datos históricos y facilidades que hicieron posible la realización de este estudio

## Referencias

Ngouloubi, T. L., Gomba, R., Gogom, M., Nianga-Apila, Eyandzi, A. O. (2025). “Optimization of a Medium-Voltage Distribution Network via Photovoltaic Integration: A Case Study of the Liouesso MT Grid”, Science Journal of Energy Engineering, 13(3), 108-119. https://doi.org/10.11648/j.sjee.20251303.11.

Soria, J. D. (2024). “Análisis de factibilidad técnica en la instalación de un parque de generación distribuida fotovoltaica en la red de distribución en 13,2kV de Balcarce”, Trabajo final de grado (Ingeniería Eléctrica), Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata. http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/handle/123456789/905.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Energía
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Comparación de métodos de medición de vida útil para lámparas LED

## Comparison of LED Lamp Lifetime Measurement Methods

Presentación: 30/10/2025

**Matías Maglianesi**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Laboratorio de Mediciones y Ensayos, Santa Fe, Argentina
mmaglianesi@frsf.utn.edu.ar

**Agustina Solís**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Laboratorio de Mediciones y Ensayos, Santa Fe, Argentina
asolis@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

Este trabajo en curso aborda la comparación de dos métodos de medición de vida útil en lámparas LED con el objetivo de evaluar la precisión de las estimaciones provistas por los fabricantes. Se analizaron 20 lámparas idénticas divididas en dos grupos: el primero sometido a funcionamiento continuo durante 2000 horas y el segundo a un ciclo de conmutación encendido-apagado, siguiendo lo estipulado en la resolución 438/2024 y la norma IEC 62612:2018. Se realizaron mediciones periódicas del flujo luminoso determinar la variación en el rendimiento lumínico en el tiempo. Los resultados muestran que el grupo sometido a funcionamiento continuo presentó una disminución promedio del 1,1 % en el flujo luminoso, mientras que el grupo con ciclos de conmutación registró un incremento promedio del 1,08 %.

**Palabras clave:** lámparas LED, vida útil, métodos de ensayo

### Abstract

This study compares two lifetime measurement methods for LED lamps to evaluate the accuracy of manufacturer-provided estimations. A total of 20 identical lamps were divided into two groups: one operated continuously for 2000 hours and the other subjected to an on-off switching cycle, following the requirements of Resolution 438/2024 and IEC 62612:2013 standard. Periodic luminous flux measurements were performed to assess variations in light output over time. Results indicate that the continuously operated group experienced an average flux reduction of 1.1%, while the switching cycle group showed an average increase of 1.08%.

**Keywords:** LED lamps, lifetime, test methods

## 1. Introducción

En los últimos años, el mantenimiento del flujo luminoso se ha convertido en un factor clave dentro del ámbito de la iluminación, ya que asegura niveles de iluminación adecuados durante toda la vida útil de los equipos. En este sentido, las lámparas LED destacan como una de las soluciones más confiables, al conservar un rendimiento luminoso estable y minimizar la depreciación del flujo con el paso del tiempo. Sin embargo, la verdadera vida útil de estas lámparas, especialmente en condiciones de uso real, es un tema que sigue siendo objeto de investigación. Los fabricantes suelen proporcionar estimaciones del tiempo de funcionamiento de las lámparas basadas en condiciones ideales de operación, pero a la hora de verificar estos valores, las diferentes normas nacionales e internacionales no pueden llegar a un consenso sobre el método más efectivo para verificarlo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Este estudio busca proporcionar una evaluación más precisa del comportamiento de las lámparas LED bajo dos condiciones de envejecimiento, funcionamiento constante y funcionamiento intermitente. Comparando el impacto de ambos métodos sobre la vida útil, el rendimiento lumínico y la eficiencia energética de las lámparas. De esta manera, se espera obtener conclusiones que puedan ayudar a mejorar la fiabilidad de los datos proporcionados por los fabricantes y ofrecer una visión más clara sobre cómo las lámparas LED se comportan en condiciones de uso reales.

En la siguiente sección, se explayan los datos del lote de lámparas considerados para el análisis, así como también la metodología de cálculo para la medición de flujo y vida útil según mantenimiento de flujo. Por su parte, en la sección 3, se desarrollan los resultados, comparando mediante graficas los resultados obtenidos.

## 2. Materiales y métodos

En este estudio, se busca comparar dos métodos distintos para evaluar el envejecimiento de las lámparas LED, con el fin de verificar la precisión de los valores proporcionados por los fabricantes. El primer método, extraído del artículo 5 del apéndice VI de la resolución 438/2024 de la secretaria de Industria y Comercio de la Argentina, consiste en hacer funcionar las lámparas de manera continua durante 3.000 horas, un enfoque que simula un uso prolongado sin interrupciones, pero que podría no reflejar la variabilidad en el uso diario de los dispositivos, generando un mayor estrés térmico en los componentes. Por otro lado, el segundo método extraído del inciso 11.3.3 la norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 62612:2013, consiste en un ciclo de encendido y apagado, que reproduce un patrón de uso más cercano al comportamiento típico de las lámparas en hogares o entornos comerciales, donde las lámparas no permanecen encendidas durante periodos tan extensos de tiempo, y lo que se pone a prueba es la resistencia de los componentes electrónicos. Para el estudio, se utilizaron un lote de 20 lámparas idénticas de la Figura 1.

**Figura 1**. Modelo de lámpara LED bajo ensayo con sus respectivos datos técnicos.

En este caso la vida útil declarada por el fabricante es de 12000 horas, dato relevante para el posterior cálculo de la cantidad de ciclos de conmutación a las que son sometidas las lámparas.

Al lote de lámparas se le realizó la medición inicial de flujo lumínico siguiendo lo estipulado en la norma IEC 62612:2013. El ensayo es indirecto y consiste en una serie de mediciones dentro de una esfera integradora de Ulbricht. En primera instancia, se midió el flujo inicial con una lámpara patrón calibrada por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) (En). Seguido de una medición con esta misma lámpara apagada, acompañada de una lámpara auxiliar encendida (Ehn) y la misma medición, realizada con una lámpara del lote bajo ensayo apagada (Ehx). Estas 2 mediciones sirven para poder tener en cuenta diferencias geométricas entre las lámparas y la configuración espacial en la esfera. Finalmente, se procedió a medir las 20

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

lámparas bajo ensayo (Ex). Se utilizó la Ecuación (1) para obtener el valor corregido (International Electrotechnical Commission, 2013), siendo $\Phi_{cal}$ el valor de flujo luminoso de la lampara patrón calibrado por el INTI (INTI, 2025).

$$\mathbf{\Phi_{corregido}} = \frac{\mathbf{E_x}}{\mathbf{E_n}} \times \frac{\mathbf{E_{hn}}}{\mathbf{E_{hx}}} \times \mathbf{\Phi_{cal}} \quad (1)$$

En cuanto al ensayo de mantenimiento de flujo, cada laboratorio se reserva la forma precisa con la cual lo lleva a cabo, sin embargo, sin excepción deben medirse según normas y resoluciones legales vigentes, esto es durante TRES MIL (3000) horas, al cabo de las cuales todas las lámparas de la muestra ensayada deberán mantener un flujo luminoso mayor o igual a un porcentaje del flujo inicial de la lámpara (Min. de Economía - SIyC, 2024) según lo establecido en la Tabla 1.

**Tabla 1**. Vida nominal según flujo luminoso mínimo mantenido a las 3000 horas.

| Vida nominal (horas) | Flujo Luminoso Mínimo Mantenido (%) @3.000 hs. |
|---|---|
| Menor a 10.000 | 83,70% |
| Mayor o igual a 10.000 y menor a 15.000 | 89,90% |
| Mayor o igual a 15.000 y menor a 20.000 | 93,10% |
| Mayor o igual a 20.000 y menor a 25.000 | 94,80% |
| Mayor o igual a 25.000 y menor a 30.000 | 95,80% |
| Mayor o igual a 30.000 y menor a 40.000 | 96,50% |
| Mayor o igual a 40.000 y menor a 50.000 | 97,40% |
| Mayor o igual a 50.000 | 97,90% |

Este flujo mantenido corresponde al cociente entre mediciones según Ec. 2:

$$\mathbf{\Phi_{mant}}[\%] = \frac{\mathbf{\Phi_{final}}}{\mathbf{\Phi_{inicial}}} \times \mathbf{100} \quad (2)$$

Para llevar a cabo el análisis, sin embargo, no se realiza la comparación luego de las 3000hs, en cambio, se opta por mediciones parciales. Luego de realizar la medición inicial, se separó el lote en 2 grupos de 10 lámparas. Un primer lote fue conectado a una fuente de alimentación que cumpla con los requisitos establecidos por la resolución 438/2024, y se midió su valor cada 500 horas, llegando hasta un máximo de 2000 horas para este trabajo.

Al grupo de 10 lámparas restantes, se las sometió al ensayo de conmutación de suministro eléctrico. Este ensayo estipula que se deben realizar un ciclo de encendido y apagado de 30 segundos cada uno igual a la mitad de la cantidad de horas de vida declaradas. Recordando que el fabricante declaró 12000 horas de vida útil, se calcularon 6000 ciclos de conmutación para las lámparas. Se midió nuevamente el flujo luminoso, solo que la referencia ya no es temporal, sino más bien en cantidad de ciclos, cada 1000 ciclos se realiza entonces la medición de mantenimiento, a modo de poder comparar la variación del flujo entre los 2 métodos.

## 3. Resultados y discusión

La tabla 1 expone las mediciones obtenidas a lo largo de los diferentes ensayos. Las lámparas 1 a 10 fueron sometidas a tiempo de envejecimiento, mientras que las lámparas 11 a 20 a ciclos de conmutación. Cabe aclarar que la lampara 10 falló luego de 1500 horas.

**Tabla 2**. Resultado de las mediciones de flujo luminoso en lúmenes a lo largo del envejecimiento.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| Nº Lamp | Flujo luminoso [lm] | | | | | Diferencia [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 hs 0 SW | 500 hs 1000 SW | 1000 hs 2000 SW | 1500 hs 3000 SW | 2000 hs 4000 SW | |
| 1 | 367,07 | 369,35 | 367,19 | 369,31 | 363,04 | -1,10 |
| 2 | 344,67 | 347,25 | 346,91 | 348,3 | 344,24 | -0,13 |
| 3 | 366,69 | 368,03 | 367,57 | 367,78 | 361,81 | -1,33 |
| 4 | 363,10 | 364,37 | 363,91 | 363,48 | 357,06 | -1,66 |
| 5 | 365,08 | 371,32 | 369,35 | 372,65 | 364,28 | -0,22 |
| 6 | 368,67 | 371,7 | 368,6 | 369,02 | 365,13 | -0,96 |
| 7 | 373,68 | 376,21 | 371,7 | 373,13 | 366,18 | -2,01 |
| 8 | 359,89 | 363,14 | 361,09 | 363,77 | 355,06 | -1,34 |
| 9 | 354,03 | 354,96 | 353,86 | 356,8 | 349,94 | -1,15 |
| 10 | 352,52 | 352,71 | 351,7 | 353,36 | 0 | 0,24 |
| 11 | 366,22 | 368,95 | 365,5 | 365,91 | 373,68 | 2,04 |
| 12 | 362,25 | 362,66 | 363,22 | 361,62 | 368,78 | 1,80 |
| 13 | 361,30 | 362,19 | 360,65 | 360,48 | 366,76 | 1,51 |
| 14 | 363,38 | 359,52 | 360,36 | 357,91 | 361,47 | -0,53 |
| 15 | 353,93 | 354 | 352,36 | 352,19 | 355,79 | 0,52 |
| 16 | 350,53 | 352,66 | 353,13 | 351,81 | 355,12 | 1,31 |
| 17 | 356,11 | 357,05 | 356,08 | 355,24 | 359,06 | 0,83 |
| 18 | 351,29 | 351,14 | 351,51 | 350,76 | 353,19 | 0,54 |
| 19 | 343,16 | 346,19 | 348,46 | 344,19 | 348,96 | 1,69 |
| 20 | 363,38 | 365,14 | 364,45 | 366,19 | 367,14 | 1,03 |

En la Figura 2 y la Figura 3 se observa el comportamiento de los 2 grupos de lámparas por separado. Cada recta corresponde la medición a lo largo del tiempo (o cantidad de conmutaciones) de las lámparas tal y como se enumeran en la Tabla 2.

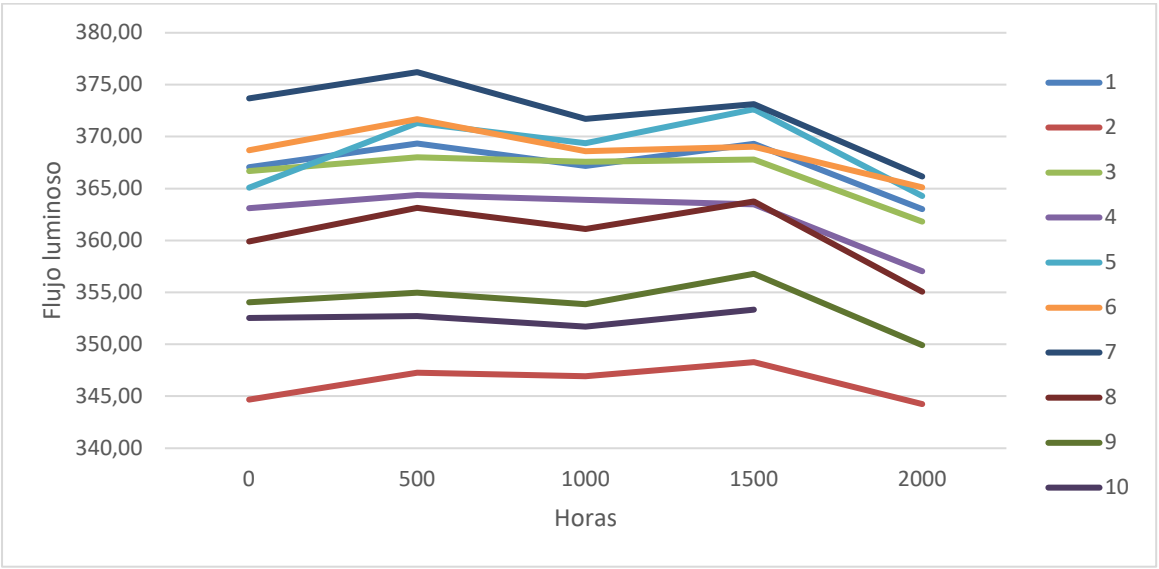



**Figura 2**. Variación de flujo para lámparas con envejecimiento continuo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

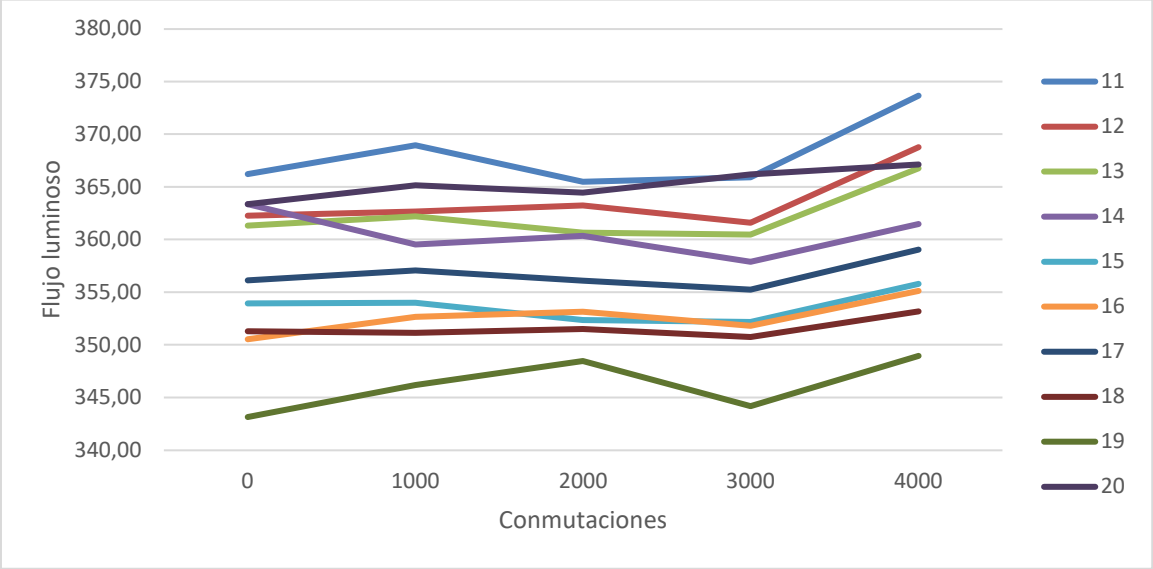



**Figura 3**. Variación de flujo para lámparas con ciclos de conmutación.

En el caso de la Figura 2, se puede apreciar como en general el flujo va lentamente cayendo a lo largo de las horas, siendo en todos los casos menor el flujo tras 2000 horas que el flujo inicial, resultando un promedio (excluyendo la lámpara 10) de un decaimiento de un 1,1% del flujo. Por otro lado, en la Figura 3 se registra un aumento de la luminiscencia a lo largo de los ciclos, resultando en 9 de los 10 casos un flujo mayor tras 4000 conmutaciones que el valor inicial, siendo un promedio de un 1,08% de aumento del flujo.

Cabe destacar que a las mediciones se les debe considerar la incertidumbre asociada a los instrumentos y equipos de medición utilizados, lo cual puede influir en la precisión de los resultados, especialmente teniendo en cuenta la sensibilidad de los valores obtenidos, sin embargo, observamos que las mediciones siguen una tendencia de acuerdo con el ensayo que se les ha realizado. Esta consistencia permite validar el análisis realizado.

Se considera que los resultados presentados son aún parciales, ya que se requiere la realización de un mayor número de ensayos para confirmar las tendencias observadas y fortalecer la validez estadística de las conclusiones. Por lo tanto, este trabajo se encuentra en desarrollo, como parte de un estudio más amplio que busca establecer criterios experimentales sólidos para la evaluación de la vida útil de lámparas LED bajo distintas condiciones de uso.

El ensayo basado en funcionamiento continuo evidenció una disminución promedio del flujo luminoso del 1,1 %, lo cual puede atribuirse al estrés térmico acumulado por la operación constante, que acelera el envejecimiento de los componentes internos. En contraposición, el método de ciclos de conmutación presentó un incremento promedio del 1,08 % en el flujo luminoso, lo que podría explicarse por un proceso de estabilización inicial del sistema óptico y electrónico tras repetidas fases de encendido y apagado, sin alcanzar condiciones térmicas extremas como en el funcionamiento ininterrumpido.

## 4. Conclusiones

El análisis comparativo entre los dos métodos de medición de vida útil para lámparas LED permite concluir que la metodología empleada tiene una incidencia directa, y significativa, sobre los resultados obtenidos y, por lo tanto, sobre la interpretación de la durabilidad del producto.

Los resultados ponen de manifiesto que la estimación de la vida útil de las lámparas LED no puede basarse únicamente en ensayos continuos, dado que este escenario no refleja el uso cotidiano de los dispositivos en entornos residenciales o comerciales, donde los ciclos de encendido y apagado son habituales. Asimismo, se evidencia la necesidad de considerar métodos que integren ambos comportamientos o que ponderen patrones reales de utilización, con el fin de proporcionar datos más representativos para los consumidores.

En términos prácticos, la inclusión de ensayos conmutados en los procesos de certificación permitiría generar información más confiable sobre el rendimiento lumínico y la estabilidad de los componentes, reduciendo la brecha entre las condiciones de laboratorio y el uso real. Finalmente, este estudio aporta un punto de partida para futuras investigaciones orientadas a

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

establecer metodologías normalizadas que contemplen variables como temperatura ambiente, perfiles de carga y características de instalación, de modo de garantizar estimaciones más precisas y útiles para el mercado.

## Agradecimientos

Se agradece al laboratorio de mediciones y ensayos LaMyEn por aportar los datos y el equipamiento requerido para el estudio, como también al Ing. Nicolas Pochettino por su guía y acompañamiento durante el desarrollo del proyecto.

## Referencias bibliográficas

International Electrotechnical Commission. (2013). *62612:2013+AMD1:2015+AMD2:2018 - Self-ballasted LED lamps for general lighting services with supply voltages.*

INTI. (2025). *INTI*. Obtenido de Servicio Argentino de Calibración y Medición: https://www.inti.gob.ar/areas/metrologia-y-calidad/servicio-argentino-de-calibracion/servicio-argentino-de-calibracion

Min. de Economía - SIyC. (26 de 11 de 2024). *Resolución 438/2024.* Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-438-2024-406558/texto

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Energía
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Microrredes con generación distribuida: estudio de impacto de fuentes fotovoltaicas y almacenamiento con baterías

## Microgrids with Distributed Generation: Impact Study of Photovoltaic Sources and Battery Storage

Presentación 30/10/2025

**Carlos Ariel Romani**
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina
cromani_19@hotmail.com

### Resumen

La creciente conciencia mundial sobre la necesidad de fuentes de energías limpias y la búsqueda de sistemas de energía más resilientes, han impulsado el desarrollo de las investigaciones en torno a la implementación de microrredes que incorporan fuentes renovables. Sin embargo, su operación presenta desafíos significativos derivados de la intermitencia inherente a los recursos naturales explotados en las instalaciones. El objetivo principal de este trabajo es evaluar la factibilidad técnica de utilizar infraestructuras tradicionales de redes de distribución en media tensión en su operación como microrredes, incorporando generación distribuida con aporte fotovoltaico y almacenamiento con baterías. El análisis contempla la modelización de la microrred en un software de simulación, y se centra en los perfiles y fluctuaciones de voltaje, y en la cargabilidad de líneas. En este trabajo, el estudio se realiza sobre una porción de la red de distribución de la ciudad de Rafaela (Santa Fe, Argentina). Este estudio concluye que el almacenamiento con baterías es fundamental para optimizar el uso de la energía fotovoltaica, haciendo viable técnicamente la conversión de la red convencional en una MR con aporte de generación fotovoltaica.

**Palabras clave:** Baterías; Energías Renovables; Microrredes

### Abstract

Growing global concern about the need for clean energy sources and the search for more resilient energy systems have driven research into the implementation of microgrids that incorporate renewable sources. However, their operation presents significant challenges due to the inherent intermittency of the natural resources exploited in these installations. The main objective of this work is to evaluate the technical feasibility of using traditional medium-voltage distribution network infrastructures in their operation as microgrids, incorporating distributed generation with photovoltaic sources and battery storage. The analysis includes modeling the microgrid in a simulation software program and focuses on voltage profiles and fluctuations, as well as line load capacity. In this study, the analysis is performed on a portion of the distribution network in the city of Rafaela (Santa Fe, Argentina). This study concludes that battery storage is essential to optimize the use of photovoltaic energy, making the technical conversion of the conventional grid into a microgrid with photovoltaic generation contribution viable.

**Keywords:** Batteries; Renewable Energy; Microgrids

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

En las últimas décadas, la configuración clásica de los sistemas eléctricos basada en grandes centrales de generación, insertas en extensas redes de transmisión y distribución ha experimentado una notable transformación (Mojumdar y col., 2015). En Argentina, las MRs no son infraestructuras de uso regular, aunque algunas investigaciones evalúan reutilizar redes convencionales y reconvertirlas a MRs. Por caso, (Manassero y col., 2023) definieron criterios para dividir la red de la ciudad de Rafaela (Santa Fe) en porciones consideradas MRs. Asimismo, los estudios realizados por (Chiani, 2024) dimensionaron instalaciones de generación diésel y fotovoltaica que fueron añadidas a estas MRs en un entorno de simulación, considerando diversos escenarios: demanda pico y valle, condiciones con abastecimiento diésel pleno (sin aporte solar), generación fotovoltaica a potencia nominal, y casos de caída abrupta de la generación solar. No obstante, otras condiciones de interés no fueron consideradas: a) incorporación de baterías, y b) variaciones temporales más realistas de las cargas y de la generación solar. Frente a esta brecha, la contribución de este trabajo reside en cuantificar el impacto de la integración de un banco de baterías y de perfiles de generación y demanda variables en la estabilidad operativa y la viabilidad técnica de una microrred crítica, proporcionando un análisis integral que combina indicadores técnicos (tensión, cargabilidad) con la dimensión económica (costos operativos). Este trabajo retoma los modelos de (Manassero y col., 2023) con los generadores propuestos por (Chiani, 2024), para abordar escenarios de demanda y climatología variable, y analiza el impacto de un banco de baterías. Para ello, se observan indicadores del perfil y fluctuaciones tensión, cargabilidad de líneas, y costos de generación y adquisición de la energía desde la red de la empresa distribuidora. Esta última mantiene su conexión con la MR, operando como nodo importador o exportador. Los estudios se realizan sobre una de las MRs exploradas en el trabajo de (Chiani, 2024), identificada como la más comprometida para alcanzar condiciones operativas aceptables. La información de las demandas fue provista por la EPE, mientras que para la generación solar se utilizó el modelo de Mohamed (2008), con información meteorológica de la zona. Las baterías utilizan el perfil carga/descarga del trabajo de (Loyarte y col., 2022). Las simulaciones se realizaron con software libre, como *Electrical Grid Simulator* (Loyarte y col., 2023) y la librería *Pandapower* (Thurner y col., 2018). Los resultados permiten extraer conclusiones relevantes sobre las configuraciones analizadas, incluyendo el impacto del almacenamiento y la fluctuación de la generación fotovoltaica, aplicados sobre una MR en condiciones realistas que caracterizan la distribución eléctrica en el país.

# 2. Metodología

## 2.1. *Descripción de la microrred en estudio*

La zona en estudio cubre buena parte de la ciudad de Rafaela, fraccionada en 5 MRs de acuerdo con (Manassero y col., 2023). Un análisis basado flujos de potencia identificó a la MR con mayores dificultades para sostener niveles aceptables de tensión, motivo de una superficie más amplia que en las restantes y líneas extensas, la que fue seleccionada como objeto de este trabajo. Comprende el Autódromo de Rafaela, algunas industrias y zonas rurales, en una topología radial en 13,2 kV con 31 nodos.

**Tabla 1.** Generadores incorporados en la MR estudiada.

| N° Gen. | Tipo | Potencia nominal (kW) | Nodo (ubicación) |
|---|---|---|---|
| 1 | diésel | 320 | 5 |
| 2 | | 320 | 9 |
| 3 | | 680 | 18 |
| 4 | | 680 | 21 |
| 5 | fotovoltaico | 427,13 | 21 |
| 6 | | 341,70 | 22 |
| 7 | | 284,75 | 5 |
| 8 | | 427,13 | 9 |
| 9 | | 402,84 | 18 |

La condición “base” contempla el añadido de 4 grupos de generación diésel (GGD) y 5 fotovoltaicos (GFV), según el dimensionamiento y la ubicación realizados por (Chiani, 2024), resumido en la Tabla 1. Los GGD se incorporan en nodos a los que también aportan GFV, en vistas de que el espacio disponible lo posibilita. Esta combinación permite que, ante escenarios de nubosidad variable y la eventual pérdida rápida de la potencia fotovoltaica, los GGD atenúen el impacto en el servicio.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

### 2.2. *Escenarios de simulación*

Se estudia la MR en situaciones realistas, con curvas de demanda diaria variando cada 10 minutos, según los registros de la empresa distribuidora, contemplando la intermitencia de los GFV y la incorporación de un banco de baterías. Para ello, se realizan las siguientes evaluaciones: a) despacho de los GGD, expresado como proporción de sus potencias nominales; b) aporte de los GFV, eventualmente limitando la potencia pico; c) simulaciones con distintas potencias nominales del banco de baterías.

La Fig. 1 muestra las curvas de demanda en la MR (potencia activa, por unidad de la carga pico) provistas por la EPE. La demanda de reactivo se calcula con un factor de potencia (f.p.) típico inductivo de 0,85. Además, los GGD se despachan a potencia fija y se configuran en modo de control de tensión a 1 "por unidad" (p.u.), con límites de reactivo computados a partir de la potencia nominal, para un f.p. entre 0,80 inductivo y 0,95 capacitivo. No obstante, para los GFV se considera la fluctuación del recurso solar. Para ello, se dispuso de información meteorológica de la zona en el último año (irradiancia G y temperatura ambiente Ta), cada 10 minutos, a partir de la cual la potencia de un parque se calcula según (Mohamed, 2008):

$$P_{GFV} = P_n \cdot \frac{G}{G_{std}} \cdot \left[1 + k_p \cdot (T_c - T_r)\right] \cdot \eta \qquad (1)$$

donde $P_n$ es la potencia pico de la instalación (según la Tabla 1), $G_{std}$ es la irradiancia estándar (1000 W/m$^2$), $T_r$ la temperatura de referencia (25 °C), $k_p$ el coeficiente de potencia-temperatura, y $T_c$ la temperatura de las celdas. El parámetro $k_p$ es informado por el fabricante de los módulos. A los efectos de las simulaciones, se utiliza un valor de -0,0044 °C$^{-1}$ (por ej., característico del panel Hissuma PSPDG 240W HS); mientras que $T_c$ se estima según (Skoplaki y Palyvos, 2009):

$$T_c = T_a + 0{,}031 \left(°C \frac{m^2}{W}\right) G \qquad (2)$$

El factor adimensional $\eta$ en la Ec. (1), positivo y no mayor que 1, permite limitar la potencia que el equipo inversor admite inyectar a la red. Una valoración 1 implica que el controlador busca maximizar el aporte fotovoltaico.

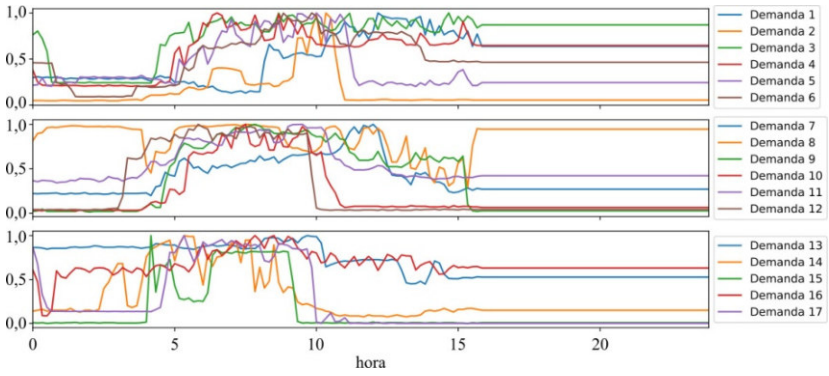



**Figura 1.** Perfiles diarios de demanda, por unidad (p.u.) del pico.

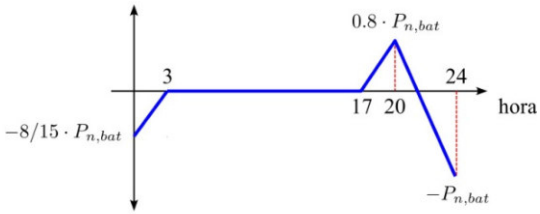



**Figura 2.** Perfil de potencia de las baterías.

Las Ecs. (1, 2) permitieron calcular $P_{GFV}$ para un año y por parque solar. Luego, un procesamiento posterior a partir de un script en Python, permitió identificar el momento de mayor variación de la potencia fotovoltaica en un paso de 10 minutos. Los estudios utilizaron la curva de potencia para este día, representativa de una situación pesimista en términos de la intermitencia de los GFV, con saltos que alcanzan un 98% en 10 minutos y en horarios cercanos al mediodía. Los GFV se configuran en modo estático, sin control de tensión y sin aporte de reactivo, habitual en parques pequeños (potencias inferiores a 1 MW).

Al margen del escenario de simulación "base", un análisis posterior se realizó con la incorporación de un banco de baterías, cuyo impacto en la MR se estudia para diversas potencias nominales $P_{n,bat}$ (máxima de carga o descarga). Para éste, se utiliza la curva devenida del estudio de Loyarte y col. (2022), que identificó el perfil óptimo para reducir los costos operativos en una red de distribución radial de media tensión en la provincia de Santa Fe. En estas condiciones, de evidentes similitudes con la configuración de la MR analizada, se adoptó el mismo perfil para las baterías, linealizado (simplificado) en la Fig. 2, y expresado como función de $P_{n,bat}$. Los horarios en que se producen cambios en los tramos lineales responden a: i) modificaciones en el precio de la energía para la distribuidora (bandas horarias *pico*, *valle* y *resto*); y ii) se establece que el estado de carga al final del día sea igual que el disponible al comienzo, para no comprometer la reserva para el día siguiente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

2.3. *Ejecución de las simulaciones*

La MR fue modelada con el software *Electrical Grid Simulator*, y luego manipulada por un script de Python con la librería *Pandapower*, para ejecutar cálculos de flujos de potencia en bucle, donde cada ciclo representa una condición diferente, dadas las variaciones en la carga y el clima. Se consideran perfiles diarios discretizados cada 10 minutos, totalizando 144 simulaciones (24 hs × 6 intervalos por hora = 144). Finalizado cada bucle, adicionalmente a las variables que se obtienen a través de *Pandapower*, se computan: fluctuaciones de tensión (diferencias con el instante anterior, por nodo), costos de adquisición de la energía importada de la distribuidora, y costo operativo de los GGD. Los costos de operación de los GFV y de las baterías se desprecian frente a los anteriores. El costo de importación $C_{imp}$ (instantáneo) se calcula según la hora $t$ (de 0 a 24 hs), en función de la potencia $P_{imp}$ adquirida (en MW), de acuerdo con lo reportado por la EPE:

$$C_{imp}(USD/h) = \begin{cases} 50{,}0 \cdot P_{imp} \;\; ; \;\; 5 < t \leq 18 \quad \text{(banda "resto")} \\ 52{,}3 \cdot P_{imp} \;\; ; \;\; 18 < t \leq 23 \quad \text{(banda "pico")} \\ 47{,}6 \cdot P_{imp} \;\; ; \;\; 23 < t \leq 24 \;\wedge\; 0 \leq t \leq 5 \quad \text{(banda "valle")} \end{cases} \tag{3}$$

Por su parte, el costo operativo del $i$-ésimo generador diésel se modela en función de la potencia despachada $P_{GGD,i}$, según:

$$C_{GGD,i}\,(USD/h) = a_i \cdot P_{GGD,i}^2 + b_i \cdot P_{GGD,i} + c_i \qquad (i-\text{ésimo gen. diésel}) \tag{4}$$

donde se utilizaron los coeficientes $a_i$, $b_i$ y $c_i$ de la Tabla 2, según las especificaciones de consumo brindadas por cada fabricante.

**Tabla 2.** Coeficientes de costo (en USD/h) para los GGD, para potencias despachadas en kW.

| N° Gen. Diésel | $a_i$ | $b_i$ | $c_i$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 1,68e-04 | 0,21437 | 11,66 |
| 2 | 1,19e-04 | 0,23710 | 15,54 |
| 3 | 4,70e-05 | 0.23759 | 28,58 |
| 4 | 4,70e-05 | 0.23759 | 28,58 |

Luego, el costo operativo instantáneo total $C_T$ (de valor medio $\overline{C_T}$) y el correspondiente a la energía diaria operada $C_{T,E}$, son:

$$C_T\,(USD/h) = C_{imp} + \sum C_{GGD,i} \qquad ; \qquad (\text{para todo } i \in \text{conjunto de GGD}) \tag{5}$$

$$C_{T,E}\,(USD) = \overline{C_T} \cdot 24 \text{ hs} \tag{6}$$

Por otra parte, las simulaciones consideran las siguientes hipótesis:

1. Se asume que la MR es independiente de la empresa distribuidora (presenta otro propietario), en razón de analizar la factibilidad de condiciones actualmente no reglamentadas, en las cuales sea posible administrar internamente y en forma privada sus recursos (despacho de generadores, importaciones o exportaciones).
2. El despacho de los GGD no por motivo de costos, sino para disminuir la dependencia con la red de la EPE.
3. Se asume que $P_{imp}$ puede ser positiva (compra de energía a la distribuidora) o negativa (exportación), según lo decida la propia MR, y el costo asociado para la compra o venta es el señalado en la Ec. (3). Éste no suele ser el criterio ofrecido por las empresas distribuidoras argentinas. No obstante, se pretende aquí plantear reglas sencillas generales de funcionamiento, evitando un análisis específico en el ámbito de reglas propias de una empresa en particular.

## 3. Resultados y discusión

La Tabla 3 resume los casos analizados, escalando las demandas de la Fig. 2 para obtener el pico de verano. El punto de conexión con la red distribuidora se utiliza como barra de compensación (slack), con una tensión controlada de 1,05 (p.u.). Las baterías se instalan en un nodo que también incluye generación fotovoltaica y diésel, con espacio suficiente.

Los resultados se presentan en la Tabla 4, con los niveles mínimo y máximo registrados de tensión ($V_{min}$ y $V_{max}$, respectivamente), el valor medio ($V_{med}$), la máxima fluctuación ($\Delta V_{max}$, en valor absoluto), el estado de carga máximo en líneas ($I_{max}$), las pérdidas ($EP$), el aporte porcentual de los GFV en la energía diaria ($E_{FV}$) y el costo diario total de operación ($C_{T,E}$).

Se observa que una generación excesiva puede generar sobrecargas. Cuando responde a los GGD, además, se incrementan sustancialmente los costos. Por el contrario, si los excesos se deben a los GFV, el costo disminuye, aunque su impacto en las

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

fluctuaciones de tensión es mayor. La incorporación de un banco de baterías de potencia excesiva repercute de manera similar. Sobresalen los casos 8 a 13, que detectan niveles de carga elevados para bancos de 4 MW. Por otro lado, cuando el aporte de los generadores (o baterías) es elevado, la MR se torna exportadora ($P_{imp} < 0$). Así, $C_{T,E}$ puede disminuir en forma importante, tendiendo, a su vez, a elevar las tensiones en nodos alejados del centro de distribución. En ocasiones, esta elevación es excesiva (sobretensiones), como en los casos 2, 8, 9, 11, 12, 14 y 17, que exceden 1,10 (p.u.), límite habitual en redes de media tensión.

**Tabla 3.** Casos de estudio evaluados.

| Caso | Despacho GGD (%) de la potencia nominal | Limitación de la GFV (η) | $P_{n,bat}$ (MW) |
|---|---|---|---|
| 1 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 100 | 1 | 0 |
| 3 | 50 | 1 | 0 |
| 4 | 20 | 1 | 0 |
| 5 | 100 | 0,70 | 0 |
| 6 | 50 | 0,70 | 0 |
| 7 | 20 | 0,70 | 0 |
| 8 | 100 | 1 | 4 |
| 9 | 50 | 1 | 4 |
| 10 | 20 | 1 | 4 |
| 11 | 100 | 0,70 | 4 |
| 12 | 50 | 0,70 | 4 |
| 13 | 20 | 0,70 | 4 |
| 14 | 100 | 1 | 2 |
| 1 | 50 | 1 | 2 |
| 16 | 20 | 1 | 2 |
| 17 | 100 | 0,70 | 2 |
| 18 | 50 | 0,70 | 2 |
| 19 | 20 | 0,70 | 2 |

**Tabla 4.** Resultados en variables operativas técnicas y económicas.

| Caso | $V_{min}$ (p.u.) | $V_{max}$ (p.u.) | $V_{med}$ (p.u.) | $\Delta V_{max}$ (p.u.) | $I_{max}$ (%) | $EP$ (MWh) | $E_{FV}$ (%) | $C_{T,E}$ (USD) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,0500 | 1,0793 | 1,0652 | 0,01424 | 52,11 | 1,18 | 0 | 13563,85 |
| 2 | 1,0500 | 1,1175 | 1,0725 | 0,03892 | 95,81 | 2,07 | 63,84 | 12963,89 |
| 3 | 1,0365 | 1,0972 | 1,0586 | 0,04032 | 70,88 | 0,92 | 67,71 | 7180,86 |
| 4 | 1,0251 | 1,0847 | 1,0502 | 0,04123 | 56,10 | 0,62 | 68,79 | 4150,38 |
| 5 | 1,0500 | 1,1061 | 1,0703 | 0,02762 | 81,98 | 1,75 | 45,41 | 13141,25 |
| 6 | 1,0365 | 1,0854 | 1,0563 | 0,02863 | 57,14 | 0,71 | 47,94 | 7363,60 |
| 7 | 1,0251 | 1,0726 | 1,0479 | 0,02929 | 42,87 | 0,48 | 48,52 | 4363,62 |
| 8 | 1,0037 | 1,1282 | 1,0727 | 0,03892 | 129,21 | 2,53 | 62,91 | 12953,27 |
| 9 | 0,9855 | 1,1082 | 1,0588 | 0,04032 | 104,39 | 1,41 | 66,54 | 7171,33 |
| 10 | 0,9853 | 1,0971 | 1,0507 | 0,04123 | 121,69 | 1,15 | 67,46 | 4141,95 |
| 11 | 1,0037 | 1,1282 | 1,0705 | 0,02762 | 129,21 | 2,21 | 44,74 | 13130,50 |
| 12 | 0,9855 | 1,1082 | 1,0565 | 0,02863 | 104,39 | 1,20 | 47,10 | 7353,93 |
| 13 | 0,9853 | 1,0971 | 1,0484 | 0,02929 | 121,69 | 1,00 | 47,59 | 4328,03 |
| 14 | 1,0386 | 1,1175 | 1,0729 | 0,03892 | 95,81 | 2,17 | 63,80 | 12951,85 |
| 15 | 1,0217 | 1,0972 | 1,0589 | 0,04032 | 70,88 | 1,02 | 67,64 | 7168,72 |
| 16 | 1,0097 | 1,0847 | 1,0506 | 0,04123 | 63,30 | 0,73 | 68,69 | 4138,27 |
| 17 | 1,0386 | 1,1061 | 1,0707 | 0,02762 | 89,39 | 1,85 | 45,38 | 13129,15 |
| 18 | 1,0217 | 1,0854 | 1,0567 | 0,02863 | 64,36 | 0,80 | 47,89 | 7351,39 |
| 19 | 1,0097 | 1,0726 | 1,0483 | 0,02929 | 63,30 | 0,58 | 48,46 | 4324,42 |

En relación a las fluctuaciones de tensión, se observa que un perfil de uso de las baterías establecido para criterios económicos, como el utilizado, se basa en una lógica sencilla que no atenúa las variaciones bruscas de la GFV. En ocasiones, hasta puede ser perjudicial. En redes de 13,2 kV se acepta un límite de fluctuación de 0,030 (p.u.), excedido en varios de los casos planteados.

A modo de muestra, las Figs. 3 y 4 exhiben algunas de las curvas de resultados para el caso 19, que logra buen equilibrio entre indicadores técnicos y económicos. La Fig. 3 muestra que, en los períodos de aporte fotovoltaico y de las baterías, la MR se torna exportadora (también impulsada por los GGD). Para la potencia reactiva, en cambio, la condición es mayormente de importación, dada la necesidad del control de tensión, atendiendo a que los GFV y las baterías no tienen capacidad de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

inyección de reactivo. La Fig. 4 muestra que en los períodos de exportación, los niveles de carga en diferentes tramos tienden a crecer.

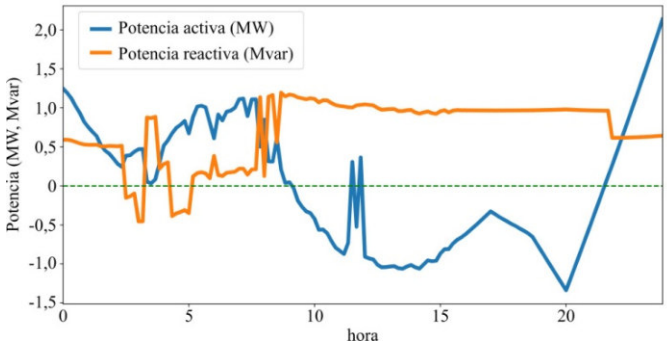



**Figura 3.** Potencias importadas por la MR.

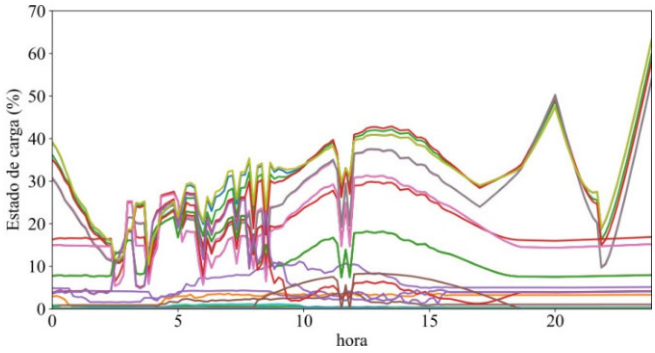



**Figura 4**. Niveles de carga en tramos de línea.

## 4.Conclusiones

Este estudio demuestra que la reconversión de la red de distribución tradicional de Rafaela en una microrred operativa es técnicamente viable, aunque sujeto a condiciones críticas que constituyen los hallazgos principales de esta investigación:

1. El almacenamiento con baterías es indispensable para la viabilidad técnica. Sin él, la microrred no puede compensar eficazmente la intermitencia fotovoltaica, lo que resulta en perfiles de tensión inestables y limita severamente la capacidad de aprovechar la generación renovable.
2. Existe una compensación crítica entre el costo de inversión y la estabilidad operativa. Mientras el Escenario 7 (sin baterías) representa la solución de menor inversión, el Escenario 19 (con banco de 2 MW) es técnicamente superior: reduce las pérdidas técnicas en un [X]%, aplana significativamente el perfil de tensiones y acerca la tensión mínima a la máxima, garantizando un suministro dentro de los parámetros reglamentarios.
3. La gestión inteligente de la generación local es un requisito operativo. Contrariamente a la intuición, maximizar la inyección de energía diésel y fotovoltaica no siempre es óptimo. La estabilidad de la microrred puede requerir limitar estratégicamente esta generación para prevenir sobrecargas en las líneas y mantener la calidad del servicio.
4. La conexión con la red principal sigue siendo un recurso vital. La posibilidad de importar/exportar energía es un amortiguador crucial que proporciona flexibilidad operativa y respaldo, facilitando la integración de una alta penetración de fuentes intermitentes.

En definitiva, este trabajo provee un modelo validado que trasciende el caso de estudio: la clave para materializar microrredes estables en infraestructuras existentes no está en la generación distribuida por sí sola, sino en su integración sinérgica con sistemas de almacenamiento y estrategias de control que prioricen la estabilidad sobre la maximización de la generación.

## Referencias bibliográficas

Abbasi, M., Abbasi, E., Li, L., Aguilera, R. P., Lu, D. y Wang, F. (2023). Review on the microgrid concept, structures, components, communication systems, and control methods. Energies, 16(1), 484.

Chiani, A. (2024). Estudio de Factibilidad Técnica para la Conformación de una Multi-Microrred Eléctrica en la Ciudad de Rafaela. Encuentro de Jóvenes Investigadores Tecnológicos (JIT), organizado por la UTN Rosario.

Loyarte, A., Sanseverinatti, C. y Sangoi, E. (2023). Electrical Grid Simulator: Software de Simulación de Sistemas Eléctricos de Potencia con Orientación a la Investigación. Jornadas de CyT 2023 de la UTN San Francisco.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Energía
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Metodología para el análisis de consumo y calidad de energía en usuarios residenciales

## Methodology for the Analysis of Energy Consumption and Power Quality in Residential Users

Presentación: 30/10/2025

**Emiliano Rubén Bauza**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina
bauzaemi@gmail.com

**Federico Nicolás Díaz**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina
fndiaz.01@gmail.com

### Resumen

Este trabajo presenta una metodología integral para analizar consumo y calidad de energía en usuarios residenciales, ilustrada con casos de la ciudad de Santa Fe. Para el desarrollo metodológico, en primer lugar, se realizaron mediciones semanales en siete viviendas monofásicas durante cuatro meses con un analizador clase A según IEC-61000-4-30. El procesamiento de datos permitió caracterizar perfiles de carga diferenciando usuarios de alto y bajo consumo, tanto en días hábiles como no hábiles. Asimismo, se analizó la demanda de potencia y energía, destacando la correlación con la temperatura ambiente. En relación con la calidad de suministro, se evaluaron parámetros de tensión y corriente, incluyendo indicadores como flicker y distorsión armónica total. Los resultados muestran la aplicabilidad de la metodología para diagnosticar consumos y perturbaciones en redes residenciales, constituyendo una herramienta útil para estudios de eficiencia energética, gestión de la demanda y planificación de políticas de uso racional de la energía.

**Palabras clave:** Calidad de la energía, perfiles de carga, sector residencial.

### Abstract

This paper presents a comprehensive methodology to analyze energy consumption and power quality in residential users, illustrated with cases from the city of Santa Fe. For the methodological development, weekly measurements were carried out in seven single-phase households over four months using a Class A analyzer in accordance with IEC 61000-4-30. Data processing enabled the characterization of load profiles, distinguishing between high- and low-consumption users on both weekdays and non-working days. Power and energy demand were also analyzed, highlighting their correlation with ambient temperature. Regarding supply quality, voltage and current parameters were evaluated, including indicators such as flicker and total harmonic distortion (THD). The results demonstrate the applicability of the methodology to diagnose consumption patterns and disturbances in residential networks, constituting a useful tool for energy efficiency studies, demand-side management, and the planning of rational energy use policies.

**Keywords:** Power quality, load profiles, residential sector.

## 1. Introducción

La energía eléctrica constituye uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico y social. Su disponibilidad y calidad resultan esenciales para la vida cotidiana y para el crecimiento de las ciudades (IEA, 2022). En Argentina, el sector

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

residencial representa aproximadamente el 45% de la demanda total de energía eléctrica, lo cual refleja la importancia del análisis de sus patrones de consumo y calidad de suministro (Secretaría de Energía, 2023).

Diversos estudios han abordado la caracterización de perfiles de consumo residencial, tanto a nivel nacional como internacional. Por ejemplo, Basilio (2024) analizó la variabilidad del consumo en usuarios residenciales, destacando la influencia de factores climáticos. A su vez, investigaciones recientes remarcan la necesidad de contar con equipos de medición de alta precisión para estudiar la calidad de energía en redes de baja tensión (García et al., 2020). Sin embargo, aún persisten vacíos respecto a la caracterización integral del consumo y de la calidad del suministro en contextos residenciales urbanos.

En este trabajo se propone un análisis experimental en usuarios de la ciudad de Santa Fe, aplicando técnicas de monitoreo y diagnóstico con un analizador de clase A (IEC 61000-4-30). El aporte central consiste en establecer perfiles de carga típicos, evaluar la relación entre consumo y temperatura ambiente, y realizar un prediagnóstico de los principales indicadores de calidad de energía en instalaciones residenciales.

## 2. Materiales y métodos

En primer lugar, se realizan mediciones en siete usuarios residenciales de la red de baja tensión de la ciudad de Santa Fe (todos usuarios con acometida monofásica) a lo largo de un periodo de 4 meses. En la Figura 1 se muestra la ubicación geográfica de los puntos de medición; nótese que los mismos se encuentran distribuidos en distintas zonas de la ciudad. Los registros fueron semanales (con una duración mínima de siete días corridos) y con una frecuencia de muestreo de 10 minutos. El registro semanal permite contemplar de forma representativa las variabilidades propias en el consumo de los usuarios, tanto para días hábiles como no hábiles.

**Figura 1**. Ubicación de los usuarios de baja tensión medidos.

El set de datos obtenidos se procesa de manera sistemática para caracterizar los perfiles de carga, identificar patrones de demanda, consumos de base y de stand-by, y definir perfiles típicos e identificar patrones comportamiento. A su vez, se analizan en simultáneo cuestiones asociadas a la calidad de la energía eléctrica en el punto de suministro de cada usuario para obtener un muestreo general de las perturbaciones estacionarias más frecuentes.

El estudio se separa en 3 grandes secciones: perfiles de carga, potencia y energía y calidad de la energía. A continuación, se describe cada una de las secciones.

### 2.1 *Perfiles de carga*

El objetivo del estudio de los perfiles de carga es caracterizar y definir perfiles de carga típicos en función de los datos medidos. El perfil de consumo diario depende de las actividades de los ocupantes de la vivienda y de las condiciones ambientales. La Figura 2 presenta un diagrama de flujo que describe el proceso de análisis para la obtención de los perfiles de carga para día hábiles y no hábiles y la clasificación en usuarios de Alto Consumo (AC) y Bajo Consumo (BC).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

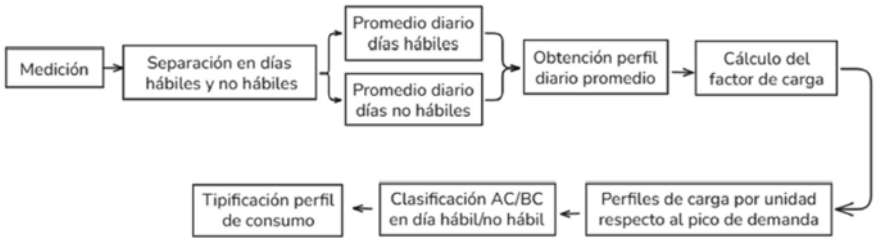



**Figura 2**. Diagrama de flujo del proceso de análisis para la obtención de los perfiles de alto y bajo consumo.

Se destaca en el diagrama la separación en días hábiles y no hábiles; esto es debido al cambio pronunciado de hábitos de consumo existente entre estos dos tipos de días. El promedio diario permite evaluar la evolución temporal del consumo, exponiendo así los picos y valles según las rutinas de los usuarios estudiados. Por otra parte, el factor de carga proporciona un indicador cuantitativo de la intensidad de la demanda del usuario. Un factor de carga alto implica que el usuario tiene picos de consumo que distan de su forma de consumo promedio. Por lo contrario, un factor de carga cercano a la unidad implica que la forma de consumo del usuario dista muy poco de su consumo promedio.

Los perfiles de carga en por unidad permiten estudiar la evolución del consumo de los distintos usuarios independientemente de las magnitudes de tales consumos. Este estudio generalizado permite identificar patrones de consumos y tipificar perfiles de carga de usuarios particulares.

### 2.2 *Consumo de potencia y energía*

Para el análisis de potencia se evalúa el consumo promedio, máximo y percentil 95 de cada usuario. De esta manera, es posible cuantificar la variabilidad del consumo de potencia de los usuarios y analizar su divergencia. Respecto a la demanda de energía, se destaca su vinculación directa con la temperatura ambiente, por lo que para los estudios se considera el percentil 95 de temperatura registrada en cada período de medición.

Para el estudio de ambas variables, potencia y energía, es importante discriminar por bandas horarias. Una clasificación clásica en el área es de diurna-nocturna, respecto a la evolución solar del día, y pico-resto-valle, respecto al esquema tarifario eléctrico nacional. En este trabajo, se consideran las dos clasificaciones.

### 2.3 *Calidad de energía*

Con respecto a la calidad de energía, el método de análisis aplicado se enfoca en la descripción del suministro de energía por parte de la distribuidora y del consumo de esta energía por parte de los usuarios. Esto se logra a través del análisis de la calidad de la tensión y del análisis de la corriente, respectivamente.

Con respecto a la primera variable, se evalúan los valores eficaces de la tensión registrados en cada usuario, las fluctuaciones del indicador de perceptibilidad a corto plazo (“PST”, parpadeo luminoso a corto plazo) y la distorsión armónica total de tensión. Debido a que son evoluciones temporales, los valores que interesan son aquellos referidos al percentil 95.

Respecto al análisis de la corriente demandada por el usuario, los principales indicadores utilizados son la comparación entre valor máximo y percentil 95 de corriente registrada para cada usuario y distorsión armónica de la corriente, expuesta a través del indicador de distorsión armónica total (THD).

## 3. Resultados y discusión

En cada medición se releva información acerca de las características generales de las cargas conectadas durante la semana en cuestión, el grado de ocupación de la vivienda y algunas cuestiones básicas acerca de las características físicas de la vivienda. A su vez, y dada su correlación con los consumos, se debe considerar también el registro de los perfiles de temperatura ambiente para cada periodo de registro.

En los casos utilizados para ejemplificar la metodología se utiliza un medidor clase A según IEC 61000-4-30 e intervalos de medición de 10 minutos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

### 3.1 *Perfiles de carga*

En primer lugar, es posible obtener dos resultados principales respecto al perfil de carga de los usuarios analizados: la magnitud de consumo, AC o BC, y la forma del perfil diario medio; tanto para días hábiles como no hábiles. A partir de esta información, se obtienen indicadores como el factor de carga y el consumo energético por metro cuadrado y/o per cápita.

De los 7 usuarios de la ciudad de Santa Fe, se destaca que los usuarios 1 a 5 resultaron del tipo BC, y el 6 y 7 del tipo AC. La Figura 3 y la Figura 4 presentan los perfiles en por unidad para un día hábil y no hábil, respectivamente. Se observa la diferencia entre BC y AC, donde se destaca cómo los usuarios de alto consumo presentan picos más pronunciados en horarios vespertinos.

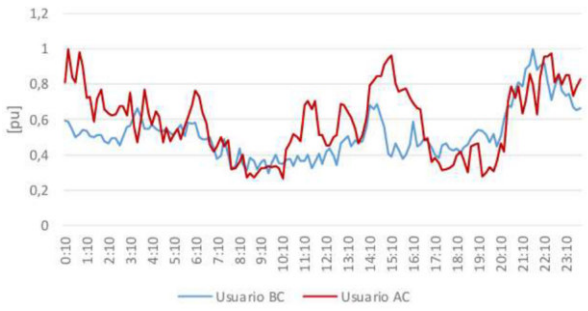



**Figura 3**. Perfil diario medio de potencia activa para días hábiles para usuarios de bajo y alto consumo (en pu).

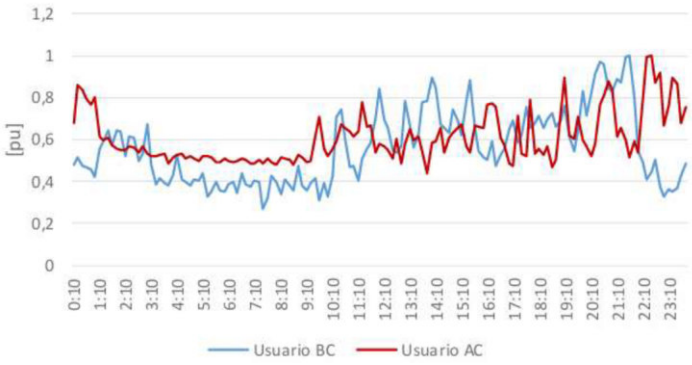



**Figura 4**. Perfil diario medio de potencia activa para días no hábiles para usuarios de bajo y alto consumo.

### 3.2 *Consumo de potencia y energía*

En función a lo expuesto en el punto 2.2, se obtiene la forma amplia e integral a las características de consumo de los usuarios estudiados. Respecto al comportamiento de la demanda potencia, lo más relevante es evaluar la diferencia entre valores máximos y promedios de cada usuario, junto con la magnitud.

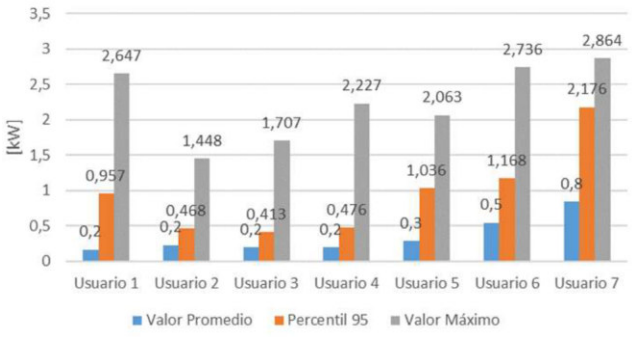



**Figura 5.** Registro de potencia activa consumida por los usuarios

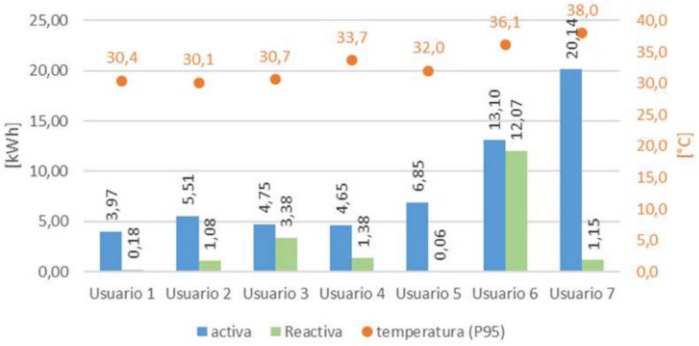



**Figura 6**. Consumo de energía (diaria activa y reactiva) registrada para cada usuario junto al percentil 95 de temperatura registrada en el período de medición.

Gráficamente, se puede apreciar esta diferencia entre los dos parámetros mencionados, junto al percentil 95, en la Figura 5. Para ciertos estudios en la red de distribución, es posible extraer conclusiones que resultan relevantes de la curva de demanda de los alimentadores. En lo referido a la demanda de energía, la metodología permite extraer resultados importantes respecto a la correlación existente entre la temperatura ambiente y el consumo de energía, lo que resulta en la posibilidad de evaluar el estrés de las redes en épocas invernales, veraniegas o de alerta de climas extremos. Esto se puede apreciar en la Figura 6, donde los usuarios con mayor valor de percentil 95 de temperatura tienen el mayor consumo de energía. Si se consideran los consumos energéticos por franja horaria, se obtienen valores similares para todos los usuarios. El percentil 95 de estas corrientes tiene valores bastante alejados de estos máximos, indicando que estos picos máximos de corriente no son tan frecuentes.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

### 3.3 *Calidad de la energía*

La metodología diferencia dos perspectivas enfocadas en las partes constitutivas de calidad de la energía en un punto de consumo: el suministro y el consumo propiamente dicho. Respecto al suministro, el cual se lleva a cabo por la empresa distribuidora, se evalúa percentil 95 del valor eficaz de la tensión y el indicador PST. Los valores límite de los parámetros mencionados varían según las normativas de cada empresa distribuidora. De las mediciones de los 7 usuarios evaluados, se obtienen los valores de tensión eficaz e indicador PST de flicker, como se observa en el gráfico compuesto de la Figura 7. Los niveles de tensión se mantienen dentro de los márgenes admisibles según las reglamentaciones vigentes de la empresa distribuidora local. El percentil 95 se encuentra dentro de la franja +/- 10% de tolerancia. En general, para todos los usuarios se destacan valores altos asociados a las fluctuaciones de tensión (cuantificada por el indicador PST de flicker). En todos los casos, el percentil 95 del indicador PST tiene valores cercanos al límite normativo de 1. Este resultado ilustra cómo la metodología puede detectar problemas incipientes de flicker en redes residenciales.

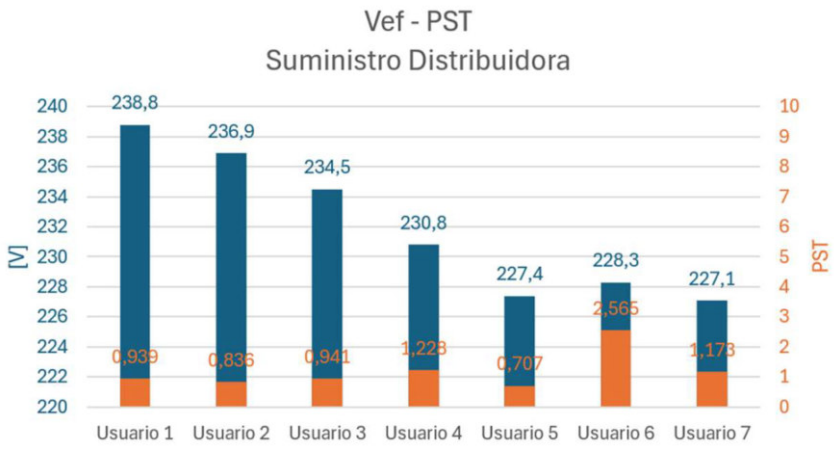



**Figura 7**. Valor eficaz de la tensión e indicador PST (flicker) percentil 95 de la tensión registrada en cada usuario.

En cuanto al consumo de cada usuario, la variable que se analiza es la corriente demandada por los mismos. Sobre esta variable se estudia su contenido de armónicos, el cual es representado por el indicador THD de distorsión armónica total. Asimismo, se construye un espectro de frecuencia para cada usuario y se evalúa la magnitud y el número de armónico de mayor magnitud. En la Figura 8 se aprecia el percentil 95 de THD obtenido para cada uno de los 7 usuarios estudiados. Se observa que todos presentan un elevado nivel del indicador. La Figura 9 presenta el impacto de los armónicos en la forma de onda de la corriente para las mediciones del usuario 1.

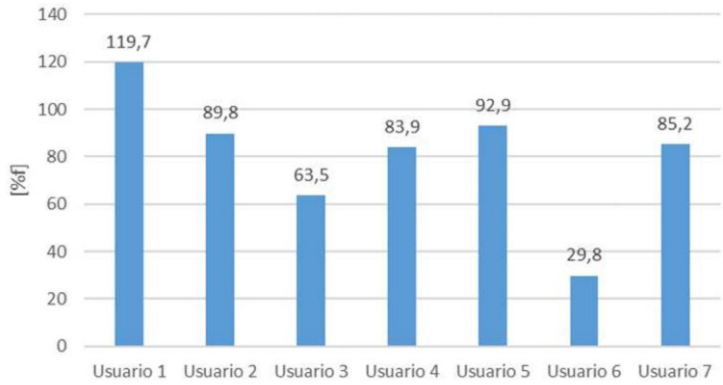



**Figura 8**. Percentil 95 del THD de la corriente registrada en cada usuario (% de la componente).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

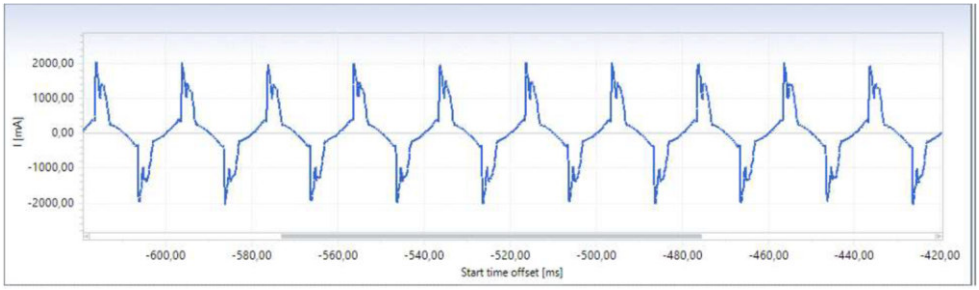



**Figura 9**. Forma de onda de la corriente (valor instantáneo) del usuario 1.

## 4. Conclusiones

El trabajo permitió validar un procedimiento integral de análisis de consumo y calidad de energía en usuarios residenciales, ilustrado en una muestra reducida de siete casos. El análisis permitió definir perfiles de carga típicos para distintos usuarios, cuantificar parámetros de consumo típicos y hacer un pre-diagnóstico de los indicadores más importantes de la calidad de energía eléctrica en bornes de usuarios residenciales. Esta información resulta de gran importancia para el estudio de medidas de eficiencia energética gestión de la demanda. La metodología propuesta permite caracterizar perfiles de carga, cuantificar consumos y evaluar indicadores de calidad de energía en usuarios residenciales, aun en muestras pequeñas. La discriminación entre bandas horarias resulta útil para plantear políticas de gestión de la demanda con el objetivo de disminuir la carga en las redes y consumir energía de forma óptima considerando el esquema tarifario nacional. Asimismo, se logró conformar herramientas y sistematizar una metodología de trabajo que permite su continuidad y escalabilidad en futuros trabajos. Sin embargo, se destaca que la muestra es reducida, por lo que los resultados no pueden generalizarse estadísticamente. De todos modos, ha sido suficiente para ejemplificar la aplicabilidad del procedimiento metodológico presentado, el cual se constituye como una herramienta útil y replicable para el análisis integral del consumo y calidad de la energía en usuarios residenciales.

## Referencias bibliográficas

Basilio, K. T. (2023). Caracterización del perfil de consumo de cargas de uso residencial. Revista Técnica y Científica de la Facultad Regional Santa Fe (UTN). Recuperado de https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/download/1580/1437/7995

International Energy Agency. (2023). Argentina – Electricity. International Energy Agency. Recuperado de https://www.iea.org/countries/argentina/electricity

Secretaría de Energía – Ministerio de Economía. (2023). Informe trimestral de coyuntura energética (T4 2023). Gobierno de la República Argentina. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/t42023.pdf

International Electrotechnical Commission. (2015). IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods (3rd ed.). IEC. International Energy Agency. (2022). World Energy Outlook 2022. IEA. Recuperado de https://www.iea.org/reports/worldenergy-outlook-2022?language=es

Chévez, P. J., Martini, I., & Discoli, C. (2020). Identificación de perfiles de usuarios para el direccionamiento de programas de mejoramiento energético (La Plata-Bs.As.-Argentina). Economía, Sociedad y Territorio, 20(63), 303-333. https://doi.org/10.22136/est20201541

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Energía
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Aplicación del índice de vulnerabilidad socio-energética en un barrio de Ibarlucea: resultados preliminares

## Application of the socio-energy vulnerability index in a neighborhood of Ibarlucea: preliminary results

Presentación 30/10/2025

**Cindy Touma**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES), Rosario, Argentina
toumacindy@gmail.com

### Resumen

El presente trabajo aplica de manera piloto el Índice de Vulnerabilidad Socio-Energética en un barrio de la localidad de Ibarlucea, con el objetivo de identificar las principales limitaciones en el acceso y uso de la energía en los hogares. A partir de encuestas realizadas en 24 viviendas, se detectó que más del 60% presentan condiciones de vulnerabilidad multidimensional vinculadas con factores estructurales y coyunturales. Asimismo, se observó una fuerte dependencia de sistemas eléctricos ineficientes e inseguros, junto con una elevada exposición a peligros y riesgos derivados de las emisiones de monóxido de carbono de los equipos de calefacción a gas y leña. Esta situación no solo incrementa el gasto energético, sino que también pone en riesgo la salud y la seguridad de los habitantes. Los resultados preliminares permiten identificar los hogares más afectados y brindan un recurso clave para la planificación de políticas locales de transición energética justa e inclusiva.

**Palabras clave:** Pobreza energética; Vulnerabilidad socio-energética; Ineficiencia térmica; Transición Energética Justa e Inclusiva.

### Abstract

This paper presents a pilot application of the Socio-Energy Vulnerability Index in a neighborhood of Ibarlucea, with the aim of identifying the main limitations in household energy access and use. Based on surveys conducted in 24 dwellings, it was found that more than 60% present multidimensional vulnerability conditions associated with structural and situational factors. In addition, a strong dependence on inefficient and unsafe electrical systems was observed, along with high exposure to hazards and risks derived from carbon monoxide emissions from gas and firewood heating equipment. This situation not only increases energy expenditures but also threatens the health and safety of residents. The preliminary results allow for the identification of the most affected households and provide a key resource for planning inclusive local policies for a just energy transition.

**Keywords:** Energy poverty; Socio-energy vulnerability; Thermal inefficiency; Just and Inclusive Energy Transition.

## 1. Introducción

Tomando como base la conceptualización de la pobreza energética (PE) definida por Boardman (1991) como la incapacidad de un hogar para acceder a servicios energéticos adecuados, seguros y asequibles, es menester reconocer así su carácter dinámico y multidimensional, condicionado por factores históricos, políticos, sociales, económicos y territoriales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

De este modo, a partir de la construcción del Índice de Vulnerabilidad Socio-Energética (Índice) para Ibarlucea desarrollado por Durán et al. (2024) se incorporan dimensiones como salud, vivienda, empleo, educación y asistencia social al enfoque integral de este concepto, entendiendo que todos estos aspectos se encuentran estrechamente ligados. Así, no solo se permite identificar los hogares con dificultades en el acceso y uso de la energía, sino también diferenciar entre vulnerabilidades coyunturales (bajos ingresos, empleo informal) y estructurales (condiciones habitacionales deficientes, problemas de salud o discapacidad). De esta manera, la investigación trasciende la medición de la PE en términos estrictamente económicos y aporta un marco integral que permite orientar la asignación de recursos y planificación energética inclusiva por parte de la comuna y la Cooperativa de Energía y de Consumos (Cooperativa) de Ibarlucea.

Este trabajo se enmarca en el proyecto “Hacia un acceso equitativo e igualitario de la energía en Ibarlucea: acciones en el marco de un plan de transición energética justa a nivel local”, financiado por el (ex) Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de Argentina (MinCyT) en la convocatoria 2023 Proyectos de Tecnologías para la Inclusión Social (PTIS). El mismo es llevado adelante entre integrantes del Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES) de la Facultad Regional Rosario de UTN (FRRo – UTN), del Instituto de Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología (IESCT – UNQ) y de la Universidad Nacional de Salta (UNS), y tiene por objetivo implementar acciones concretas de eficiencia energética e incorporación de energías renovables para el abordaje de la problemática de la pobreza energética en la comunidad de Ibarlucea enmarcado en un plan de transición energética justa a nivel local. Como parte del proceso se conformó la Mesa de Transición Energética Justa Ibarlucea, un ámbito de articulación interinstitucional promovido por el equipo de trabajo, que reúne a la cooperativa, instituciones educativas, el gobierno local, el SAMCO y organizaciones sociales con el fin de impulsar políticas e iniciativas conjuntas en torno al acceso equitativo a la energía y la sustentabilidad local. En ese espacio se delinearon prioridades, se sistematizó información y se definieron líneas de acción comunes. Una de ellas es la implementación a modo de piloto, de una encuesta que permita aplicar y cuantificar el Índice de Vulnerabilidad Socio-Energética en el barrio que se identifica con mayores complejidades socioeconómicas dentro del área de prestación de la cooperativa.

Asimismo, este trabajo se enmarca además en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, particularmente en el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 10 (Reducción de las desigualdades) y el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al proponer un abordaje integral que tiene como fin garantizar un acceso seguro y equitativo a la energía, mediante herramientas para identificar y mitigar la vulnerabilidad socio-energética en la localidad de Ibarlucea.

En este trabajo, se expondrán los resultados preliminares de esta experiencia piloto con la sistematización de indicadores asociados. Se pretende que esta iniciativa se extienda al resto de los hogares de la localidad para la elaboración de un programa estratégico en el marco de una transición energética justa a nivel local.

## 2. Metodología

Se describirán a continuación los detalles sobre la muestra y la realización de la encuesta en base al Índice.

### 2.1. *Muestra*

Ibarlucea enfrenta limitaciones estructurales que afectan actualmente a la población local (ausencia de redes de gas natural, agua potable y cloacas) y la consecuente dependencia eléctrica para cubrir necesidades básicas. Esta situación se ve profundizada por la pérdida del poder adquisitivo, la prevalencia del empleo informal y la ausencia de esquemas de tarifa social dentro del sistema cooperativo.

Así, a partir del análisis realizado por Durán et al. (2024) y datos de la Cooperativa, se ha optado por realizar un relevamiento piloto en un barrio específico de la localidad. Durante el mes de Julio del corriente año se conformó un equipo de trabajo formado por la cooperativa, el área social del gobierno local, el SAMCO, y los integrantes de los grupos de investigación de las UUNN. En la Figura 1 vemos una imagen del proceso de relevamiento llevado adelante.

El barrio “Maggi” cuenta con 47 suministros, donde fueron identificados 8 suministros que corresponden a unidades deshabitadas y 2 a comercios. A partir de las visitas realizadas se lograron relevar 24 de los 37 hogares factibles de ser

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

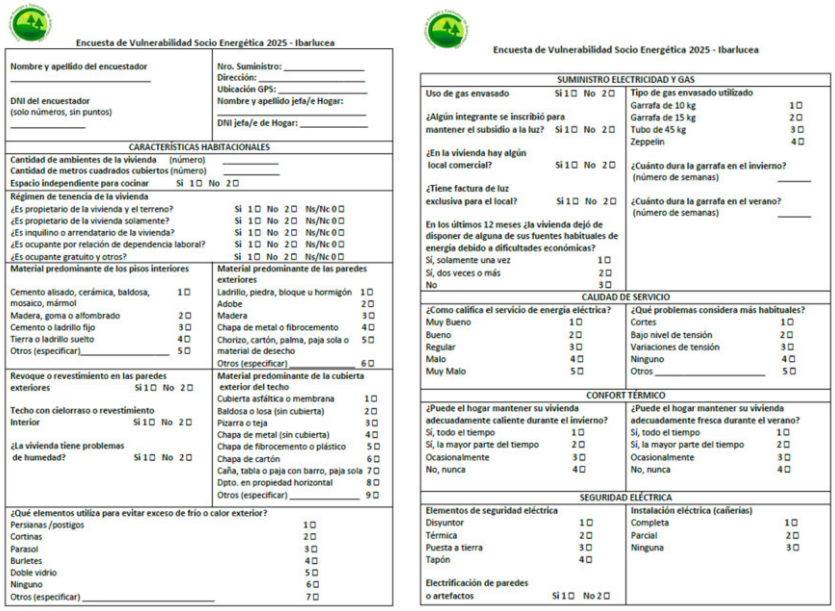
relevados. Entre los hogares no relevados se cuentan casos donde la persona a encuestar no accedió a realizarla o no atendió a los encuestadores.

**Figura 1.** Realización de la encuesta presencial en los hogares seleccionados como muestra piloto.

2.2. *Encuesta*

Para evaluar las vulnerabilidades tanto coyunturales como estructurales en busca de un análisis multidimensional, se consultó a las personas encuestadas sobre las siete dimensiones y sus variables que conforman el Índice: Salud, Hogar, Vivienda, Educación, Trabajo, Asistencia Social y Discapacidad (Durán et al, 2024, Tabla 1).

En primera instancia, se recabaron datos sobre los materiales predominantes en pisos internos, paredes exteriores y techos, como así también la cantidad de ambientes, metros cuadrados cubiertos, espacio para cocinar, régimen de tenencia, problemas de humedad, elementos utilizados para evitar el exceso de frío o calor, y confort térmico.



Encuesta de Vulnerabilidad Socio Energética 2025 - Ibarlucea

Nombre y apellido del encuestador

DNI del encuestador (solo números, sin puntos)

Nro. Suministro:
Dirección:
Ubicación GPS:
Nombre y apellido jefa/e Hogar:
DNI jefa/e de Hogar:

CARACTERÍSTICAS HABITACIONALES

Cantidad de ambientes de la vivienda (número)
Cantidad de metros cuadrados cubiertos (número)
Espacio independiente para cocinar Si 1☐ No 2☐

Régimen de tenencia de la vivienda
¿Es propietario de la vivienda y el terreno? Si 1☐ No 2☐ Ns/Nc 0☐
¿Es propietario de la vivienda solamente? Si 1☐ No 2☐ Ns/Nc 0☐
¿Es inquilino o arrendatario de la vivienda? Si 1☐ No 2☐ Ns/Nc 0☐
¿Es ocupante por relación de dependencia laboral? Si 1☐ No 2☐ Ns/Nc 0☐
¿Es ocupante gratuito y otros? Si 1☐ No 2☐ Ns/Nc 0☐

Material predominante de los pisos interiores
Cemento alisado, cerámica, baldosa, mosaico, mármol 1☐
Madera, goma o alfombrado 2☐
Cemento o ladrillo fijo 3☐
Tierra o ladrillo suelto 4☐
Otros (especificar) 5☐

Material predominante de las paredes exteriores
Ladrillo, piedra, bloque u hormigón 1☐
Adobe 2☐
Madera 3☐
Chapa de metal o fibrocemento 4☐
Chorizo, cartón, palma, paja sola o material de desecho 5☐
Otros (especificar) 6☐

Revoque o revestimiento en las paredes exteriores Si 1☐ No 2☐

Techo con cielorraso o revestimiento interior Si 1☐ No 2☐

¿La vivienda tiene problemas de humedad? Si 1☐ No 2☐

Material predominante de la cubierta exterior del techo
Cubierta asfáltica o membrana 1☐
Baldosa o losa (sin cubierta) 2☐
Pizarra o teja 3☐
Chapa de metal (sin cubierta) 4☐
Chapa de fibrocemento o plástico 5☐
Chapa de cartón 6☐
Caña, tabla o paja con barro, paja sola 7☐
Dpto. en propiedad horizontal 8☐
Otros (especificar) 9☐

¿Qué elementos utiliza para evitar exceso de frío o calor exterior?
Persianas /postigos 1☐
Cortinas 2☐
Parasol 3☐
Burletes 4☐
Doble vidrio 5☐
Ninguno 6☐
Otros (especificar) 7☐

Encuesta de Vulnerabilidad Socio Energética 2025 - Ibarlucea

SUMINISTRO ELECTRICIDAD Y GAS

Uso de gas envasado Si 1☐ No 2☐

¿Algún integrante se inscribió para mantener el subsidio a la luz? Si 1☐ No 2☐

¿En la vivienda hay algún local comercial? Si 1☐ No 2☐

¿Tiene factura de luz exclusiva para el local? Si 1☐ No 2☐

En los últimos 12 meses ¿la vivienda dejó de disponer de alguna de sus fuentes habituales de energía debido a dificultades económicas?
Sí, solamente una vez 1☐
Sí, dos veces o más 2☐
No 3☐

Tipo de gas envasado utilizado
Garrafa de 10 kg 1☐
Garrafa de 15 kg 2☐
Tubo de 45 kg 3☐
Zeppelin 4☐

¿Cuánto dura la garrafa en el invierno? (número de semanas)

¿Cuánto dura la garrafa en el verano? (número de semanas)

CALIDAD DE SERVICIO

¿Como califica el servicio de energía eléctrica?
Muy Bueno 1☐
Bueno 2☐
Regular 3☐
Malo 4☐
Muy Malo 5☐

¿Qué problemas considera más habituales?
Cortes 1☐
Bajo nivel de tensión 2☐
Variaciones de tensión 3☐
Ninguno 4☐
Otros 5☐

CONFORT TÉRMICO

¿Puede el hogar mantener su vivienda adecuadamente caliente durante el invierno?
Sí, todo el tiempo 1☐
Sí, la mayor parte del tiempo 2☐
Ocasionalmente 3☐
No, nunca 4☐

¿Puede el hogar mantener su vivienda adecuadamente fresca durante el verano?
Sí, todo el tiempo 1☐
Sí, la mayor parte del tiempo 2☐
Ocasionalmente 3☐
No, nunca 4☐

SEGURIDAD ELÉCTRICA

Elementos de seguridad eléctrica
Disyuntor 1☐
Térmica 2☐
Puesta a tierra 3☐
Tapón 4☐

Electrificación de paredes o artefactos Si 1☐ No 2☐

Instalación eléctrica (cañerías)
Completa 1☐
Parcial 2☐
Ninguna 3☐

**Figura 2.** Primeras páginas de la encuesta realizada.

Con respecto a los suministros de energía, se interrogó sobre la inscripción a subsidios, la presencia de algún local comercial dentro del hogar, utilización y duración del gas envasado, y la calidad del servicio eléctrico. Asimismo, se incluyeron preguntas sobre la presencia de elementos de seguridad eléctrica, instalación eléctrica y electrificación de paredes o artefactos.

Se encuestó a cada jefe/a de hogar sobre su edad, sexo, identidad de género, cobertura de salud, nivel educativo, situación laboral e ingresos aproximados tanto del hogar como de cada jefe/a. Además, se recopilaron datos respecto al número de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

personas en el hogar, cantidad de niños y adultos mayores, problemas crónicos, lugar de atención médica habitual y discapacidad.

Por último, se tomaron datos referidos a los métodos utilizados para la cocción de alimentos (electricidad, gas, leña), conservación de alimentos, lavado, refrigeración (ventilador, aire acondicionado), calefacción (electricidad, gas, aire acondicionado, leña) y calentamiento de agua sanitaria. Así, se tuvo en cuenta el tipo y la cantidad de equipamientos o artefactos, frecuencia de uso, tiempo de uso diario, capacidad, antigüedad y potencia.

## 3. Resultados

Se expondrán a continuación los datos analizados hasta el momento, referidos a la infraestructura del hogar, la vulnerabilidad general, riesgo por emisiones dentro de la vivienda, y la eficiencia y seguridad de los sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria utilizados.

En primer lugar, se muestran en la Figura 2 (izq.) la suma total de ineficiencia térmica, correspondiente a la infraestructura del hogar, contando así pisos, techos y paredes ineficientes, como también la presencia de humedad, el mal aislamiento y el disconfort térmico. De esta forma, el 83% de los hogares encuestados poseían alguna de estas condiciones. La mayoría se encontraba entre una y dos, aunque también se hallan viviendas con tres, cuatro o hasta cinco.

Consecuentemente, en la Figura 2 (der.) se observa que el 62% de las viviendas clasifican como ineficientes térmicamente, siendo esta evaluación dada a partir de la sumatoria anterior y calificando así a aquellos hogares que sumaban dos o más ineficiencias.

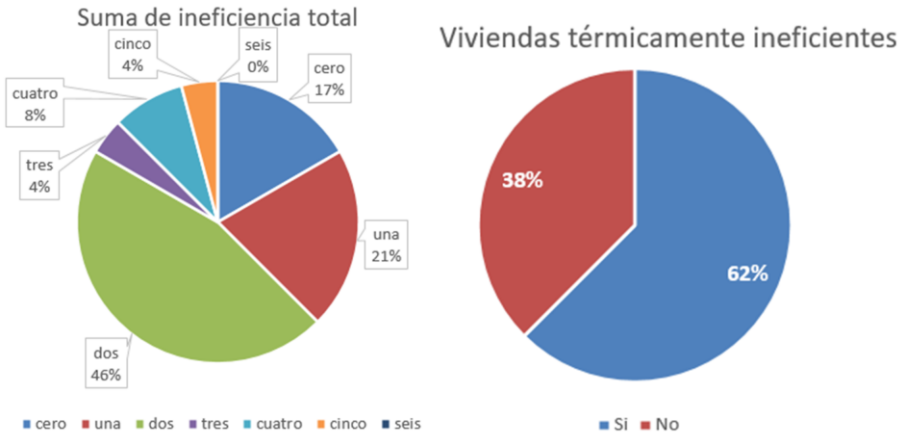



**Figura 2.** Suma de total de condiciones de ineficiencia térmica (izq.). Viviendas con ineficiencia térmica (der.).

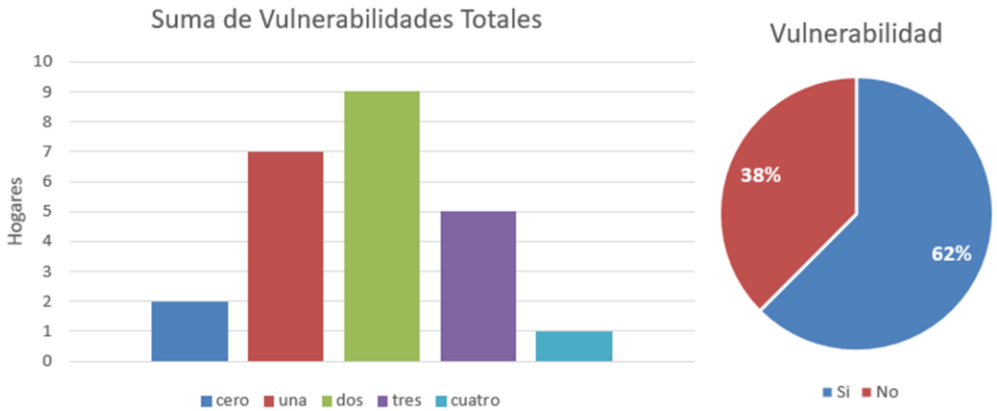



**Figura 3.** Suma de vulnerabilidades totales (izq.). Vulnerabilidad general en hogares encuestados (der.).

Continuando con el análisis, se presenta en la Figura 3 (izq.) la suma de vulnerabilidades totales, que contabiliza no sólo la ineficiencia térmica de la vivienda, sino también aquella presente en la instalación eléctrica, los jefes/as de hogar y hogares vulnerables. De esta manera, se observa que la mayoría presenta una o dos de estas vulnerabilidades. Así, en la Figura 3 (der.) se expone que el 62% se hallan en condición de vulnerabilidad, ya que evidencian dos o más condiciones de ineficiencia,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

tanto las que respectan a la infraestructura e instalación de la vivienda, como así también a las dimensiones demográficas del hogar. Es decir, casi dos tercios del total de los encuestados se encuentra en una situación vulnerable.

Por otra parte, se analizó la calidad del sistema de calefacción en relación a las emisiones de monóxido de carbono (CO) por día, considerando seguros a aquellos que emiten hasta 200 gramos de CO por día, vigilados a los que se encuentran entre 200 y 500, riesgosos entre 501 y 1000, y peligrosos los que emiten más de 1000 gramos de CO por día. De esta forma, se observa en la Figura 4 que la mayoría de los hogares se establece como seguro, aunque dentro de estos se halla que en mayor medida solo utilizan elementos eléctricos. Así, un tercio del total utiliza sistemas de calefacción que emiten gran cantidad de monóxido de carbono, encontrándose en un estado de peligro.

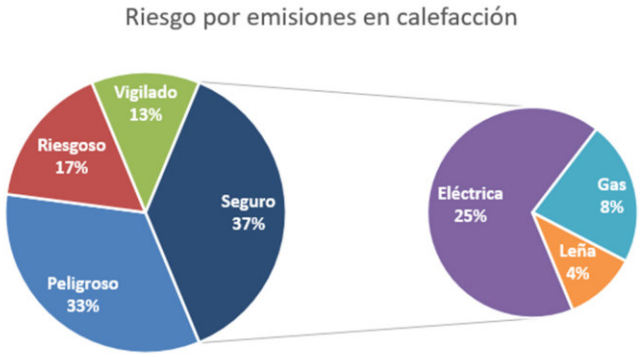



**Figura 4.** Riesgo diario por emisiones en calefacción y sistema de calefacción dentro de aquellos seguros.

Asimismo, se analizó en la Figura 5 la eficiencia del sistema de calefacción eléctrica, observando que más de dos tercios de los hogares utilizan algún equipo eléctrico ineficiente para calefaccionar la vivienda, tales como estufas de cuarzo y caloventores. Por el otro lado, la totalidad de aquellos que adoptan un sistema de calefacción eléctrica eficiente utilizan aire acondicionado.

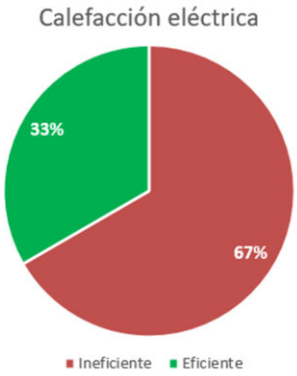
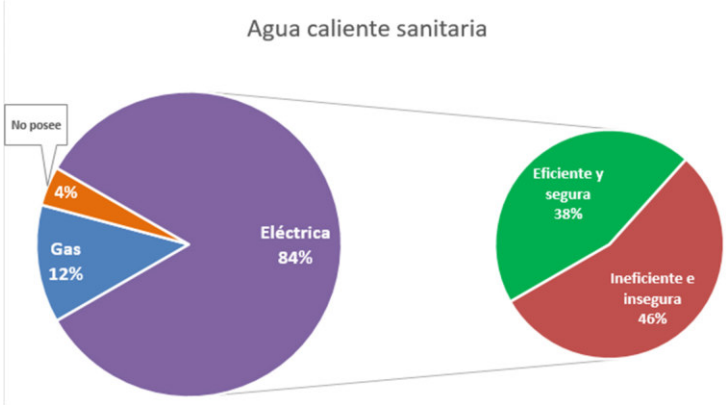



**Figura 5.** Eficiencia de los sistemas de calefacción eléctrica.

Con respecto a los datos obtenidos sobre sistema de agua caliente sanitaria (ACS) expuestos en la Figura 6, se encontró que en su mayoría se utiliza equipamiento eléctrico, mientras que un 12% utiliza equipos a gas, y una sola vivienda encuestada no poseía ninguno de ellos. Si analizamos el equipamiento eléctrico utilizado para ACS, vemos que más de la mitad de ellos son equipos ineficientes e inseguros (ducha y calefón eléctrico).



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 6.** Eficiencia y seguridad de los sistemas eléctricos de agua caliente sanitaria.

De acuerdo a los datos expuestos, se logró detectar vulnerabilidades en los hogares tanto en la infraestructura y los sistemas de calefacción y ACS, como así también en su demografía. Así, se detalló sobre los riesgos de emisiones en sistemas de calefacción a gas y leña, observando que gran parte de ellos se encuentra en una situación de peligro. En cuanto a aquellos eléctricos, que se encontraban dentro de los sistemas seguros con respecto a emisiones, se halló que dos tercios del total son ineficientes. Por último, los sistemas de ACS, los cuales principalmente son eléctricos, más de la mitad de estos equipamientos utilizados son ineficientes e inseguros para las personas que habitan la vivienda.

## 4. Conclusiones

Con respecto a la información detallada anteriormente, se observa que gran parte de los hogares encuestados se encuentran en una situación de vulnerabilidad socio energética, ya que más del 60% posee una vivienda ineficiente y a su vez la mayoría cumple con al menos dos de las condiciones de vulnerabilidad total.

Además, gran parte de los hogares se encuentra en una situación de peligro o riesgo de acuerdo a la cantidad de emisiones de monóxido de carbono por día que derivan de la utilización de equipos de calefacción a gas o leña ineficientes e inseguros. Asimismo, aunque el total de los hogares que utilizan sistemas de calefacción eléctricos se encuentran dentro del marco de seguridad con respecto a las emisiones, los equipos que emplean son en su mayoría ineficientes.

La situación no varía demasiado con respecto al sistema de ACS: siendo mayormente utilizados equipos eléctricos, más de la mitad de estos son ineficientes e inseguros, los cuales no solo tienen un bajo rendimiento, sino que también pone en riesgo la vida de las personas que los utilizan.

A partir de estos datos analizados se puede visibilizar no solo la situación del barrio, sino también la de los hogares más afectados en términos de vulnerabilidad socio energética. Dicho esto, es posible orientar la asignación de recursos y una planificación energética inclusiva por parte de la comuna y la Cooperativa de Ibarlucea hacia los hogares que se encuentran en una peor condición o hacia factores que influyen negativamente en la calidad de vida de los vecinos, como el peligro y riesgo de emisiones de monóxido de carbono, o la utilización de equipos eléctricos ineficientes e inseguros para calefacción y agua caliente sanitaria. Por ejemplo, se permite de esta forma orientar planes hacia el cambio de estos equipos por otros más seguros y eficientes.

## Agradecimientos

Se agradece la ayuda en la realización del trabajo a Pablo Rullo, Rodrigo Durán, Ignacio Arraña, al equipo coordinado entre el gobierno comunal, el Sistema para la Atención Médica de la Comuna (SAMCO), la Cooperativa de Energía y de Consumos de Ibarlucea, Universidades Nacionales y demás integrantes del Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES).

## Referencias bibliográficas

Boardman, B. (1991). Fuel Poverty: from cold houses to affordable warmth. London: Belhaven Press.

Durán, R., Ruggeri, E., García, M., Arraña, I., Garrido, S., Wild, G., Rullo, P. (2024). Diseño y estimación de un índice de vulnerabilidad socio energética para hogares en Ibarlucea, Santa Fe. Energías Renovables Y Medio Ambiente, 54, 21–28.

Viñuela, J., Chévez, P., Martini, I., San Juan, G. (2021). Fundamentos y Metodología de encuesta para análisis y evaluación de hogares en condiciones de pobreza energética. Avances en Energías Renovables Y Medio Ambiente, 25, 315–326.

Naciones Unidas. (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (UNDESA). Disponible en <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf>

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Energía
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Resistencia eléctrica en trajes conductivos: comparación de ensayo IEC 60895 y métodos alternativos

## Electrical Resistance in Conductive Suits: Comparison of IEC 60895 Testing and Alternative Methods

Presentación: 30/10/2025

**Leandro Olivo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina
lolivo@frsf.utn.edu.ar

**Esteban Pfaffen**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina
epfaffen@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

En el presente trabajo se verifica el cumplimiento de la norma IEC 60895:2020 relacionada a valores máximos de resistencia eléctrica en un traje conductivo de clase 2, y se comparan métodos de medición alternativos al propuesto por la norma. El traje se encuentra compuesto por una chaqueta, pantalón, y pares de calcetines, botas y guantes. Para ello, se aplican tres técnicas: medición en corriente continua con método Kelvin de cuatro hilos, medición en corriente alterna a 50 Hz y uso de un miliohmímetro. Los ensayos se realizan bajo condiciones ambientales controladas. Los valores medidos oscilaron entre 0,365 Ω y 0,912 Ω para chaqueta–pantalón, entre 1,446 Ω y 11,445 Ω para guantes, entre 1,561 Ω y 7,181 Ω para calcetines y entre 53,931 Ω y 1938 Ω para botas. Los resultados demuestran conformidad con respecto a los límites admisibles que otorga la norma.

**Palabras clave:** resistencia eléctrica, traje conductivo, IEC 60895:2020.

### Abstract

This work verifies compliance with IEC 60895:2020 regarding the maximum electrical resistance values in a Class 2 conductive suit and compares alternative measurement methods to those prescribed by the standard. The suit consists of a jacket, trousers, and pairs of socks, boots, and gloves. Three techniques are applied: direct current measurement using the Kelvin four-wire method, alternating current measurement at 50 Hz, and the use of a milliohmmeter. Tests are conducted under controlled environmental conditions. Measured values ranged from 0.365 Ω to 0.912 Ω for jacket–trousers, from 1.446 Ω to 11.445 Ω for gloves, from 1.561 Ω to 7.181 Ω for socks, and from 53.931 Ω to 1938 Ω for boots. The results demonstrate compliance with the admissible limits established by the standard.

**Keywords:** Electrical resistance, conductive suit, IEC 60895:2020.

## 1. Introducción

De acuerdo al artículo publicado en el 2023 por la Organización Internacional del Trabajo (International Labour Organization, 2024), aproximadamente tres millones de trabajadores mueren cada año debido a accidentes y enfermedades relacionados con el trabajo, de los cuales, 330.000 muertes son derivadas por accidentes laborales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En lo que Argentina compete, en base a la Superintendencia de Riesgos del Trabajo (Superintendencia de Riesgos de Trabajo, 2024), en el 2024 se registraron 359.543 accidentes de trabajo y enfermedades profesionales.

Bajo esa perspectiva, los elementos de protección personal (EPP) son considerados indispensables cuando las medidas de control técnico o administrativo no logran eliminar completamente el riesgo de accidente y/o enfermedades laborales. En trabajos sobre líneas de alta tensión, los EPP constituyen la última barrera de protección, por lo que es indispensable una periódica evaluación del correcto estado de funcionamiento del equipo.

En ese marco, los trajes conductivos, fabricados con materiales sintéticos y conductivos, aseguran continuidad eléctrica entre sus partes, reducen el campo eléctrico interno y permiten realizar trabajos en tensión colocando al operario al mismo potencial. Junto con otros elementos de protección, constituyen una medida fundamental para la seguridad y eficiencia en mantenimiento en vivo. Según la IEC 60895:2020 (International Electrotechnical Commission, 2020), pueden presentarse como traje completo o por piezas (botas, guantes, chaqueta, etc.), definiendo sus parámetros eléctricos en función de la clase, con aplicaciones hasta 1000 kV CA y ±800 kV CC.

En este documento, se presentan los resultados asociados a los ensayos de resistencia eléctrica de las prendas del traje conductivo, donde se verifican los valores obtenidos en base a la normativa vigente y se analizan resultados obtenidos a partir de metodologías alternativas en la medición.

## 2. Materiales y métodos

1.1 *Traje conductivo*

El traje se compone por dos prendas principales, la chaqueta y el pantalón. Además, el conjunto dispone de un par de botas conductivas, un par de medias y un par de guantes conductivos (véase Figura 1). Cabe destacar, que las prendas son de clase 2.

**Figura 1.** Prendas del traje conductivo

2.2 Medición de la resistencia eléctrica del conjunto chaqueta-pantalón

El procedimiento adoptado es el mencionado en la sección 5.4.2 de la IEC 60895 (IEC, 2020). Las mediciones fueron tomadas por tres métodos: corriente alterna, miliohmimetro y corriente continua.

Con el fin de reducir la resistencia de contacto entre el electrodo y la prenda, el método de corriente continua se analiza modificando la forma de tomar la prenda con la pinza según tres técnicas:

- Pinza agarrada a los cables de unión en cada extremo (alternativa 1).
- Pinza agarrada directamente a la tela de la ropa (alternativa 2).
- Pinzas agarrando directamente la ropa con papel aluminio (alternativa 3).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

2.3 *Medición de la resistencia eléctrica de los guantes*

El procedimiento experimental se basa en la sección 5.6.2.1 de la norma IEC 60895 (IEC, 2020). Las mediciones se efectúan mediante dos métodos: voltamperométrico, con aplicación de tensión continua y alterna, y mediante un miliohmímetro. Los ensayos se realizan en dos condiciones: guante en estado natural y guante estirado logrado por tracción mecánica con listones de madera y prensas. Los guantes se disponen sobre una superficie de madera limpia y lisa, utilizada como material no conductor. A diferencia de lo establecido en la norma, no se emplean electrodos conductores; la conexión se efectúa con pinzas tipo cocodrilo directamente sobre la tela, pinzando a la altura de la muñeca y en cada dedo individualmente (pulgar, índice, medio, anular y meñique).

2.4 *Medición de la resistencia eléctrica de las medias*

El procedimiento experimental, basado en la norma IEC 60895:2020, sección 5.6.2.2 (IEC, 2020), consiste en medir la resistencia eléctrica mediante dos métodos: voltamperometrica (con tensión continua y alterna) y un miliohmímetro. Se realizan dos ensayos alternativos: uno con la media en su estado natural y otro con la media estirada mecánicamente mediante un sistema de listones y prensas de madera. Todas las mediciones se efectúan sobre una superficie de madera no conductora, conectando una pinza cocodrilo a la correa de unión y otra a la punta de la media.

2.5 *Medición de la resistencia eléctrica de las botas*

La técnica utilizada se explica detalladamente en la sección 5.6.2.3 de la norma IEC 60895 (IEC, 2020). Los métodos son los mismos que los mencionados en los apartados anteriores. Las botas se colocan sobre una superficie metálica midiendo la resistencia eléctrica entre la misma y la correa del calzado. A diferencia de los procedimientos seguidos con otras prendas, el ensayo de esta bota se realiza sin emplear técnicas que modifican su geometría, evitando así alteraciones significativas en los resultados. Sin embargo, para obtener datos comparativos, se ejecutaron las mediciones en dos condiciones: con y sin la presencia de bolas metálicas en su interior.

2.6 *Prueba de unión*

La sección 5.5.3 de la norma IEC 60895 (IEC, 2020) explica el procedimiento por el cual se realizaron las pruebas de unión que es necesaria en los casos donde el traje está construido por partes, como es el caso de estudio. Se utiliza el método de corriente continua mencionado en casos anteriores y con la pinza sujeta a los cables de unión en cada extremo. A diferencia de lo que plantea la norma, no se utiliza un electrodo de contacto.

Independientemente de la prenda ensayada, los instrumentos utilizados comprenden dos multímetros marca FLUKE (para realizar los ensayos del método voltamperimetro) y un miliohmimetro marca GWINSTEK.

## 3. Resultados y discusión

A fines de simplificar la lectura del trabajo, a continuación, se presenta una lista con nomenclaturas de aquellos conceptos más relevantes utilizados en el documento, a saber:

- MO = Ensayo realizado con miliohmimetro
- CA = Ensayo realizado con un circuito de CA.
- CC = Ensayo realizado con un circuito de CC.
- $\bar{R}_1$= Resistencia chaqueta-pantalón con alternativa 1
- $\bar{R}_2$= Resistencia chaqueta-pantalón con alternativa 2 [Ω].
- $\bar{R}_3$= Resistencia chaqueta-pantalón con alternativa 3 [Ω].
- $\bar{R}_{SE}$= Resistencia promedio de prenda sin estirar [Ω].
- $\bar{R}_E$= Resistencia promedio de prenda estirada [Ω].
- $R_{SE}$ = Resistencia de prenda estirada [Ω].
- $R_E$ = Resistencia de prenda estirada [Ω].
- $R_B$ = Resistencia de prenda con bolillas [Ω].
- $R_{SB}$ = Resistencia de prenda sin bolillas de acero [Ω].

En los ensayos de laboratorios, las condiciones ambientales resultan determinantes ya que influyen tanto en la posibilidad de ejecución como en la validez de los datos obtenidos. Aunque la norma IEC 60895 no exige registrar dichos

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

parámetros, los ensayos realizados se llevaron a cabo bajo condiciones ambientales estables: temperatura de 25,1°C, humedad de 41% y presión atmosférica de 1027 HPa.

La Tabla 1 resume las resistencias obtenidas mediante los métodos MO, CA y CC, considerando la prenda en su longitud natural y bajo estiramiento, tanto para guantes como para medias conductivas.

**Tabla 1**. Resistencias medidas de los guantes (estirados y sin estirar) y medias (estiradas, sin estirar y con bolillas), mediante los métodos MO, CA y CC

| | Guante I | | Guante D | | Media I | | | Media D | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\bar{R}_{SE}$ | $\bar{R}_E$ | $\bar{R}_{SE}$ | $\bar{R}_E$ | $R_{SE}$ | $R_E$ | $R_B$ | $R_{SE}$ | $R_E$ | $R_B$ | Veredicto |
| MO | 8,19 | 1,45 | 7,63 | 1,66 | 5,97 | 1,36 | 3,61 | 5,13 | 1,16 | 1,23 | Cumple |
| CA | 7,26 | 3,06 | 10,99 | 3,84 | 5,71 | 1,81 | 2,40 | 4,39 | 0,75 | 1,91 | Cumple |
| CC | 8,05 | 2,39 | 11,45 | 3,15 | 7,18 | 2,54 | 1,84 | 5,97 | 2,38 | 1,56 | Cumple |

Según la IEC 60895, la resistencia de guantes y medias clase 2 debe ser menor a 15 Ω. Los ensayos registraron valores menores a 12 Ω, lo que verifica el cumplimiento de la norma. La Figura 2 presenta los valores de resistencia del guante y la media izquierda del traje según los diferentes métodos de ensayo. No se observó dispersión significativa entre mediciones en CA y CC, como se observa en la Figura 2. La resistencia disminuye al estirar la prenda o al aumentar la presión de contacto (en el caso de las medias durante el ensayo con bolillas), evidenciando la mejora de la conductividad por las propiedades intrínsecas del material (ver Figura 2).

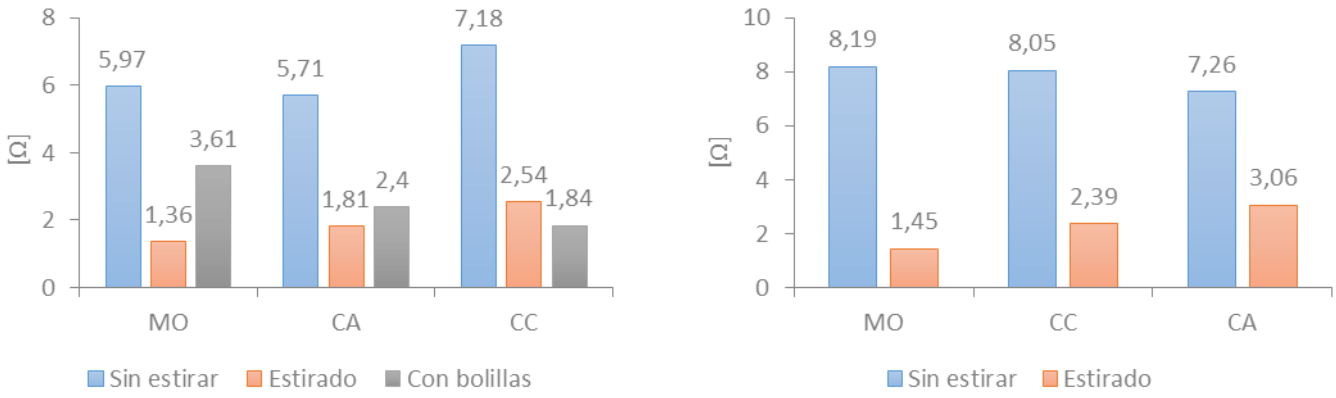



**Figura 2**. Comparación de valores de resistencias medidos mediante cada método de ensayo. Izquierda, media izquierda; derecha, guante izquierdo.

La Tabla 2 presenta las resistencias obtenidas mediante los métodos MO, CA y CC. En el conjunto chaqueta–pantalón se reporta la resistencia en CC según los procedimientos indicados en la Sección 2.3, mientras que para el calzado se muestran los valores medidos con y sin bolillas.

Según la norma IEC 60895, la resistencia del traje debe ser inferior a 20 Ω (clase 2). En los ensayos, los valores obtenidos fueron menores a 1 Ω, declarando conformidad. La Figura 3 presenta los valores de resistencia según el método 2 y 3. Se aprecia la similitud de las mediciones, sugiriendo que el aumento de la presión de contacto que se consigue al colocar papel aluminio a la pinza no modifica de forma mensurable el valor de resistencia medido.

**Tabla 2**. Resistencias medidas en chaqueta–pantalón (según Sección 2.3) y en zapatos, con y sin bolillas, mediante los métodos MO, CA y CC

| Chaqueta-Pantalon | Zapato I | Zapato D |
|---|---|---|

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | $\bar{R}_1$ | $\bar{R}_2$ | $\bar{R}_3$ | $R_B$ | $R_{SB}$ | $R_B$ | $R_{SB}$ | Veredicto |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MO | 0,365 | - | - | 620 | 14.409 | 1.938 | 15.507 | Cumple |
| CA | 0,440 | - | - | 82,304 | 333,077 | 69,93 | 152,96 | Cumple |
| CC | 0,504 | 0,909 | 0,912 | 88,571 | 579,730 | 53,93 | 222,57 | Cumple |

Para el calzado, la norma establece un límite de 10 kΩ. En la Tabla 2 se observa que, bajo el método MO sin bolillas, algunos valores superan dicho límite; sin embargo, estos resultados se descartan por no ser consistentes con los métodos de CA y CC, lo que sugiere un error significativo en la medición o la no idoneidad del MO para este caso. El mismo fenómeno se evidencia durante el ensayo con bolillas, es decir el MO arroja un valor comparable al valor de resistencia en CC sin bolillas (ver Figura 3).

Considerando lo anterior, se declara conformidad de las resistencias medidas en el calzado. Cabe destacar además que, al ensayar con bolillas, la resistencia disminuye notablemente, lo que refleja un comportamiento más representativo de las condiciones reales de uso y evidencia una buena propiedad del material, como se evidencia en la Figura 3.

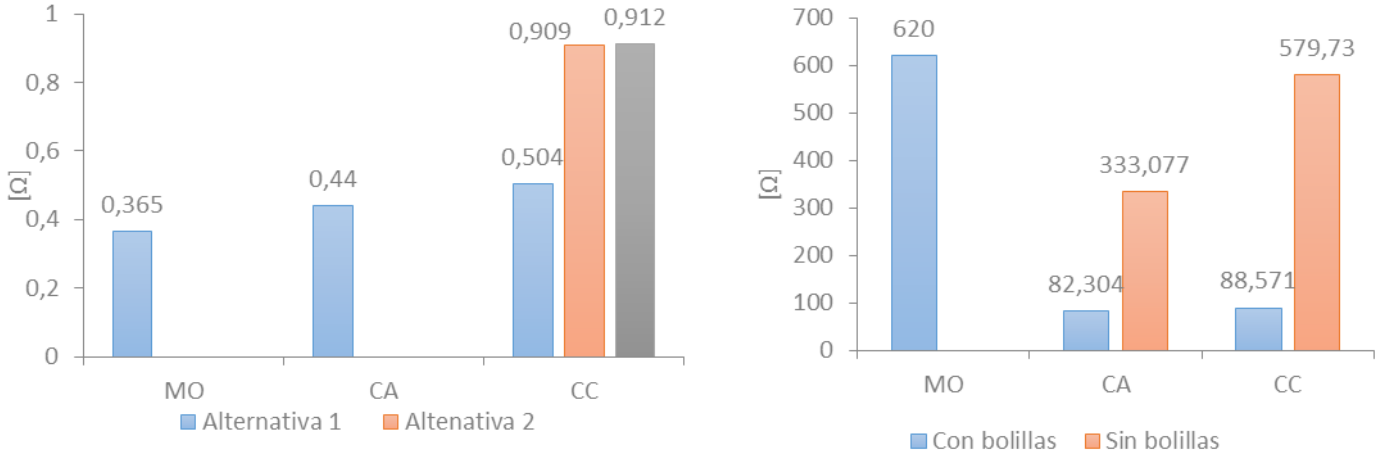



**Figura 3**. Comparación de valores de resistencias medidas mediante el método de ensayo. Izquierda, chaqueta-pantalón; derecha, zapato izquierdo

Por último, en la Tabla 3 se detallan los valores de resistencia obtenidos durante la prueba de unión siguiendo el procedimiento de la Sección 5.5.3 de la norma IEC 60895.A las uniones se les otorga una nomenclatura en función de la posición en la que son medidas: PI (Palma izquierda), PD (Palma derecha), CI (Calcetín izquierdo), CD (Calcetín derecho) y U (unión).

**Tabla 3**. Resistencias medidas en prueba de unión según método de la Sección 5.5.3 de la IEC 60895

| | PI-PD | CI-CD | PD-CI | PI-CD | U-PD | U-PI | U-CD | U-CI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Resistencia medida | 0,479 | 1,143 | 0,956 | 1,112 | 0,324 | 0,534 | 0,714 | 0,784 |

Por norma IEC 60895, la resistencia de unión debe ser menor a 40 Ω (clase 2). En los ensayos, los valores obtenidos fueron menores a 1,5 Ω, declarando conformidad. Como se mencionó con anterioridad, en esta prueba no se usaron electrodos; sin embargo, los resultados obtenidos fueron satisfactorios, concluyendo que su uso no condiciona el ensayo particularmente.

## 4. Conclusiones

En este trabajo, se verifica que, a partir de un conjunto de mediciones directas e indirectas, y siguiendo la normativa IEC 60895, es posible evaluar adecuadamente la conductividad de un traje destinado a trabajos en alta tensión. Los resultados

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

muestran que, independientemente del procedimiento empleado, las diferencias obtenidas no son significativas, lo que confirma la validez de los métodos aplicados. En particular, las mediciones con CC y CA presentan una alta concordancia, en línea con lo establecido en la sección 5.4.2 de la norma. El método con miliohmímetro, en cambio, ofrece valores comparables en algunos casos, pero evidencia discrepancias importantes en ciertas prendas, lo que lo convierte en una técnica menos confiable. Esto se refleja, por ejemplo, en las resistencias medidas en los zapatos. Asimismo, se observó que el estiramiento de las prendas reduce significativamente la resistencia, lo cual favorece su desempeño, aunque la norma no especifica está condición de ensayo. En contraste, la ausencia de bolillas de acero genera un marcado incremento de la resistencia (ejemplo: para medias, $R_B$ = 1,91 Ω frente a $R_{SB}$ = 4,39 Ω), lo que confirma la necesidad de incluirlas en ensayos representativos para condiciones reales de uso.

## Referencias bibliográficas

International Electrotechnical Commission. (2020). *Trabajo en vivo – Ropa conductora (IEC 60895:2020)*. Ginebra: International Electrotechnical Commission. ISBN 978-2-8322-8099-7.

International Labour Organization. (2024). “Casi 3 millones de personas mueren por accidentes y enfermedades relacionadas con el trabajo”. *International Labour Organization*, 19 de febrero de 2024. Disponible en https://www.ilo.org/es/resource/news/casi-3-millones-de-personas-mueren-por-accidentes-y-enfermedades.

Superintendencia de Riesgos de Trabajo. (2024). *Informes, estadísticas y datos sobre el Sistema de Riesgos del Trabajo*. Ministerio de Capital Humano. Disponible en https://www.srt.gob.ar/estadisticas/acc_ultimos_datos.php.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Energía
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Reconquista

# Comparativa de generación de energía real vs generación de energía teórica estimada de un sistema solar fotovoltaico

## Comparison of Actual Energy Generation vs. Estimated Theoretical Generation of a Photovoltaic Solar System

Presentación: 30/10/2025

**Ignacio Molina**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
Ignaciomolina16@hotmail.com

**José Giménez**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
gimenezjoseignacio@hotmail.com

### Resumen

En este proyecto se realizan cálculos para determinar la energía teórica mensual que puede generar un sistema fotovoltaico, compuesto por seis paneles solares monocristalinos PERC de 545 W emplazado en Avellaneda (Santa Fe), y compararla con la energía real producida durante el año 2024. El análisis mostró que la energía teórica estimada es superior a la registrada por el usuario, dejando una brecha explicable por factores como las condiciones climáticas, la temperatura de los módulos, pérdidas por suciedad, sombras parciales, degradación de los módulos y pérdidas eléctricas (inversores, cableado y conexiones), variables que no se reflejan completamente en las estimaciones teóricas. Este trabajo busca cuantificar esas diferencias y comprender cómo afectan al rendimiento del sistema, para mejorar la precisión en futuras estimaciones y promover instalaciones fotovoltaicas más eficientes y ajustadas a condiciones reales.

**Palabras clave:** Energía Solar Fotovoltaica, Energía Teórica vs Real, Factores de perdida.

### Abstract

This project performs calculations to determine the theoretical monthly energy that a photovoltaic system composed of six 545W PERC monocrystalline solar panels located in Avellaneda (Santa Fe) can generate, and compare it with the actual energy produced during the year 2024. The analysis showed that the estimated theoretical energy is higher than that registered by the user, leaving a gap explainable by factors such as weather conditions, module temperature, losses due to dirt, partial shading, module degradation, and electrical losses (inverters, cabling, and connections), variables that are not fully reflected in the theoretical estimates. This work seeks to quantify these differences and understand how they affect system performance, in order to improve the accuracy of future estimates and promote more efficient photovoltaic installations tailored to real conditions.

**Keywords:** Photovoltaic Solar Energy, Theoretical vs. Real Energy, Loss Factors.

## 1. Introducción

El diseño de un sistema fotovoltaico requiere, en principio, una estimación teórica precisa de la producción de energía esperada. Esta etapa es importante, ya que de ella depende tanto el dimensionamiento adecuado de la instalación como la proyección del retorno de la inversión. Sin embargo, la experiencia demuestra que existe una diferencia entre las previsiones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

sobre el papel y los resultados obtenidos en condiciones reales de operación. Factores como la variabilidad climática, la acumulación de suciedad sobre los paneles, las pérdidas por temperatura, e incluso la degradación de los materiales a lo largo del tiempo pueden influir notablemente en el rendimiento final del sistema.

Este trabajo se enfoca en el análisis de un sistema fotovoltaico instalado en la ciudad de Avellaneda, en la provincia de Santa Fe. Y tiene como eje principal realizar una comparativa entre la energía generada realmente y las estimada durante la etapa de diseño, evaluando así la eficiencia real del sistema bajo condiciones locales

Al profundizar en este caso específico, se reconoce la importancia de considerar no solo los aspectos técnicos del dimensionamiento, sino también el contexto ambiental y operativo en el que se inserta cada sistema fotovoltaico. De este modo, se promueve una visión más realista y precisa del potencial de la energía solar, contribuyendo al desarrollo de estrategias más efectivas para su integración en la matriz energética regional.

## 2. Materiales y métodos

El sistema fotovoltaico para analizar consta de seis paneles solares mono perc de media celda (modelo HiKu CS6W-545MS), cada uno con una potencia nominal de 545 Wp. La energía generada por estos paneles se almacena en un banco de baterías estacionario de ciclo profundo fabricado por INMALCA, compuesto por cuatro unidades de 12 V y 120 Ah conectadas en serie para alcanzar una tensión total de 48 V. Además, el sistema incorpora un inversor híbrido 3 en 1 con una capacidad de 3 kW a 48 V, que realiza la conversión de corriente continua a alterna. En la Tabla 1 se puede apreciar los valores reales de energía que generó este sistema en el año 2024, cuyos datos fueron obtenidos vía wifi del inversor.

**Tabla 1**. Energía real generada por el sistema fotovoltaico

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $E_{gen}$[kW] | 371 | 326 | 334 | 279 | 284 | 222 | 358 | 337 | 289 | 453 | 392 | 469 |

Con el fin de poder contrastar los valores reales con los estimados, es necesario calcular la energía hipotética a generar por este sistema. Para ello se emplearán expresiones derivadas del trabajo titulado *"A new method for evaluating nominal operating cell temperature (NOCT) of unglazed photovoltaic thermal module*. (Vat Sun et al. 2020)

A partir de la siguiente ecuación se determina la energía estimada mensual.

$$\boldsymbol{E_{est} = P_m \times HSP \times D \times \eta_p \times k} \quad (1)$$

Donde $P_m$ es la potencia eléctrica máxima de salida [W], $HSP$ es la cantidad de horas solares pico[1] por día, $D$ es la cantidad de días que posee el mes, $\eta_p$ es el rendimiento del sistema fotovoltaico, "performance ratio": 0.75 – 0.85. Siendo 0.80 un valor ampliamente utilizado como referencia estándar en cálculos de estimación de energía generada (Guan et al., 2017; Ben Aoun et al., 2017; Fesharaki et al., 2016) y $k$ es un factor de corrección para convertir la irradiancia del plano horizontal a la del plano del panel.

El coeficiente de corrección $k$ se puede obtiene a partir de información proporcionada por la Secretaría de Energía de la República Argentina en el documento "Guía del Recurso Solar (2019)". En la Tabla 2 se indica los siguientes coeficientes para la provincia de Santa Fe, teniendo en cuenta una inclinación del panel de 30° o un ángulo azimut de 60°.

**Tabla 2**. Coeficiente de corrección k

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $k$ | 0.93 | 0.95 | 1 | 1.06 | 1.13 | 1.17 | 1.16 | 1.09 | 1.02 | 0.97 | 0.93 | 0.92 |

La potencia máxima que un módulo fotovoltaico puede entregar depende de la irradiancia solar incidente y de la temperatura del módulo. Bajo condiciones estándar de prueba (STC), la potencia se mide con irradiancia de 1000 W/m². Sin embargo, en operación real, la potencia se ve afectada por:

[1] Período del día en que la radiación solar equivale a una irradiancia de 1000 W/m².

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- La temperatura del módulo, que suele ser superior a la ambiental.
- La irradiancia real, que varía según condiciones meteorológicas.
- Pérdidas por suciedad, sombreado parcial, conexiones, y eficiencia del inversor.

La ecuación general utilizada para calcular la potencia máxima es (Pantic et al., 2016):

$$\boldsymbol{P_m = P_{m,stc} \times \left(1 - \gamma(T_{PV} - 25)\right) \times \frac{I_T}{1000}} \quad (2)$$

Donde $P_{m,stc}$ es la potencia eléctrica máxima bajo STC2 [W], $\gamma$ es el coeficiente de temperatura $\left[\frac{\%}{°C}\right]$, $T_{PV}$ es la temperatura del módulo fotovoltaico [°C] y $I_T$ es la irradiancia solar real incidente sobre el módulo fotovoltaico $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

El coeficiente de temperatura $\gamma$ de un panel solar indica cómo varía la eficiencia del este con los cambios de temperatura, el mismo depende de la tecnología del panel. En 2007, la desarrolladora de software de simulación de sistemas de energía renovable Homer Energy obtuvo como resultados de sus estudios los siguientes coeficientes:

- Silicio Policristalino → $\gamma \approx -0.48$.
- Silicio Monocristalino → $\gamma \approx -0.46$.
- Híbrido de silicio monocristalino/amorfo → $\gamma \approx -0.30$.

Es un número negativo debido a que la potencia de salida disminuye al aumentar la temperatura de la celda.

El valor de $T_{PV}$ puede determinarse mediante la siguiente ecuación (Ross, 1980; Masters, 2004; Duffie and Beckman, 2013):

$$\boldsymbol{T_{PV} = T_a + (NOCT - 20) \times \frac{I_T}{800}} \quad (3)$$

Donde $T_a$ es la temperatura ambiente [°C] y $NOCT$ es la temperatura nominal de operación de la célula [°C]. NOCT (nominal operating cell temperature) es un parámetro que indica la temperatura que alcanzan las celdas solares de un panel cuando este opera en condiciones exteriores específicas. Estas condiciones incluyen una irradiancia de 800 [W/m²], una temperatura ambiente de 20 [°C], y una velocidad del viento de 1 [m/s], en circuito abierto. Generalmente es un valor que aporta el fabricante y se suele ubicarse en el rango de 45 ± 2 °C para módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos.

Para la temperatura ambiente, se tomará una media entre la temperatura máxima y promedio de cada mes. Esto nos dará un valor más aproximado del promedio de la temperatura mensual en las horas diurnas. A partir de la tabla proporcionada por el sitio web weather spark se obtienen los siguientes valores de temperatura para cada mes del año.

**Tabla 3**. Promedios mensuales de temperatura en 2024

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T máx (°C) | 32 | 30 | 28 | 25 | 22 | 20 | 20 | 22 | 24 | 26 | 30 | 32 |
| T prom (°C) | 27 | 25 | 24 | 21 | 18 | 15 | 14 | 16 | 17 | 21 | 24 | 27 |
| $T_a$ (°C) | 29.5 | 27.5 | 26 | 23 | 20 | 17.5 | 17 | 19 | 20.5 | 23.5 | 27 | 29.5 |

Para el cálculo de la energía generada por cada mes, se utilizará un promedio mensual de la irradiancia, el cual se determinará a partir de la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{I_T = \frac{I_{p,men} \times 1000}{HSP_p}} \quad (4)$$

Siendo $I_{p,men}$ el promedio mensual de la irradiación solar diaria sobre el plano horizontal $[kWh/m^2/día]$ y $HSP_p$ son las horas solares pico promedio del mes $[hs/día]$. El valor $I_{p,men}$ se obtiene del documento titulado "Informe de Radiación Solar

[2] Condiciones estándar de prueba (1000 W/m², AM 1.5 y 25 °C de temperatura ambiente) bajo las cuales se mide la potencia nominal de un panel solar.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

en la provincia de Santa Fe" realizado por FIQ – IFIS-Litoral, UNL – CONICET y el GRUPO DE ENERGÍAS NO CONVENCIONALES. Cabe destacar que datos corresponden al año 2018, siendo la información más reciente encontrada la que se muestra en la Tabla 4 a continuación.

**Tabla 4**. Promedio mensual de Irradiación solar en Santa Fe

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_{p,men}$ $[kWh/m^2/día]$ | 6.79 | 5.3 | 5.19 | 4.44 | 3.14 | 2.71 | 3.1 | 3.49 | 4.64 | 4.51 | 6.58 | 6.36 |

Mientras que el valor de $HSP_p$ se obtiene de la base de datos de la NASA. En su sitio web, para la ciudad de Avellaneda, se registran los siguientes valores mensuales promedio en la Tabla 5 siguiente:

**Tabla 5**. Horas solares pico promedio por mes (HSP)

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $HSP_p$ | 6.05 | 5.88 | 5.69 | 4.87 | 4.06 | 3.65 | 4.15 | 4.79 | 5.23 | 5.51 | 6.07 | 6.02 |

## 3. Resultados y discusión

Una vez definidas las ecuaciones y parámetros necesarios, se procedió a realizar los cálculos correspondientes para obtener la energía eléctrica teórica mensual generada por el sistema fotovoltaico. En la Tabla 6 se pueden ver los valores obtenidos a partir de los cálculos realizados, en esta se expresa detalladamente el resultado para cada mes del año.

**Tabla 6**. Valores de todas las variables de estudio por cada mes.

| | $I_{p,men}[kWh/m^2/día]$ | HSP | $I_t$ $[W/m^2]$ | $K$ | $T_a$[°C] | $T_{pv}$[°C] | $P_m[W]$ | $E_{est}$[Wh] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Ene$ | 6,79 | 6,05 | 1122,3 | 0,93 | 29,5 | 64,6 | 4338,0 | 585,8 |
| $Feb$ | 5,3 | 5,88 | 901,4 | 0,95 | 27,5 | 55,7 | 3363,2 | 450,9 |
| $Mar$ | 5,19 | 5,69 | 912,1 | 1 | 26 | 54,5 | 3387,5 | 462,6 |
| $Abr$ | 4,44 | 4,87 | 911,7 | 1,06 | 23 | 51,5 | 3344,6 | 414,4 |
| $May$ | 3,14 | 4,06 | 773,4 | 1,13 | 20 | 44,2 | 2752,0 | 303,3 |
| $Jun$ | 2,71 | 3,65 | 742,5 | 1,17 | 17,5 | 40,7 | 2603,0 | 266,8 |
| $Jul$ | 3,1 | 4,15 | 747,0 | 1,16 | 17 | 40,3 | 2615,1 | 302,1 |
| $Ago$ | 3,49 | 4,79 | 728,6 | 1,09 | 19 | 41,8 | 2566,3 | 321,6 |
| $Sep$ | 4,64 | 5,23 | 887,2 | 1,02 | 20,5 | 48,2 | 3211,0 | 411,1 |
| $Oct$ | 4,51 | 5,51 | 818,5 | 0,97 | 23,5 | 49,1 | 2973,0 | 381,4 |
| $Nov$ | 6,58 | 6,07 | 1084,0 | 0,93 | 27 | 60,9 | 4129,7 | 559,5 |
| $Dic$ | 6,36 | 6,02 | 1056,5 | 0,92 | 29,5 | 62,5 | 4050,9 | 538,4 |

Con el fin de poder apreciar mejor la brecha entre la energía real generada por el sistema y la estimada calculada, se presenta a continuación una tabla y un gráfico comparativo ver Tabla 7 y la Figura 1 respectivamente.

**Tabla 7**. Comparación entre la energía generada y la energía estimada.

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $E_{gen}$[kW] | 371 | 326 | 334 | 279 | 284 | 222 | 358 | 337 | 289 | 453 | 392 | 469 |
| $E_{est}$[kW] | 585,8 | 450,9 | 462,6 | 414,4 | 303,0 | 266,8 | 302,1 | 321,6 | 411,1 | 381,4 | 559,5 | 538,4 |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

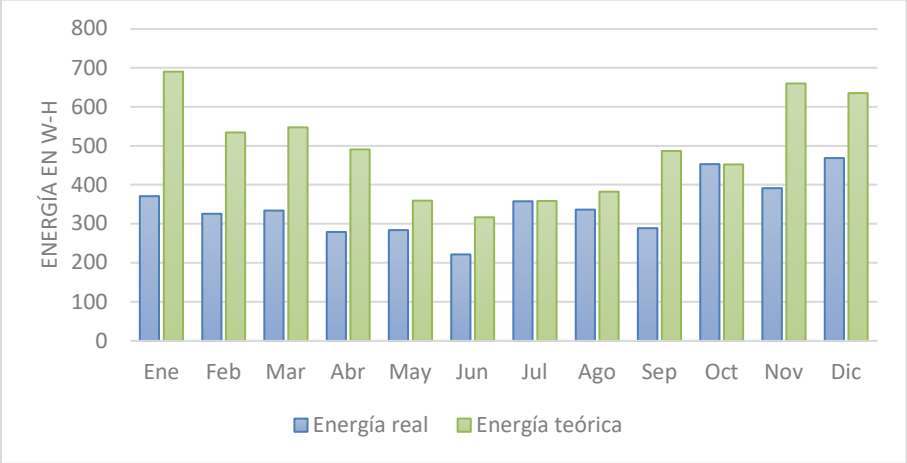



**Figura 1**. Generación real vs Generación estimada (teórica)

De la tabla y gráfico anterior se observa que, en la gran mayoría de los meses la energía teórica fue ampliamente superior a la real, lo que determina que existe una gran diferencia entre lo proyectado y lo realmente generado.

## 4. Conclusiones

El análisis comparativo entre la energía real generada y la energía teórica estimada muestra que existe una desviación significativa entre estos valores, los resultados se aproximan solo en contadas partes del año. La diferencia se debe a diversos factores que generalmente quedan marginados a la hora de realizar los cálculos. Las condiciones climáticas y particularmente la temperatura en los meses con presencia de olas de calor.

En términos generales, el comportamiento anual evidencia que la estimación teórica resulta útil como referencia de diseño, pero no refleja de manera exacta el rendimiento en condiciones reales de operación, por lo que este trabajo aporta información al respecto a la hora de diseñar un sistema que debe estar sujeto obligadamente a entregar una cierta cantidad de energía eléctrica solicitada por el cliente.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo provisto por el Ing. Mario Ros y por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Reconquista (UTN-FRRq).

## Referencias bibliográficas

HOMER Energy. *PV temperature coefficient of power*. HOMER Energy LLC. Recuperado el 16 de julio de 2025. https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.15/pv_temperature_coefficient_of_power.html

Guan, G.-P., Li, Y.-J., Liu, R., Moscato, M., & Lu, Z.-L. (2017). Performance analysis of a 10.6 kWp grid-connected photovoltaic system in Serpong. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 909(1), 012019. https://doi.org/10.1088/1757-899X/909/1/012019

Ben Aoun, S., Mraoui, S., & Hadj Arab, A. (2017). Long term performance, losses and efficiency analysis of a 960 kWp photovoltaic system in the Mediterranean climate. Energy Conversion and Management, 145, 169–181. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.065

Fesharaki, V. J., Dehghani, M., & Fadaei, A. (2016). Performance ratio – Crucial parameter for grid connected PV plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, 1300–1302. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.075

NASA. (s. f.). *Data Access Viewer (DAV)*. Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER), Langley Research Center. Recuperado el 2 de agosto de 2025. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Ross, R. G., Jr. (1980). *Flat-plate photovoltaic array design optimization*. En *Conference Record of the 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 1126–1132). IEEE.

Secretaría de Gobierno de Energía. Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética. (2019). *Guía del recurso solar: Anexos* (1.a ed. revisada) [PDF]. Recuperado el 2 de agosto de 2025. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_del_recurso_solar_anexos_final.pdf

Stanojević, D., Daković, A., & Nikolić, V. (2016). The assessment of different models to predict solar module temperature, output power and efficiency for Nis, Serbia. Energy, 103, 778–792. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.090

Gobierno de la Provincia de Santa Fe. (2019). *Informe de radiación solar* [PDF]. Recuperado el 10 de agosto de 2025. de https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/08/Informe-de-radiación-solar.pdf

Sun, Asanakham, Deethayat and Kiatsiriroat (2020). *A new method for evaluating nominal operating cell temperature (NOCT) of unglazed photovoltaic thermal module.* Chiang Mai, 50200, Thailand

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Energía
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Estimación de campos electromagnéticos para verificación de valores admisibles en línea de alta tensión

## Estimate of electromagnetic fields for verifying admissible values of a power transmission line

Presentación: 30/10/2025

**Francisco Moine**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina.
fmoine@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

El objetivo del presente trabajo es obtener una estimación de campo electromagnético en una futura estación transformadora y su vinculación con una línea aérea de alta tensión, ubicada en la localidad santafesina de Carreras. Para ello, en primer lugar, se analiza y estudia la línea proyectada. Luego, se realiza el modelado en software específico, para obtener los valores de campo eléctrico y magnético para casos conservadores. Con esta información, se verifica que las instalaciones proyectadas cumplen con la normativa referente a los límites establecidos sobre estos parámetros.

**Palabras clave:** Campo Electromagnético, Modelado, Transmisión.

### Abstract

The objective of this work is to estimate the electromagnetic field in a future transformer substation and its connection with a high-voltage overhead transmission line, located in the town of Carreras, Santa Fe Province. To this end, the projected line is first analyzed and studied. Subsequently, specific software is used for modeling to obtain electric and magnetic field values under conservative scenarios. Based on this information, it is verified that the projected facilities comply with the regulations regarding the established limits for these parameters.

**Keywords:** Electromagnetic Field, Modeling, Transmission.

## 1. Introducción

En los sistemas eléctricos de distribución y transmisión, la construcción de nuevas líneas y estaciones transformadoras (ET) requiere, durante su planificación, de una detallada evaluación del impacto ambiental. En este sentido, deben cumplirse diferentes normativas que tienen como objetivo reducir el impacto que la obra pueda tener tanto sobre el entorno inmediato como las personas que habitan o transitan las zonas aledañas a las instalaciones.

Una de estas restricciones es presentada en los valores de campo electromagnético (CEM) que irradian las instalaciones en funcionamiento normal. Es de suma importancia que tanto el campo eléctrico como magnético se encuentren por debajo de valores admisibles a fines de velar por la seguridad de la población (Gajšek, Ravazzani & Samajdar, 2016) . Es por ello que surge la necesidad de desarrollar métodos para modelar y obtener una estimación de estos valores empleando las características proyectadas para las instalaciones. En el caso de Argentina, esto valores límites quedan establecidos según la resolución 77/98 de la Secretaría de Energía (Secretaría de Energía, 1998).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Este trabajo presenta el análisis de cumplimiento de normativa (Resolución 77/98 de Secretaría de Energía) en la instalación de una línea de alta tensión (LAT) con acometida a una nueva ET en la provincia de Santa Fe (Argentina) en lo respectivo a radiación de campo electromagnético. En primer lugar, se seleccionan los datos de mayor relevancia de la LAT, a fines de generar un modelo aproximado del sistema. Luego, se obtienen los valores de campo eléctrico y magnético a partir de ecuaciones básicas del electromagnetismo. Por último, se verifica que los valores se encuentren dentro de los límites admisibles. Los resultados demuestran el cumplimiento de la normativa para la línea proyectada.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 *Línea de estudio*

El proyecto a analizar se basa en la construcción de una nueva LAT comprendida por un tramo subterráneo, un tendido aéreo dividido en subtramos urbano y rural, y una ET a construirse sobre un terreno en la localidad de Carreras. Esta línea tiene previsto interconectar las ET Firmat y Carreras a fines de mejorar los perfiles de tensión de la red. En este trabajo, a fines de no extender demasiado el análisis, se estudia el campo eléctrico y magnético del tramo aéreo de la LAT, tanto para disposición triangular (en zonas rurales) como para la coplanar vertical (en zonas urbanas). La Figura 1 presenta la traza de la línea proyectada.

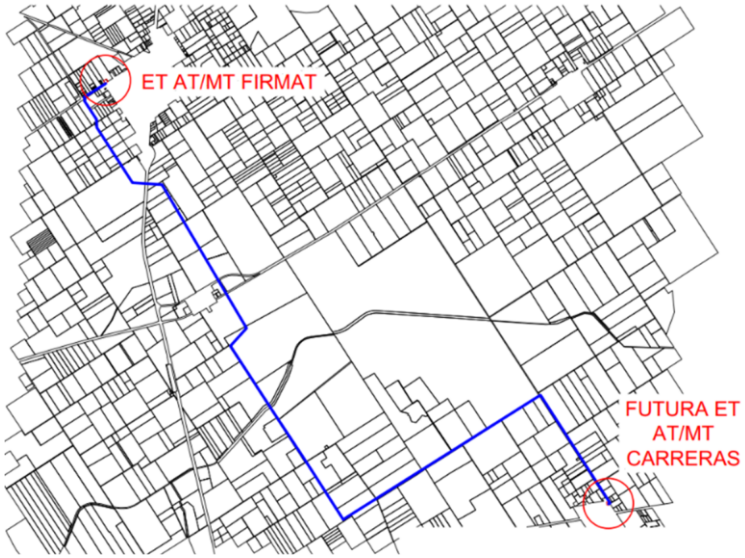



**Figura 1.** Traza de LAT proyectada para conexión de ET Firmat y Futura ET Carreras.

En general, debido a que la forma de onda de tensión y corriente es variable en el tiempo, los campos eléctricos y magnéticos se distribuirán de la misma manera en el espacio. En este sentido, el análisis de cada campo debe realizarse considerando el módulo para un instante dado en un punto del espacio. Además, se analiza el caso más conservador; es decir, en medio del vano para altura mínima de la línea con respecto al suelo. Debido a que se modelan dos tipologías de línea (triangular y vertical coplanar), serán dos puntos de modelado. La normativa establece la necesidad de que no se superen ciertos valores admisibles de campo a 1 [m] del suelo en la franja de servidumbre. La Tabla 1 expresa los valores límites tanto para campo magnético como eléctrico.

**Tabla 1.** Valores permitidos según Resolución 77/98.

| Valores permitidos | | |
|---|---|---|
| Parámetro | Límite | Unidad |
| Campo eléctrico | 3 | kV/m |
| Campo magnético | 25 | μT |

Con respecto al análisis de los puntos en cuestión, en primera instancia, se recopila la información de relevancia para realizar el modelado de la LAT. La Tabla 2 presenta los parámetros requeridos en el estudio. Se detalla la tensión de línea, características eléctricas y mecánicas del cable, disposición geométrica de la línea, entre otros. Ciertos parámetros, como tensiones y corrientes, al tratarse del mismo conductor, poseen el mismo valor sin importar la disposición; las diferencias se encuentran en las longitudes del vano y las franjas de servidumbres.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 2.** Parámetros relevantes de la línea.

| Parámetro | Coplanar Vertical | Triangular |
|---|---|---|
| Tensión [kV] /Frecuencia [Hz] | 132/50 | |
| Corriente por Fase [A] | 565 | |
| Conductor | Al/Ac | |
| Sección [mm$^2$] | 282,5 | |
| Longitud del Vano [m] | 150 | 250 |
| Franja de Servidumbre [m] | 13,4 | 24,8 |

La disposición de los conductores, las alturas y la información espacial referida a la línea se detalla en la Figura 2 (para coplanar vertical) y la Figura 3 (para triangular). Los CEM pueden vincularse a través de elementos de construcciones como vallas y cercos, líneas de comunicación, o cañerías metálicas a través del acoplamiento electroestático o magnético. Esto genera corrientes y tensiones indeseadas en los mismos, siendo un factor de riesgo. Adicionalmente, tanto una LAT como una ET generan radiaciones en el espectro electromagnético de baja frecuencia, que en grandes cantidades puede llegar a calentar tejidos biológicos, así como también generar sensaciones de cosquilleo. En este sentido, es menester realizar un análisis del impacto de la nueva línea en el medioambiente y su población.

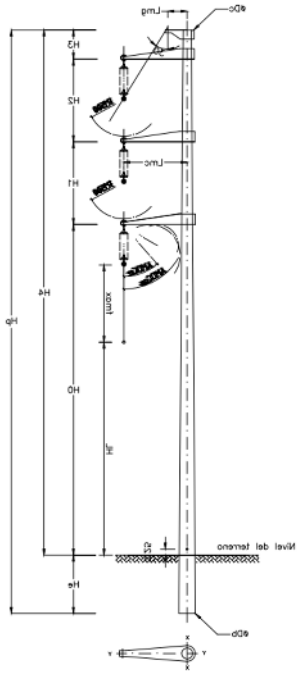


**Figura 2.** Geometría de estructura de suspensión urbana (coplanar vertical).

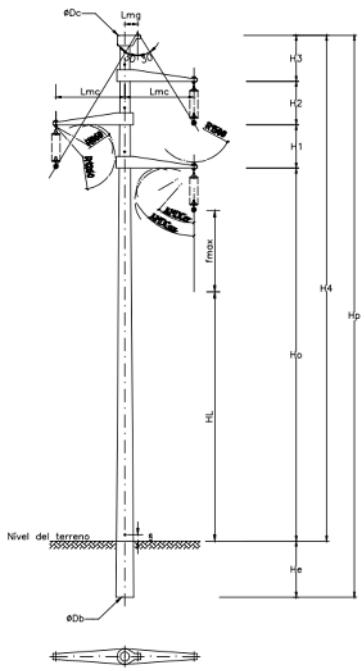


**Figura 3.** Geometría de estructura de suspensión rural (triangular).

2.2 *Ecuaciones de Campo Electromagnético e hipótesis intervinientes*

Para estudiar el cumplimiento de la normativa en la línea proyectada, es necesario modelar el campo distribuido en los espacios asociados a la LAT. En este sentido, se aplican las ecuaciones básicas de electromagnetismo (Ecuaciones (1) - (4)) que definen el campo eléctrico y magnético en el espacio (Hayt & Buck, 2012).

$$\tilde{E}_{kx} = \frac{\tilde{Q}_k}{2\pi\varepsilon}\left[\frac{X_p}{{X_p}^2 + (H_k - H_p)^2} - \frac{X_p}{{X_p}^2 + (H_k + H_p)^2}\right] \quad (1)$$

$$\tilde{E}_{ky} = \frac{\tilde{Q}_k}{2\pi\varepsilon}\left[\frac{H_k - H_p}{{X_p}^2 + (H_k - H_p)^2} - \frac{H_k + H_p}{{X_p}^2 + (H_k + H_p)^2}\right] \quad (2)$$

$$\tilde{B}_{kx} = \frac{2 \times 10^{-7}\, \tilde{I}_k\, X_p}{{X_p}^2 + (H_p - H_k)^2} \quad (3)$$

$$\tilde{B}_{ky} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot \tilde{I}_k \cdot (H_p - H_k)}{{X_p}^2 + (H_p - H_k)^2} \quad (4)$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

donde $\tilde{Q}_k$ es la carga del conductor; $X_p$ es la distancia en el eje de abscisas entre el conductor y el punto a calcular el campo eléctrico; $H_k$ y $H_p$ son las alturas del conductor y el punto respectivamente; $\tilde{I}_k$ es la corriente del conductor; $\varepsilon$ es la permitividad del vacío; y $\tilde{E}_k$ y $\tilde{B}_k$ son los campos eléctricos y magnéticos para cada componente ($x$ e $y$).

El modelado en dos dimensiones para estos campos considera las siguientes hipótesis de simplificación:

- Los conductores se asumen como cilindros infinitamente largos, paralelos entre sí y paralelos a una tierra considerada perfectamente plana.
- Se asume que no hay presencia de cargas espaciales en las inmediaciones de los conductores.
- El medio dieléctrico entre conductores y tierra es aire, cuya permisividad eléctrica es prácticamente independiente de las condiciones ambientales y prácticamente igual a la permisividad del vacío, y la permeabilidad magnética del aire es prácticamente igual a la del vacío.
- La tierra no es buena conductora para el campo magnético, con lo cual los conductores imagen requeridos para modelar el efecto de la tierra están a una distancia relativamente grande de los conductores.

Las simulaciones se llevan a cabo en Python, haciendo uso de librerías libres para la resolución y el mapeo de campos vectoriales. Estos modelos, junto con los resultados obtenidos, han sido validados en software específico del tema.

## 3. Resultados y discusión

La disposición de los conductores para el modelado se presenta en la Figura 4. Se observan los puntos de amarre y el conductor en altura mínima de acuerdo con los planos de la Figura 2 y la Figura 3. A partir de estos modelos, se analiza la distribución del campo magnético y eléctrico, y los valores adoptados a 1 [m] del suelo en la franja de servidumbre.

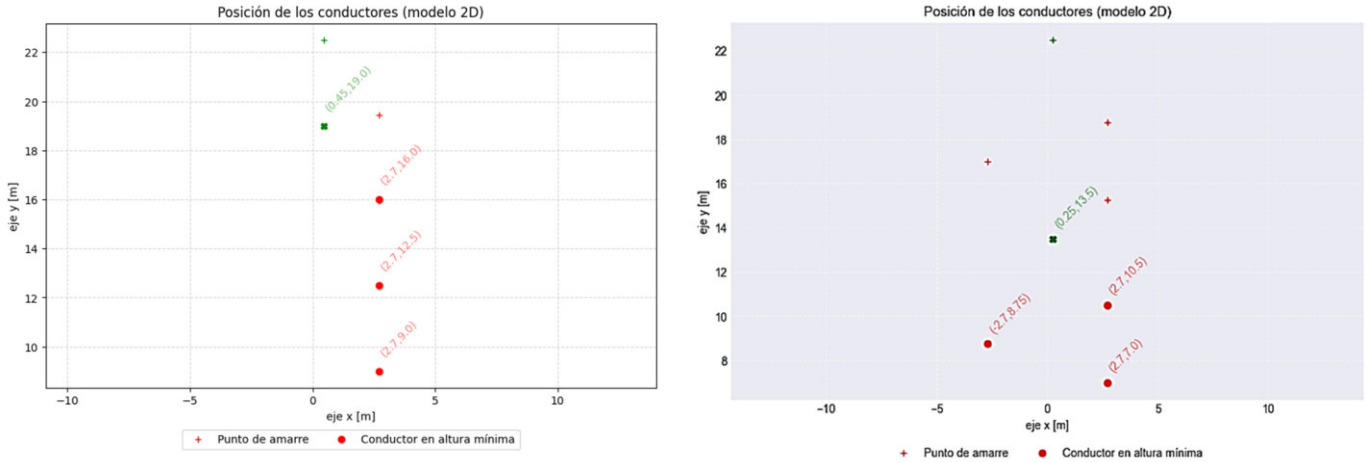



**Figura 4.** Geometría de las disposiciones de LAT. Izquierda: disposición coplanar vertical; derecha, triangular.

### 3.1 *Campo magnético*

La Figura 5 y la Figura 6 muestran la distribución del campo magnético en función de la distancia considerando el poste o estructura de suspensión como el origen del eje de abscisa, tanto para la disposición coplanar vertical y triangular, respectivamente. En cada Figura se destaca el valor máximo de campo en rojo. Las líneas punteadas presentan el límite de la franja de servidumbre. Nótese que la disposición coplanar, a diferencia de la triangular, no posee centrada su franja al poste, si no a la línea; es por ello que se distribuye asimétricamente a la distancia (ver Figura 5). Es de destacar que, tanto para la tipología rural como urbana, los valores de campo magnético se ven contenidos dentro del rango aceptado según normativa.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

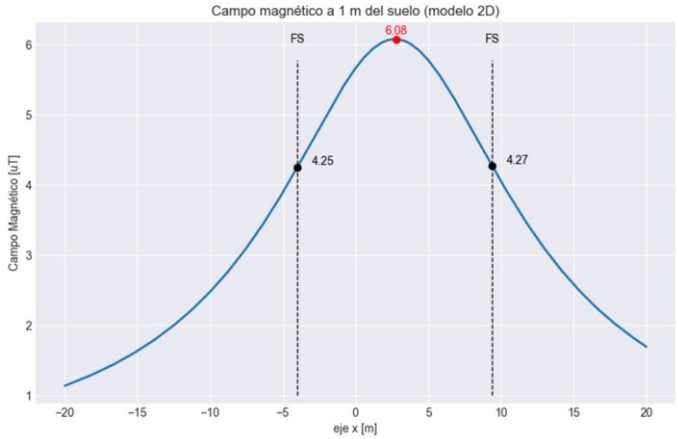



**Figura 5.** Perfil de campo magnético transversal a la LAT, estimado a 1 [m] del suelo con conductores en altura mínima para disposición coplanar vertical.

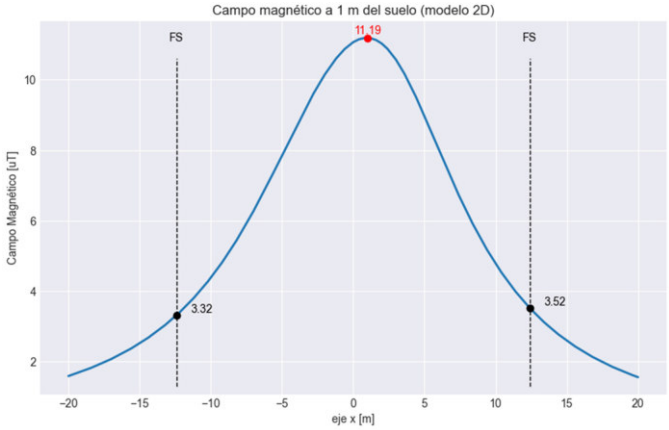



**Figura 6.** Perfil de campo magnético transversal a la LAT, estimado a 1 [m] del suelo con conductores en altura mínima para disposición triangular.

3.1 *Campo Eléctrico*

En lo respectivo al campo eléctrico, la Figura 7 presenta el campo en la disposición urbana, mientras que la Figura 8 muestra el perfil de campo para la disposición rural. En primer lugar, se aprecia que en ninguno de los casos se excede el valor límite de 3 [kV/m] según normativa. Nuevamente, el mismo es obtenido para el centro de vano de ambos tendidos.

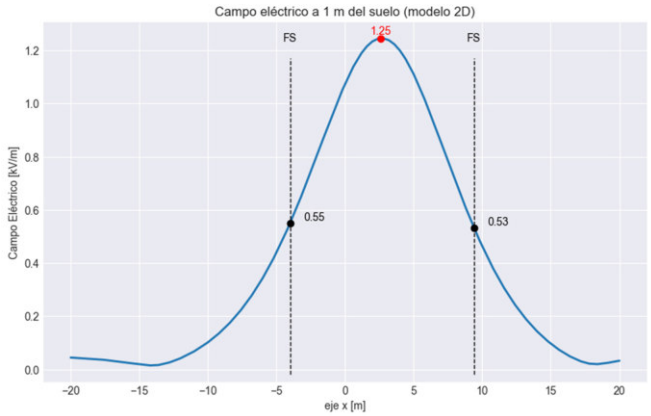



**Figura 7.** Perfil de campo eléctrico no perturbado transversal a la LAT, estimado a 1 [m] del suelo con conductores en altura mínima para disposición coplanar vertical.

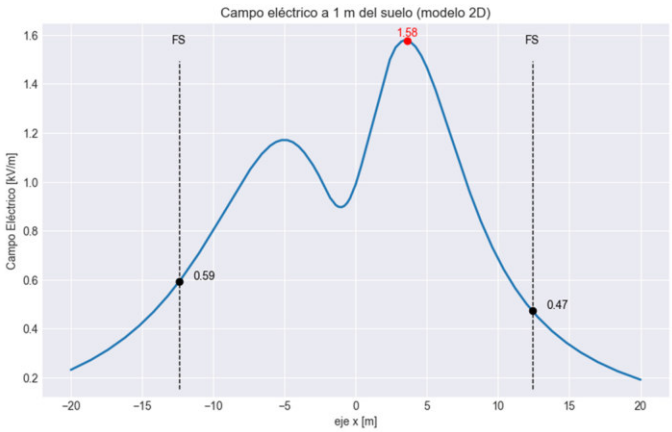



**Figura 8.** Perfil de campo eléctrico no perturbado transversal a la LAT, estimado a 1 [m] del suelo con conductores en altura mínima para disposición triangular.

Además, como se observa en la Figura 8, el perfil de campo eléctrico posee dos picos diferenciados, junto con un valle entre ellos. Esto se explica en función a la disposición triangular de la estructura de suspensión (ver Figura 3). El valor máximo del campo eléctrico (destacado en rojo en la gráfica) se encuentra exactamente en el punto del espacio donde dos de los tres conductores de la traza se encuentran superpuestos horizontalmente, pero a diferente altura. El pico a la izquierda del centro del vano es el conductor restante de la línea. Este efecto no se aprecia en la Figura 7 ya que los mismos refuerzan su campo eléctrico al encontrarse todos en forma coplanar vertical.

3.1 *Resumen de resultados finales*

A continuación, la Tabla 3 resume los valores máximos obtenidos en la franja de servidumbre, determinado que estos cumplen con la legislación vigente exigida.

**Tabla 3.** Resumen de los valores máximos calculados para cada configuración en centro del vano

| Disposición | Ítem | Valores obtenidos en franja de servidumbre | Conformidad |
|---|---|---|---|
| Configuración coplanar vertical | Campo eléctrico | 0,55 | Cumple |
| | Campo magnético | 4,27 | Cumple |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | | |
|---|---|---|---|
| Configuración triangular | Campo eléctrico | 0,59 | Cumple |
| | Campo magnético | 3,52 | Cumple |

Cabe destacar que estos resultados son estimativos, y como tal, tienen un propósito más bien orientativo, ya que, si bien se posiciona con una postura conservadora en materia de cálculo, los valores obtenidos pueden diferir de aquellos de la construcción final, siendo necesaria una medición de los parámetros analizados para verificar su cumplimiento con la normativa.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se modelaron los campos electromagnéticos de diferentes configuraciones de línea a fines de evaluar el cumplimiento de normativa. Como tal, es de destacar el uso racional de herramientas informáticas para la resolución de problemas de ingeniería, logrando amoldar las mismas al uso y medida del profesional. Como cualquier herramienta, puede expandirse para simplificar ciertas tareas en este tipo de trabajos, o bien, optimizarse para reducir tiempos de ejecución y cálculo, aunque estos son despreciables actualmente. Específicamente, en el ámbito de la normativa vigente en torno a CEM, resulta primordial verificar su cumplimiento para asegurar el bienestar de la comunidad y mitigar el impacto que una obra de tal envergadura podría tener de otro modo sobre la misma. Por último, es importante recalcar la importancia de realizar una medición una vez terminada la obra para verificar si los resultados obtenidos a través del modelado reflejan la realidad, o bien, por diversos motivos descritos en el presente trabajo, se alejan demasiado de los mismos.

## Referencias bibliográficas

Secretaría de Energía. (1998). Resolución 77/98: Límites de exposición a campos eléctricos y magnéticos en instalaciones de transmisión de energía eléctrica. Buenos Aires: Secretaría de Energía de la Nación. Disponible en https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-77-1998-48226/texto

Gajšek, P., Ravazzani, P., & Samajdar, D. P. (2016). Review of Studies Concerning Electromagnetic Field (EMF) Exposure Assessment in European Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(9), 875.

Hayt, W. H., & Buck, J. A. (2012). *Engineering Electromagnetics*. 8th ed. New York: McGraw-Hill.

Eje temático

# Estructuras y construcciones civiles

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Estructuras y construcciones civiles
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado.
**Facultad Regional:** Rafaela

# Diseño de pieza de unión de estructura sombra de ganado

## Design of the connecting piece for a livestock shade structure

Presentación 30/10/2025

**Jonatán Rodrigo Cuatrín**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo Investigación Aplicada en Métodos Numéricos para Ciencias de la Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.
jonatan.cuatrin@frra.utn.edu.ar

**Lautaro Falchini**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo Investigación Aplicada en Métodos Numéricos para Ciencias de la Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.
lautarofalchini777@gmail.com

### Resumen

El estrés térmico en bovinos constituye un problema relevante en la producción ganadera, ya que reduce la ganancia de peso, la fertilidad y la producción de leche. Para mitigar este efecto, se emplean estructuras de sombra artificial que mejoran el confort animal mediante la regulación del microclima. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en los elementos principales —columnas, vigas y cubiertas—, relegando las uniones a un papel secundario o resolviéndolas de forma empírica, pese a que cerca del 10 % de las fallas en estructuras metálicas se atribuyen a deficiencias en las conexiones (Alkam, 2021). En el ámbito agropecuario, factores como la intemperie, el viento, el barro y la acción animal agravan esta situación. Este trabajo presenta el diseño y la verificación de una pieza de unión fabricada en aluminio A356-T6, evaluada mediante el método de elementos finitos. Los resultados muestran tensiones máximas de 40,5 MPa, muy inferiores al límite elástico del material (170 MPa), y un factor de seguridad de 4,2, lo que confirma la viabilidad estructural de la propuesta.

**Palabras clave:** Uniones; Diseño; Análisis de elemento finitos; Aluminio

### Abstract

Heat stress in cattle represents a significant challenge in livestock production, as it reduces weight gain, fertility, and milk yield. To mitigate this effect, artificial shade structures are commonly used to improve animal comfort by regulating the microclimate. However, most previous studies have focused on the main structural elements—columns, beams, and roofing—while connections have been treated as secondary components or resolved empirically, despite the fact that approximately 10% of failures in metal structures are attributed to deficiencies in joints (Alkam, 2021). In agricultural environments, service conditions such as weather exposure, wind, mud, and animal interaction further exacerbate this issue. This study presents the design and verification of a joint component made of A356-T6 aluminum, analyzed using the finite element method. The results show maximum stresses of 40.5 MPa, well below the material's yield strength (170 MPa), and a safety factor of 4.2, confirming the structural feasibility of the proposed solution.

**Keywords:** Joints; Design; Finite element analysis; Aluminum

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El estrés térmico en bovinos se presentó como un problema de gran impacto en la producción ganadera, dado que redujo la ganancia de peso, la fertilidad y la producción de leche. Para mitigar este efecto, se desarrollaron diferentes tipos de estructuras de sombra artificial, cuyo propósito fue regular el microclima y mejorar el confort animal.

En estos desarrollos, gran parte de los estudios previos se centraron en los elementos principales de la estructura, tales como columnas, vigas o cubiertas, mientras que las uniones fueron tratadas de manera secundaria o resueltas empíricamente. Este enfoque generó un punto crítico, ya que se comprobó que en estructuras metálicas aproximadamente un 10 % de las fallas se originaron en deficiencias de diseño en las uniones, lo que convierte a las conexiones en uno de los puntos más vulnerables del sistema estructural (Alkam, 2021).

En el caso específico de las estructuras destinadas al sector agropecuario, la problemática se acentuó por las condiciones de servicio: exposición a cargas de viento, intemperie, humedad, barro y la acción directa de los animales. En este contexto, el correcto diseño y cálculo de las uniones no solo debió garantizar la transmisión de las solicitaciones sin comprometer la seguridad estructural, sino también asegurar durabilidad, facilidad de montaje y un costo accesible para el productor.

El presente trabajo abordó esta línea de investigación, centrándose en el diseño, modelado y verificación de una pieza de unión para estructuras reductoras de estrés térmico en bovinos, utilizando como material de base el aluminio A356-T6 fundido. El análisis se realizó mediante el método de los elementos finitos, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la unión bajo cargas representativas de servicio y establecer criterios de diseño que permitan su futura validación experimental.

# 2. Materiales y métodos

*2.1. Procedimiento general y objetivo.*

Se partió del modelo global estructural previamente calculado en software de cálculo de modelo matricial de rigidez, con la finalidad de trasladar la carga crítica al nivel de detalle necesario para diseñar y analizar la pieza de unión. El objetivo fue identificar el vínculo más cargado, obtener su envolvente de cargas, modelar la unión en Solid Edge considerando requisitos de fundición en aluminio y, finalmente, verificar su comportamiento mediante un análisis por elementos finitos (FEM).

*2.2. Determinación del vínculo más cargado.*

A partir del modelo global desarrollado en software de cálculo de modelo matricial de rigidez, se analizaron las reacciones internas y esfuerzos obtenidos para los distintos casos de carga considerados en el proyecto, tales como peso propio, acciones de viento, cargas de uso y sobrecargas accidentales, como se muestra en la Figura 1. Estos resultados fueron procesados en una hoja de cálculo, donde se organizaron los valores de tracción, compresión, corte y momento actuantes en cada una de las barras. Mediante este procesamiento fue posible identificar el vínculo más exigido de la estructura, entendido como aquel que concentró los mayores esfuerzos en las combinaciones de diseño.

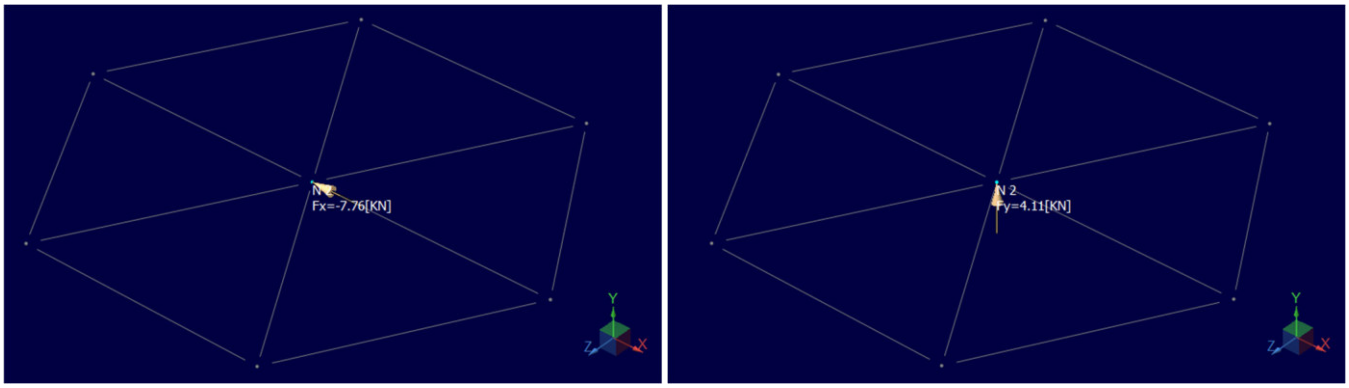


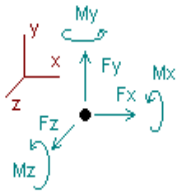

**Figura 1**. Envolvente de cargas en el nudo más solicitado.

Una vez determinado dicho vínculo, se construyó la envolvente de cargas, integrando los máximos valores de solicitaciones registrados en los distintos estados de carga. Este procedimiento permitió definir los casos críticos de análisis, que incluyeron el estado de servicio típico, la combinación extrema por acción de viento y un escenario representativo de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

empuje lateral generado por la interacción animal. De esta forma, se obtuvo un conjunto de cargas representativas que sirvieron de base para el modelado detallado de la unión en etapa posterior, en la Tabla I se muestra los envolventes en el nudo más solicitado.

**Tabla I** - Envolvente de carga en nudo más solicitado.

| Cargas en el nudo de envolvente | | |
|---|---|---|
| Dirección | Valor | Fuerzas |
| FX (→) | 7758 N |  |
| FY (↓) | -4107 N | |
| FZ(↙) | 0 N | |



2.3 *Elección de material*

La selección del material fue un aspecto decisivo en el diseño de la unión, ya que debía garantizar tanto la resistencia estructural como la durabilidad en condiciones ambientales adversas. El componente se encuentra expuesto a cargas variables, humedad, barro y agentes químicos propios del tambo, por lo que era necesario un material capaz de responder mecánicamente y, al mismo tiempo, mantener un buen desempeño frente a la corrosión (Maraveas, 2020) (Amadi & Anaele, 2015).

El uso de acero, si bien habitual en estructuras, presenta desventajas en este contexto: su elevada densidad incrementa el peso propio de la unión, lo que repercute en mayores esfuerzos transmitidos a la base, y su baja resistencia natural a la corrosión obliga a recurrir a recubrimientos o mantenimientos periódicos, encareciendo el ciclo de vida del sistema.

En contraste, el aluminio A356-T6 ofreció una combinación adecuada de propiedades: buena resistencia mecánica tras el tratamiento T6, baja densidad que facilita el montaje y reduce solicitaciones adicionales, excelente fundibilidad para fabricar piezas complejas mediante moldeo, y resistencia natural a la corrosión que asegura mayor durabilidad sin necesidad de tratamientos protectores costosos. Estas características justificaron su elección como material base para la pieza de unión analizada.

La Tabla II resume las propiedades mecánicas del A356-T6 empleadas en el modelo de elementos finitos, utilizadas como base para la verificación estructural de la pieza de unión.

**Tabla II** - Propiedades mecánicas del aluminio A356-T6

| Propiedad | Símbolo | Valor empleado |
|---|---|---|
| Densidad | ρ | 2.712 kg/m³ |
| Módulo de elasticidad | E | 68.9 GPa |
| Coeficiente de Poisson | ν | 0.33 |
| Límite elástico (0.2%) | $\sigma_{0.2}$ | 170 MPa |
| Resistencia a tracción (UTS) | σ_u | 240 MPa |
| Elongación | A | 3–10 % |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

*2.4. Criterios para el diseño de unión*

En la práctica profesional de la ingeniería civil, el diseño de uniones suele estar fuertemente apoyado en la normativa vigente y en herramientas de cálculo estructural que incluyen módulos específicos para la verificación de conexiones. Estos módulos permiten resolver un amplio rango de uniones soldadas o atornilladas en acero y hormigón, basándose en modelos previamente establecidos que simplifican el proceso de dimensionamiento. Si bien esta metodología resulta adecuada para estructuras convencionales, presenta la limitación de estar restringida a tipologías estándar, lo que dificulta su aplicación a geometrías no tradicionales o a materiales distintos al acero.

En el caso de la unión desarrollada para este proyecto, la problemática fue diferente. La pieza debía ser fundida en aluminio A356-T6, material que no está contemplado en la mayoría de los módulos predefinidos de software estructural de uso civil. Por ello, se optó por una estrategia de cálculo propia de la ingeniería mecánica, en la que el comportamiento de la unión se abordó mediante modelado por elementos finitos, herramienta que permite reproducir con mayor fidelidad las condiciones reales de trabajo, la geometría compleja de la pieza y las propiedades específicas del aluminio.

De esta manera, el análisis no se limitó a la aplicación de fórmulas cerradas o tipologías prefijadas, sino que permitió verificar el desempeño de uniones no convencionales, explorar escenarios de carga particulares (como el empuje animal) y obtener distribuciones de tensiones detalladas en zonas críticas. Esta metodología amplió el marco tradicional de la ingeniería civil, integrando recursos de la ingeniería mecánica para dar respuesta a un problema que, por su naturaleza, requería soluciones fuera de los esquemas clásicos.

*2.5. Diseño de pieza de unión*

La geometría de la pieza se definió en función de la transmisión de cargas, la factibilidad de fundición en aluminio A356-T6 y las condiciones de servicio en el tambo. Para garantizar un correcto llenado del molde y facilitar la extracción, se adoptó un ángulo de desmolde superior 3,5°, acompañado de transiciones suaves en las zonas de cambio de sección.

Se incorporaron refuerzos en los sectores de fijación de las barras estructurales, con el objetivo de aumentar la rigidez local y asegurar una correcta transmisión de esfuerzos entre los elementos vinculados. La pieza incluye también orificios para el alojamiento de las barras redondas, dispuestos según su ángulo de trabajo, y agujeros para los pernos de fijación a la base, ubicados estratégicamente para permitir un montaje seguro sin debilitar el cuerpo principal.

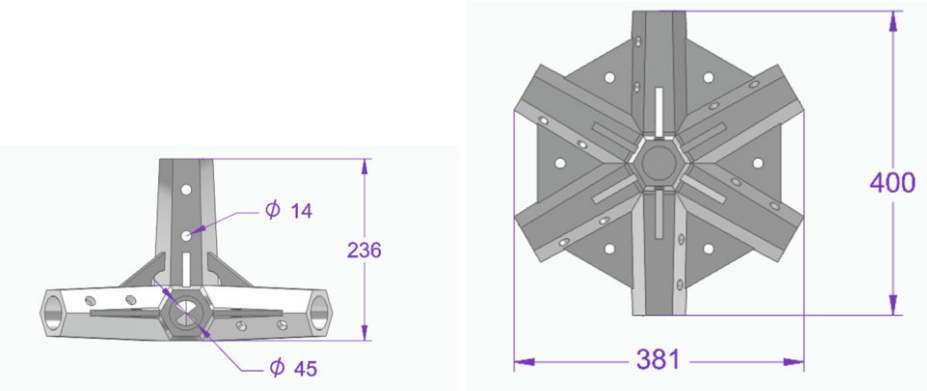



**Figura 2**. Modelo de pieza de unión.

En conjunto, la forma de la unión respondió a criterios mecánicos y de fabricación, asegurando una pieza resistente, funcional y viable para su producción industrial mediante fundición en aluminio. La Figura 2 presenta el diseño adoptado.

*2.6. Método de los elementos finitos (FEM)*

El método de los elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una de las herramientas más utilizadas en ingeniería para el análisis de componentes sometidos a diferentes estados de carga. La principal ventaja de esta técnica radica en que permite analizar componentes con geometrías irregulares, materiales específicos y condiciones de carga diversas, situaciones que difícilmente podrían resolverse con métodos analíticos tradicionales. Además, ofrece la posibilidad de identificar zonas críticas de concentración de tensiones, evaluar la influencia de los apoyos y predecir con mayor fidelidad el comportamiento estructural antes de la fabricación del componente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Este término es un criterio fundamental para evaluar la resistencia de materiales ductiles, por ejemplo, el acero frente a cargas aplicadas. Permite predecir si un material alcanzará su límite elástico o si comenzará a experimentar deformaciones plásticas, es decir, cambios permanentes en su forma (Carrere, 2017).

Las tensiones de Von Mises ( $\sigma_{VonMises}$) se determinan a partir de una magnitud derivada de los esfuerzos principales ($\sigma 1$, $\sigma 2$, $\sigma 3$), que actúan en diferentes direcciones dentro del material. Además, permiten evaluar la energía de distorsión en un punto específico, proporcionando una medida integral de la resistencia frente a esfuerzos combinados de tracción, compresión y corte.

Este enfoque simplifica el análisis estructural al unificar distintos tipos de tensiones en un solo valor, facilitando la verificación de la seguridad y el rendimiento del material.

Formula (5.1) de cálculo:

$$\sigma_{VonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \qquad (5.1)$$

En el marco de este proyecto, el empleo del FEM resultó esencial, ya que la unión diseñada no correspondió a una tipología estándar cubierta por los programas de cálculo estructural convencionales. La pieza, modelada en aluminio A356-T6 y con geometría optimizada para procesos de fundición, requirió una verificación más detallada. A través del análisis por elementos finitos fue posible simular las condiciones de carga obtenidas en el modelo global, evaluar la respuesta de la unión frente a las solicitaciones críticas y comprobar que los esfuerzos máximos se mantuvieran dentro de los límites admisibles del material, en la Figura 3 se muestra una captura del modelo con los las fijaciones y la malla adoptada para el cálculo.

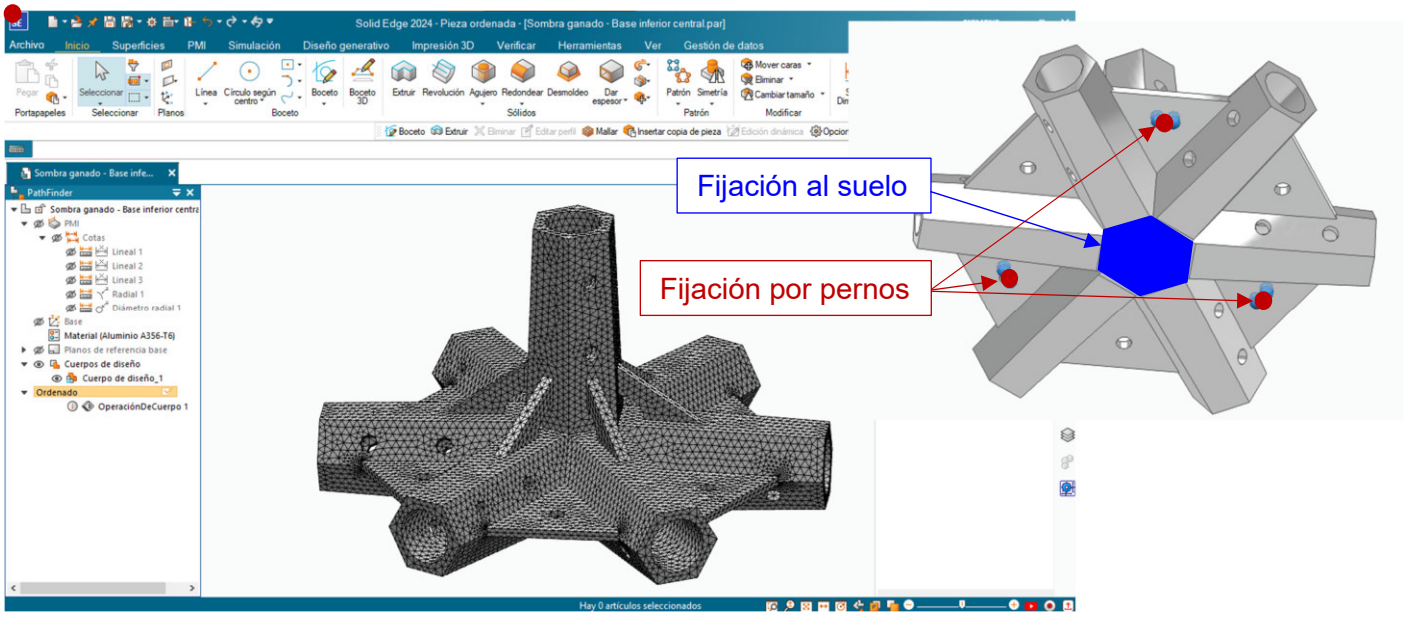



**Figura 3**. Preparación para el cálculo de elemento finitos.

En síntesis, el FEM no solo permitió adaptar criterios de cálculo de la ingeniería civil a un componente fabricado en aluminio, sino que también proporcionó una visión más completa y realista del desempeño de la unión, constituyéndose en una herramienta clave para el desarrollo y validación de la propuesta.

La comparación entre las tensiones de Von Mises ($\sigma$Von Mises) y el límite elástico del material ($fy$) es un criterio ampliamente utilizado en ingeniería estructural:

$$\sigma_{VonMises} \leq fy$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 3. Resultados y discusión

*3.1. Resultados del modelado*

El análisis estático realizado sobre la pieza de unión en aluminio A356-T6 permitió obtener resultados clave para evaluar su desempeño estructural. Se aplicaron cargas representativas equivalentes a las obtenidas en el modelo global de la estructura, alcanzando solicitaciones máximas de 7758 N en dirección horizontal y 4107 N en dirección vertical.

Las tensiones, el análisis por el criterio de Von Mises mostró un valor máximo de 40.5 MPa, muy por debajo del límite elástico del material (170 MPa), lo que confirma que la pieza trabaja dentro del rango elástico admisible, en la Figura 4 se muestra las tensiones sobre la pieza y en la Figura 5.

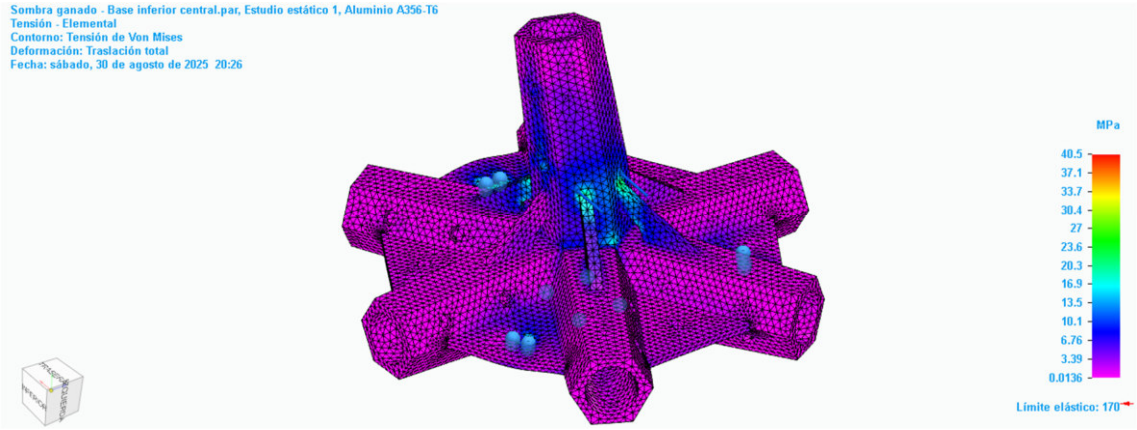



**Figura 4**. Resultado de tensiones por el análisis de elementos finitos.

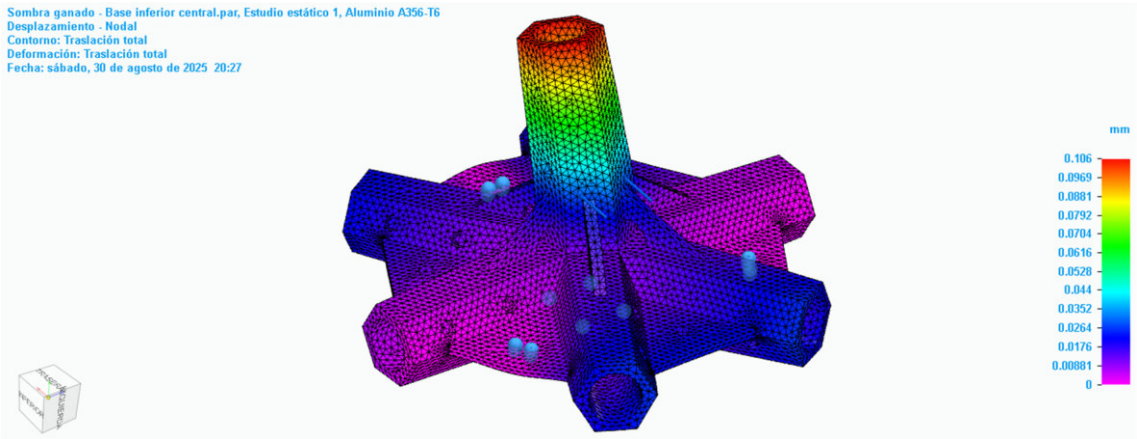



**Figura 5**. Resultado de deformaciones por el análisis de elementos finitos.

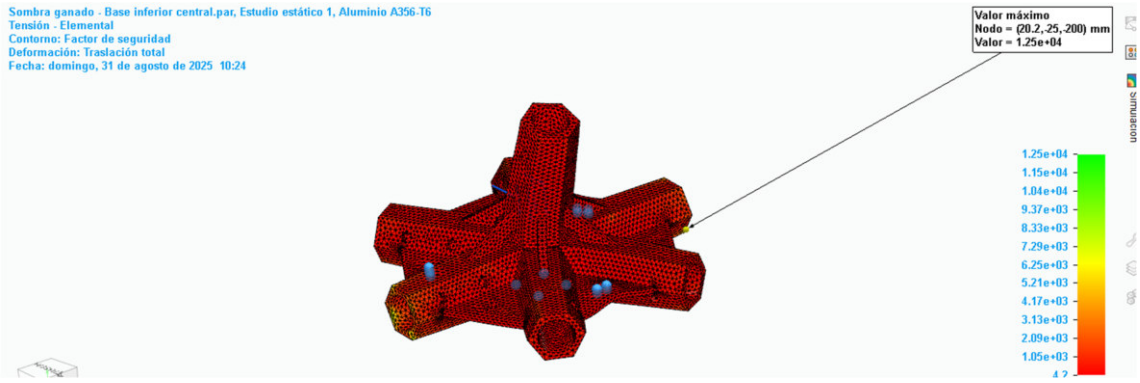



**Figura 6**. Resultado del factor de seguridad por el análisis de elementos finitos.

En cuanto a los desplazamientos máximos registrados fueron de 0.106 mm, provocando una rotación de 0,3° (1/20L), lo que indica que la pieza mantiene alta rigidez frente a las solicitaciones de servicio. Estos valores mínimos de deformación

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

son característicos de un apoyo que restringe tanto traslaciones como rotaciones, por lo que el nudo puede considerarse un empotramiento., como se muestra en la Figura 5.

El factor de seguridad mínimo obtenido fue de 4.2, lo que proporciona un margen adecuado para asegurar la confiabilidad de la unión frente a cargas extremas o condiciones imprevistas, como se muestra en la Figura 6. Estos resultados respaldan la viabilidad de la propuesta y constituyen un punto de partida sólido para futuras validaciones experimentales.

## 4. Conclusiones

El desarrollo de uniones específicas para estructuras reductoras de estrés térmico en bovinos representa un aporte fundamental para mejorar la seguridad y durabilidad de este tipo de sistemas. A través del análisis por elementos finitos, fue posible diseñar y verificar una pieza de unión en aluminio A356-T6, material que aportó ventajas de resistencia, ligereza y durabilidad frente a ambientes agropecuarios agresivos.

Los resultados mostraron que la unión cumple con los requisitos de seguridad estructural, manteniéndose ampliamente dentro de los límites de resistencia del material. Sin embargo, lo más relevante fue la integración de enfoques propios de la ingeniería mecánica, como el modelado FEM, para resolver un problema que excede las herramientas convencionales de la ingeniería civil. Este cruce metodológico permitió abordar geometrías no tradicionales y materiales poco habituales en estructuras civiles, marcando un camino para el desarrollo de soluciones innovadoras.

En conclusión, la investigación evidenció la importancia de no restringirse exclusivamente a los recursos normativos o software de cálculo tradicionales de la ingeniería civil, sino abrirse a metodologías híbridas que permitan diseñar uniones más seguras, adaptables y eficientes para el sector agropecuario.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rafaela (UTN-FRRa) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## Referencias

Alkam, A. (1 de 11 de 202). Causes of structural failures with steel structures. *International Journal of Engineering Research and Applications*, págs. 45–52.

Amadi, S. W., & Anaele, E. O. (01 de Septiembre de 2015). *EFFECTS OF HUMAN AND ANIMAL URINE ON NITRIDING FOR IMPROVED HARDNESS PROPERTY OF ALUMINIUM ALLOY MATERIALS*. Obtenido de eajournals: https://www.eajournals.org/wp-content/uploads/Effects-of-Human-and-Animal-Urine-on-Nitriding-for-Improved-Hardness-Property-of-Aluminium-Alloy-Materials.pdf?

Carrere, A. D. (2017). Teorías de falla. Santa Fe: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe.

Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI). (2018). *Libro Rojo.* Buenos Aires: Universidad FASTA Ediciones.

INTI. (2005). *Cirsoc 102: reglamento argentino de acción del viento sobre las construcciones.* Buenos Aires: INTI.

INTI. (2013). *Cirsoc 103: reglamento argentino para construcciones sismorresistentes.* Buenos Aires: INIT.

INTI. (2018). *Cirsoc 306: reglamento argentino de estructuras de acero para antenas.* Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina: INTI.

Maraveas, C. (1 de Enero de 2020). *Durability Issues and Corrosion of Structural Materials and Systems in Farm Environment*. Obtenido de MDPI: https://www.mdpi.com/2076-3417/10/3/990?

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Estructuras y construcciones civiles
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Aplicación del método de factores de la ISO 15686 en la determinación de la vida útil de construcciones patrimoniales de la ciudad de Santa Fe

## Application of the Factor Method of ISO 15686 in Determining the Service Life of Heritage Buildings in the City of Santa Fe

Presentación: 10/09/2025

**Augusto Baqué**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina
abaque@frsf.utn.edu.ar

**Francisco Dallo Coniglio**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina
frandalloconiglio@gmail.com

### Resumen

La estimación de la vida útil en las construcciones es necesaria para tomar decisiones en cuanto a restauraciones con el objetivo de su preservación. El caso de las estructuras patrimoniales de la ciudad de Santa Fe, Argentina, se torna particular, debido a la ausencia de métodos de evaluación de la durabilidad al momento de su construcción. Por eso, se utiliza la norma ISO 15686, la cual describe la utilización del Método de los Factores para obtener una predicción de la vida útil de carácter confiable. El Método tiene en cuenta variables como el diseño, mano de obra, materialidad, condiciones climáticas interiores y exteriores, uso y mantenimiento, los cuales tienen escalas de valores asignadas según la influencia de estos sobre el caso en estudio. La obtención del valor de vida útil estimada, servirá como indicador para modificar la gestión y toma de decisiones que preserven el estado de la construcción.

**Palabras clave:** Vida útil, Durabilidad, ISO 15686.

### Abstract

The estimation of the service life in buildings is necessary to make decisions regarding restorations with the objective of their preservation. The case of the heritage structures in the city of Santa Fe, Argentina, becomes particular due to the absence of durability evaluation methods at the time of their construction. Therefore, ISO 15686 is used, which describes the application of the Factor Method to obtain a reliable prediction of service life. The Method takes into account variables such as design, work execution, materiality, indoor and outdoor environment, usage and maintenance, which have assigned value scales based on their influence on the case under study. The obtained estimated service life value will serve as an indicator to modify management and decision-making that preserves the state of the building.

**Keywords:** Service life, durability, ISO 15686.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

La estimación de la vida útil de las construcciones es un instrumento esencial para entender el comportamiento de las edificaciones a lo largo de todo su ciclo de vida, desde las fases iniciales de diseño y ejecución, hasta su eventual desmantelamiento y demolición. Mediante este análisis no solo se busca asignar un valor temporal a la durabilidad, sino también aportar criterios técnicos para orientar intervenciones y proponer planes de mantenimiento, que garanticen tanto la preservación, como la optimización de recursos. Previo a esto, se deben establecer criterios para arribar a un resultado lo más preciso posible, buscando reducir las incertidumbres existentes con una eficiente búsqueda y depuración de datos. Los criterios devienen de un análisis de la norma ISO 15686, la cual sienta las bases y condiciones para la aplicación de un correcto análisis.

El concepto de vida útil comenzó a ser abordado en las décadas de 1970 y 1980, cuando trabajadores y especialistas observaron que los materiales utilizados presentaban distintos tiempos de deterioro, por lo que se requería un análisis para conocer los costos y mantenimientos a efectuar en etapas posteriores a su puesta en servicio. Esta iniciativa dio lugar a estudios e investigaciones dentro del campo de la durabilidad, estableciéndose pautas y normativas para contemplar un criterio de estimación de vida útil lo más certero posible. De allí salieron nacieron diversas documentaciones, destacando la propuesta por RILEM en 1989 (RILEM TC 71-PSL,1989) o la norma ISO 6241 (ISO/ TC 59, 1984), las cuales presentaban recomendaciones y parámetros a tener en cuenta para una estimación de la vida útil. No fue sino hasta el año 2000, en el cual, el comité técnico dentro de ISO, referido al sector de la construcción (TC 19, SC 14), publicó un primer capítulo de la norma ISO 15686–1 (ISO/TC 59/SC 14, 2011), relacionado al establecimiento de los principios generales para la planificación de vida útil de los edificios.

Desde la concepción del término de vida útil, su abordaje se vio influido por tres enfoques para su determinación: los métodos probabilísticos, los cuales hacen uso de modelos matemáticos (principalmente el modelo de Markov), en donde se estima la probabilidad de falla en un período estimado; los métodos deterministas, en donde se modelan procesos de degradación traducidos a factores y funciones en el tiempo (como se plantea en la norma ISO 15686); y modelos de ingeniería, en donde se combinan tanto los probabilísticos como los deterministas, generando un análisis de mayor precisión a raíz de una exigencia mayor en la recopilación de datos.

En Argentina, la normativa existente sobre el tema es prácticamente nula y parte de ella se encuentra desactualizada. De forma general, se cuenta con la IRAM 11553:1969 “Durabilidad de los edificios” (IRAM, 1969), donde se establece la categoría del edificio según su vida útil, mencionando los principales agentes nocivos que inciden en la durabilidad de los diversos materiales presentados. Por otro lado, y aplicado a estructuras de hormigón, se utiliza el “Reglamento argentino de estructuras de hormigón” CIRSOC 201:2005, en donde se fijan los requisitos de durabilidad para alcanzar una vida útil de 50 años, pero se restringe su aplicación a construcciones patrimoniales. La falta de normativas locales y su aplicación a construcciones refuerzan la necesidad de adaptar metodologías internacionales dentro del campo de aplicación local, previendo la existencia de factores climáticos, constructivos y agentes perjudiciales regionales.

El objetivo de tomar como caso de estudio construcciones patrimoniales radica en la necesidad de preservación de edificaciones que presentan un alto valor histórico, ubicadas dentro de la ciudad de Santa Fe y zonas aledañas. A partir del establecimiento de criterios, ejecución de relevamientos, y obtención de documentación histórica, serán establecidos los parámetros para facilitar la gestión, conservación y toma de decisiones sobre el patrimonio en estudio.

## 2. Metodología

Como inicio de introducción al método, se establecen el tipo de construcciones a analizar. Esto es, optar por aquellas que contemplen similitudes constructivas y estructurales entre sí, simplificando su aplicativo. Para ello se cuenta con un catálogo de patrimonio urbano (Universidad Nacional del Litoral, FADU, 1993), del cual se extrajeron las arquitecturas a evaluar. Éstas denotan similitudes en su materialidad, presentando mamposterías portantes, bovedillas de perfilería metálica y revestimientos de mármol y yeso.

A su vez, en la norma ISO 15686–10 (ISO/TC 59/SC 14, 2010) se define la categoría de estudio. Al ser construcciones de más de 50 años, en la actualidad, la mayoría puede encontrarse en estado de abandono, por lo que se toman como caso de análisis aquellas edificaciones que se encuentren en servicio, definiéndose la etapa de estudio 9.2 “Mantenimiento y

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

condiciones de administración", indicando construcciones que se encuentren en uso y con períodos de mantenimiento regulares. A su vez, se descartan construcciones que hayan contado con una vasta cantidad de cambio de usos.

La etapa de estudio adoptada especifica las partes de la norma a utilizar para efectuar la metodología de aplicación, siendo estas:

- ISO 15686–3 (ISO, 2002): auditoría secundaria de implementación y adecuación del cuidado de la vida útil.
- ISO 15686–7 (ISO, 2017): estudios de desempeño para determinar la vida útil estimada.
- ISO 15686–8 (ISO, 2008): selección de datos de referencia de vida útil y estimación de vida de servicio.
- ISO 15686–9 (ISO, 2008): evaluación de datos de vida útil.

### 2.1 *Método de los Factores*

El método de los factores, dado por la ISO 15686–8 (ISO/ TC 59/ SC 14, 2008), mediante una ecuación, permite obtener la Vida Útil Estimada (VUE) en años. Ésta viene dada por la afectación de la Vida Útil de Referencia (VUR) por medio de 7 factores (1).

$$\boldsymbol{VUE = VUR \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G} \quad (1)$$

Siendo *A* la calidad de los materiales (refleja la calidad del material y es un indicador de la calidad del diseño del propio componente o construcción), *B* el nivel de diseño (integración del componente dentro de la construcción y evalúa el grado de protección frente a los agentes de deterioro), *C* el nivel de ejecución (se valora si cumple con normativas, recomendaciones técnicas y buenas prácticas constructivas. A su vez, abarca aspectos como el almacenamiento de materiales, protección durante la instalación, facilidad del montaje, cantidad de operaciones necesarias, entre otros), *D* las condiciones de exposición interiores (evalúa la exposición del componente a factores de deterioro dentro del edificio, considerando tanto la intensidad de esos agentes, como el uso general de la construcción y las condiciones locales particulares), *E* las condiciones de exposición exteriores (analiza la exposición del componente a agentes de deterioro externos y su severidad. Se tiene en cuenta el uso global de la edificación y las condiciones específicas del entorno. Además, se valora si su acción afecta a un solo elemento o repercute sobre otros), *F* las Condiciones de uso (refiere al impacto que tiene la utilización del edificio, local o activo construido sobre el componente) y *G* el nivel de mantenimiento (refleja el grado de mantenimiento previsto o practicado. Se pueden incluir aspectos relacionados con la limpieza y la posibilidad de incorporar agentes externos no habituales durante estas tareas).

La adopción del valor numérico de los factores deviene de una inspección visual, relevamiento fotográfico y de antecedentes, a partir de sub – factores especificados. Por lo general, este valor variará entre 0,8 y 1,2, efectivizando una ponderación de los sub – factores y obteniendo una cifra final por factor.

### 2.2 *Agentes de deterioro*

Resulta de gran importancia establecer los agentes de riesgo presentes, que afectan de manera directa o indirecta a los componentes en su conjunto, que conforman la construcción.

Dentro de los agentes presentes que afectan a las construcciones se encuentran: Mecánicos (gravedad, deformaciones vibraciones y ruidos), Electromagnéticos (radiación, electricidad, magnetismo), Térmicos (niveles extremos o cambios bruscos de temperatura), Químicos (aguas y solventes, agentes oxidantes, agentes reductores, ácidos, bases, sales, químicamente neutros) y Biológicos (vegetación, animales, hongo y moho).

Éstos se tratan de los agentes más comunes, pero puede ser que no todos apliquen. Esta información deviene de diversas fuentes tales como la retroalimentación a partir de datos recabados en las inspecciones, información existente o evaluaciones efectuadas.

### 2.3 *Vida Útil de Referencia - VUR*

La norma ISO 15686–8:2008 establece el procedimiento para determinar la VUR. Al determinar su estudio desde la planificación de la construcción, se debe constituir un criterio para adoptar un valor numérico y poder ejecutar el modelo

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

matemático. A raíz de no poseer la información directa, debido a que las construcciones cuentan con más de un siglo de antigüedad, las pautas para la determinación del criterio se basan en testimonios allegados a las etapas de planificación, construcción, refacción y mantenimientos de la obra y en referencia bibliográficas y normativas vigentes.

Siendo que ninguna normativa especifica explícitamente la vida útil de una construcción patrimonial, ni de sus elementos constructivos, se sirve de éstas como referencia y a fines de optar por el correcto criterio y posterior adopción de una vida útil vinculada al estado de edificación. Se sabe además que la gran mayoría de las construcciones a evaluar, en su etapa de planificación y diseño, no fueron previstas para funcionar como patrimonio, por lo que es comprensible la falta de datos sobre la vida útil de referencia. Por ello resulta de utilidad introducir el concepto de rendimiento de ciclo de vida de una construcción, efectuando una evaluación en el desempeño de un edificio a lo largo de su vida útil, presente en la Figura 1.

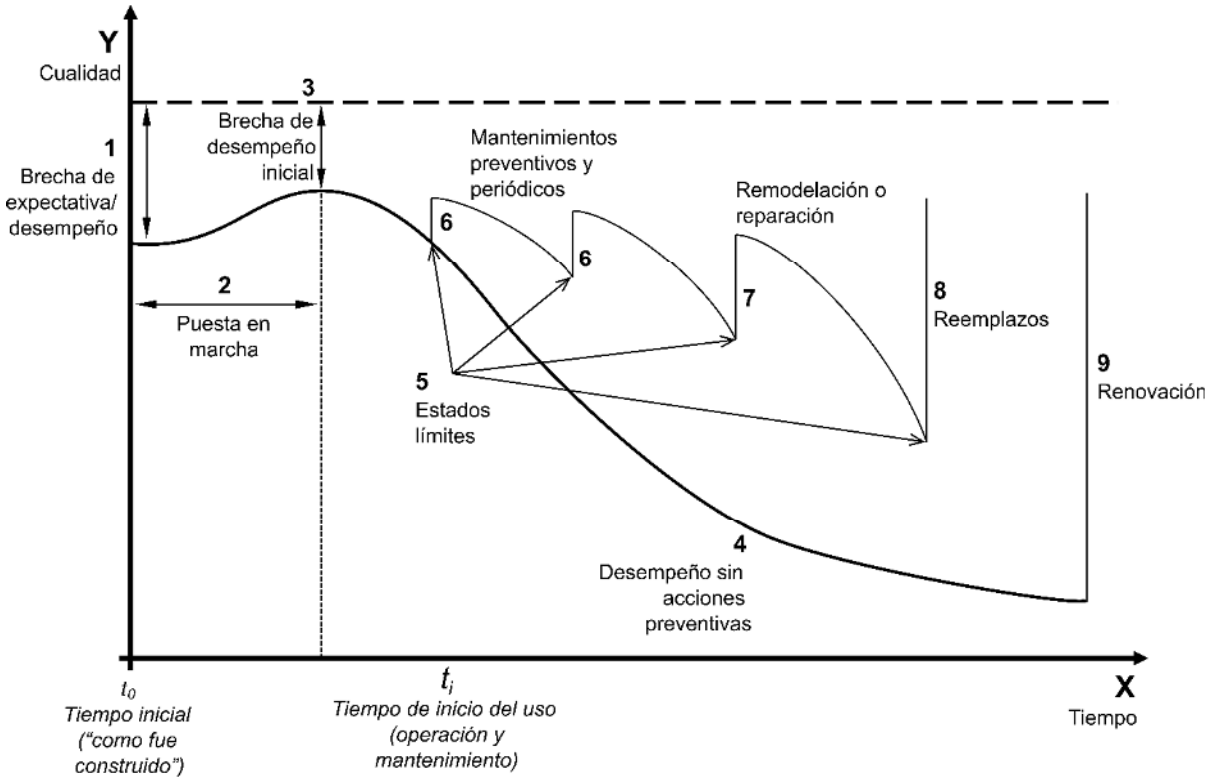



**Figura 1**. Ciclo de vida de una construcción

La línea de trazos representa la performance esperada por el comitente, existiendo una brecha inicial debido a fallos o daños efectuados en el período de construcción. Posterior a la entrega, esta performance tiende a disminuir, a consecuencia del bajo mantenimiento que se le da a la edificación en su etapa inicial. Generalmente las etapas de mantenimiento serán reactivas, es decir, comenzarán a efectuarse a medida que surjan testigos visuales de los problemas que afecten la matriz del inmueble, como pueden ser pequeñas fisuras o manchas de moho. La idea principal es mantener lo más reducida posible la brecha entre el comportamiento esperado y el real, lo que derivará en una mejora en cuanto al funcionamiento y comportamiento de la edificación.

Las normativas consultadas IRAM 11553 (IRAM, 1969), CSA S478:19 "Guideline on Durability in Buildings" (Canadian Standard Association, 2019), European Organization for Technical Approvals (EOTA 1998 – 2010), British Estándar BS 7543:1992 (BSI, 1992), establecen diversos períodos de vida para los variados tipos de construcciones, presentando un rango que va de 50 a 120 años.

## 3. Resultados y discusión

A partir del trabajo efectuado, se procede a establecer un criterio para los casos en estudio pertinentes, ejecutando una adopción numérica de los factores y sub – factores e iniciando la evaluación con construcciones de menor envergadura.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Se determinó que los 7 factores inciden en la afectación de la VUR, por lo que se estableció un rango para cada sub – factor. Este rango, establecido por la norma, varía de 0,8 a 1,2, representando un desmejoramiento y un aumento en la vida útil respectivamente. A su vez, la normativa fija estos valores como límites, existiendo la posibilidad de reducirlos en caso de contar con información de mayor certeza que justifique dicho cambio. Estos sub – factores dependerán de un grado de afectación de los mecanismos de deterioro que corresponde a una escala que variará de 1 a 5, siendo el primero la mejor condición (representando un incremento de la VUR) y el segundo, la peor (disminución de la VUR). Cabe la posibilidad de la existencia de factores que no permitan un incremento de la vida útil, como puede ser el mantenimiento de la construcción, que no aportará modificaciones positivas.

Se instauran entonces los rangos de cada factor a evaluar, siendo:

- Factor A – Calidad de los materiales: Rango de 0,8 a 1,2, con intervalos sucesivos de 0,1. Si bien se efectúa un relevamiento de todos los elementos, es probable que no se cuente con datos específicos de cada material (procedencia, calidad, entre otros).
- Factor B – Nivel de diseño: Rango de 0,8 a 1,2, con intervalos sucesivos de 0,1. La adopción de estos límites implica que las etapas de diseño son de mayor relevancia en instancias de proyecto, no así cuando ya se encuentra en servicio la construcción.
- Factor C – Nivel de ejecución: Rango de 0,8 a 1,2, con intervalos sucesivos de 0,1. Depende principalmente de la información con la que se cuente al momento de la aplicación del criterio. Al transcurrir una gran cantidad de tiempo desde la materialización de la edificación, se plantea una incertidumbre, que se corresponde principalmente a la calidad de las entrevistas y documentaciones existentes.
- Factores D y E – Condiciones de exposición (interior y exterior): Rango de 0,9 a 1,1, con intervalos sucesivos de 0,05. Estos pueden medirse con un grado de exactitud elevado, contando con basta cantidad de antecedentes que elevan la precisión de estudio, así como de la evaluación in situ de cada construcción.
- Factor F – Condiciones de uso: Rango de 0,9 a 1,1, con intervalos sucesivos de 0,05. Al igual que los factores D y E, si bien se corresponde a la calidad de los sistemas de gestión, es información de fácil acceso y queda expuesta en las evaluaciones y las condiciones en las que se encuentren los elementos relevados.
- Factor G – Nivel de mantenimiento: Rango de 0,8 a 1,0, con intervalos sucesivos de 0,05. Este factor no extiende la vida útil, ya que se basa en mantener las condiciones iniciales en la que se encontraba la construcción.

Las estrategias para la obtención de datos, además de contar con información y archivos existentes, constan de revisión de normativas que establezcan una VUR a utilizar para construcciones patrimoniales y entrevistas efectuadas a las diferentes personas que frecuenten la edificación, dueños, constructoras responsables de las refacciones, y en los casos que sea posible, responsables de la construcción inicial. Debido al desconocimiento de la vida útil de diseño por la inexistencia de registros que brinden información sobre dicho suceso y la falta de conocimiento de estos conceptos en instancias de concepción de las construcciones patrimoniales, el valor adoptado de la vida útil de referencia deviene del análisis realizado y el criterio adoptado. La teoría indica que la diferencia entre la vida útil estimada y la vida actual adquiera un valor positivo (la construcción sigue erigida en la actualidad, lo que implica la incompatibilidad con valores negativos).

Para los casos a evaluar, es de gran relevancia la información recabada, en complemento con la visita de inspección al inmueble, para constatar el estado de la edificación y contrastar documentación existente.

## 4. Conclusiones

La aplicación del método de los factores de la norma ISO 15686 permite establecer un marco metodológico para la estimación de vida útil de edificaciones patrimoniales en la ciudad de Santa Fe. Aun cuando la información disponible se halla de manera parcial, los criterios adoptados y los rangos asignados a los factores, resultan adecuados para un análisis preliminar.

El método resulta ser una herramienta adaptable al contexto local, aportando criterios técnicos que favorecen la gestión de futuras refacciones y remodelaciones, como también la preservación del patrimonio edilicio.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En instancias posteriores se ejecutará la validación del método mediante el relevamiento de las construcciones, demostrando la aplicabilidad del criterio y sentando bases para su aplicación de forma general en entornos similares para estos tipos de construcciones.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF) y el Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI).

## Referencias bibliográficas

ISO 15686-1, (2011). “Buildings and constructed assets-Service life planning- Part 1: General principles”.

ISO 15686-8 (2008). “Buildings and constructed assets — Service-life planning-Part 8: Reference service life and service-life estimation”.

ISO 15686-3 (2002). “Buildings and constructed assets — Service-life planning- Performance audits and reviews”.

ISO 15686-9 (2008). “Buildings and constructed assets — Service-life planning- Guidance on assessment of service-life data”.

ISO 15686-10 (2010). “Buildings and constructed assets — Service-life planning- When to assess functional performance”.

ISO 15686-7 (2017). “Buildings and constructed assets — Service-life planning-Performance evaluation for feedback of service life data from practice”.

JIT 2024

ISO 6241, (1984). “Performance standards in building-Principles for their preparation and factors to be considered”.

RILEM TC 71-PSL, (1989). “Systematic methodology for service life prediction of building materials and components”.

Universidad Nacional del Litoral, Centro de publicaciones, FADU, (1993). “Inventario: 200 Obras del Patrimonio Arquitectónico de Santa Fe”.

IRAM 11553, (1969). “Durabilidad de los edificios”.

Canadian Standard Association, (2019), (CSA S478:19). “Guideline on Durability in Buildings”.

British Estándar, (1992), BS 7543:1992.

European Organization for Technical Approvals (2010), (EOTA 1998 – 2010).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

MENCIÓN ESPECIAL

**Eje temático:** Estructuras y construcciones civiles
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Aplicación del georradar para la evaluación y diagnóstico de estructuras

# Ground-penetrating radar application for the evaluation and diagnosis of structures

Presentación 30/10/2025

**Ruth Gauna Pinatti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
rgaunapinatti@frsf.utn.edu.ar

**María Ema Sarli**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
sarliema890@gmail.com

**Camila Villalba**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
camivillalbaa0@gmail.com

## Resumen

Los georradares son herramientas que emiten y reciben ondas electromagnéticas para analizar materiales sin dañarlos. La antena digital HS 350 de GSSI, capaz de explorar grandes profundidades, es útil para detectar estructuras civiles soterradas. Este estudio se centra en la aplicación del georradar en un campo experimental con distintos materiales y objetos enterrados, realizando mediciones variando la constante dieléctrica y la profundidad con el propósito de calibrar la respuesta del radar y establecer criterios de aplicación y confiabilidad. Los resultados indican que la detección es más eficaz cuando los objetos presentan alto contraste dieléctrico, como caños con agua, mientras que mayores profundidades reducen la nitidez. Además, se analiza un caso de estudio en el Desagüe Llerena de Santa Fe. En este sentido, el trabajo se orienta a validar el georradar como técnica no destructiva para relevamiento de infraestructuras inaccesibles y aporta base para futuros estudios en ingeniería civil.

**Palabras clave:** Georradar; Detección; Estructuras soterradas; Dieléctrico; Ensayo no destructivo

## Abstract

Ground-penetrating radars are tools that emit and receive electromagnetic waves to analyze materials without damaging them. GSSI's HS 350 digital antenna, capable of exploring great depths, is useful for detecting buried civil structures. This study focuses on the application of ground-penetrating radar in an experimental field with different buried materials and objects, taking measurements by varying the dielectric constant and depth to calibrate the radar's response and establish application and reliability criteria. The results indicate that detection is more effective when objects present a high dielectric contrast, such as pipes filled with water, while greater depths reduce sharpness. In addition, a case study of the Llerena Drain in Santa Fe is analyzed. In this regard, the work aims to validate ground-penetrating radar as a non-destructive technique for surveying inaccessible infrastructure and provides a basis for future studies in civil engineering.

**Keywords:** Ground-penetrating radar; Detection; Underground structures; Dielectric; Non-destructive testing

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

1.1 *Aplicación del georradar en la detección y evaluación de estructuras*

En la actualidad, se dispone de múltiples metodologías orientadas a la detección, evaluación y análisis de deterioros en diversas tipologías de estructuras civiles. No obstante, en la mayoría de los casos resulta necesario realizar intervenciones destructivas en la estructura para determinar con precisión su estado, lo que en muchos escenarios resulta inviable. En este contexto, la implementación de georradares constituye una alternativa para efectuar inspecciones no destructivas y no invasivas. Estos dispositivos operan mediante una unidad emisora de ondas electromagnéticas y una unidad receptora acoplada a un sistema digital de registro, el cual procesa las mediciones obtenidas y determina las profundidades en las que se encuentran los elementos reflectores y los distintos materiales atravesados por las ondas.

El georradar se configura como una técnica electromagnética de prospección no destructiva que permite obtener imágenes de alta resolución del subsuelo y de las estructuras internas. Opera en un amplio espectro de frecuencias, lo que condiciona la capacidad de penetración y la resolución espacial del análisis. El campo electromagnético emitido por el radar interactúa con el medio del objeto de estudio y, en cualquier interfaz donde se presente una variación en la constante dieléctrica, la onda es parcialmente reflejada, transmitida y posteriormente registrada por la antena receptora. (Benedetto et. al, 2015: 1).

La “constante dieléctrica” constituye una propiedad electromagnética fundamental para la caracterización de materiales como suelos, hormigón, arena o agua, determinando la velocidad de propagación de una señal electromagnética en su interior (Morey et. al, 1998: 1-2). Esta magnitud se encuentra directamente relacionada con la conductividad y la velocidad de transmisión de energía del material. En este estudio, el equipo empleado considera un rango de valores de constante dieléctrica comprendido entre 1 y 81, donde 1 corresponde al aire y 81 al agua. Cuando una señal electromagnética incide sobre un límite entre materiales con diferentes constantes dieléctricas, la onda experimenta variaciones significativas que permiten determinar la profundidad del reflector. Este fenómeno, análogo a la reflexión de ondas luminosas en medios con diferentes propiedades ópticas, constituye la base para la detección y localización de estructuras subterráneas.

El contraste entre valores dieléctricos condiciona la respuesta del radar. Una transición de un valor alto a uno bajo genera una reflexión negativa, representada como un sector opaco en negro, mientras que un cambio de bajo a alto produce una reflexión positiva, visualizada en blanco. A mayor diferencia entre los valores dieléctricos, mayor es el contraste y la resolución del reflector obtenido.

1.2 *Análisis e interpretación de radargramas*

La información procesada se representa gráficamente mediante radargramas, donde la profundidad se indica en el eje vertical y la distancia recorrida en el eje horizontal. Cada discontinuidad o estrato que refleja las ondas electromagnéticas queda registrado en el radargrama, posibilitando la identificación precisa de la posición y profundidad de los objetivos detectados.

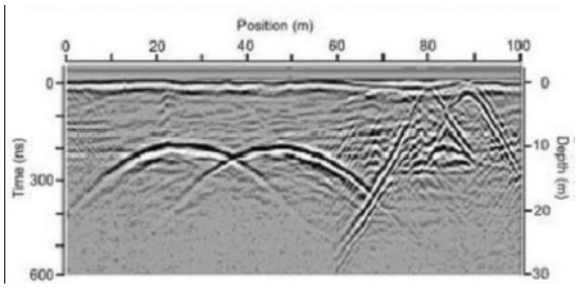



**Figura 1**. Radargrama como resultado de medición

En el radargrama se observan hipérbolas con diferentes tonalidades que corresponden a los diversos materiales soterrados. Este fenómeno se produce porque el equipo no detecta el objeto únicamente cuando se encuentra directamente sobre él, sino que inicia su detección en registros previos a dicha posición y la mantiene en registros posteriores. El vértice de la hipérbola indica la localización real del objeto. La geometría de la hipérbola depende principalmente de la velocidad de propagación de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

las ondas a través del material; a mayor velocidad (relacionada con un menor valor dieléctrico), más amplias serán las hipérbolas, y viceversa.

## 2. Metodología

2.1 *Equipamiento empleado*

El equipo utilizado pertenece a la firma GSSI, y se distinguen los siguientes componentes:

- Antena digital HS350 con odómetro integrado para la medición de distancias.
- Unidad de control SIR 4000, la cual cuenta con una pantalla de visualización que permite ver las lecturas en tiempo real o en modo de reproducción. En ella se realizan las configuraciones para luego realizar las mediciones en campo, se configura principalmente el modo de trabajo, el dieléctrico a utilizar, la profundidad a evaluar y la cantidad de escaneos.
- Programa de procesamiento de datos RADAN 7.los detalles sobre la muestra y la realización de la encuesta en base al Índice.

**Figura 2.** Equipo de la firma GSSI

**Figura 3**. Unidad de control SIR 4000

2.2 *Implementación de un campo experimental para la puesta a punto del equipo*

Se desarrolló un campo experimental con el fin de analizar y caracterizar el desempeño del equipo ante distintos estratos de suelo, diferenciados por sus propiedades dieléctricas, así como frente a diversos objetos enterrados.

**Figura 4**. Campo experimental de pruebas.

El campo experimental se emplazó en un predio correspondiente a la facultad ubicado en el puerto de la ciudad de Santa Fe. El mismo consistió en una unidad de ensayo, la cual radica en una excavación de aproximadamente 3 metros de largo por 2 metros de ancho, subdividida en 6 módulos de 1,00 metro de ancho, 1,00 metro de largo y 1 metro de profundidad. En esta unidad de prueba se enterraron diferentes objetos, constituidos por distintos materiales (y, consecuentemente, distintos dieléctricos), tales como ladrillos cerámicos macizos y huecos, tuberías de diferentes materiales (hierro, PVC y cerámico) y distinto diámetro, un balde colocado del revés dispuesto de forma tal que permita la captación de aire en su interior, y una chapa metálica sinusoidal plegada en “bovedilla” con el mismo propósito. Se colocó, por último, un caño de PVC ⌀110 con un codo y un tramo vertical, dejándole su extremo superior expuesto aproximadamente 10 centímetros sobre el nivel de terreno natural, para realizar medidas tanto con el caño vacío como lleno de agua.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Las mediciones se efectuaron en conjuntos de tres hiladas sobre el lateral de 3 metros y en pares de hiladas en el extremo de 2 metros, como se muestra en la Figura 5.

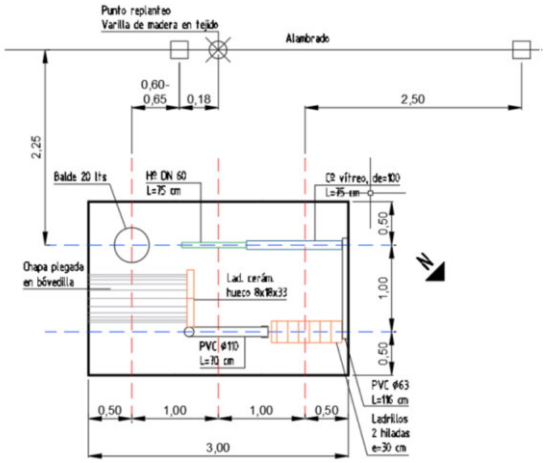



**Figura 5**. Plano del campo de pruebas realizado

Las mismas se organizaron de manera sistemática con el fin de evaluar la respuesta del georradar bajo distintas configuraciones de trabajo. En el lateral de 3 metros se dispusieron tres ejes de medición, identificados como Eje 1, Eje 2 y Eje 3. Sobre cada uno de ellos se configuraron lecturas a profundidades de 2 m, 3 m y 4 m. La variación de la profundidad tuvo como objetivo analizar la capacidad de penetración de la antena y el grado de resolución de los objetos enterrados a diferentes niveles.

En cada profundidad se realizaron barridos modificando la constante dieléctrica ingresada en el equipo. Este ajuste resulta necesario ya que la constante dieléctrica influye en la estimación de la velocidad de propagación de la onda y, en consecuencia, en la precisión de la profundidad calculada. La metodología aplicada consistió en variar dicho parámetro en tres etapas:

- De 1 en 1, desde el valor 1 hasta el 10.
- De 2 en 2, desde el valor 10 hasta el 30.
- De 10 en 10, desde el valor 30 hasta el 80.

De esta manera se buscó cubrir todo el rango operativo del equipo (aire ≈ 1 hasta agua ≈ 81), con el fin de identificar qué configuraciones se corresponden mejor con las condiciones reales del terreno y de los objetos enterrados. Posteriormente, en el extremo de 2 metros se plantearon dos ejes de medición, con registros a profundidades de 1, 2, 3 y 4 metros, aplicando la misma metodología de variación de la constante dieléctrica. Esta disposición perpendicular permitió contrastar resultados entre ambos sentidos de lectura, observando posibles diferencias en la respuesta del radar debido a la orientación del barrido y a la interacción con los distintos materiales.

### 2.3 *Caso de estudio*

Un caso de estudio y calibración del equipo en condiciones de obra real correspondió al Desagüe Llerena, un conducto entubado para el escurrimiento de excedentes pluviales, ejecutado en la ciudad de Santa Fe y finalizado en el año 2017. Se trata de una infraestructura de hormigón armado, con sección rectangular conformada por dos vanos, cuyo trazado se desarrolla bajo la calzada de la calle Llerena —que le otorga su denominación— y culmina en la Laguna Setúbal. La elección de esta obra resultó de particular interés, dado que el conducto atraviesa distintos esquemas de estratigrafía superficial, con variabilidad de materiales, tales como pavimentos rígidos y flexibles apoyados sobre capas de suelo compactado, así como sectores en los que la cobertura se reduce a una única capa de arena de río. Esta diversidad estratigráfica aportó un marco propicio para enriquecer el análisis. La investigación que se llevó a cabo consto de las actividades detalladas a continuación:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- Ubicación del conducto de acuerdo con los planos conforme a obra, el cual también aportó información sobre las características geométricas de la sección transversal y la altimetría del trazado permitiendo identificar la variación de la cota de tapada a lo largo de su recorrido.
- Determinación de la profundidad de tapada y su sección por medio de mediciones en dos secciones dispuestas en sentido transversal respecto a la dirección de escurrimiento. El primer relevamiento se realizó sobre un sector próximo a la desembocadura, donde por encima del caño se encuentra una única fase constituida por arena de río producto del dragado del fondo de la laguna. En dicho caso se utilizó un valor de dieléctrico de 14 para la medición. La segunda instancia de medición se efectuó sobre la calzada. Allí, de acuerdo con los planos conforme a obra, la tapada existente es de 0,9 m aproximadamente.
- Con el empleo del software Radan 7, se utilizaron una serie de filtros para visualizar de mejor manera los radargramas. De manera consecutiva se aplicaron los siguientes filtros: Time zero; Background Removal y Noise Band; Migration; Gain; y Deconvolution.
- Se visualizaron hipérbolas superiores registradas y la ubicación prevista del conducto. Asimismo, se identificaron otras hipérbolas que podrían corresponder al tabique central que divide los dos vanos del conducto. Estos resultados se encuentran en concordancia con la información proporcionada por la documentación conforme a obra.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 *Campo experimental en predio*

En base a los resultados del estudio del campo experimental, se observó que la nitidez del radargrama depende del dieléctrico del material. Específicamente, a medida que el dieléctrico disminuye, las ondas se aprecian con mayor claridad en la imagen. Por el contrario, un dieléctrico alto produce un radargrama menos nítido, que se traduce en un color gris casi homogéneo.

Durante el estudio, se buscó la detección de objetos puntuales enterrados que fueron mencionados anteriormente, los cuales se representan gráficamente en el radargrama como una hipérbola. Este fenómeno se debe a que el equipo detecta las reflexiones de la señal electromagnética no solo directamente sobre el objeto, sino también en los barridos anteriores y posteriores a esa posición. La ubicación real del objeto corresponde al vértice de la hipérbola y la forma de la misma está directamente influenciada por la velocidad de las ondas en el material, que a su vez depende del dieléctrico. Una velocidad mayor (dieléctrico menor) resulta en una hipérbola más ancha, mientras que una velocidad menor (dieléctrico mayor) produce una hipérbola más cerrada. Como objeto puntual se buscó la detección de un caño de PVC con el que se hicieron varias pruebas variando diferentes parámetros como ser profundidad, dieléctrico y se realizaron pruebas con sección vacía, es decir, el caño con aire dentro y sección llena, es decir el caño con agua. Se obtuvieron las lecturas que se muestran a continuación:

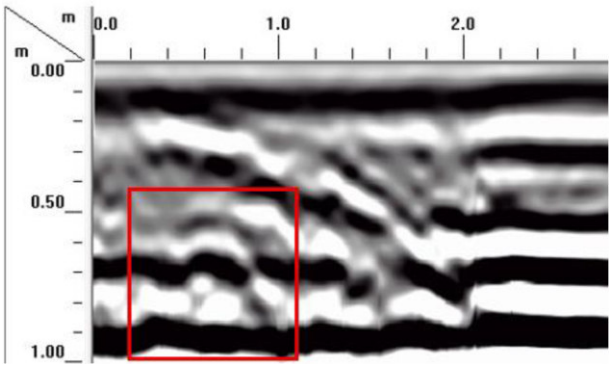



**Figura 6**. Lectura a prof. 2m con caño vacío, dieléctrico 6

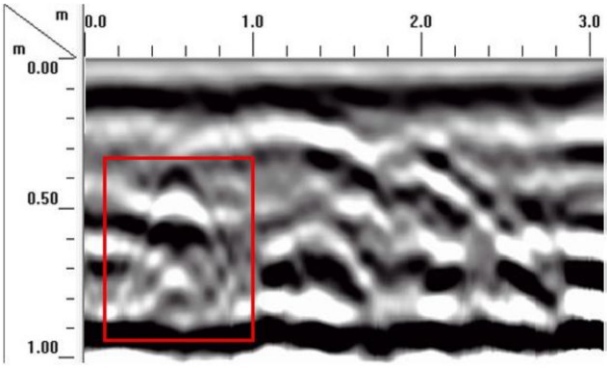



**Figura 7**. Lectura a prof. 2m con caño con agua, dieléctrico 6

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

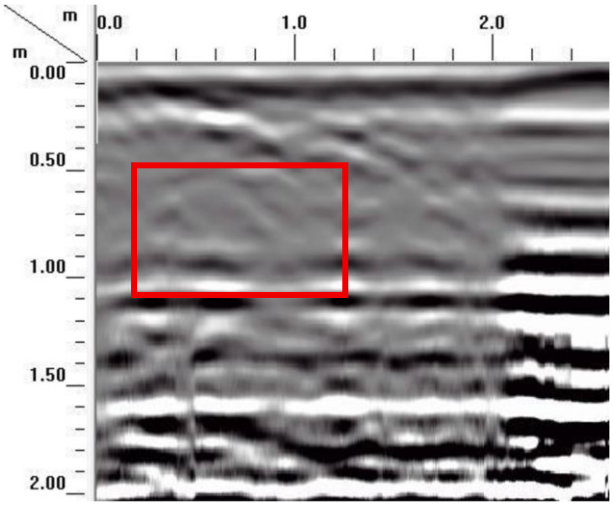



**Figura 8**. Lectura a prof. 3m con caño con agua, dieléctrico 6

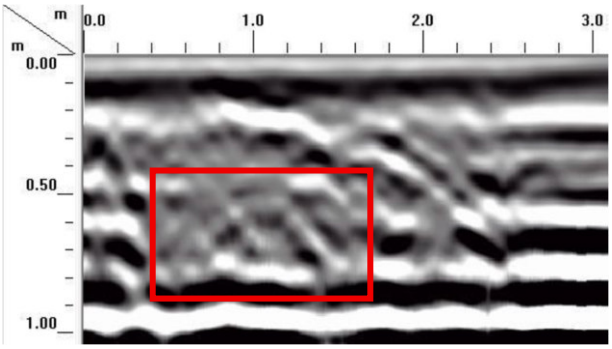



**Figura 9**. Lectura a prof. 2 m con caño con agua, dieléctrico 7

Como se observa en las lecturas realizadas sobre el "Eje 2", y de acuerdo con el plano del campo experimental mostrado en la Figura 5, teniendo en cuenta que la escala mostrada sobre el eje "x" corresponde a la distancia recorrida con el georradar, y la distancia sobre el eje "y" corresponde a la profundidad de la lectura, se admite que la lectura corta en un plano perpendicular los objetos soterrados mostrados en la figura mencionada. Contrastando las imágenes y de acuerdo al marco teórico fundamentado, se pueden observar hipérbolas más notorias en las Figuras 7 y 9, correspondiéndose con el caño de PVC soterrado, dadas las distancias observadas en ambos ejes. Como se puede observar, la lectura tomada con el caño lleno de agua es más nítida que la lectura correspondiente al caño lleno de aire, distinguiéndose que las reflexiones de onda asociadas al caño con agua presentan mayor contraste y continuidad en los patrones, lo que facilita su identificación dentro del perfil, mientras que en el caso del caño con aire las señales aparecen más difusas y con menor definición. También se puede observar en la figura 9 que las hipérbolas que corresponden a la ubicación del caño lleno de agua se ven más difusas al aumentar el dieléctrico configurado, esto confirma la influencia del contenido del caño en la respuesta del georradar y la relevancia del contraste dieléctrico en la detección de objetos soterrados. La incertidumbre en las mediciones se puede reducir significativamente aumentando el número de lecturas en el sector analizado, asegurando condiciones ambientales óptimas y una superficie plana ya que la irregularidad de la misma puede afectar las observaciones. Estas prácticas facilitan la obtención de lecturas más claras, lo que minimiza el margen de error de lectura de los radargramas.

## 4. Conclusiones

En función de las mediciones presentadas en este trabajo, la cuales tuvieron como propósito evaluar el comportamiento del georradar bajo distintas configuraciones tanto de profundidad como de dieléctricos, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Los caños llenos de agua se identifican con mayor claridad, ya que generan hipérbolas más definidas en el radargrama debido al contraste de la constante dieléctrica del agua (muy elevada) en comparación con la del aire o los materiales de relleno. Por el contrario, cuando el caño se encuentra vacío, la hipérbola se presenta con menor nitidez debido a que la diferencia de valores dieléctricos es menor.
- Con valores bajos de dieléctrico el contraste entre las lecturas con el caño vacío y lleno de agua fue más notorio, mientras que con valores mayores se redujo ya que este se aproxima más al del agua (≈81). La resolución de las lecturas tiende a reducirse al aumentar la configuración de la profundidad como se observa en la Figura 8.
- Las condiciones ambientales influyen en los resultados, esto se evidencia en el registro de parábolas adicionales posiblemente vinculadas a la humedad del suelo por lluvias los días previos a realizar las mediciones del caño con agua.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

No se obtuvieron resultados con contrastes tan marcados como se esperaba variando únicamente parámetros básicos como el dieléctrico y la profundidad. Esto sugiere que, para optimizar las mediciones, es necesario ajustar otros parámetros del equipo y considerar las condiciones del terreno. Sin embargo, los resultados muestran que el georradar es un equipo eficaz para la detección de tuberías con agua, aplicaciones en mantenimiento de infraestructura civil y como propuesta de investigación futura se podría analizar el estado de estructuras históricas existentes lo que resulta relevante para realizar inspecciones no destructivas.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF) y el Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI).

## Referencias bibliográficas

Benedetto, A., Et. Al (2015) “Civil Engieneering Applicationes of Found Penetrating Radar”. Suiza: Springer International Publishing, 337.

Geophysical Survey Systems Inc. (2014-2017) “Manual SIR 4000 MANUAL”, 40 Simon Street, Nashua, Estados Unidos, 1-157.

Correa M. et Al, (2024). Evolution and hydro-stratigraphy of the coastal aquifer in Garopaba/SC: Interpretation from georadar and tubular Wells, Journal of South American Earth Sciences, Volume 149, 105182, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brasil,1-5.

# Eje temático

# Materiales

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiante de grado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Evaluación de porosidad en componentes de Al-Si inyectado usando tomografía computada

## Porosity evaluation in injected Al-Si components using computed tomography

Presentación: 30/10/2025

**Boris Riva**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Departamento de Ingeniería Industrial, Rafaela, Santa Fe, Argentina
boris_riva@hotmail.com

**Carolina Cardozo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Departamento de Ingeniería Industrial, Rafaela, Santa Fe, Argentina
carolinacardozog3@gmail.com

### Resumen

En este trabajo se presentan y discuten los resultados de caracterización y visualización de porosidad 3D, obtenidos vía tomografía computada, en dos acoples de Al-Si inyectado correspondientes a un sistema de suspensión de vehículos pesados. Si bien ambos acoples son homólogos, uno de ellos fue rechazado, para su comercialización, debido a una falla de estanqueidad detectada a partir de un ensayo neumático. El software empleado, en el pos-procesamiento de las imágenes obtenidas, posibilitó el diseño de una estrategia para evaluar y comparar la porosidad en volúmenes y planos homólogos de ambas componentes. Si bien los resultados obtenidos muestran valores similares de conteo total, el volumen de la porosidad es 30% mayor en la componente rechazada. Además, la evaluación de secciones y volúmenes homólogos en zonas críticas de ambas componentes, mostró diferencias notorias en cuanto a conteo, tamaño, forma y distribución de la porosidad. Finalmente, la metodología cuantitativa que propone este trabajo posibilitó correlacionar las redes de poros evaluadas con el proceso productivo llevado a cabo.

**Palabras clave:** Tomografía computada, Fundición inyectada, Aleación Al-Si

### Abstract

This paper presents and discusses the results of 3D porosity characterization and visualization, obtained via computed tomography, in two injected Al-Si couplings corresponding to a heavy-duty vehicle suspension system. Although both couplings are homologous, one of them was rejected for commercialization due to a leak detected during a pneumatic test. The software used in the post-processing of the obtained images enabled the design of a strategy to evaluate and compare porosity in homologous volumes and planes of both components. Although the results obtained show similar total count values, the porosity volume is 30% greater in the rejected component. Furthermore, the evaluation of homologous sections and volumes in critical areas of both components showed notable differences in porosity count, size, shape, and distribution. Finally, the quantitative methodology proposed in this paper allows correlating the evaluated pore networks with the production process.

**Keywords:** Computed tomography, Injected casting, Alloy Al-Si

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

Las técnicas tradicionales no destructivas, incluidas la radiografía y el ultrasonido, proporcionan capacidades de visualización, caracterización y diagnóstico de porosidad 3D insuficientes. En las etapas de investigación, desarrollo de producto, creación de prototipos y, además, en la inspección de componentes, se requieren técnicas más eficientes a fin de evaluar la naturaleza, alcance y distribución de la porosidad. Una modalidad no destructiva superadora, en cuanto al diagnóstico de la porosidad 3D, es la micro-tomografía computada de rayos X (TC) (Hanke, 2016; Maire, 2014; Matthew, 2021). A partir de esta técnica no invasiva es posible caracterizar individualmente una gran cantidad de poros de forma irregular según sus coordenadas espaciales, el área de superficie, el volumen, la forma y las distancias entre los mismos. Además, las técnicas de procesamiento digital de imágenes, asociadas a TC, permiten la visualización 3D de todos los poros in situ dentro del sólido fundido.

Por otra parte, la fundición por inyección de Al-Si es un proceso productivo a partir del cual se inyecta el material fundido a alta presión dentro de un molde a fin de obtener piezas que pueden adquirir formas complejas (Nunes, 2024). El silicio es un elemento clave en estas aleaciones, ya que reduce la temperatura de fusión, aumenta la fluidez y mejora la resistencia a altas temperaturas. Este proceso, eficiente para la producción en serie, ofrece algunas ventajas como ser: buena precisión dimensional, buen acabado superficial y poco requerimiento de mecanizado ulterior. Este tipo de fundición se utiliza ampliamente, en componentes de automotores, aeroespaciales y de comunicaciones, debido a su alta relación resistencia-peso, alta conductividad térmica y buena resistencia a la corrosión (Li, 2020; Li, 2021; Lumley, 2013). Sin embargo, la porosidad inherente a este proceso es siempre una preocupación debido a que la misma podría alterar diferentes propiedades mecánicas (Di Giovanni, 2013). Aun así, para componentes donde la estanqueidad es el requisito más importante, la porosidad podría ser, salvo para el caso de poros pasantes, más tolerada.

En este trabajo, se presentan y discuten los resultados de caracterización y visualización de porosidad 3D obtenidos vía TC en dos acoples homólogos de Al-Si inyectado, con requisitos de estanqueidad, correspondientes a un sistema de suspensión de vehículos pesados, uno aceptado y el otro rechazado para su comercialización. La metodología utilizada incluye la reconstrucción 3D del sólido evaluado, la visualización de defectos en diferentes planos y volúmenes de interés, la visualización de defectos 3D vía transparencias y el estudio cuantitativo de parámetros de forma (compacidad). Finalmente, a partir de esta metodología fue posible correlacionar los resultados obtenidos vía TC con las diferentes fases del proceso productivo a partir del cual se obtuvieron las componentes evaluadas.

# 2. Metodología

## 2.1. Componentes inyectadas

Las componentes evaluadas corresponden a un acople utilizado entre el sistema de alimentación de aire a presión y el sistema de suspensión de vehículos pesados. Las dimensiones son 68 × 35 × 35 mm. En este trabajo, se evaluaron dos componentes homólogas, una apta, y la otra, no apta para su comercialización. La Figura 1 muestra una imagen 3D de la componente aceptada, la cual tiene una zona de ingreso y otra de egreso de aire a presión y, además, un orificio de venteo. En estos conductos, la condición de estanqueidad es esencial para que dicha presión de aire pueda sostenerse en servicio. Cabe destacar que el orificio de venteo actúa como válvula de seguridad a partir del empleo de una membrana. Cuando el sistema recibe una contrapresión debido a las disparidades del suelo, dicha membrana accionará liberando el excedente de presión.

El proceso productivo inherente a las componentes evaluadas, llevado a cabo en una empresa autopartista de la ciudad de Rafaela, se puede dividir en tres fases. En primer lugar, la aleación Al-Si utilizada como materia prima (ALCOA 380) se calienta en un horno hasta 680 °C a fin de ser vertida en una batea, de la cual se toma la cantidad de material fundido necesaria para cada inyección. Luego, se inyecta el material en el molde. Cabe destacar que, todos los parámetros de la misma, como, por ejemplo, presión y velocidad de inyección, tendrán influencia directa sobre el resultado final. A continuación, se libera la pieza y se la somete a diferentes procesos a fin de determinar si es aceptada o no para su comercialización.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

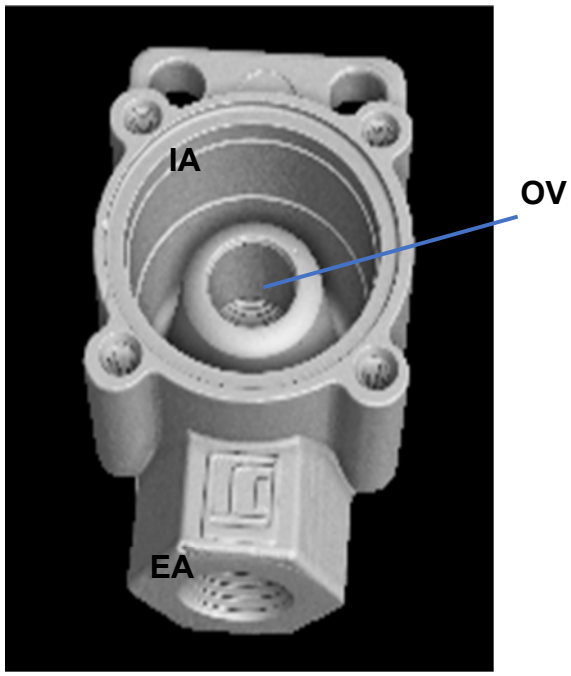



**Figura 1**. Componente apta (IA, ingreso de aire; EA, egreso de aire; OV, orificio de venteo).

En cuanto a los mencionados procesos, en primer lugar, se realiza un granallado para limpiar la superficie exterior. Luego, se mecanizan los orificios roscados necesarios para su funcionamiento y, además, para poder realizar el siguiente proceso, el cual consiste en impregnar la pieza con un compuesto de silicato de sodio que contribuye a obturar poros superficiales y potencialmente pasantes. El último paso es realizar un ensayo neumático a fin de evaluar la estanqueidad de los diferentes conductos. Este consiste en inyectar, a través de su orificio de entrada, aire comprimido a 5 bar, sellando herméticamente su salida y verificando la caída de presión luego de 30 s. Si dicha caída es mayor a 0,03 bar, la pieza recibe nuevamente un baño empleando silicato de sodio. De persistir el problema, la pieza se cataloga como falla y no será comercializada.

2.2. Micro-tomografía de rayos X

Para la elección de los parámetros óptimos, inherentes al proceso de micro-tomografiado, se tuvo en cuenta la densidad, geometría y dimensiones de las componentes a evaluar y, además, las características y el estado general y local (piezas consumibles) del tomógrafo a utilizar (Laboratorio de Tomografía de INTI Rafaela). El escaneo de las componentes evaluadas se llevó a cabo empleando un tomógrafo General Electric (Phoenix V |tome| x S 240), usando un voltaje de aceleración de 170 kV y una corriente de filamento de 100 µA. Por otro parte, los parámetros de resolución y magnificación fueron 97 µm/vóxel y 2,04x, respectivamente, con un total de 1000 proyecciones, 3 fotogramas promediados por cada proyección, y un tiempo de escaneo de aproximadamente 1 hora. Cabe destacar que, antes de tomografiar las componentes, se llevó a cabo un ajuste dimensional empleando un patrón de distancias del tipo ball bar (Zwanemburg, 2022). En este trabajo, todas las imágenes se analizaron empleando Volume Graphics VGSTUDIO MAX 3.0 (version 3.0, Volume Graphics, Heidelberg, Germany) (Volume Graphics), el cuál es un software comúnmente usado en laboratorios de TC.

## 3. Resultados y discusión

El presente estudio compara dos piezas inyectadas, las cuales son homólogas, con requisitos de estanqueidad, una apta y otra rechazada para su comercialización. El objetivo es detectar diferencias de porosidad, vía micro-tomografía por rayos X, a fin de correlacionar dichas diferencias con aquellas atribuibles al proceso productivo. La hipótesis planteada es que la pérdida de presión de aire, en la pieza rechazada, se debe a poros pasantes en diferentes zonas críticas. Teóricamente, en un molde con cambios de sección notorios, la solidificación podría adelantarse en zonas de sección mínima, impidiendo el flujo continuo y dificultando el llenado adecuado del molde, lo cual posibilitaría la generación de porosidad alargada (Samuel, 2021). La Figura 2 muestra las zonas consideradas como críticas, a partir de la comparación entre ambas componentes de un plano de corte longitudinal de la pieza aceptada. La zona central hueca (orificio de venteo) podría ser considerada como muy crítica debido al marcado cambio de sección que tiene su diseño.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Con respecto a las poblaciones totales, la pieza aceptada tiene 350 poros más que la rechazada. Esto corresponde al 1,3% de la población total de dicha pieza aceptada, el cuál es un valor porcentual bajo. Sin embargo, la primera contiene un volumen de poros que es un 30% menor al correspondiente a la pieza rechazada.

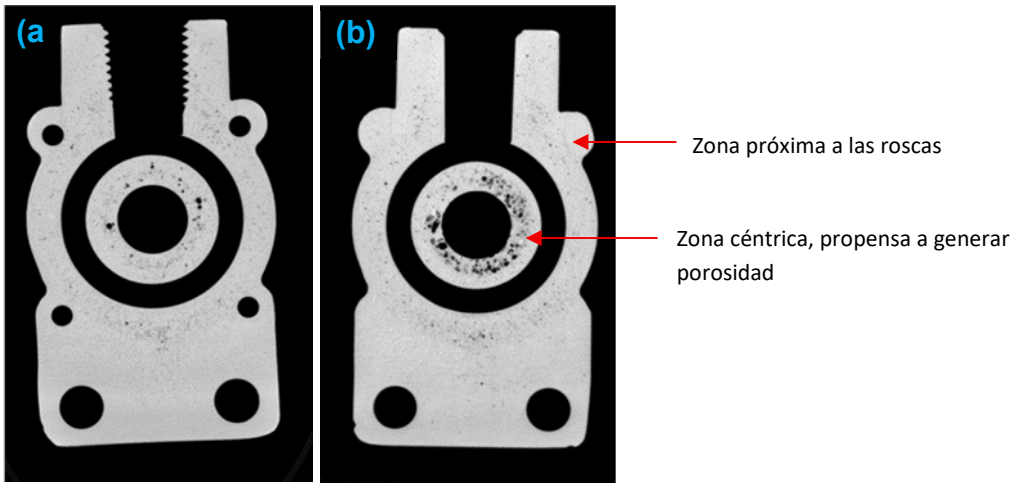



**Figura 2**. Secciones longitudinales homólogas de las componentes (a) apta y (b) rechazada

Las Figura 2 muestra imágenes que corresponden a planos longitudinales de ambas piezas. Puede notarse que la aceptada contiene 4 orificios y el roscado del conducto de salida de aire, los cuales son posteriores a la aceptación. Ambas figuras muestran claramente que la zona más afectada se encuentra en las paredes del orificio de venteo (corona circular). En la Figura 3b se observa que no solo hay mayor cantidad de poros, sino también una gran diferencia en cuanto al tamaño de estos, lo cual induciría a la generación de poros pasantes. Por otro lado, se pueden apreciar otro tipo de defectos, como lo son las inclusiones metálicas. Estas inclusiones pueden ocurrir por la existencia de aceite en la materia prima o por la mezcla de aluminio virgen con aluminio tratado dentro del horno de fundición.

La Figura 3 muestra la compacidad (C) en función del volumen del poro para el orificio de venteo (ver Figura 1), el cual es evaluado como región de interés (ROI), lo cual es posible empleando el software VGSTUDIO MAX 3.0. Cabe destacar que C es un importante parámetro de forma, y se obtiene a partir de la relación: $V/V_c$, siendo $V$ el volumen del poro y, $V_c$, el volumen de la esfera que circunscribe el poro (Días, 2021). Debido a que un poro real nunca podrá ser una esfera, los valores de C serán siempre menores que 1. En estos gráficos, cada poro de la subpoblación está representado mediante un círculo azul. Estos gráficos permiten observar zonas de concentración diferentes: en la pieza aceptada, esta zona, si bien decreciente, corresponde al rango de 0 a 0,2 mm3. En cambio, en la pieza rechazada, dicha zona extiende el rango (0-0,3 $mm^3$). Además, esta extensión de la zona de concentración corresponde a poros de compacidad baja (0,05-0,3), los cuales no tendrían su origen en gases sino en problemas de contracción (Magnusson, 2001).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

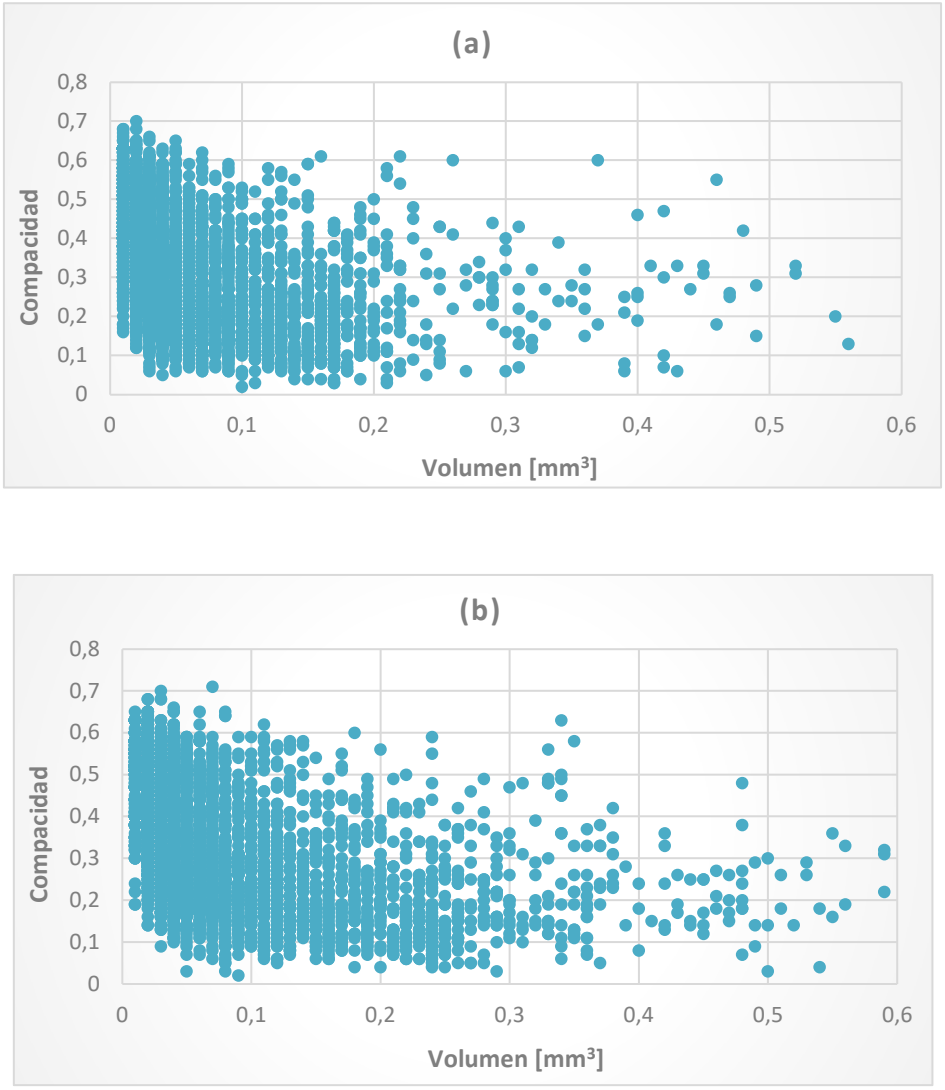



**Figura 3**. Compacidad vs volumen de las subpoblaciones asociadas a la pieza (a) apta y (b) no apta

En las ROIs de ambos acoples, aparecen poros con forma cuasi-esférica (Figura 2), de bajo volumen, los cuales podrían ser atribuidos a la existencia de burbujas de aire en el proceso de inyección. Este problema podría ocurrir por diferentes causas: aire atrapado en el proceso de fundición, gases contenidos en el material, flujo turbulento en el proceso de inyección, presión inestable. Para minimizar estos defectos, la temperatura y presión en el molde debería ser la prescripta, el flujo se debería mantener laminar mientras se acerca a la boquilla y, además, se debería realizar un óptimo purgado de gases. Cabe aclarar que, llevar a cabo lo prescripto no eliminará los defectos, pero disminuirá notablemente el número de los mismos.

Por otra parte, los poros de mayor tamaño y menor compacidad serían producto de un molde ineficaz, cuyo diseño no está optimizado, ofreciendo cambios bruscos de secciones que generan llenado y/o enfriamiento inadecuado, lo cual, a su vez, generaría porosidad por contracción (Deev, 2019). El diseño del molde debería contar con diferentes conductos de penetración, para dispersar y llenar las diferentes zonas del molde al mismo tiempo. En la medida de lo posible, el molde debería priorizar el llenado de la parte más lejana a la boquilla, evitando la solidificación prematura que impida el flujo laminar (Sigworth, 2013).

Finalmente, las inclusiones metálicas pueden reducirse significativamente con 2 pasos. En primer lugar, disminuir el uso de aceite en el proceso, que actualmente actúa como agente refrigerador. Se debería actualizar la tecnología para contar con refrigeración por agua para evitar este problema. Por otro lado, se recomienda no mezclar materia prima virgen con aquellos productos terminados y procesados que no pasaron la prueba de estanqueidad. De esta manera, se disminuyen los niveles de oxidación y de inclusiones metálicas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 4. Conclusiones

En este trabajo se evalúa, empleando micro-tomografía computada de rayos X, complejas redes de poros pertenecientes a dos componentes inyectadas, pertenecientes a un sistema de suspensión de vehículos pesados, una apta, y la otra, no apta para su comercialización. Las principales conclusiones son los siguientes:

1) Si bien el conteo de poros es similar en ambas piezas, el volumen total de porosidad en la pieza no apta es 30% mayor.

2) La hipótesis principal, que anticipa la zona de mayor diferencia de porosidad entre ambas piezas (orificio de venteo), es confirmada por las imágenes tomográficas obtenidas.

3) La evaluación de dicho orificio de venteo, como región de interés, muestra que, la pieza no apta, contiene mayor conteo de poros generados por contracción (baja compacidad), lo cual induciría la generación de poros pasantes, que serían la causa de la pérdida de estanqueidad en dicha pieza.

4) Se detectaron, en ambas piezas, inclusiones y defectos asociados a partículas de aceite y óxido generados por fallas tanto en la toma del material fundido que alimenta la inyección como de lubricación del pistón de la inyectora.

5) La micro-tomografía de rayos X, que es superior a la radiografía convencional debido a que genera imágenes 3D que pueden ser rotadas y seccionadas a fin de facilitar el análisis, que permite aislar regiones de interés volumétricas y, además, efectuar complejas mediciones y cálculos a partir de datos de ubicación, forma y tamaño de todos y cada uno de los poros del sólido evaluado, mostró ser una herramienta muy útil a fin de correlacionar las complejas redes de poros evaluadas, en componentes inyectadas de Al-Si, con el proceso productivo llevado a cabo. Finalmente, la metodología implementada en este trabajo podría ser utilizada para evaluar componentes porosas de diferentes diseños y materiales.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento a Diego Pollini, por su gran predisposición y ayuda en cuanto a las componentes y el proceso productivo asociado al presente trabajo y, además, a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Facultad Regional Rafaela (UTN), por su apoyo en cuanto al financiamiento del mismo.

## Referencias bibliográficas

Deev, V. B., Prusov, E. S., Shunqi, M. et al. (2019). “The influence of the melt cooling rate on shrinkage behaviour during solidification of aluminum alloys”. *Materials Science and Engineering*, 537.

Di Giovanni, M. T., De Menezes, J. T. O., Cerri, E., Castrodeza, E. M. (2020). “Influence of microstructure and porosity on the fracture toughness of Al-Si-Mg alloy”, *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 1286–1295.

Díaz, F.V., Peralta, M.E., Fernandino, D.O. (2021). “Study of sphericity and compactness parameters in spheroidal graphite iron using X-ray micro-computed tomography and image processing.” *Journal of Nondestructive Evaluation.* 40, 1-10.

Hanke, R., Fuchs, T., Salamon, M. and Zabler, S. (2016). “X-ray microtomography for materials characterization”. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods,* pp. 45-79.

Li, K., Zhang, J., Chen, X., Yin, Y., He, Y., Zhou, Z., Guan, R. (2020). “Microstructure evolution of eutectic Si in Al-7Si binary alloy by heat treatment and its effect on enhancing thermal conductivity.” *Journal of Materials Research and Technology.,* 9, 8780-8786

Li, Y., Liu, J., Zhou, H., Huang, W. (2021). “Study on the distribution characteristics of microstructure and mechanical properties within the cylinder head of low-pressure sand cast aluminum alloy.” *International Journal of Metalcasting*, 16, 1252-1264.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Lumley, R.N., Deeva, N., Larsen, R., Gembarovic, J., Freeman J. (2013). “The role of alloy composition and T7 heat treatment in enhancing thermal conductivity of aluminum high pressure diecastings.” *Metallurgical and Material Transactions A*, 44, 1074-1086.

Magnusson, T., Arnberg, L. (2001). “Density and solidification shrinkage of hypoeutectic aluminum-silicon alloys.” *Metallurgical and Material Transactions A*, 32, 2605–2613.

Maire, E., Withers, P. J. (2014) “Quantitative X-ray tomography”. *International Journal of Metalcasting*, 59, 1-43.

Mathew, J., Williams, M.A., Srirangam, P. (2021). “X-ray computed tomography studies on porosity distribution in vacuum induction cast Al-7Si alloys.” *JOM*, 73, 3866–3872.

Nunes, H., Emadinia, O., Vieira, M.F., Reis, A. (2024). “Low- and high-pressure casting aluminum alloys: a review.”

Samuel, A.M., Zedan, Y., Doty, H., Songmene, V., Samuel, F.H. (2021). “A review study on the main sources of porosity in Al-Si cast alloys.” *Advances in Materials Science and Engineering*.

Sigworth, G., Neff, D. and Schwam, D. (2013). “Optimization of permanent mold mechanical property test bars in A356 alloy using a new mold design.” *International Journal of Metal Casting*, 7, 25–38.

Volume graphics VGSTUDIO MAX. https://www.volumegraphics.com/en/products/vgsm.html

Zwanenburg, E.A., Williams, M.A. and Warnett, J.M. (2022). “Performance testing of dimensional X-ray computed tomography systems.” *Precision Engineering*., 77, 179-193.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Venado Tuerto

# Desarrollo de un procedimiento para la calibración de xilohigrómetros en madera

## Development of a procedure for the calibration of xylohygrometers in wood

Presentación: 30/10/2025

**Nicolás Decleire**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
ndecleire@frvt.utn.edu.ar

**Nicolás Gatica**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
gidec@frvt.utn.edu.ar

### Resumen

La determinación del contenido de humedad en la madera es fundamental debido a su influencia sobre sus propiedades físicas y mecánicas. Determinarla sin los métodos tradicionales de secado en horno acelera ese proceso. Este trabajo es el inicio del desarrollo del procedimiento de calibración de xilohigrómetros resistivos aplicado para la especie pino ponderosa cultivada en Neuquén. Se sometieron probetas a un proceso de saturación controlada y posteriormente a mediciones periódicas de humedad con xilohigrómetro y por el método de secado en horno, conforme a la norma IRAM 9532 (1963). Los resultados mostraron que en el rango de 14-15% de humedad ambos métodos convergen a valores cercanos, mientras que fuera de dicho intervalo se observan diferencias que evidencian la necesidad de calibrar el instrumento. Se obtuvo una elevada correlación lineal $R^2 \approx 0{,}99$ y ecuaciones de ajuste en direcciones paralela y perpendicular a las fibras sin diferencias significativas.

**Palabras clave:** Xilohigrómetro, humedad en madera, calibración.

### Abstract

Determining wood moisture content is critical due to its influence on its physical and mechanical properties. Determining moisture without traditional kiln-drying methods accelerates the process. This work represents the beginning of the development of a calibration procedure for a resistive xylohygrometers applied to ponderosa pine species grown in Neuquén. Specimens were subjected to a controlled saturation process and subsequently subjected to periodic moisture measurements using a xylohygrometer and the kiln-drying method, in accordance with IRAM standard 9532 (1963). The results showed that in the 14-15% moisture range, both methods converge to close values, while outside this range, differences are observed that demonstrate the need to calibrate the instrument. A high linear correlation $R^2 \approx 0.99$ was obtained, and fitting equations in directions parallel and perpendicular to the fibers did not differ significantly.

**Keywords:** Xylohygrometers, moisture in wood, calibration.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

La humedad de la madera constituye una variable determinante en sus propiedades físicas y mecánicas. Debido a su carácter higroscópico, la madera tiende a ganar o perder agua en función de las condiciones ambientales, hasta alcanzar un punto de equilibrio higroscópico.

El Grupo de Investigación de Estructuras Civiles (GIDEC) de la Facultad Regional Venado Tuerto – Universidad Tecnológica Nacional, determina el contenido de humedad mediante el método tradicional de secado en horno, sobre muestras extraídas de las probetas de ensayo, conforme a la norma IRAM 9532 (1963).

Las condiciones ambientales ejercen una influencia directa sobre la humedad de las probetas. En consecuencia, desde la extracción de las muestras hasta la determinación de su contenido de humedad pueden producirse variaciones que introduzcan incertidumbre respecto del valor real al momento del ensayo. Por este motivo, resulta de especial interés la incorporación de instrumentos de medición específicos que permitan determinar el contenido de humedad en forma instantánea durante la realización de los ensayos.

Entre los equipos disponibles se encuentra el xilohigrómetro, instrumento portátil diseñado para medir directamente la humedad en probetas de madera o estructuras in situ. Si bien estos dispositivos se entregan calibrados por el fabricante, sus mediciones no garantizan la exactitud ni la trazabilidad requeridas por las normativas. En consecuencia, es necesario realizar la calibración del instrumento para cada especie de madera.

El presente trabajo constituye el inicio del desarrollo de un procedimiento cuyo objetivo es la calibración del xilohigrómetro. Para ello, se propone desarrollar una metodología orientada a establecer curvas y patrones de ajuste, comenzando con la especie pino ponderosa y con la intención de extender el procedimiento a otras especies en estudio dentro del grupo de investigación. La metodología consiste en comparar las lecturas obtenidas con un xilohigrómetro de resistencia frente a los valores reales de contenido de humedad determinados según la norma IRAM 9532 (1963), a fin de determinar una función matemática que permita corregir los resultados instrumentales.

Este proceso reviste especial interés, dado que actualmente no se registran en el país laboratorios que desarrollen calibraciones específicas para este tipo de instrumentos. Por lo tanto, los avances alcanzados en esta línea de investigación aportarán beneficios tanto al ámbito científico como en la industrialización y comercialización de la madera en Argentina.

# 2. Materiales y métodos

2.1 *Materiales e Instrumentos*

La especie utilizada para el desarrollo del trabajo fue "*Pinus ponderosa"* Douglas ex Lawson (pino ponderosa) proveniente de la provincia de Neuquén.

Las probetas se confeccionaron a partir de tablas de madera aserrada cepillada de dimensiones de 1" en su canto y de 4" en su cara de manera de que las muestras se encuentren libre de defectos. Se realizaron una serie de probetas con características de acuerdo al detalle de la Tabla 1. En la Figura 1 se visualizan las probetas utilizadas para la medición de humedad. Los objetivos de las actividades de investigación inicial propuestas fueron:

**Tabla 1.** Diseño de muestras

| Serie | Dimensiones | Especie | Cantidad de muestras |
|---|---|---|---|
| 1 | 4" × 4" × 1" | Pino Ponderosa | 5 |

En cuanto a instrumentos, para la medición se utilizó un xilohigrómetro resistivo Powerfix con un rango de medición de humedad de entre 6% y 44% como muestra la figura 2, balanza de pesaje con precisión de ± 0,01 g y horno de secado que alcance temperaturas de 103°C ± 2°C.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

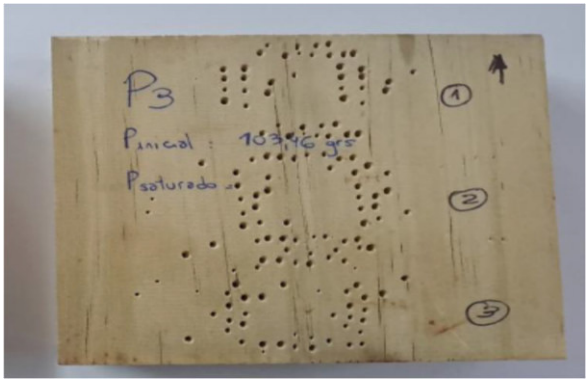



**Figura 1**. Probetas de pino ponderosa 4” × 4” × 1”.

2.2 *Método*

El procedimiento experimental se estructuró en tres etapas. En primer lugar, se realizó la saturación de las probetas en agua; en segundo término, la medición simultánea del contenido de humedad mediante xilohigrómetro y del peso húmedo utilizando balanza de precisión; y finalmente, el secado de las probetas hasta la completa eliminación de humedad.

La saturación se realizó colocando las probetas en un recipiente sin sumergir la superficie transversal superior, cuidando que el agua pueda penetrar por la superficie interior de la probeta y el aire desplazado pueda salir por la superficie superior. Una vez húmeda esta cara, la probeta se sumergió por completo en agua, permaneciendo en esta forma un mínimo de siete días. Ya saturadas las probetas, se extraen, se las seca con un trapo húmedo y se las acondiciona en cámara de estabilizado a 20 ± 2 °C y 60% de humedad relativa hasta alcanzar el porcentaje de humedad correspondiente al rango de medición superior del xilohigrómetro a calibrar.

Posteriormente, se procedió a medir en forma simultánea y periódica hasta que la probeta alcanzó el equilibrio higroscópico con el ambiente, el porcentaje de humedad indicado en el xilohigrómetro y el peso húmedo medido en la balanza. Por cada probeta se tomaron seis lecturas distribuidas en tres mediciones por cara (una lectura en el centro y dos repartidas en cada extremo de la probeta) para obtener una medición representativa de la distribución del agua en su interior. Asimismo, las lecturas se realizaron tanto en sentido paralelo como perpendicular a las fibras de la madera para evaluar su incidencia.

Finalmente, las probetas se colocaron en un horno de secado a 103 ± 2°C durante un tiempo máximo de veinte horas o hasta que dos pesadas sucesivas no mostraran variaciones mayores al 0,1% en un intervalo de 2 horas en sus mediciones. Alcanzada esta condición, se realizó la medición del peso anhidro de las probetas. En la figura 2 se muestra la medición en ambos sentidos de las fibras de la madera estudiada junto con el xilohigrómetro utilizado.

**Figura 2.** Medición con xilohigrómetro paralela (izquierda) y perpendicular (derecha) a las fibras.

La humedad por método de secado en horno se determinó con la siguiente ecuación:

$$H = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

Donde $P_h$ corresponde al peso húmedo de la muestra ensayada y $P_s$ es el peso anhidro de la probeta.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 3. Resultados y discusión

De las 5 muestras ensayadas, se descartó 1 probeta por presentar exceso de agua en su interior y que se supone podría estar atribuido a un rápido secado superficial que habría retrasado la evacuación del agua almacenada en el interior de la madera.

En la Tabla 2 se exponen los valores de humedad determinados por el método de secado en horno conforme a la norma IRAM 9532 (1963) a la que denominamos "humedad real" junto con los valores medidos con xilohigrómetro en el sentido paralelo y perpendicular a las fibras de madera ensayada en función del tiempo que secado de las probetas. En la Figura 3 el trazado de sus curvas humedad-tiempo.

**Tabla 2.** Valores experimentales promedio de humedad.

| | | Tiempo (hs) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 21,5 | 40,5 | 45 | 47,5 | 61,5 | 69 | 85,5 | 91 | 110 |
| Humedad determinada por método de secado en horno IRAM 9532 (1963) | % | 23,23 | 18,73 | 16,24 | 15,12 | 14,56 | 12,82 | 12,22 | 12,01 | 11,86 | 9,89 |
| Humedad medida con xilohigrómetro paralelo a las fibras | % | 20,25 | 17,21 | 15,29 | 15,21 | 14,25 | 13,46 | 13,13 | 13,21 | 13,17 | 11,42 |
| Humedad medida con xilohigrómetro perpendicular a las fibras | % | 19,88 | 17,25 | 15,38 | 15,25 | 14,38 | 13,50 | 13,00 | 13,00 | 13,25 | 11,13 |

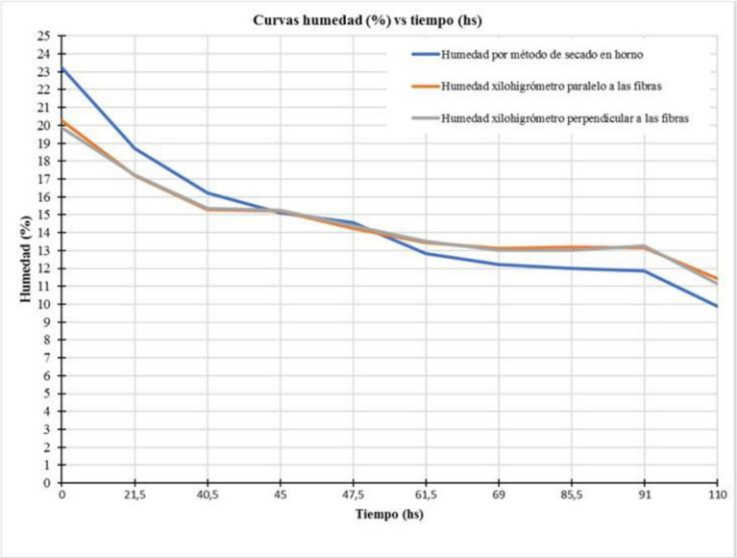



**Figura 3.** Curvas humedad-tiempo para la especie pino ponderosa.

En el rango comprendido entre el 14% y 15% de contenido de humedad, los valores determinados por el método de secado en horno y aquellos obtenidos con xilohigrómetro son valores muy similares e incluso coincidentes en algunos puntos. Por encima y por debajo las curvas comienzan a distanciarse entre sí, lo que hace necesaria la calibración del instrumento. Para ello resulta pertinente realizar un análisis de dispersión entre los valores de humedad determinados por ambos métodos para determinar la ecuación de ajuste adecuada.

Por otra parte, se observa que las mediciones realizadas con el instrumento arrojan valores prácticamente equivalentes en ambos sentidos de medición respecto a la orientación de la fibra de la madera, por lo se estima que la anisotropía de la madera no influye en la forma de medición de la humedad que el instrumento utiliza.

En la figura 4, se presenta la relación entre los valores de humedad determinados por el método de secado en horno y los medidos con el xilohigrómetro en la dirección paralela a las fibras junto con su recta de regresión lineal y su ecuación de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

ajuste para aplicarse sobre las mediciones realizadas con el instrumento para la especie estudiada. En la figura 5, se muestran los mismos elementos para la dirección perpendicular a las fibras.

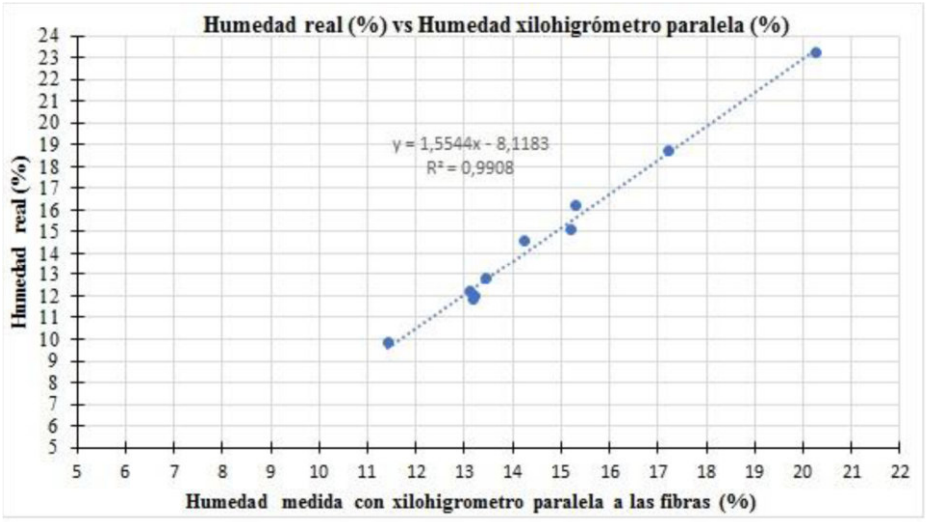



**Figura 4.** Correlación humedad real-humedad xilohigrómetro paralela a la fibra.

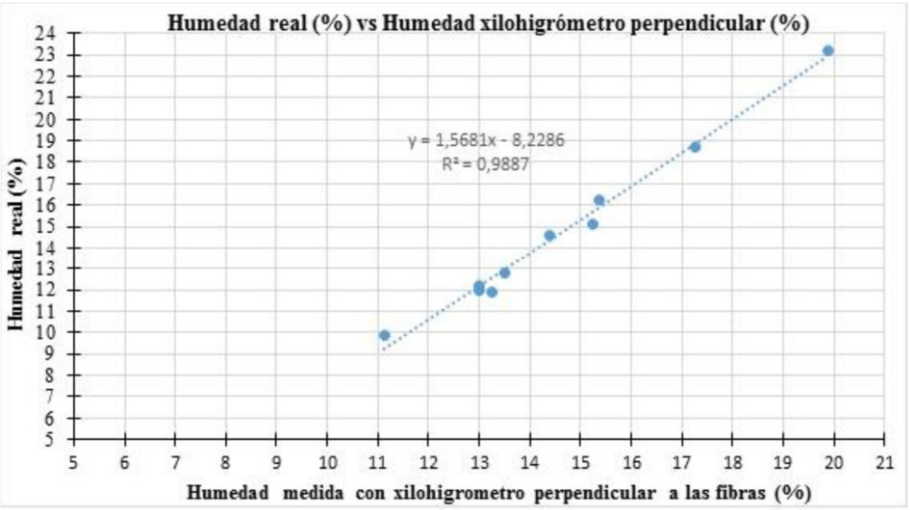



**Figura 5.** Correlación humedad real-humedad xilohigrómetro perpendicular a la fibra.

Realizando un ajuste lineal se obtiene un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9908$ y una ecuación de calibración $y = 1,5544\ x - 8,1183$ para la dirección paralela a la fibra. Para la dirección perpendicular el coeficiente es $R = 0,9887$ y su ecuación de calibración $y = 1,5681\ x - 8,2286$.

## 4. Conclusiones

Se obtuvieron excelentes coeficientes de correlación $R^2 \approx 0,99$ para un ajuste lineal en ambos sentidos de las fibras de la madera para la especie de pino ponderosa cultivada en la provincia de Neuquén para la pequeña cantidad de muestras ensayadas.

La medición con el xilohigrómetro es indistinta del sentido de orientación de las fibras de la madera estudiada.

Se debería analizar una serie más amplia de muestras a los efectos de confirmar las tendencias de esta incipiente investigación. Asimismo, debería ampliarse el estudio de las muestras para para diferentes combinaciones de especie-procedencia para determinar su patrón de calibración.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Estos resultados, son el inicio para desarrollar en futuras experiencias un procedimiento de calibración que pueda ser validado tanto para su uso en investigación como también en la industria maderera.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo de docentes, graduados y alumnos becarios del Grupo GIDEC (Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles) junto con el laboratorio de metrología de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional por su invalorable colaboración con la preparación de las probetas y sus correspondientes ensayos.

## Referencias bibliográficas

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (2011). Determinación de valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad (IRAM 9664). IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (1963). Maderas. Método de determinación de la humedad (IRAM 9532). IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (1966). Método de determinación de las contracciones totales, axil, radial y tangencial y el punto de saturación de las fibras (IRAM 9543). IRAM.

Alvarez, E. (2013). Medición de humedades en madera con xilohigrómetros, comparación y corrección. Jornada de Jovenes Investigadores Tecnológicos 2013, Rafaela, Argentina.

Forsén, H., & Tarvainen, V. (2000). *Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters* (Revised ed., VTT Publications 420). Technical Research Centre of Finland.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Materiales
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiante de grado
**Facultad Regional**: Venado Tuerto

# Determinación de propiedades mecánicas de la madera *de álamo* del Valle de Río Negro

## Determination of mechanical properties of poplar wood from the Río Negro Valley

Presentación: 30/10/2025

**Gianella Peró**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigaciones de Estructuras Civiles (GIDEC), Venado Tuerto, Argentina.
gianellapero@gmail.com

**Santiago Picinato**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigaciones de Estructuras Civiles (GIDEC), Venado Tuerto, Argentina.
santiagopicinato@gmail.com

### Resumen

Este trabajo presenta la caracterización mecánica de la madera de álamo cultivada en el Valle de Río Negro, correspondiente a las especies *Populus Nigra* y *Populus I214*. Se ensayaron 96 tablas de dimensiones estructurales (2” × 4” × 250 cm), clasificadas visualmente. Los ensayos de flexión estática, módulo de elasticidad global, densidad y humedad se realizaron siguiendo normas IRAM e ISO. Los resultados arrojaron una resistencia a flexión promedio de 37 N/mm², un módulo de elasticidad global medio de 11.332 N/mm² y una densidad promedio de 407 kg/m³. Se observó fuerte correlación entre densidad, rigidez y resistencia, mientras que la nudosidad presentó baja incidencia. Los datos obtenidos, aunque preliminares, evidencian el potencial de esta madera para uso estructural y constituyen un paso inicial hacia la definición de valores característicos y su inclusión en futuras normativas.

**Palabras clave:** Madera de álamo, Propiedades mecánicas, Resistencia a flexión, Módulo de elasticidad, Densidad, Uso estructural.

### Abstract

This study reports the mechanical characterization of poplar wood (populus nigra and populus I214) cultivated in the Río Negro Valley. A total of 96 visually graded structural boards (2” × 4” × 250 cm) were tested. Static bending, global modulus of elasticity, density, and moisture content were evaluated in accordance with IRAM and ISO standards. The results showed an average bending strength of 37 N/mm², an average global modulus of elasticity of 11.332 N/mm², and an average density of 407 kg/m³. Strong correlations were found between density, stiffness, and strength, while knot size had low influence. Although preliminary, these findings highlight the potential of this wood for structural applications and represent a first step toward defining characteristic values and its inclusion in future standards.

**Keywords:** Poplar wood, Mechanical properties, Bending strength, Modulus of elasticity, Density, Structural use.

## 1. Introducción

La madera es uno de los materiales naturales utilizados en la construcción, debido a su buena relación resistencia-peso, su comportamiento mecánico favorable, y su bajo impacto ambiental. Entre las especies forestales de rápido crecimiento, el álamo se destaca por su versatilidad, fácil manejo silvícola y gran potencial como recurso renovable. Como antecedente,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

consideramos la publicación Guillaumet et al (2016) sobre propiedades mecánicas en populus deltoides “Stoneville 67” procedente del delta del Paraná. No obstante, las propiedades físico-mecánicas del álamo pueden variar significativamente según el clon y las condiciones del sitio de cultivo, por lo que su uso estructural requiere estudios específicos que propongan los valores característicos para dar origen a una norma que informe su desempeño. En este contexto el presente proyecto de investigación tiene como objetivo principal determinar las propiedades resistentes de la madera de álamo cultivada en el Valle de Río Negro, en base a la clasificación visual existente para el Populus deltoides del Delta del Paraná (Guillaumet, 2019: 95-114).

En Argentina solo existen cinco combinaciones especie-procedencia con validación normativa, lo cual posiciona en desventaja a otras regiones productoras. El trabajo propone caracterizar esta madera mediante ensayos mecánicos de rotura, conforme a las normas IRAM 9663 (2013) e IRAM 9664 (2013). Se realizarán ensayos sobre madera de dos sitios del Valle de Río Negro con escuadrías de dimensiones estructurales (2” x 4” x 250 cm), las dos especies corresponden a *Populus Nigra* de Cipoletti y *Populus I214* de Allen. A partir de los resultados, se determinará si las propiedades son homogéneas entre los diferentes sitios y se establecerán valores característicos del material. Considerando que las propiedades de la madera dependen no solo de la especie y el clon, sino también del lugar de cultivo, resulta esencial verificar experimentalmente su comportamiento para determinar si cumple con los requisitos estructurales y si presenta similitudes con el álamo proveniente del Delta del Paraná.

## 2. Materiales y métodos

*2.1 Materiales*

La madera álamo empelada en este trabajo proviene de plantaciones ubicadas en el Valle de Río Negro, correspondientes a las especies *Populus Nigra* y *Populus I214*. El procesamiento inicial fue en el Aserradero Olivetti, localizado en la ciudad de Allen, provincia de Río Negro, Argentina, cuya ubicación se presenta en la Figura 1.

El material se recibió en forma de tablas aserradas y cepilladas, como se muestra en la Figura 2, identificadas con su correspondiente denominación de origen y lote, lo que permitió registrar cada muestra. Se trabajó con dos lotes diferenciados:

- *Populus Nigra*, procedente de Cipolletti (Serie 1 - Lote O): 53 tablas de 2 × 4 × 250 cm.
- *Populus I214*, procedente de Allen (Serie 2 - Lote N): 72 tablas de 2 × 4 × 250 cm.

**Figura 1.** Ubicación del Aserradero (Allen, Río Negro, Argentina).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 2.** Acopio de tablas.

Del material recibido, se seleccionaron 38 tablas de la Serie 1 (*Populus Nigra*) y 58 tablas de la Serie 2 (*Populus I-214*). Esta elección se realizó mediante un criterio visual inicial, descartando aquellas tablas que presentaban defectos como ataques biológicos u otras imperfecciones evidentes, con el objetivo de asegurar que las muestras fueran representativas y aptas para los ensayos posteriores. Las probetas fueron acondicionadas en una atmósfera normalizada de (20 ± 2) °C y (65 ± 5) % de humedad relativa.

*2.2 Métodos*

Se relevaron los defectos, tales como dimensión de nudos, presencia de médula, inclinación de las fibras, considerando la propuesta el criterio 3 de la Tabla 24C adoptado por Guillaumet (2019) en su tesis doctoral, los cuales se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros de clasificación.

| Parámetro | Unidad | Clase 1 (C1) | Clase 2 (C2) |
|---|---|---|---|
| Médula | - | No se admite | Se admite, sin condiciones |
| Nudosidad | mm/mm | Menor o igual a 1/3 | Menor o igual a 2/3 |
| Dirección de las fibras | mm/mm | Desviación menor que 1:9 | |

Los ensayos se efectuaron en el laboratorio GIDEC de la Facultad Regional Venado Tuerto, sobre 38 tablas de la Serie 1 y 58 tablas de la Serie 2, con dimensiones estructurales de 2” x 4” x 250 cm; siguiendo los procedimientos establecidos en la norma IRAM 9663 (2013) para determinar las propiedades mecánicas de la madera. La figura 3 presenta el esquema de ensayo.

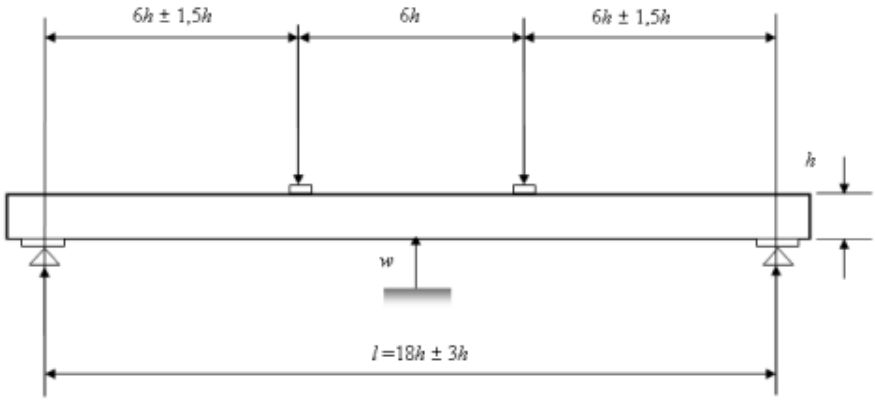



**Figura 3.** Esquema del dispositivo de ensayo para medición del módulo de elasticidad global en flexión.

Para la medición de cargas se utilizó una celda de carga máxima 5000 kg a través de una rótula móvil para evitar excentricidad de carga. Las deformaciones se determinaron a través de un comparador de precisión de 0,01 mm., hasta 250 kg en escalones de 50 kg de carga. La figura 4 ilustra el banco de ensayo con su equipamiento de medición de deformaciones.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 4.** Dispositivo de ensayos.

Para determinar la resistencia a flexión se utilizó la siguiente ecuación:

$$f_m = \frac{3 \cdot P_{máx} \cdot a}{b \cdot d^2} \quad (1)$$

Donde $P_{máx}$ es la carga máxima (en N), $a$ la distancia entre un punto de carga y el apoyo (en mm), $b$ el ancho de la sección transversal en un ensayo a flexión o la menor medida de la sección transversal (en mm) y $d$ la altura de la sección en un ensayo de flexión o medida mayor de la sección (en mm).

Para determinar el módulo de elasticidad global se aplicó la siguiente ecuación:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3\left(2\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh}\right)} \quad (2)$$

Siendo $E_{m,g}$ es el módulo de elasticidad global en flexión (en N/mm$^2$), $l$ la longitud entre apoyos (en mm), $h$ la altura de la sección en un ensayo de flexión o medida mayor de la sección (en mm), $F_2 - F_1$ es el incremento de carga (en N), $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación para $F_2 - F_1$ (en mm) y $G$ es el módulo de elasticidad transversal (en N/mm$^2$).

Luego del ensayo se cortó un trozo cercano al sector de rotura, para la determinación de la densidad y humedad de cada probeta de acuerdo con la norma ISO 3130 y las ISO 3131.

Se presentan los valores de resistencia a la flexión, ajustada a la altura de referencia de 150mm, el módulo de elasticidad y la densidad a la humedad de referencia del 12%, de acuerdo con lo establecido según Norma IRAM 9664.

## 3. Resultados y discusión

Se analizaron los resultados por clases según el criterio de la Tabla 1. Las probetas rechazadas forman parte de la clase 3. Se presentan los resultados de resistencia a flexión en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Resistencia a Flexión [N/mm$^2$].

| CLASE | n | Promedio | Mínimo | Máximo | Percentil 5% | COV. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 34 | 41 | 18 | 61 | **19** | 25% |
| 2 | 45 | 36 | 9 | 61 | **11** | 33% |
| 3 | 17 | 34 | 12 | 62 | **12** | 40% |
| TOTAL | 96 | 37 | 9 | 62 | **12** | 31% |

n= cantidad ; COV= coeficiente de variación

Los resultados de la Tabla 2 indican que la clase 1 presenta un percentil 5% más alto en comparación con la clase 2. Además, la clase 1 muestra el promedio de resistencia a la flexión más alto y la menor dispersión de datos, reflejada en su coeficiente de variación (COV) más bajo.

En las Tablas 3 y 4 se exponen los resultados correspondientes al módulo de elasticidad global y a la densidad, respectivamente.

**Tabla 3.** Módulo de Elasticidad Global [N/mm$^2$].

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| CLASE | n | Promedio | Mínimo | Máximo | COV. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 33 | **11.590** | 6.172 | 20.216 | 33% |
| 2 | 44 | **10.791** | 4.411 | 17.753 | 36% |
| 3 | 16 | **12.289** | 6.334 | 17.222 | 25% |
| TOTAL | 93 | **11.332** | 4.411 | 20.216 | 33% |
| n= cantidad ; COV= coeficiente de variación | | | | | |

**Tabla 4.** Densidad [kg/m$^3$].

| CLASE | n | Promedio | Mínimo | Máximo | Percentil 5% | COV. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 34 | 412 | 321 | 585 | **321** | 14% |
| 2 | 45 | 398 | 292 | 554 | **315** | 15% |
| 3 | 17 | 420 | 330 | 502 | **330** | 14% |
| TOTAL | 96 | 407 | 292 | 585 | **321** | 15% |

Los resultados obtenidos remarcan que no hay una diferencia significativa entre las clases 1 y 2, tanto al módulo de elasticidad y la densidad.

**Tabla 5.** Correlaciones.

| | Resistencia a flexión | Densidad | Módulo de elasticidad global | Nudo máximo |
|---|---|---|---|---|
| Resistencia a flexión | | 0,61 | 0,67 | -0,15 |
| Densidad | 0,61 | | 0,67 | |
| Módulo de Elasticidad global | 0,67 | 0,67 | | 0,13 |

De acuerdo con resultados de la Tabla 5 se puede apreciar una fuerte correlación entre la tensión de rotura, la densidad y el módulo de elasticidad global. Esto indica que, a mayor densidad y rigidez del material, mayor es su resistencia a la rotura. Por el contrario, el parámetro referente a los nudos presenta una correlación débil con las demás variables, lo que sugiere que su influencia sobre las características mecánicas es baja.

Si bien los resultados obtenidos proporcionan una visión inicial de las propiedades de la madera, es crucial destacar que estos datos deben considerarse preliminares. La cantidad de muestras analizadas en este estudio es limitada en comparación con el total de ensayos que se realizarán en una etapa posterior. Por lo tanto, las correlaciones y los valores estadísticos aquí presentados, aunque son valiosos como referencia, podrían variar una vez que se incorpore el conjunto de datos completo, lo que permitirá un análisis más robusto y conclusiones definitivas.

## 4. Conclusiones

- Los resultados de tensión muestran que la clase 1 alcanza un percentil 5% de 19 N/mm², mientras que la clase 2 presenta un valor de 11 N/mm². Esta diferencia sugiere la conveniencia de aplicar la clasificación de la madera de acuerdo con el criterio 3 de Guillaumet (2019).
- Los valores obtenidos para el módulo de elasticidad y la densidad no evidencian diferencias significativas entre las clases, lo que no justificaría establecer una clasificación basada en estos parámetros.
- Las maderas ensayadas muestran una baja relación de la nudosidad en la tensión de rotura.
- Los valores experimentales para el Populus I214 y Nigra, resultaron inferiores en un 30% respecto de los valores propuestos en clase 1 y en un 65% en la clase 2 para el Populus Deltoides del Delta del Paraná en la tesis doctoral de Guillaumet (2019).
- Los valores obtenidos evidencian el potencial del material; no obstante, deben considerarse resultados preliminares debido al número limitado de muestras. Este trabajo constituye un primer paso hacia la caracterización para uso estructural de esta combinación especie-procedencia.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto titulado “Caracterización para uso estructural de la madera de Populus del Alto Valle de Río Negro”, identificado con el código ECTCVT0010105TC. Agradecemos a los alumnos, graduados y demás integrantes del grupo GIDEC de la Facultad Regional Venado Tuerto, por su participación en el desarrollo de los ensayos realizados, y a los directores del PID, Dr. Ing. Guillaumet e Ing. Filippetti, por su valiosa dirección.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Referencias

Guillaumet, Manavella, Acuña, Piter (2016) Propiedades mecánicas en flexión de la madera aserrada de populus deltoides ´STONEVILLE 67´- 37° Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Asunción, Paraguay

Guillaumet (2019) Tesis doctoral “Comportamiento estructural de la madera de álamo (Populus deltoides Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’) cultivado en el delta del río Paraná.” UTN FRCU.

ISO 3131 (1975). International Organization for Standardization (E). Wood - Determination of density for physical and mechanical tests.

ISO 3130 (1975). International Organization for Standardization (E).) Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

IRAM 9663 (2013). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Buenos Aires.

IRAM 9664 (2013). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Estructuras de madera. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Buenos Aires.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Materiales
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional**: Villa María

# Producción de nanotubos de $TiO_2$ mediante anodizado electroquímico: avances preliminares

## Production of $TiO_2$ nanotubes by electrochemical anodization: preliminary progress

Presentación: 30/10/2025

**Aldana Berenice Cativa Sonzini**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Villa María, Laboratorio de Electroquímica Aplicada y Corrosión, Villa María, Cordoba, Argentina
Centro de Investigación y Transferencia Villa María (CONICET–UNVM), Villa María, Córdoba, Argentina
abcativasonzini@gmail.com

### Resumen

Las aguas residuales representan una fuente crítica de contaminación y riesgo sanitario, lo que impulsa la búsqueda de tecnologías sostenibles para su tratamiento. Entre ellas, los nanotubos de $TiO_2$ ($TiO_2$-NT) obtenidos por anodizado electroquímico han despertado gran interés debido a su elevada actividad fotocatalítica y estabilidad. En este trabajo se presentan avances preliminares en la producción de $TiO_2$-NT sobre láminas de titanio mediante anodizado en electrolitos a base de $H_3PO_4$, HF y $NH_4F$, aplicando voltajes en el rango de 10–80 V. Bajo ciertas condiciones se observaron interrupciones asociadas a electrólisis excesiva, mientras que en otros casos se registraron cambios de color atribuibles a variaciones en el espesor de las capas de óxido. Estos resultados constituyen un primer paso en la puesta a punto de la técnica, previa a caracterizaciones morfológicas (SEM) y electroquímicas que permitan optimizar los recubrimientos para futuras aplicaciones ambientales.

**Palabras clave:** Nanotubos de $TiO_2$; Fotocatálisis; Anodizado; Aguas residuales.

### Abstract

Wastewater is a critical source of pollution and public health risk, driving the search for sustainable treatment technologies. Among them, titanium dioxide nanotubes ($TiO_2$-NT) synthesized by electrochemical anodization have gained significant attention due to their high photocatalytic activity and stability. This work presents preliminary advances in the production of TiO2-NT on titanium sheets through anodization in electrolytes based on $H_3PO_4$, HF, and $NH_4F$, applying voltages in the range of 10–80 V. Under certain conditions, anodization was interrupted due to excessive electrolysis and electrolyte decomposition, while in other cases color changes were observed, attributed to variations in oxide layer thickness. These optical effects provide indirect evidence of oxide growth, although the nanotubular morphology remains to be confirmed. Overall, the results represent an initial step toward optimizing anodization parameters prior to morphological (SEM) and electrochemical characterizations, with the longterm goal of applying $TiO_2$-NT coatings in the photocatalytic inactivation of microorganisms in wastewater.

**Keywords:** $TiO_2$ Nanotubes; Photocatalysis; Anodization; Wastewater

## 1. Introducción

Las aguas residuales urbanas, industriales y agropecuarias constituyen una de las principales fuentes de contaminación hídrica, favoreciendo procesos de eutrofización y la proliferación de organismos potencialmente patógenos, incluidas bacterias y cianobacterias productoras de toxinas. Si bien los métodos convencionales de desinfección, como la cloración,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

resultan efectivos, su aplicación puede generar subproductos indeseados y con impacto ambiental. En este contexto, la nanotecnología basada en óxidos semiconductores surge como una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas.

Dentro de estos materiales, el dióxido de titanio ($TiO_2$) se destaca por su estabilidad química, inocuidad relativa y elevada actividad fotocatalítica bajo irradiación (Nakata & Fujishima, 2012). Bajo exposición a luz UV o visible, el $TiO_2$ genera pares electrón-hueco capaces de reaccionar con el agua y el oxígeno, produciendo especies reactivas de oxígeno (•OH, $O_2^{\bullet -}$) que oxidan contaminantes orgánicos y dañan membranas celulares de microorganismos, contribuyendo a la purificación del agua (Hoffmann et al., 1995). Particularmente, los nanotubos de $TiO_2$ ($TiO_2$-NT) obtenidos por anodizado electroquímico representan una evolución frente a los polvos de $TiO_2$, ya que forman recubrimientos autoorganizados, fuertemente adheridos al sustrato metálico, aumentando la superficie activa disponible lo que favorece el contacto más eficiente con los contaminantes y mejora el rendimiento del recubrimiento (Roy et al., 2011).

El proceso de anodizado se basa en la oxidación electroquímica del titanio en presencia de iones fluoruro, donde la competencia entre crecimiento de óxido y disolución localizada da lugar a la formación de estructuras tubulares ordenadas. Diversos factores como la composición del electrolito ($NH_4F$, $H_3PO_4$, solventes orgánicos), el contenido de agua, el voltaje aplicado, el tiempo de anodización y el tratamiento térmico posterior determinan la morfología final, la fase cristalina y, por ende, la eficiencia fotocatalítica (Roy et al., 2011).

La morfología y las propiedades finales de los nanotubos de $TiO_2$ dependen fuertemente de las condiciones electroquímicas empleadas durante el anodizado. Entre los factores más determinantes se encuentran el voltaje aplicado y la composición del electrolito (Gomez Sanchez et al., 2013; Regonini & Clemens, 2015).

El voltaje regula principalmente el diámetro interno de los nanotubos: bajos valores (10–20 V) conducen a poros más pequeños y desordenados, mientras que voltajes intermedios (30–60 V) permiten obtener nanotubos autoorganizados con diámetros entre 30–100 nm. A medida que se incrementa el potencial (>100 V), se favorece el crecimiento de nanotubos de mayor diámetro y longitud, aunque puede comprometerse la estabilidad mecánica de la estructura (David et al., 2022). Además, el tiempo de anodización regula principalmente la longitud de los tubos, alcanzando desde unos pocos cientos de nanómetros hasta decenas de micrómetros, hasta que el proceso se estabiliza por equilibrio entre formación y disolución del óxido.

Respecto al electrolito, se ha demostrado que la presencia de iones fluoruro ($F^-$) es indispensable para la formación tubular, ya que inducen la disolución localizada del $TiO_2$. La fuente más empleada es $NH_4F$, aunque también se han utilizado NaF o HF, en combinación con solventes orgánicos como etilenglicol o glicerol, que proporcionan alta viscosidad y reducen la agresividad del medio (Liu et al., 2011). La fracción de agua es igualmente crítica: porcentajes bajos (1–5 %) favorecen nanotubos largos y bien definidos, mientras que contenidos excesivos producen disolución no controlada y estructuras porosas irregulares (Roy et al., 2011). Asimismo, el ajuste del pH y la incorporación de aditivos como $H_3PO_4$ o ácido láctico permiten modular la estabilidad y uniformidad de los tubos (David et al., 2022).

En conjunto, la optimización del voltaje, la composición del electrolito y el tiempo de anodización resultan esencial para controlar el diámetro, longitud, ordenamiento y fase cristalina posterior de los nanotubos. Estas variables constituyen, por tanto, el núcleo experimental de este trabajo, donde se busca establecer condiciones reproducibles para la obtención de recubrimientos de $TiO_2$NT orientados a aplicaciones ambientales.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 *Materiales*

Se utilizaron chapas de titanio cp grado 2 de 0,4 mm de espesor, wt% 99,2 Ti; c: 0,1 máx., Fe: 0,3 máx., H: 0,01 máx. y O: 0,25 max. (Cordés Roberto Argentina). Las chapas fueron cortadas en piezas de 1 × 3 cm², desengrasadas con acetona, y posteriormente enjuagadas con agua ultra pura.

Los reactivos empleados en la preparación de los electrolitos fueron: ácido fluorhídrico (HF), fluoruro de amonio ($NH_4F$), ácido fosfórico ($H_3PO_4$), y agua ultra pura (18,2 MΩ-cm). Las soluciones electrolíticas fueron preparadas por dilución de los ácidos concentrados (HF y $H_3PO_4$) y solubilización de las sales ($NH_4F$). Se utilizaron en todos los casos reactivos pro análisis.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los electrolitos preparados consistieron en mezclas detalladas a continuación, con el fin de evaluar la efectividad de anodizado:

- 1 M $H_3PO_4$ + 0,3% p/v HF
- 1 M $H_3PO_4$
- 1 M $H_3PO_4$ + $NH_4F$ 15% p/v
- 0,1 M $H_3PO_4$ + $NH_4F$ 1,5% p/v

2.2. *Anodizado*

El crecimiento de películas anódicas de $TiO_2$ se realizó a diferentes voltajes en el rango de 10–80 V, aplicados de forma constante mediante una fuente de poder regulable (Arcano JY300). Se utilizó una celda de dos electrodos, empleando la chapa de titanio como electrodo de trabajo y un alambre de platino (99,99% de pureza, Cordés Roberto Argentina) como contra electrodo. La distancia entre electrodos se mantuvo en ~2 cm.

El tiempo de anodizado se varió entre 30 y 40 minutos. Durante el proceso, la celda se mantuvo a temperatura ambiente (22 ± 2 °C). Luego del anodizado los electrodos fueron enjuagados con agua ultra pura y acetona.

## 3. Resultados y discusión

Durante la fase experimental inicial, se anodizaron muestras en diferentes condiciones de voltaje y tiempos, utilizando electrolitos basados en ácido fosfórico, ácido fluorhídrico y fluoruro de amonio, como se detalla en la Tabla 1.

**Tabla 1**. Tratamientos aplicados sobre titanio.

| | Electrodo | Electrolito | Contra electrodo | Voltaje | Tiempo (min) | Resultado | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tratamiento 1 | $TiO_2$ | 1 M $H_3PO_4$ + 0,3% p/v HF | Pt | 80 | 30 | Anodizado, cambio de color | |
| Tratamiento 2 | $TiO_2$ | 1 M $H_3PO_4$ + 0,3% p/v HF | Pt | 30 | 30 | Anodizado, cambio de color | |
| Tratamiento 3 | $TiO_2$ | 1 M $H_3PO_4$ + 0,3% p/v HF | Pt | 0 | 0 | Interrupción del anodizado | |
| Tratamiento 4 | $TiO_2$ | 1 M $H_3PO_4$ + 0,3% p/v HF | Pt | 0 | 0 | Interrupción del anodizado | |
| Tratamiento 5 | $TiO_2$ | 1 M $H_3PO_4$ + 0,3% p/v HF | Pt | 0 | 0 | Interrupción del anodizado | |
| Tratamiento 6 | $TiO_2$ | 1 M $H_3PO_4$ + 0,3% p/v HF | Pt | 0 | 0 | Interrupción del anodizado | |
| Tratamiento 7 | $TiO_2$ | 1 M $H_3PO_4$ | Pt | 10 + 20 + 30 consecutivos | 3 + 3 + 3= 9 | Anodizado, cambio de color | |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tratamiento 8 | $TiO_2$ | 1 M $H_3PO_4$ + $NH_4F$ 15% p/v | Pt | 0 | 0 | Interrupción del anodizado | |
| Tratamiento 9 | $TiO_2$ | 0,1 M $H_3PO_4$ + $NH_4F$ 1,5% p/v | Pt | 30 | 40 | Anodizado, cambio de color | |

A partir de los tratamientos realizados, se pudo observar que en algunas condiciones no se logró anodizado controlado y el mismo fue interrumpido, ya que la fuente pasó de modo voltaje a corriente, acompañado por liberación de vapores, lo que sugiere procesos de electrólisis excesiva y descomposición del electrolito, este fenómeno es conocido en la literatura como una transición inestable del anodizado (Roy et al., 2011).

Como primera aproximación, se registraron cambios en la coloración de las chapas de titanio anodizadas, observándose tonalidades que variaron entre el amarillo, azul y violeta según las condiciones aplicadas. Estos cambios colorimétricos se atribuyen a fenómenos de interferencia en películas delgadas y constituyen una evidencia indirecta de la formación de capas de óxido de diferente espesor (Moon et al, 2014). Aunque, los mismos no permiten confirmar la morfología tubular, aportan información preliminar sobre el crecimiento de óxidos bajo distintas condiciones electroquímicas.

## 4. Conclusiones

A pesar de las dificultades técnicas, se obtuvieron películas anodizadas, que serán objeto de caracterización más detallada en la siguiente etapa del proyecto. Está previsto realizar análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), con el fin de confirmar la morfología, diámetro y longitud de los nanotubos, así como estudios electroquímicos para evaluar la respuesta foto electroquímica de los recubrimientos.

En conjunto, los resultados preliminares permiten identificar las variables críticas del proceso (voltaje, fracción de agua y tiempo de anodización) y establecer estrategias de ajuste para minimizar la transición inestable del anodizado y promover la formación de películas superficiales estables y reproducibles. Estos avances constituyen un paso fundamental para poner a punto la técnica de anodizado y avanzar hacia su aplicación en la inactivación fotocatalítica de microorganismos en aguas residuales.

## Referencias bibliográficas

David, T. M., Dev, P. R., Wilson, P., Sagayaraj, P., & Mathews, T. (2022). A critical review on the variations in anodization parameters toward microstructural formation of TiO2 nanotubes. Electrochemical Science Advances, 2(4), e202100083.

Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical Reviews*, 95(1), 69–96.

Gomez Sanchez, A., Schreiner, W., Duffó, G., & Ceré, S. (2013). Surface modification of titanium by anodic oxidation in phosphoric acid at low potentials. Part 1. Structure, electronic properties and thickness of the anodic films. Surface and interface analysis, 45(6), 1037-1046.

Liu, R., Yang, W. D., Qiang, L. S., & Wu, J. F. (2011). Fabrication of TiO2 nanotube arrays by electrochemical anodization in an NH4F/H3PO4 electrolyte. Thin Solid Films, 519(19), 6459-6466.

Moon, J. Y., Kemell, M., Punkkinen, R., Hedman, H. P., Park, B., Suominen, A., ... & Tuominen, A. (2014). Interference colors of TiO2 nanotube arrays grown by anodic oxidation. Advanced Materials Research, 875, 370-374.

Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). TiO2 photocatalysis: Design and applications. Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry Reviews, 13(3), 169-189.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Regonini, D., & Clemens, F. J. (2015). Anodized TiO2 nanotubes: effect of anodizing time on film length, morphology and photoelectrochemical properties. Materials Letters, 142, 97-101.

Roy, P., Berger, S., & Schmuki, P. (2011). $TiO_2$ nanotubes: synthesis and applications. Angewandte Chemie International Edition, 50(13), 2904–2939. https://doi.org/10.1002/anie.201001374

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional:** Venado Tuerto

# Cizalladura en probetas de madera contralaminada de pino ponderosa

## Shear Strength of Ponderosa Pine Cross-Laminated Timber Specimens

Presentación: 30/10/2025

**Andrea D. Tosco**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
atosco@frvt.utn.edu.ar

**Nicolás Decleire**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
ndecleire@frvt.utn.edu.ar

### Resumen

La madera contralaminada (CLT) se ha consolidado a nivel internacional como un material estructural innovador y sostenible. En Argentina, su estudio con especies locales se encuentra en una etapa incipiente, lo que demanda investigaciones que aporten parámetros de fabricación y desempeño. Este trabajo analiza la influencia de la cantidad de adhesivo y de la presión de prensado en la resistencia al corte de probetas de CLT de tres capas fabricadas con *Pinus ponderosa* de la región andino-patagónica. Se evaluaron dos gramajes de adhesivo estructural EPI (180 y 250 g/m²) y tres presiones de prensado (1, 2 y 6 kg/cm²), mediante ensayos de resistencia al esfuerzo cortante conforme a la norma UNE-EN 16351:2021.

**Palabras clave:** Madera maciza estructural. Encolado. Construcción sostenible.

### Abstract

Cross-laminated timber (CLT) has been internationally recognized as an innovative and sustainable structural material. In Argentina, research on CLT made from local species is still at an early stage, requiring studies that establish fabrication parameters and structural performance. This work investigates the influence of adhesive spread rate and pressing pressure on the shear strength of three-layer CLT specimens manufactured with Pinus ponderosa from the Andean-Patagonian region. Two spread rates of EPI structural adhesive (180 and 250 g/m²) and three pressure levels (1, 2, and 6 kg/cm²) were evaluated through shear strength tests in accordance with UNE-EN 16351:2021.

**Keywords:** Solid structural wood. Glued. Sustainable construction.

## 1. Introducción

El desempeño de la madera contralaminada (CLT) en estructuras depende de múltiples factores, entre los que destacan las propiedades físicas y mecánicas de la especie utilizada, la calidad y tipo de adhesivo empleado, la orientación y disposición de las láminas, las condiciones del proceso de fabricación y las uniones mecánicas. La fabricación comprende diversas etapas, que incluyen selección y clasificación de la madera, cepillado, corte de tablas, aplicación de adhesivo, armado del panel, prensado, lijado, corte final, control de calidad y empaque. Dentro de los parámetros críticos del proceso, la adhesión entre capas resulta especialmente significativa, ya que se encuentra condicionada tanto por las especificaciones de los fabricantes de adhesivos como por las propiedades de la madera y las condiciones de prensado. En cuanto a este último, los métodos

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

empleados son dos: prensado al vacío y prensado hidráulico. El primero tiene una capacidad que puede oscilar entre 0,05 y 0,1 N/mm$^2$ (0,5-1,0 kg/cm$^2$), lo que puede resultar insuficiente para corregir deformaciones o irregularidades de las tablas, comprometiendo el contacto uniforme entre las caras. En consecuencia, su aplicación suele restringirse al uso de adhesivos poliuretanos (tipo PUR), especies de coníferas y espesores de tabla no superiores a 40 mm. Por su parte, el prensado hidráulico permite alcanzar presiones mayores recomendándose valores de hasta 0,8 N/mm² (8,0 kgf/cm²) para láminas de espesor superior a 35 mm. De manera complementaria, se aconseja la aplicación simultánea de presión lateral en el rango de 0,2 a 0,5 N/mm², con el objetivo de minimizar la presencia de vacíos entre tablas de una misma capa (Do Nascimento, 2020; Karcabeyli y Gagnon, 2019; González et al., 2014; Schickhofer, 2010).

De acuerdo con la normativa vigente, los adhesivos aptos para la fabricación incluyen los basados en resinas fenólicas y aminoplásticas (MF, MUF, PRF), poliuretanos monocomponentes de curado en húmedo (PUR) y adhesivos de emulsión polimérica-isocianato (EPI). La calidad del encolado depende de factores como las características de la madera, el sistema de aplicación y la cantidad de adhesivo, debiendo garantizar una cobertura uniforme de la superficie. Tosco et al. (2024) reportaron delaminaciones en ensayos a flexión de prototipos CLT elaborados con pino elliottii-taeda, atribuidas a deficiencias en la unión entre láminas.

El objetivo del presente estudio es evaluar la influencia de la cantidad de adhesivo y de la presión de prensado en la resistencia al corte de probetas de CLT fabricadas en laboratorio. Para ello, se realizaron ensayos de resistencia al esfuerzo cortante ($f_v$) conforme al Anexo G de la norma UNE-EN 16351:2021. El estudio forma parte de un análisis más amplio —en el marco de una tesis doctoral— orientado a la caracterización de madera contralaminada fabricada con pino ponderosa, con miras a determinar la factibilidad de su aplicación en estructuras, prestando especial atención a configuraciones con 250 g/m² de adhesivo y presiones hidráulicas verticales cercanas a 2 kg/cm².

En Argentina, el estudio de la madera maciza estructural con especies locales se encuentra en una etapa incipiente, en contraste con los avances consolidados en otros países latinoamericanos. Esta situación evidencia la necesidad de generar conocimiento que permita caracterizar el comportamiento de las especies implantadas en el país con vistas a establecer parámetros normativos que favorezcan su utilización. En este contexto, el presente estudio adquiere relevancia al aportar datos técnicos sobre el pino ponderosa de la región andino-patagónica, contribuyendo no solo al desarrollo de la industria maderera nacional, sino también a la apertura de un campo aún poco explorado en la construcción argentina.

## 2. Materiales y métodos

### *2.1. Materiales*

Para la fabricación de las probetas de madera contralaminada (CLT) se emplearon tablas de *Pinus ponderosa (Dowglas ex Lawson)* provenientes de plantaciones cercanas a la ciudad de San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. Las mismas se encontraban cepilladas, libres de impurezas y estabilizadas en cámara bajo condiciones de 20 ºC y 65% de humedad relativa. Como adhesivo estructural se empeó Emulsión Polímero de Isocianato (EPI) 1975/1999 (adhesivo/catalizador) de la marca Akzo Nobel®.

### *2.2. Fabricación de muestras de ensayo*

En el laboratorio del Grupo de Investigación y Desarrollo en Estructuras Civiles (GIDEC) de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto (UTN FRVT) se fabricaron 35 muestras de madera contralaminada (CLT) de tres capas, con dimensiones de 70 mm x 100 mm x 560 mm (espesor x ancho x largo). Las láminas se dispusieron sin ranuras ni holguras, orientando las capas externas en dirección longitudinal a la fibra y la capa central en sentido transversal. De este modo, la configuración de espesores y orientaciones de cada capa quedó definida como 25x-20y-25x. La relación entre ancho y espesor fue superior a cuatro ($b_l/t_l > 4$).

Para la unión de capas se aplicaron dos dosis de adhesivo estructural: la recomendada y la máxima especificada en la ficha técnica del fabricante (180 y 250 g/m²), manteniendo una proporción adhesivo-catalizador de 100:15 en peso. La fabricación se realizó en ambiente controlado siguiendo las recomendaciones del fabricante del adhesivo. El tiempo total para la elaboración de cada probeta no superó los 10 minutos.

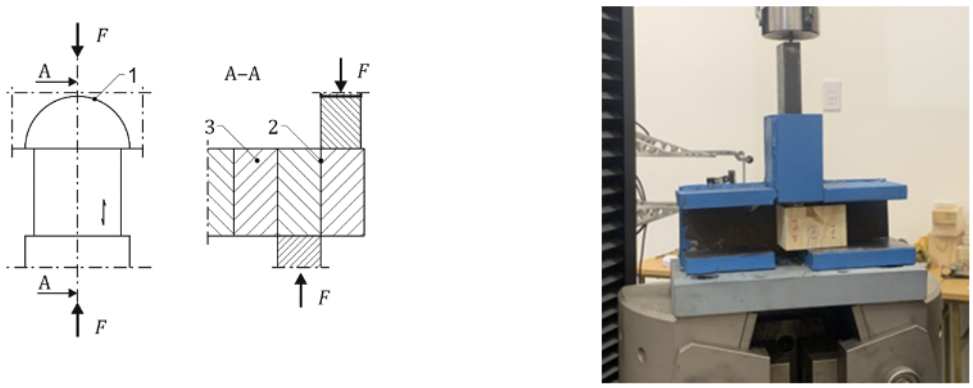
AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Posteriormente, las probetas fueron colocadas en un dispositivo de diseño propio, preparado para comprimir tres unidades garantizando una distribución uniforme de la presión. Se aplicaron tres niveles: 6, 2 y 1 kg/cm². El valor máximo se tomó de la norma IRAM 9660-1:2006, relativa a la fabricación de madera laminada encolada estructural, mientras que el mínimo se estableció según lo recomendado por el fabricante del adhesivo y coincide con la presión alcanzable mediante prensas de vacío.

### *2.3. Ensayos en submuestras*

Las muestras se subdividieron en submuestras de 50 mm x 50 mm x 70 mm (espesor x ancho x longitud) para la realización de ensayos de resistencia al esfuerzo cortante (Anexo G UNE-EN 16351:2021). Presentaban superficies planas, paralelas entre sí y perpendiculares al plano de encolado. Previo al ensayo, la superficie de cortante se midió con una precisión de 0,5 mm. Partiendo de mediciones de masa y volumen de la probeta completa, de acuerdo con la normativa UNE-EN 408:2010 + A1:2012 se obtuvo la densidad.

El ensayo se llevó a cabo en GIDEC mediante un dispositivo diseñado y fabricado en el propio laboratorio, el cual cumple con los requisitos establecidos en la normativa correspondiente (Figura 1). Dicho dispositivo fue montado en una máquina universal de ensayos Galdabini®, equipada con una celda de carga de 100 kN y una precisión de ± 1 %.




(A) (B)

**Figura 1.** (A) Esquema del ensayo de corte UNE EN 16351:2021, donde: 1: Apoyo en rótula. 2: Plano de cortadura. 3: Probeta de ensayo bloqueada, si es necesario. (B) Dispositivo y probeta para ensayo de esfuerzo cortante.

La máquina aplicó la carga de compresión sobre el dispositivo a velocidad constante, registrándose la carga máxima con una precisión de ±3 %. Cada submuestra se colocó con las fibras orientadas en la dirección de la fuerza aplicada. Bajo el incremento progresivo de la carga, se generó un esfuerzo cortante en el plano de encolado hasta producirse la rotura, la cual en ningún caso ocurrió antes de los 20 s. Posteriormente, se determinó el porcentaje de rotura atribuible a la madera (un alto porcentaje de rotura por madera es indicativo de una buena calidad de adhesión) y la resistencia al esfuerzo cortante ($f_v$), de acuerdo con la ecuación (1). Tras finalizar los ensayos, las muestras fueron secadas en estufa (UNE EN 13183-1:2019) para ajustar los valores de densidad a las condiciones de referencia del 12% de humedad (UNE-EN 384:2016).

$$f_v = k\frac{F_u}{A}$$
$$k = 0{,}78 + 0{,}0044\,t \qquad (1)$$

Donde, $F_u$ es la carga de rotura en N; $A = b\,t$ es el área de la superficie de esfuerzo cortante en mm²; $k$ es un factor de corrección para las probetas con anchura de superficie de cortadura paralela a la fibra menor que 50mm.

Los resultados obtenidos para la resistencia y el porcentaje de rotura por madera de uno de los planos de encolado fueron descartados, ya que el dispositivo presentó fallas al ejecutar el ensayo sobre este plano, lo que derivó en una aplicación incorrecta de la carga y en valores no representativos.

## 3. Resultados y discusión

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Durante los ensayos la madera adoptó un contenido de humedad del 12 ± 3%. La densidad media ajustada fue de 433 kg/cm$^3$ (máx: 554 kg/cm$^3$; mín. 376 kg/cm$^3$).

### *3.1. Resistencia al esfuerzo de corte*

En la Tabla 1 se presentan los valores de la resistencia al esfuerzo de corte ($f_v$) obtenidos en uno de los planos de encolado de las 50 submuestras ensayadas. Las mismas se encuentran agrupadas por serie según la combinación de la cantidad de adhesivo y la presión de fabricación. Las series $S_1$ y $S_5$ alcanzaron los mayores valores medios de $f_v$, en ambos casos se aplicó una presión de 6 kg/cm$^2$, resultando $S_5$ (3,22 N/mm$^2$ con 250 g/m$^2$) un 40% superior a $S_1$ (2,30 N/mm$^2$ con 180 g/m$^2$), explicado por la mayor cantidad de adhesivo. De manera similar, $S_1$ y $S_6$ mostraron valores medios muy próximos (2,30 N/mm$^2$ para 180 g/m$^2$ y 6 kg/cm$^2$ y 2,16 N/mm$^2$ para 250 g/m$^2$ y 2 kg/cm$^2$), pese a que la primera se fabricó con la menor cantidad de adhesivo y la mayor presión, y la segunda con la mayor cantidad de adhesivo y menor presión. Por último, las series $S_3$ y $S_4$, ambas con 180 g/m$^2$ de adhesivo, registraron valores comparables de $f_v$ (1,94 N/mm$^2$ y 1,84 para N/mm$^2$, respectivamente), lo que sugiere que el aumento de la presión de 1 a 2 kg/cm$^2$ tampoco fue determinante.

**Tabla 1.** Resistencia al esfuerzo de corte $f_v$ de encolado por serie (N/mm$^2$)

| Serie | Adhesivo - Presión | Plano 1 | | | | n |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | mín. | med. | máx. | COV | |
| $S_1$ | 180 - 6 | 1,92 | 2,30 | 2,72 | 12 | 10 |
| $S_3$ | 180 - 2 | 1,49 | 1,94 | 2,54 | 19 | 7 |
| $S_4$ | 180 - 1 | 1,34 | 1,84 | 2,63 | 35 | 5 |
| $S_5$ | 250 - 6 | 2,55 | 3,22 | 4,6 | 26 | 4 |
| $S_6$ | 250 - 2 | 1,02 | 2,16 | 4,10 | 34 | 24 |
| Total | | 1,02 | 2,18 | 4,10 | 29 | 50 |

Adhesivo en g/m$^2$. Presión en kg/cm$^2$. mín: mínimo. med: medio. máx: máximo. COV: Coeficiente de variación en %. n: cantidad de submuestras por serie.

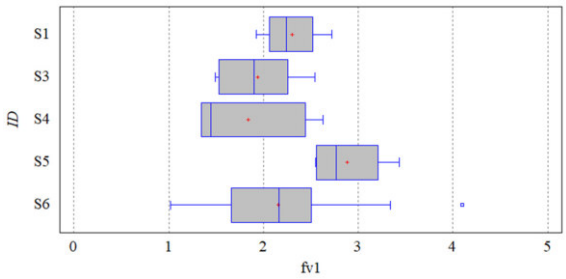



**Figura 2**. Dispersión la resistencia al esfuerzo de corte $f_v$ para el plano de encolado Nº1 (A) ordenado por serie

### *3.2. Rotura por madera*

En la Tabla 2 se muestran los valores medios del porcentaje de rotura por madera para el plano de encolado evaluado, se acompaña de la Figura 3, que ilustra la dispersión en los resultados. Los valores medios oscilaron entre 37,1 y 67,5%. Al comparar los grupos con mayor número de submuestras, se observa que la serie $S_6$ (55,8%, 250 g/m$^2$ y 2 kg/cm$^2$) superó en 13 % a la $S_1$ (49,5% 180 g/m$^2$ y 6 kg/cm$^2$). Asimismo, para la misma cantidad de adhesivo (180 g/m$^2$) y variando la presión de 6 a 2 kg/cm$^2$, $S_1$ resultó un 33% superior a $S_3$ (49,5% vs. 37,1%, respectivamente). Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones de ensayo y considerando las variaciones en la presión y la cantidad de adhesivo evaluadas, la contribución de la madera a la rotura fue relativamente estable entre las series. La Prueba de Múltiples Rangos (LSD) de Fisher no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre series, con un nivel de confianza del 95 %.

**Tabla 2**. Valor medio de la rotura por madera para cada plano de encolado (%)

| Serie | Adhesivo - Presión | Plano 1 | n |
|---|---|---|---|
| $S_1$ | 180 - 6 | 49,5 (53) | 10 |
| $S_3$ | 180 - 2 | 37,1 (98) | 7 |
| $S_4$ | 180 - 1 | 54,0 (66) | 4 |
| $S_5$ | 250 - 6 | 67,5 (49) | 4 |
| $S_6$ | 250 - 2 | 55,8 (63) | 23 |

Adhesivo en g/m$^2$. Presión en kg/cm$^2$. (COV): Coeficiente de variación en %. n: cantidad de submuestras por serie.

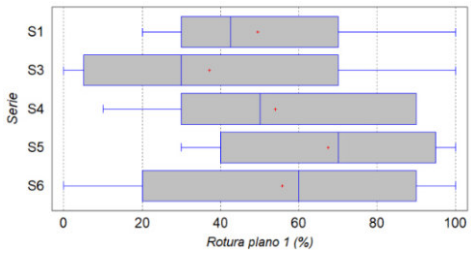



**Figura 3.** Rotura por madera para plano de encolado Nº1 por serie

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 4. Conclusiones

A escala de laboratorio y dentro de los rangos evaluados, la combinación de mayor presión y mayor cantidad de adhesivo condujo a los valores más elevados de resistencia al esfuerzo de corte. No obstante, también se observaron comportamientos semejantes entre probetas fabricadas con la menor cantidad de adhesivo y la mayor presión, en contraste con aquellas con mayor adhesivo y menor presión. En cuanto al porcentaje de rotura por madera, la elevada variabilidad registrada parece responder principalmente a las características intrínsecas del material, más que a los parámetros de encolado. Como limitación, se destaca el uso de probetas de pequeña escala, lo que restringe la extrapolación directa de los resultados a elementos estructurales de mayor tamaño. Pese a ello, los ensayos permitieron validar el dispositivo de prueba y constituyen una referencia técnica inicial para cálculos analíticos preliminares, que serán contrastados en estudios posteriores a escala real.

## Referencias bibliográficas

Asociación Española de Normalización (AENOR). (2005). *UNE-EN 384: Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad de la madera estructural*.

Asociación Española de Normalización (AENOR). (2012). *UNE-EN 408: Estructuras de madera. Madera aserrada y laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*.

Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). *UNE EN 13183-1:2019: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.*

Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). *UNE EN 16351: Madera estructural. Madera contralaminada (CLT). Requisitos*.

Ciro Almedida do Nascimento. (2020). Posibilidades para el desarrollo de la tecnología de maderacontralaminada (CLT) y su aplicación en la construcción: ESTUDIO SOBRE LA SITUACIÓN ACTUAL EN BRASIL. [Tesis mestría]. Barcelona.

González Soto, P., Saavedra, E., Pérez Pulgar, E., Burgos Leiva, C., Piña, F., & Wagner, M. (2014). *Sistema constructivo en madera contralaminada para edificios. Estudios de ingeniería para introducir en Chile un sistema constructivo de rápida ejecución para edificios de mediana altura, utilizando elementos de madera contralaminada*. Instituto Forestal (INFOR).

Guindos, Pablo (2019). *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte II*. UPV Press.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2006). IRAM 9660-1: Madera laminada encolada estructural. Parte 1 - Clases de resistencia y requisitos de fabricación y de control

Karacabeyli, E., & Gagnon, S. (Eds.). (2019). *Canadian CLT handbook: 2019 edition* (Vol. 1 & 2). FPInnovations.

Schickhofer, G. 2010, Cross laminated timber (CLT) in Europe – from conception to implementation. Presentation made at the CLT seminar. University of British Columbia, Department of Wood Science. March 22, 2010. Vancouver, Canada.

Schickhofer, G. 2010, Cross laminated timber (CLT) in Europe – from conception to implementation. Presentation made at the CLT seminar. University of British Columbia, Department of Wood Science. March 22, 2010. Vancouver, Canada.

Tosco, A. D., Filippetti, M. C., Decleire, N. A., & Guillaumet, A. A. (2024). Comportamiento estructural preliminar de paneles contralaminados (CLT) de Pinus elliottii-taeda en Argentina. En *Actas de las 28° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (JAIE)*.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Materiales
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional**: Rafaela

# Análisis de porosidad en un acople de Al-Si inyectado usando tomografía computada

## Porosity analysis in an injected Al-Si coupling using computed tomography

Presentación: 30/10/2025

**Carolina Cardozo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Departamento de Ingeniería Industrial, Rafaela, Santa Fe, Argentina
carolinacardozog3@gmail.com

### Resumen

Este estudio utiliza la tomografía computada de rayos X para revelar la estructura interna y porosidad en un acople de Al-Si fundido por inyección, un componente vital en el sistema de suspensión de vehículos pesados. Al emplear una meticulosa metodología de reconstrucción 3D y un análisis cuantitativo de los defectos, fue posible trascender la simple visualización y establecer una clasificación directa entre la forma de la porosidad y los parámetros clave del proceso de fundición. De esta forma, el trabajo no sólo revela los defectos internos, sino que también ofrece una visión clara de cómo la fabricación influye en la integridad del material.

**Palabras clave:** Madera de álamo, Propiedades mecánicas, Resistencia a flexión, Módulo de elasticidad, Densidad, Uso estructural.

### Abstract

This study uses X-ray computed tomography to reveal the internal structure and porosity of an injected Al-Si coupling, a vital component in heavy-duty vehicle suspension systems. By employing an exhaustive 3D reconstruction methodology and quantitative defect analysis, it was possible to go beyond simple visualization and establish a direct classification between porosity shape and key casting process parameters. In this way, the work not only reveals internal defects but also offers a clear view of how manufacturing influences material integrity.

**Keywords:** Poplar wood, Mechanical properties, Bending strength, Modulus of elasticity, Density, Structural use.

## 1. Introducción

Los componentes de aleación de aluminio-silicio (Al-Si) fundidos por inyección son de vital importancia en la industria automotriz, especialmente en sistemas críticos como la suspensión de vehículos pesados. No obstante, un desafío recurrente en la fabricación de estas piezas es la presencia de porosidad (Samuel et al., 2021). Es un defecto que puede afectar la integridad estructural y, de manera crítica, comprometer la estanqueidad de las piezas, lo que se traduce en fallas operativas.

El estudio de estos defectos requiere metodologías de inspección no destructiva. En este contexto, la tomografía computada de rayos X ha demostrado ser una herramienta invaluable, ya que permite la visualización y cuantificación de la estructura interna y los defectos volumétricos sin dañar el material (Maire and Withers, 2014; Hanke et al., 2016; Mathew et al., 2021). El presente trabajo complementa una investigación previa de Riva et al. (2025), en la cual se analiza las diferencias entre piezas de Al-Si aceptadas y rechazadas. Sin embargo, el análisis inicial no profundizó en la interconexión de los poros y su relación directa con la falla de estanqueidad, un aspecto crucial para entender el rendimiento de la pieza.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Este estudio tiene como objetivo principal analizar con mayor detalle la porosidad de un acople de Al-Si inyectado que fue previamente rechazado, a partir de una prueba de estanqueidad, en la industria donde se manufacturó. A través del análisis de tomografías computadas, se buscó identificar la morfología y distribución de los defectos, así como la existencia de una red de poros interconectados que, como se demostrará, es la causa fundamental de la pérdida de presión y el consecuente rechazo de la pieza.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. *Materiales*

La pieza es de aleación Al-Si, que comercialmente se identifica como ALCOA 380. El mismo es moldeado por inyección. Dicho material se compone de Aluminio (metal base), Silicio 9%, Hierro 0.85%, Cobre 3.5%, Magnesio 0.4%, Manganeso 0.5% y Zinc 1.4%.

Posterior al moldeo por inyección, se le realiza a la pieza un granallado para la limpieza de la superficie, mecanizado para las superficies con roscado y un baño de silicato de sodio. Este último tiene como objetivo sellar fugas y llenar huecos, como lo son los poros superficiales y pasantes que afectan la estanqueidad de la pieza, además de ser una capa anticorrosiva. Si la prueba de estanqueidad determina que la pieza no puede cumplir su función primaria, se realiza un segundo baño de silicato de sodio y se repite la prueba. De no pasarla la pieza queda descartada y se introduce en el horno sin ningún tratamiento previo para remover el baño depositado en su superficie.

### 2.2. *Tomografía*

Se optó por tomografía computada para la inspección no destructiva de la estructura interna del material. La porosidad es un defecto común en las piezas fundidas de aluminio-silicio, para su estudio se utiliza un visualizador de reportes que permite detectar, visualizar y cuantificar los poros utilizando el algoritmo VGSTUDIO MAX 3.0. (Volume graphics, 2025). Si bien la pieza a analizar cuenta con dimensiones adecuadas para el tomógrafo, se optará posteriormente en seleccionar distintas regiones de interés para un mejor desarrollo.

Dentro de los parámetros que permitieron realizar la reconstrucción 3D, el voltaje fue de 170 kV, la corriente fue de 100 µA, la magnificación de x fue de 2,04 con 1000 imágenes escaneadas, el tiempo de escaneo fue de 60 minutos y un tamaño de vóxel de 97 µm.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. *Porosidad pieza completa*

La pieza a analizar contiene 25941 poros, los cuales tienen un radio que varía entre 0.12mm a 7.40mm. Según el programa, el 99.38% los poros presentes tienen un radio inferior a 1mm. Los defectos de pequeño tamaño indican que la pieza no se verá afectada en cuanto a sus propiedades mecánicas, pero si en cuanto a su estanqueidad. La morfología de los orificios permite intuir cuáles son sus posibles orígenes. El software mide el grado de esfericidad utilizando el volumen del poro y su superficie, siendo la relación entre el área real del mismo y el área de la esfera que mejor se adecua a su tamaño (Díaz et al., 2020; Toledo et al. 2022). La Tabla 1 muestra una clasificación en distintos grados, dando como resultado que el 57,45% de los poros son esféricos ligeramente irregulares.

**Tabla 1.** Esfericidad de poros.

| Condición | Esfericidad | Cantidad | Porcentaje (%) |
|---|---|---|---|
| Esferoidal | $R \geq 0{,}8$ | 48 | 0,19 |
| Esferoidal ligeramente irregular | $0{,}6 \leq R < 0{,}8$ | 14904 | 57,45 |
| Esferoidal irregular | $0{,}45 \leq R < 0{,}6$ | 10644 | 41,03 |
| Poros no esferoidales | $0{,}45 > R$ | 345 | 1,33 |

Los poros con formas irregulares, alargadas o dendríticas, comunes en la porosidad por contracción, actúan como concentradores de tensión. Esto significa que, bajo carga las tensiones se magnifican en los bordes afilados del poro, llevando a la iniciación de grietas y a fallas prematuras (Deev et al., 2019. Los intersticios de mayor redondez tienden a tener menor

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

impacto y son comúnmente inclusiones de tipo gaseosa. Los motivos de aparición pueden ser liberación de hidrógeno, gases de agentes desmoldantes o por el proceso de inyección. Otros poros también están presentes, pero en menor proporción, siendo identificados por su forma totalmente irregular y tendencia a ubicarse en la superficie.

Agrupando en un mismo gráfico las variables analizadas con anterioridad, vemos que la esfericidad de los poros mantiene una relación inversamente proporcional con el diámetro de los mismos (véase Figura 1). Volviendo a los poros de menor esfericidad con formas alargadas, resultan ser los poros de mayor tamaño. Estos pueden ser producto de contracciones durante la solidificación o bien pequeños poros interconectados que el visualizador identifica erróneamente como individuales de mayores dimensiones.

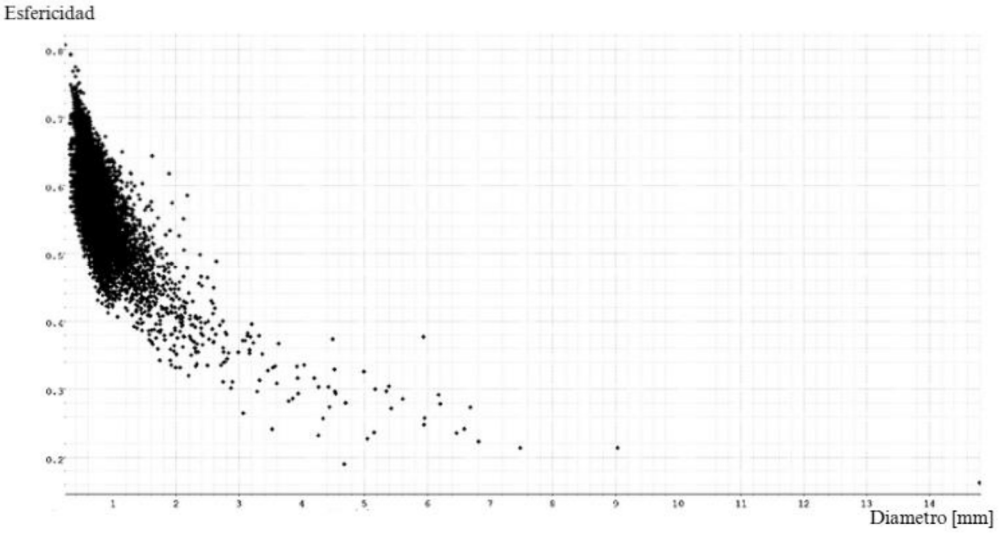



**Figura 1**. Diagrama esfericidad - diámetro de poro.

Por otra parte, se analiza cuáles son las zonas que presentan mayor porosidad en general. Según la Figura 2, a simple vista se identifica que, si bien existen poros de pequeño tamaño distribuidos uniformemente en la pieza, la zona céntrica presenta una situación crítica. Es la región que debe mantener el fluido estanco, aun así, es la que concentra mayor cantidad de poros y los de mayor tamaño, que pueden diferenciarse gracias a la escala de colores.

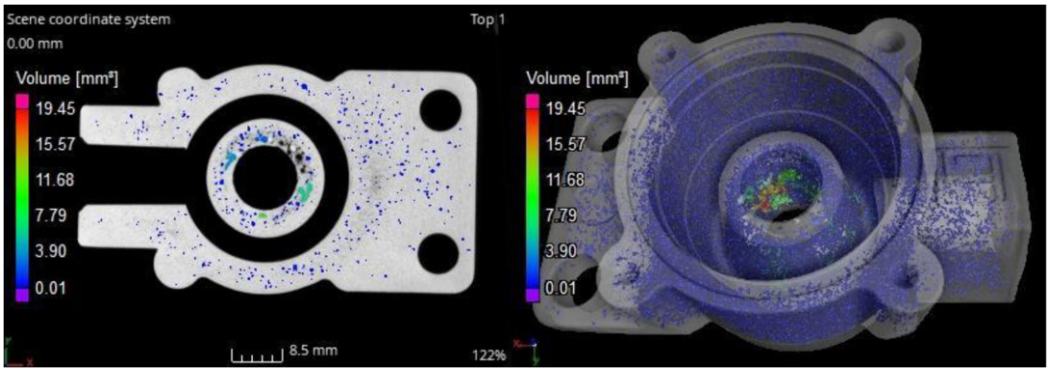



**Figura 2**. Plano x-y superior y vista del volumen completo.

Existen distintos tipos de porosidad: totalmente cerrada, donde los poros están en el interior de la pieza, porosidad ciega, cuando inicia en la superficie y termina dentro del cuerpo de la pieza y pasantes, que comienzan en una superficie y finalizan en la cara opuesta. Estos últimos, son pasos que permiten la fuga de aire, y por ende, la pérdida de presión que condiciona el rendimiento de la prueba de estanqueidad de la pieza. Para identificarlos se utiliza la herramienta malla del mencionado visualizador, la cual resalta con una línea los bordes de la superficie de la pieza escaneada en todas sus vistas. Sobre la misma se buscan imperfecciones en el área que está en contacto con el aire y posteriormente se analiza desde distintos ángulos si es efectivamente un poro pasante.

A medida que el cursor se desliza en los distintos planos, se aprecia como algunos de los poros existentes en el interior del cuerpo están señalados. Esto se debe a que la herramienta de malla identifica toda la superficie, incluyendo faltantes de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

material o poros que inician en la superficie. Si bien el visualizador no evidencia pasantes, hay una cantidad de poros de gran volumen unidos entre sí por poros pequeños que permiten la circulación del aire a través de la pieza. La interconexión de poros no debe subestimarse ya que puede terminar en dos escenarios: fugas y falla de estanquidad. La pieza consta de paredes delgadas en la zona céntrica, que cuentan con mucha porosidad conectada entre sí, ante la mínima micro fisura en la superficie externa las probabilidades de que se conecte a la red son altas, permitiendo salida de flujo interno y por ende caídas de presión fuera del valor aceptable.

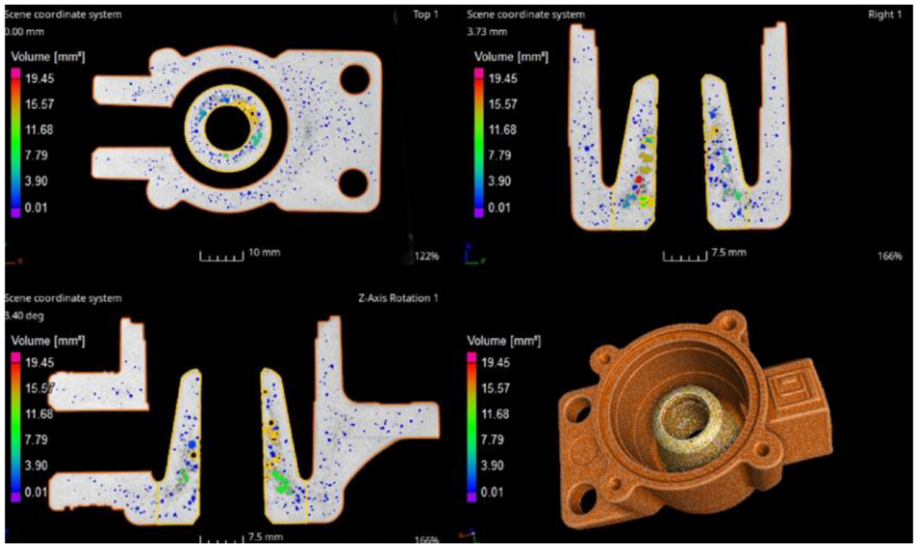



**Figura 3**. Red de poros interconectados internamente.

*3.2. Regiones de interés (ROI)*

La Figura 3 contiene imágenes que evidencian dicha red de poros en la zona céntrica de la pieza, en las paredes y salida de aire de sección cónica. Para una mayor resolución se procede a realizar una ROI (cono central con contorno amarillo en Figura 3), en la cual se inspeccionaría el volumen de la red de poros. Dicho volumen cuenta con 3859 poros, un 14,18% de los poros de la pieza total, pero lo que se distingue es la irregularidad de dichos poros descrita en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Esfericidad de poros en ROI

| Condición | Esfericidad | Cantidad | Porcentaje (%) |
|---|---|---|---|
| Esferoidal | $R \geq 0,8$ | 0 | 0 |
| Esferoidal ligeramente irregular | $0,6 \leq R < 0,8$ | 1220 | 31,61 |
| Esferoidal irregular | $0,45 \leq R < 0,6$ | 2053 | 53,20 |
| Poros no esferoidales | $0,45 > R$ | 586 | 15,19 |
| | Total | 3859 | 100 |

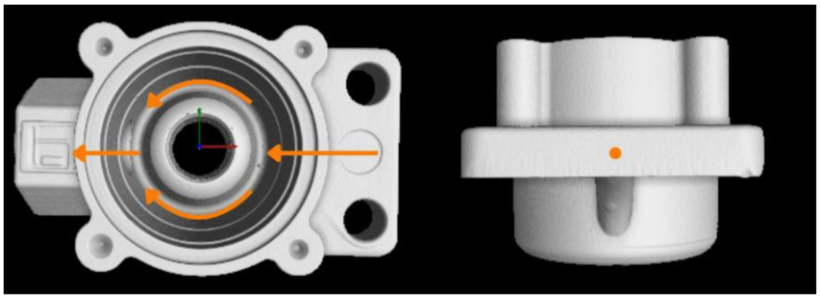


**Figura 4**. Inicio de alimentación (boquilla) y flujo de llenado.

La pieza a examinar, como se mencionó anteriormente, se manufactura mediante fundición por inyección. Si bien la presión es la necesaria para el llenado de volúmenes alejados o más pequeños, estas zonas siguen siendo críticas ya que su temperatura disminuye a mayor velocidad, y por lo tanto, la solubilidad del hidrógeno desciende, generando inclusiones de tipo gaseosas (Loizaga et al., 2008). Otro factor a analizar en la solidificación es el sentido de flujo del material en estado

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

líquido, el cual ingresa donde está situado el punto naranja en la vista lateral derecha de la pieza (Figura 4) y circula como indican las flechas en la vista superior. El primer volumen en llenarse por completo es el cono central, donde ingresa el material fundido ascendiendo.

Para analizar cómo influye en la porosidad, la ROI (cono central) se subdividió en tres partes: la sub-región A en rojo, B en amarillo y C en verde (ver Figura 5). Las subregiones B y C tienen en común que, en el momento de llenado del cono, el flujo debe ascender y luego recorrer un camino circunferencial a izquierda (ver Figura 4) pudiéndose generar turbulencias.

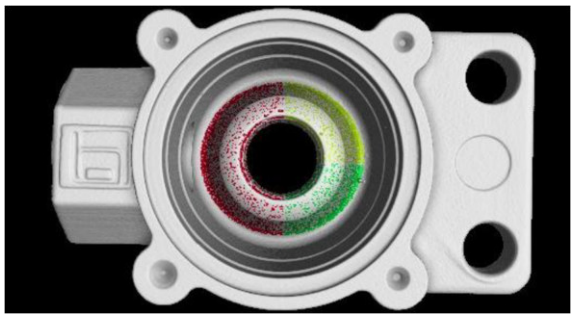


**Figura 5**. Sub-regiones del cono central.

Con la asistencia que ofrece el software VG STUDIO MAX, se determina que, dentro de la región frontal, no existe una diferencia sustancial entre el lado izquierdo y el derecho de la pieza. Además, el comportamiento de las tres regiones es similar en cantidad total de poros como en morfología, como muestra la Tabla 3. Por ende, queda descartada la hipótesis de formarse mayor cantidad de poros en el frente por la turbulencia de flujo. Otra observación es que, en las distintas regiones evaluadas, el tipo de porosidad que prevalece es del tipo irregular, debiéndose a contracciones al solidificar más que inclusiones gaseosas.

**Tabla 3.** Subregiones evaluadas

| Características | Subregión | | |
|---|---|---|---|
| | A | B | C |
| Cantidad de poros | 3840 | 1885 | 1647 |
| Total por región | 3840 | 3582 | |
| | Posterior | Frontal | |
| R ≥ 0,8 | 0,73 | 0,74 | 0,65 |
| 0,6 ≤ R < 0,8 | 49,74 | 53,42 | 54,51 |
| 0,45 ≤ R < 0,6 | 39,11 | 37,98 | 37,95 |
| 0,45 > R | 10,42 | 7,85 | 6,89 |

Además, se destaca que según Tabla 2- ROI la cantidad de poros total era de 3859 y según la Tabla 3-Sub-regiones evaluadas, la suma total de los reportes de porosidad da un total de 7422 poros, casi el doble que el anterior. Al subdividir en tres, se optó por modificar la configuración del módulo de análisis de poros. Para el primer análisis se utilizó el módulo VGDefeX, que emplea una variación de grises, además de tener en cuenta el ruido y ser más preciso en el criterio de variabilidad. Para la segunda revisión se utilizó 2.x compatibility, un análisis más básico pero que en este caso se adaptó dando mayor exactitud.

## 4. Conclusiones

El análisis de la pieza mediante tomografía computada fue fundamental para comprender la causa de la falla de estanqueidad. La pieza fue rechazada no por la cantidad de poros, sino por la existencia de una red de poros interconectados de morfología irregular en la zona céntrica, lo que genera fugas y pérdida de presión. La morfología de estos poros, alejada de la forma esférica ideal y con un alto grado de irregularidad, confirma la propensión de la pieza a fallar bajo las condiciones de la prueba de estanqueidad.

Es importante considerar la influencia del software en los resultados. A pesar de su alta exactitud, se observó que la visualización puede no ser totalmente concluyente. Por ejemplo, el programa no evidenció la existencia de poros pasantes, a pesar de que la pieza falló la prueba de estanqueidad, lo que sugiere que podrían estar presentes como parte de una red

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

interconectada en lugar de un canal directo. Un mayor acercamiento de la herramienta de visualización puede hacer que poros que están interconectados se muestren como poros individuales. Esto subraya que la interpretación de los datos del software requiere un análisis crítico y no solo la lectura superficial de los resultados, como también conocimiento del ajuste adecuado de sus parámetros.

## Agradecimientos

Agradezco profundamente a Diego Pollini por su contribución con el componente analizado e información sobre el proceso productivo de su conformación A Matías Peralta e INTI por su dedicación al proceso de reconstrucción por tomografía computada, brindando información vital para el desarrollo del presente escrito. También a Felipe Díaz por su orientación y apoyo constante. Además, a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Facultad Regional Rafaela (UTN), por su apoyo en cuanto al financiamiento del mismo.

## Referencias bibliográficas

Deev, V. B., Prusov, E. S., Shunqi, M. et al. (2019). The influence of the melt cooling rate on shrinkage behaviour during solidification of aluminum alloys. *Mater. Sci. Eng.*, 537, Article ID 022080.

Díaz, F.V., Peralta, M.E. and Fernandino, D.O. (2021). Study of sphericity and compactness parameters in spheroidal graphite iron using X-ray micro-computed tomography and image processing. *Journal of. Nondestructive Evaluation*, 40, 1-10.

Hanke, R., Fuchs, T., Salamon, M. and Zabler, S. (2016). X-ray microtomography for materials characterization. In: Hübschen, G., Iris Altpeter, I., Tschuncky, R. and Herrmann, H. (eds.), Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods, pp. 45-79.

Maire, E., Withers, P. J. (2014) “Quantitative X-ray tomography”. *International Journal of Metalcasting,* 59, 1-43.

Mathew, J., Williams, M.A. and Srirangam, P. (2021). “X-ray computed tomography studies on porosity distribution in vacuum induction cast Al-7Si alloys”, *JOM*, 73, 3866–3872.

Loizaga, A., Sertucha, J. y Suárez, R. (2008). “Defectos metalúrgicos generados por la presencia de gases en el metal fundido”, *Anales de Química*, 104 (2), 111-119.

Riva, B., Díaz, F.V., Peralta, M.E. y Cardozo, C. (2025) “Micro-tomografía de rayos x aplicada a estudios de porosidad en componentes de al-si inyectado”. Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica CAIM 2025, Buenos Aires, Argentina, 17-19 de Septiembre (enviado).

Samuel, A.M., Zedan, Y., Doty, H., Songmene, V. and Samuel, F.H. (2021). A review study on the main sources of porosity in Al-Si cast alloys. Adv. Mater. Sci. Eng., 2021, 1-16.

Toledo, J.C., Díaz, F.V., Peralta,, M.E. and Fernandino D.O. (2022). “High-quality nodule analysis in spheroidal graphite cast iron using X-ray micro-computed tomography”. *Fracture and Structural Integrity*, 62, 279-288.

Volume graphics VGSTUDIO (2025). Disponible en <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgsm.html>

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Análisis de inconsistencias en el prototipo de speckle dinámico para evaluación de hidratación del cemento: identificación y caracterización de problemas de configuración

## Analysis of inconsistencies in the dynamic speckle prototype for cement hydration evaluation: identification and characterization of configuration issues

Presentación: 30/09/2025

**Catalina Durdos**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina
cdurdos@frsf.unt.edu.ar

**Yazmin Acosta**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina
yacosta@frsf.unt.edu.ar

### Resumen

La hidratación del cemento es un proceso químico que involucra fenómenos físicos de disolución, difusión y precipitación, modificando continuamente la superficie y la microestructura del material. Estos cambios pueden monitorearse mediante interferometría de speckle dinámico, técnica basada en el análisis cuantitativo de las variaciones temporales del patrón de moteado. En trabajos previos, se desarrolló un prototipo basado en equipamiento óptico de laboratorio, para el análisis de muestras cementicias a edades tempranas de hidratación. Sin embargo, se detectaron discrepancias respecto a resultados de referencia. El objetivo del estudio fue identificar y caracterizar estos errores, determinando si su origen se debía a deficiencias del prototipo o al software utilizado para el procesamiento digital de las imágenes capturadas. El análisis sistemático de errores reveló que las desviaciones no provenían de limitaciones del prototipo ni de deficiencias en el software de procesamiento de imágenes, sino de errores de configuración en los parámetros.

**Palabras clave:** Speckle dinámico, prototipo, cemento

### Abstract

Cement hydration is a chemical process that involves physical phenomena such as dissolution, diffusion, and precipitation, continuously modifying the surface and microstructure of the material. These changes can be monitored through dynamic speckle interferometry, a technique based on the quantitative analysis of temporal variations in the speckle pattern. In previous studies, a prototype was developed based on laboratory optical equipment for the analysis of cementitious samples at early hydration stages. However, discrepancies were detected with respect to reference results. The aim of the study was to identify and characterize these errors,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

determining whether their origin was due to deficiencies in the prototype or in the software used for the digital processing of the captured images. The systematic error analysis revealed that the deviations did not stem from limitations of the prototype or deficiencies in the image processing software, but rather from misconfigurations in the parameter settings.

**Keywords:** Dynamic Speckle, prototype, cement

## 1. Introducción

El cemento es un material que consta de cuatro componentes anhidros principales: el silicato tricálcico ($C_3S$), el silicato bicálcico ($C_2S$), el aluminato tricálcico ($C_3A$) y el ferroaluminato tetracálcico ($C_4AF$). Cuando se pone en contacto el cemento con el agua se comienza el proceso de hidratación en donde los anhidros interactúan químicamente con ella, transformándose en hidratos y dando lugar a la formación de cristales de distintos tamaños y formas que van ocupando los espacios libres incluso los que inicialmente fueron ocupados por el agua. (Balzamo et al., 2012: 21)

El proceso de hidratación puede diferenciarse en varias etapas características. Durante los primeros 15 minutos aproximadamente se produce la hidrólisis de los silicatos, originando la precipitación de portlandita (CH), etringita y silicato cálcico hidratado (C-S-H). La formación de una capa de productos de hidratación sobre la superficie de los granos de cemento retarda la hidratación posterior, dando inicio al período durmiente que puede durar de 2 a 4 horas, caracterizado por una relativa inactividad donde la pasta del cemento permanece plástica y trabajable. La ruptura de la capa sobre los granos de cemento define el fin del período durmiente y el inicio del fraguado, ya que esta ruptura posibilita que el proceso de hidratación continúe. A medida que la hidratación avanza, los productos resultantes van llenando los vacíos entre los granos de cemento generándose puntos de contactos, causando la rigidización hasta que la concentración de hidratos limita la movilidad de la pasta alcanzando el fraguado final, dándole paso al período de endurecimiento donde la misma comienza a ganar resistencia. El período de fraguado se caracteriza por una aceleración en la velocidad de hidratación, en tanto que el período de endurecimiento es un estado durante el cual las reacciones se desaceleran (Balzamo et al., 2012: 45 - 46 ;52 - 53).

El conocimiento detallado de este proceso y la verificación de su desarrollo adecuado resulta de importancia, dado que durante esta etapa se determinan en gran medida las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del material cementicio. Por ello, el monitoreo de la hidratación bajo condiciones de servicio adquiere particular relevancia, ya que controlar este proceso inicial crítico permite garantizar buenas prácticas constructivas y contribuir a la calidad y al desempeño duradero del material

Uno de los campos que se explora en el desarrollo de técnicas de monitoreo del proceso de hidratación de materiales cementiceos es la interferometría, cuyo objetivo principal consiste en la medición de parámetros físicos mediante la aplicación del fenómeno de interferencia óptica. Dicho fenómeno ocurre cuando dos ondas mutuamente coherentes se superponen en alguna región del espacio, formando onda resultante de mayor, menor o igual amplitud. Dos ondas son mutuamente coherentes únicamente en dos casos específicos: cuando tienen su origen en la misma fuente luminosa, o cuando son monocromáticas y poseen exactamente la misma frecuencia temporal (Gonzalez, 2018: 2).

Dentro de esta área se encuentra el análisis de patrones de speckle dinámico (DSPA) o patrón de moteado. El DSPA constituye un método óptico no destructivo y de aplicación remota que permite el monitoreo continuo de cambios microestructurales y dinámicas superficiales en materiales. La técnica se basa en la iluminación de una superficie con luz coherente, típicamente de un láser, lo que produce patrones de speckle característicos: distribuciones aleatorias de puntos brillantes de alto contraste rodeados por regiones oscuras. Estos patrones resultan de la interferencia constructiva y destructiva de ondas de luz coherentes dispersadas por las irregularidades microscópicas de la superficie del material. La intensidad de este patrón de speckle es cuantificada mediante el índice de movilidad (IM/MI). Cuando se lo analiza a lo largo del tiempo, cada patrón contiene información detallada sobre la superficie del material y cualquier cambio se refleja en alteraciones en su distribución espacial (Jamali et al.,2025: 2).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Además de su aplicación en el monitoreo del proceso de hidratación del cemento, el DSPA ha encontrado aplicaciones en múltiples campos científicos y tecnológicos. Por ejemplo, en ciencia de materiales, facilita el análisis de materiales blandos y la caracterización de recubrimientos superficiales, posibilitando el estudio de procesos físicos, químicos. Otro ejemplo es el del sector agroalimentario, donde se lo ha implementado para la evaluación no destructiva de calidad y seguridad de productos alimenticios, proporcionando una metodología de análisis que permite la determinación de parámetros de calidad sin contacto físico con las muestras (Jamali et al.,2025: 2).

La configuración tradicional empleada para aplicar el método mencionado consiste en un montaje óptico no portátil, conformado por equipos de alta precisión instalados en laboratorios con condiciones controladas de estabilidad óptica. Debido a que se quiere monitorear el desarrollo del proceso de hidratación de materiales cementiceos en condiciones de servicio mediante ensayo de micro speckle dinámico se desarrolló un prototipo portátil que se muestra en la Figura (1), basado en los equipos empleados tradicionalmente en los ensayos de laboratorio. Para ello se empleó una lupa digital de 2.0 MP con sistema de control automático que captura las imágenes y las almacena en una tarjeta de memoria integrada, y un láser semiconductor de 5 mW y 650 nm como fuente luminosa (Zamateo y Oliva, 2023: 2-3).

**Figura 1**. Prototipo portátil para ensayo de speckle dinámico basado en los equipos empleados tradicionalmente.

Las imágenes se capturan mediante un software de control que permite modificar la sincronización de la cámara ajustando los intervalos de tiempo predefinidos por el operador, para luego ser procesadas por algoritmos programados previamente, los cuales determinan la variación de la movilidad para la serie de imágenes procesadas.

Para determinar el índice de movilidad se emplea el algoritmo “CECILIA”, desarrollado por el grupo de investigación en proyectos previos, el cual define el índice de movilidad en función de la variación de la intensidad. Se opta por emplear dicho algoritmo ya que es el que mejor se adapta al fenómeno que se pretende evaluar. El sistema comienza capturando imágenes que se almacenan en la tarjeta de memoria y son posteriormente procesadas empleando el algoritmo mencionado integrado a un software desarrollado por el GIF (Grupo de Grupo de Investigación en Física Aplicada), para la obtención del índice de movilidad en función de la variación de la intensidad (Zamateo y Oliva, 2023: 2-3).

El ensayo de micro speckle dinámico se realiza por triplicado, con una duración total de 24 horas. Durante las primeras horas se registra el proceso de hidratación, en el cual el equipo captura 11 imágenes cada 5 minutos, permitiendo determinar la movilidad asociada a dichas capturas.

En trabajos anteriores, para comprobar su eficiencia, se analizaron los registros de movilidad al efectuar el ensayo en tres recintos distintos de la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Santa Fe empleando la misma muestra (pasta de cemento CPN de consistencia normal), para evaluar el impacto que tiene el medio en el que se encuentra inmerso. Se observa en la Figura (2) que la curva obtenida con el prototipo que presentó mejor concordancia con la obtenida mediante el equipo de precisión, llamada “PATRÓN”, fue la correspondiente a la muestra ensayada en el recinto con condiciones estables de temperatura y humedad, sin flujo de personas, en condiciones similares a las del laboratorio de óptica. Este trabajo permitió determinar las condiciones de operación del prototipo, en las cuales se logró la reproducibilidad del ensayo de laboratorio óptico. (Zamateo y Oliva, 2023: 2-3).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

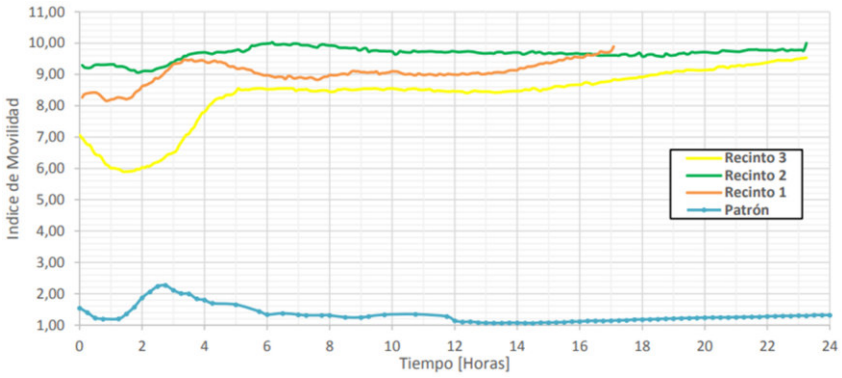



**Figura 2**. Gráfica de IM en función del tiempo. Comparación de la curva patrón (determinada con equipo tradicional) y de las curvas obtenidas en distintos recintos (determinadas con el prototipo portátil).

Durante la siguiente fase de la investigación, se pretendían estudiar distintas muestras para seguir analizando la correlación entre el Índice de Movilidad (IM) y los productos de reacción. Sin embargo, se detectó que las curvas obtenidas no correspondían a las esperadas, presentando incongruencias en los resultados. El presente trabajo tiene como objetivo analizar la ejecución del ensayo a los fines de identificar la fuente de variabilidad, determinando si se deben al funcionamiento del prototipo o del software, o bien si no existe correlación entre el speckle dinámico y el proceso de hidratación del cemento durante las etapas de inicio y fin del fraguado.

## 2. Materiales y métodos

Para analizar la ejecución del ensayo se llevaron adelante los siguientes pasos:

a) Se reprocesaron las imágenes obtenidas a partir del prototipo en ensayos realizados durante el año 2024 empleando el programa “GIFSpeckle”. El software arroja un archivo “.txt” listando el IM asociado a la superficie de la muestra cada 5 minutos. Luego se confeccionan tablas y gráficas empleando una hoja de cálculo obteniendo finalmente las curvas IM vs. Tiempo de cada ensayo.
b) Se compararon las gráficas de diez ensayos obtenidas en el reprocesamiento con la gráfica “PATRÓN”.
c) Las imágenes capturadas por el prototipo se encuentran enumeradas en forma sucesiva e indican la fecha y hora de captura. Se controlaron los datos de las imágenes capturadas, así como de los registros de laboratorio donde se indica la hora de inicio de contacto del cemento con el agua y hora de inicio del monitoreo, cantidades empleadas en la elaboración de la muestra, temperatura y humedad del laboratorio de moldeo y del laboratorio de monitoreo. Se contrastaron las fechas y horarios de ambos registros.
d) Repetición de ensayo: se determinó la cantidad necesaria de agua para consistencia normal según norma IRAM 1612:2006. Una vez determinada la cantidad de agua, se moldeó una muestra bajo la norma IRAM 1619:2003 “Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado”. Y se monitoreó el proceso de hidratación empleando el prototipo en condiciones estables de temperatura y humedad, sin flujo de personas.
e) Las imágenes capturadas por el prototipo se procesaron con el software “GIFSpeckle”. Con el listado del IM se confecciona la tabla y gráfica empleando una hoja de cálculo para obtener la curva IM vs Tiempo.
f) Nuevamente se comparó la curva obtenida del ensayo con la curva “PATRON”.

## 3. Resultados y discusión

La Figura (3) muestra las gráficas obtenidas mediante la hoja de cálculos con los datos arrojados por el programa “GIFSpeckle” al procesar las imágenes de las muestras ensayadas durante el año 2024. Se observó la presencia de incongruencias en comparación con la curva “PATRÓN”, confirmando la presencia de errores.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

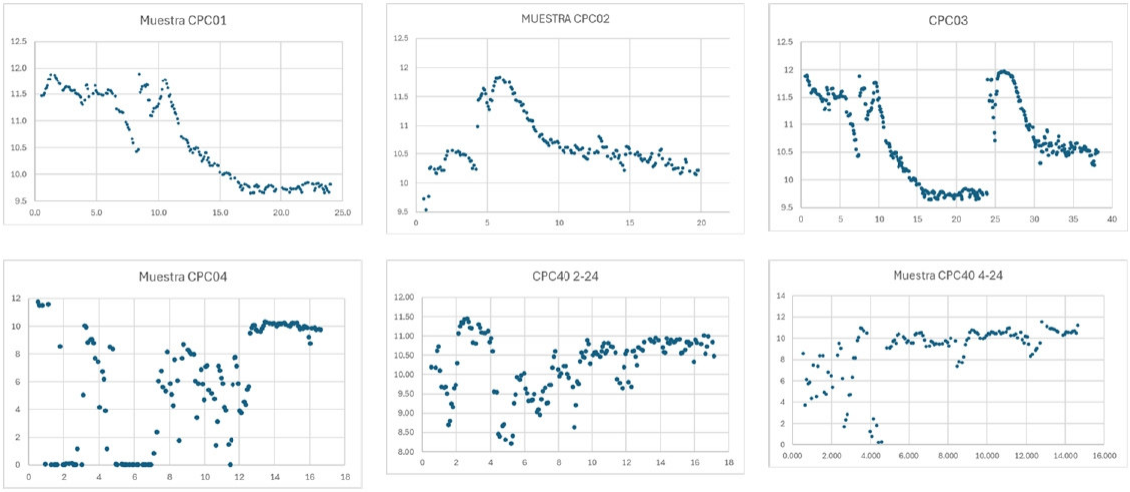



**Figura 3**. Gráficas IM en función del tiempo. Curvas de las muestras ensayadas en el año 2024 con el prototipo portátil.

Al analizar los datos de las imágenes capturadas por el prototipo se observó una falta de concordancia entre los datos tomados por el prototipo y los anotados manualmente.

En el análisis de las fechas y horarios registrados por el prototipo y su comparación con las anotaciones realizadas durante el ensayo, se observó que el dispositivo tomó 10 imágenes cada 6 minutos cuando en un principio fue configurado para que tomara 11 imágenes cada 5 minutos. Como el programa estaba configurado para analizar 11 imágenes cada 5 minutos según los parámetros del prototipo, se identificó un error adicional en las curvas debido a que los intervalos de captura no correspondían a los programados, presentaban desfase temporal. Otro error de desfase en el programa fue debido a que en determinados ensayos el dispositivo tomaba imágenes de ajuste y en otros no. Además, durante un mismo ensayo, el prototipo alternaba entre capturar 11 imágenes cada 5 minutos y 10 imágenes cada 6 minutos, mezclando ambos modos de operación.

Estas inconsistencias en la captura imposibilitaron la obtención de curvas coherentes durante el procesamiento de los datos. Se comparó la gráfica obtenida con la gráfica de la curva patrón y se confirmó la presencia de errores. Debido a que las curvas obtenidas anteriormente con el prototipo presentan una tendencia similar a la obtenida con el equipo de precisión, se podría decir que si el prototipo funciona como es debido se encuentra una relación entre el proceso de hidratación del cemento y los registros de movilidad.

La curva obtenida, que se observa en la Figura (4), es de la muestra realizada este año la cual ayudó a la verificación de los errores debido a la discrepancia con la curva “PATRON” mostrada en la Figura (2).

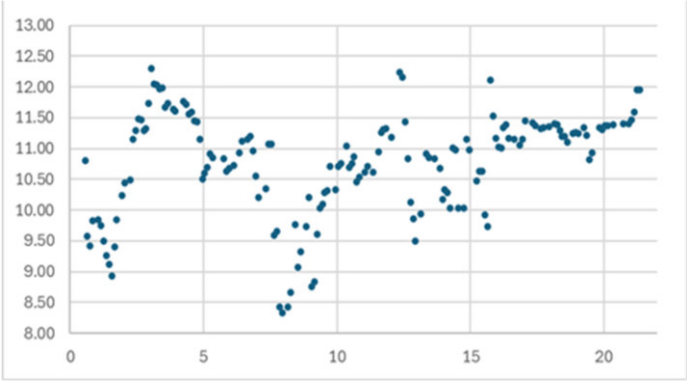


**Figura 4**. Gráfica IM en función del tiempo. Ensayo de verificación con muestra CPN 1 en 2025 con el prototipo portátil.

Actualmente se está trabajando en mejorar el funcionamiento del prototipo para corroborar la relación entre el proceso de hidratación del cemento y los registros de movilidad obtenidos mediante speckle dinámico. Tras consultar el estado del prototipo con especialistas, se determinó que el componente defectuoso era el Arduino.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 4. Conclusiones

- El objetivo principal de identificar las fuentes de error sistemático en la aplicación de interferometría de speckle dinámico para el monitoreo de hidratación temprana del cemento fue alcanzado exitosamente. Las verificaciones previas de funcionalidad confirmaron que el prototipo desarrollado presenta compatibilidad técnica con los procedimientos de caracterización de muestras cementicias, descartándose la hipótesis de incompatibilidad fundamental del sistema experimental con la metodología de medición implementada.
- El análisis sistemático de errores determinó que las desviaciones observadas respecto a los patrones de referencia provienen específicamente de deficiencias en la configuración de parámetros temporales del sistema de adquisición de datos. Se identificaron dos variables críticas: (i) inconsistencias en la secuencia de almacenamiento de imágenes del patrón de speckle, y (ii) desviaciones en los intervalos temporales programados entre capturas consecutivas.
- Estos errores de configuración comprometen la precisión en la correlación temporal entre las variaciones del patrón de speckle dinámico y los fenómenos fisicoquímicos característicos de las fases de fraguado inicial y final, resultando en pérdida de sensibilidad del método.
- Actualmente el equipo se encuentra en reparación con el fin de volver a utilizarlo y alcanzar el objetivo inicial del proyecto de investigación principal el cual es establecer una relación entre los productos de hidratación del cemento a edades tempranas y los cambios en la superficie de la muestra que son cuantificados por el Índice de Movilidad.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF) y Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI).

## Referencias bibliográficas

Balzamo,H., Bascoy, D., Bonavetti, V., Cabrera, O., Carrasco, M., Clariá, M., Di Maio, A., Eperjesi, L., Checmarew, R., Fornasier, G., Irassar, E., López, R., Maldonado, N., Oshiro, A., Rahhal, V., Sota, J., Traversa, L., Zega, C. y Zerbino, R. (2012). *Ese material llamado hormigón*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.

Zamateo, M. y Oliva, F. (2023). “Evaluación del proceso de hidratación del cemento mediante la técnica de speckle dinámico: influencia del entorno y tipos de cemento”. Jóvenes Investigadores Tecnológicos, Rafaela, Argentina, 26 al 27 de octubre. 1 – 3.

Gonzalez, D. (2018). “Estudio del proceso de hidratación del cemento mediante interferometría”. Jóvenes Investigadores Tecnológicos, Rafaela, Argentina, 25 al 26 de octubre. 1 – 3.

Pandiselvam, R., Mayookha, V. P., Kothakota, A., Ramesh, S. V., Thirumdas, R. y Juvvi, P. (2020). “Biospeckle laser techinique – A novel non-destructive approach for food quality and safety detection”, *Trends in Food Science & Technology*, 97, 1 – 13.

Jamali, R., Hadi Sadri, M. y Moradi, A. (2025). “Remote characterization of aerogel foam concrete using dynamic speckle pattern analysis”, *physics.optics*, 1, 1 – 13. [2501.11172v1] Remote characterization of aerogel foam concrete using dynamic speckle pattern analysis.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2006). *“Métodos de ensayo para la determinación de la consistencia normal”* (IRAM 1612).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2003). *“Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado”* (IRAM 1619).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo de investigación - estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Optimización de prestaciones acústicas de tableros aglomerados de residuo de desmote de algodón

## Optimization of the acoustic performance of particleboards made from cotton gin waste

Presentación: 30/10/2025

**Valentín Tomás Mangoldt**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
vmangoldt@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

La producción algodonera genera un elevado volumen de residuos de desmote, cuya gestión representa un desafío ambiental. Este subproducto, compuesto por fibras, semillas inmaduras y restos vegetales, puede aprovecharse en la fabricación de tableros aglomerados, ofreciendo alternativas sostenibles frente a la demanda creciente de materiales de construcción. En este trabajo se elaboraron tableros monocapa a partir de residuo de desmote de algodón aglomerado con resina urea-formaldehído y se evaluó su desempeño acústico mediante el método del tubo de impedancia. Los resultados muestran que la disminución de la densidad y el aumento del espesor favorecen la absorción acústica en bajas y altas frecuencias, aunque con menor eficacia en frecuencias medias. Los tableros desarrollados alcanzaron prestaciones comparables con placas comerciales de fibra de madera, espuma de poliuretano y series específicas de Durlock® (Sirius 90 y New Tacla), confirmando su potencial como material absorbente acústico sostenible y aplicable a la construcción edilicia.

**Palabras clave:** residuo de desmote, tablero de partículas, absorción acústica, tubo de impedancia, cámara reverberante

### Abstract

Cotton production generates a large volume of gin waste, whose management poses an environmental challenge. This by-product, composed of fibers, immature seeds, and plant residues, can be utilized in the manufacture of particleboards, offering sustainable alternatives in response to the growing demand for construction materials. In this study, single-layer boards were produced from cotton gin waste bonded with urea-formaldehyde resin, and their acoustic performance was evaluated using the impedance tube method. The results show that reducing density and increasing thickness enhance sound absorption at low and high frequencies, although with lower efficiency at mid frequencies. The developed boards achieved performances comparable to commercial panels made of wood fiber, polyurethane foam, and specific Durlock® series (Sirius 90 and New Tacla), confirming their potential as sustainable sound-absorbing materials suitable for building applications.

**Keywords:** cotton gin waste, particleboard, sound absorption, impedance tube, reverberation chamber

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

La producción algodonera es una de las actividades productivas más representativas del noreste de nuestro país, en dónde se concentra su cultivo. El algodón es la fibra natural más importante que se produce en el mundo y el segundo producto agrícola más comercializado, superado solo por la soja (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2023). Su producción genera aproximadamente 30 % en peso (respecto del algodón cosechado en bruto) de residuos de desmote compuestos por carpelos, motas (fibras de algodón con semillas inmaduras o rotas), palos, partes de hojas y partículas finas (Trevisan et al., 2021). Este subproducto, cuya cantidad depende del método de cosecha, técnica de desmotado, origen y variedad del algodón (Haque et al., 2021), genera inconvenientes a las poblaciones aledañas y grandes desafíos para su disposición. En este escenario, el desarrollo de nuevos materiales resulta beneficioso para resolver de manera conjunta varias de las problemáticas planteadas: la gestión de residuos, la generación de empleo alternativo y la mejora de las condiciones habitacionales de la zona. Estudios preliminares sobre materiales lignocelulósicos y subproductos agroindustriales sugieren la posibilidad de producir tableros de partículas que podrían emplearse en la construcción en seco o como reemplazo de la madera en aglomerados, en respuesta al creciente consumo de estos, impulsado por el aumento poblacional (Alma et al., 2005:141-149; Li et al., 2010:4662-4666). Así, en etapas previas de la investigación se estableció la viabilidad de producción de tableros de partículas a partir de residuos de desmote de algodón aglomerados con resina urea-formaldehido, que alcanzaron los mínimos requerimientos establecidos por las normas internacionales para tableros de partículas de baja densidad (Trevisan et al., 2021).

Por otro lado, la contaminación sonora constituye una problemática creciente vinculada al desarrollo urbano e industrial, con efectos comprobados sobre la salud humana derivables en estrés, deterioro cognitivo y enfermedades cardiovasculares tras exposiciones prolongadas. En este contexto, el uso de materiales absorbentes acústicos se presenta como una estrategia relevante en sectores como la construcción, donde el ruido impacta directamente en el confort ambiental (Mohammadi et al., 2025).

Existen dos métodos principales para medir el coeficiente de absorción sonora (SAC): el método de la cámara reverberante (ISO, 2006) y el método del tubo de impedancia o tubo de Kundt (ASTM, 2019; ISO, 2023). El primero se utiliza para muestras de gran tamaño, del orden de 10 $m^2$, y permite medir la absorción sonora por incidencia aleatoria. En cambio, el método del tubo de Kundt emplea probetas circulares de diámetros no superiores a 10 cm, y mide la absorción sonora por incidencia normal.

En particular, los materiales porosos han demostrado gran eficacia como absorbentes acústicos, ya que se caracterizan por presentar cavidades, canales o intersticios abiertos que permiten la penetración del sonido y favorecen la disipación de energía (Mohammadi et al., 2025). El coeficiente de absorción acústica ($\alpha_N$, SAC) de un material se define como la relación entre la energía acústica que absorbe el material y la energía total que incide en él. Su valor varía entre 0 (sin absorción) y 1 (absorción total), en función de las características físicas del material y la frecuencia del sonido. Se lo suele expresar para las frecuencias centrales de bandas de octava o tercio de octava (McGrory et al., 2012:135-142).

En la actualidad, el mercado ofrece una amplia gama de materiales absorbentes acústicos, tanto minerales (lana de vidrio y lana mineral) como sintéticos (espuma de poliuretano y poliestireno). Sin embargo, estos presentan limitaciones en términos de sostenibilidad, debido al elevado consumo energético de su producción, su cuantiosa contribución a las emisiones de $CO_2$ y su escasa reciclabilidad. En contraste, el empleo de fibras lignocelulósicas naturales destaca por su bajo costo, ligereza y biodegradabilidad, además de su capacidad para absorber $CO_2$ y mitigar la contaminación, lo que las convierte en una alternativa prometedora para la fabricación de aislantes térmicos y acústicos (Ferrandez-García et al., 2020; Istana et al., 2023).

Diversas investigaciones han concluido que el aumento del tamaño de las partículas, el espesor, la porosidad, la tortuosidad, la resistividad al flujo de aire y la disminución de la densidad del tablero aglomerado favorecen su absorción acústica (Ferrandez-García et al., 2020; Hassan et al., 2021:55-85; Istana et al., 2023; McGrory et al., 2012:135-142). Estos hallazgos sustentan las hipótesis que guiarán la fabricación de los tableros aglomerados en el presente estudio.

En este trabajo se evaluaron propiedades de tableros monocapa obtenidos a partir de residuos de desmote de algodón y resina urea-formaldehído con el propósito de analizar su desempeño acústico e identificar los parámetros que permitan maximizarlo. Se efectuó una comparación con tableros comerciales de diversas marcas y materiales, con el fin de contrastar

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

las prestaciones acústicas de los tableros desarrollados con aquellas de los productos comúnmente empleados en la construcción edilicia.

## 2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del estudio se utilizó residuo de desmote del algodón proveniente de una desmotadora ubicada al norte de la provincia de Santa Fe, que fue molido y tamizado hasta alcanzar tamaños de partículas que se encuentran entre 0,6 mm (tamiz N° 30) y 12,5 mm. El residuo se secó en estufa a 105 ± 2 °C para reducir su contenido de humedad natural de 16% hasta un 3%, condición adecuada para la impregnación con resina y evitar delaminaciones por evaporación de agua durante el prensado en caliente. Posteriormente, se mezcló el residuo de desmote con la resina urea-formaldehído provista por Jucarbe S.A. (Argentina), cuyo contenido de sólidos se llevó de 65 a 55 % mediante la adición de agua, y se empleó como catalizador un 5 % de solución saturada de sulfato de amonio. Luego de homogeneizar la mezcla, se colocó el material manualmente en un molde de platos calientes, y se prensó utilizando una prensa hidráulica con una temperatura de 150°C en ambos platos durante 5 minutos, obteniéndose tableros cuadrados de 250 mm de lado, cuyas características se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características de los tableros moldeados.

| Tablero | Contenido de resina (%)* | Presión de moldeo (MPa) | Espesor final (mm) | Densidad final (kg/m$^3$) |
|---|---|---|---|---|
| AC1 | 11,92 | 4,75 | 7,5 | 978,5 |
| AC2 | 9,90 | 2,50 | 7,5 | 761,5 |
| AC3 | 13,75 | 0,50 | 15,0 | 502,0 |

*Expresado como porcentaje sólidos/sólidos.

Se determinó la densidad de los tableros de acuerdo con la norma IRAM 9705 (2001) y los coeficientes de absorción sonora para incidencia normal del sonido (αN) mediante el método del tubo de Kundt, conforme a ISO 10534-2 (2023) y ASTM E 1050 (2019). Las mediciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (LAL-CIC), utilizando un sistema de tubos de impedancia de dos micrófonos con software de procesamiento de señal (modelo GAG001, ver Fig. 1). Para ello, se emplearon ruidos de banda ancha en tercios de octava entre 100 y 5000 Hz: en el rango de 100–1600 Hz se utilizó el tubo grande (99–100 mm de diámetro), mientras que en el rango de 800–5000 Hz se utilizó el tubo chico (29–30 mm).

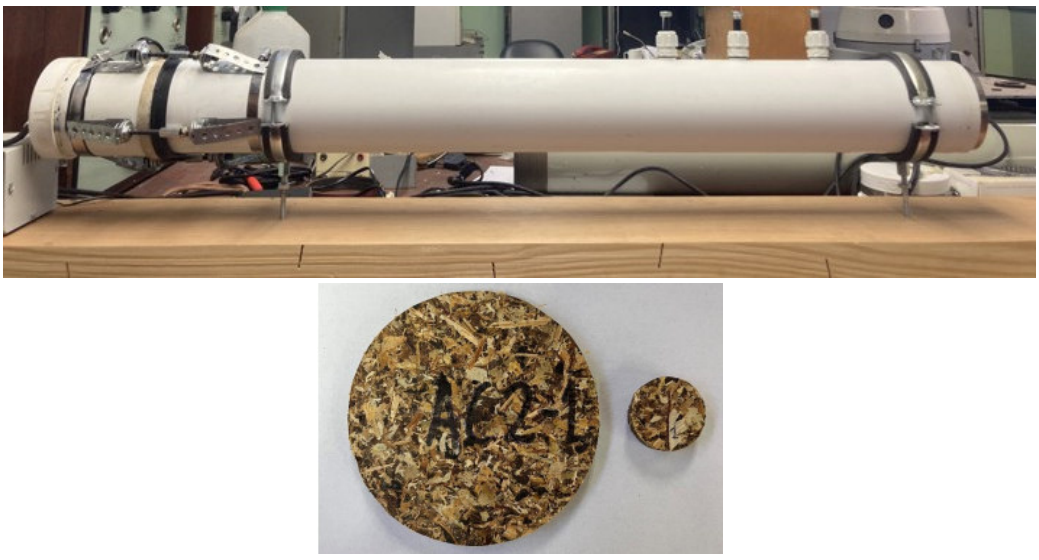



**Figura 1.** Tubo de impedancia y muestras ensayadas.

## 3. Resultados y discusión

Los resultados del ensayo de absorción acústica por tubo de Kunt se obtuvieron como promedio de las mediciones realizadas a las probetas del material ensayado. En la Tabla 2 se presentan los valores resultantes del coeficiente de absorción para incidencia normal del sonido (αN, adimensional) para el rango completo de frecuencias, de las tres placas ensayadas. Para el rango de 800 Hz a 1600 Hz se promediaron los valores obtenidos con ambos tubos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los coeficientes de absorción acústica de tableros comerciales suelen expresarse respecto al ensayo de cámara reverberante (por incidencia aleatoria del sonido). Dado que no fue posible producir la cantidad de tableros necesaria para este ensayo, se utilizó el modelo matemático de McGrory et al. (2012:135-142), que relaciona los coeficientes por incidencia normal y aleatoria (Ecuación 1), con el objetivo de poder comparar el desempeño acústico de los tableros elaborados para este trabajo con los comerciales. En este modelo, $\propto_r (f)$ es el coeficiente estimado en cámara reverberante, $\propto_n$ el coeficiente de absorción acústica por tubo de Kundt, $\emptyset(f)$ un factor de frecuencia, $\delta$ la densidad (kg/m³), $\Theta$ el espesor (mm) y $\rho$ la resistividad al flujo de aire (mksrayls/m).

$$\propto_r (f) = 0{,}945 + 0{,}245 \ln(\propto_n) + \emptyset(f) - 0{,}002\,\delta + 0{,}0015\,\Theta + 7{,}52 \times 10^{-6}\rho \quad (1)$$

El coeficiente de resistividad al flujo del aire depende de cada material y se determina por medio de un ensayo, conforme a ASTM C522-03 (2022), que no se realiza en el territorio nacional. Por este motivo, se aproximó su valor para cada tablero, con relación a las resistividades de tableros de fibras de distintos tipos de madera, cuyo rango de densidades varía entre 355 y 743 kg/m$^3$ (Smardzewski et al., 2013: 467-476).

La Tabla 2 presenta los coeficientes de absorción acústica por incidencia normal y aleatoria de cada tablero en el rango de frecuencias de ensayo, mientras que las Figuras 2 y 3 muestran su variación con la frecuencia, tanto en los tableros elaborados como en los comerciales. La comparación incluyó placas acústicas de fibra mineral de Durlock® (Comet 60/120, New Tacla y Sirius 90) y otros tableros de distintos materiales, cuyos valores de absorción se tomaron de Deambrosi (2012).

**Tabla 2.** Coeficiente de absorción acústica, por incidencia normal y aleatoria del sonido, de cada tablero.

| Frecuencia (Hz) | Coeficiente de absorción acústica por tubo de Kundt | | | Factor de frecuencia | Coeficiente de absorción acústica por cámara reverberante | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | AC1 | AC2 | AC3 | | AC1 | AC2 | AC3 |
| 100 | 0,05 | 0,04 | 0,06 | 0,000000 | 0,15 | 0,08 | 0,18 |
| 125 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,006276 | 0,10 | 0,02 | 0,14 |
| 160 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | -0,082530 | 0,01 | 0,00 | 0,05 |
| 200 | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,036260 | 0,13 | 0,12 | 0,21 |
| 250 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,110300 | 0,20 | 0,29 | 0,32 |
| 315 | 0,04 | 0,06 | 0,09 | 0,064040 | 0,15 | 0,24 | 0,34 |
| 400 | 0,04 | 0,06 | 0,11 | 0,098280 | 0,19 | 0,28 | 0,42 |
| 500 | 0,04 | 0,07 | 0,15 | 0,094280 | 0,18 | 0,31 | 0,49 |
| 630 | 0,06 | 0,10 | 0,20 | 0,078040 | 0,27 | 0,38 | 0,55 |
| 800 | 0,10 | 0,15 | 0,31 | 0,056560 | 0,37 | 0,46 | 0,63 |
| 1000 | 0,11 | 0,19 | 0,42 | 0,036920 | 0,38 | 0,50 | 0,69 |
| 1250 | 0,15 | 0,27 | 0,51 | 0,010380 | 0,42 | 0,56 | 0,71 |
| 1600 | 0,22 | 0,33 | 0,49 | -0,025150 | 0,48 | 0,57 | 0,67 |
| 2000 | 0,23 | 0,42 | 0,45 | -0,040960 | 0,48 | 0,62 | 0,63 |
| 2500 | 0,24 | 0,46 | 0,38 | -0,047400 | 0,48 | 0,63 | 0,58 |
| 3150 | 0,23 | 0,5 | 0,43 | -0,045580 | 0,47 | 0,65 | 0,61 |
| 4000 | 0,22 | 0,42 | 0,48 | -0,048560 | 0,46 | 0,61 | 0,64 |
| 5000 | 0,18 | 0,31 | 0,54 | -0,044970 | 0,41 | 0,54 | 0,67 |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

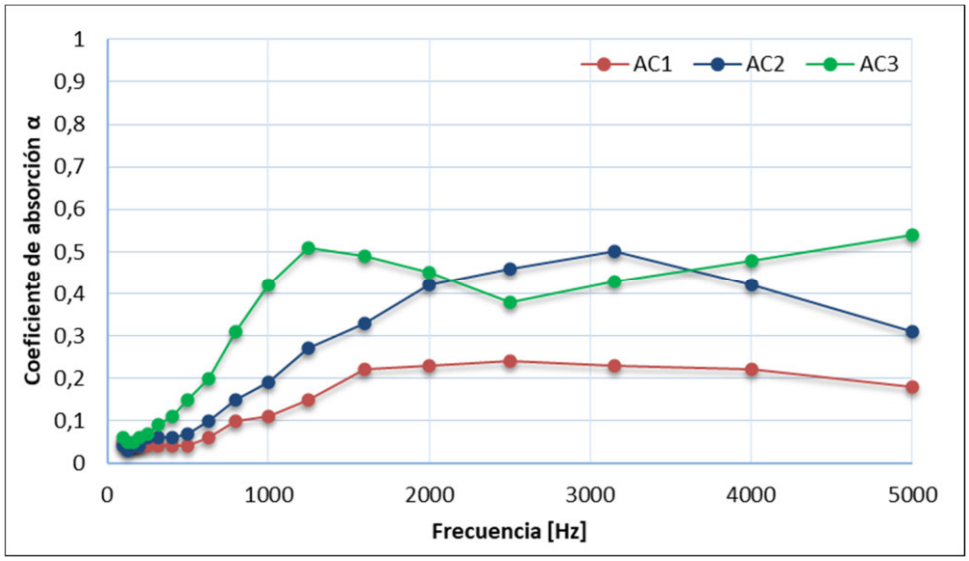



**Figura 2.** Coeficientes de absorción acústica por tubo de Kundt de cada tablero.

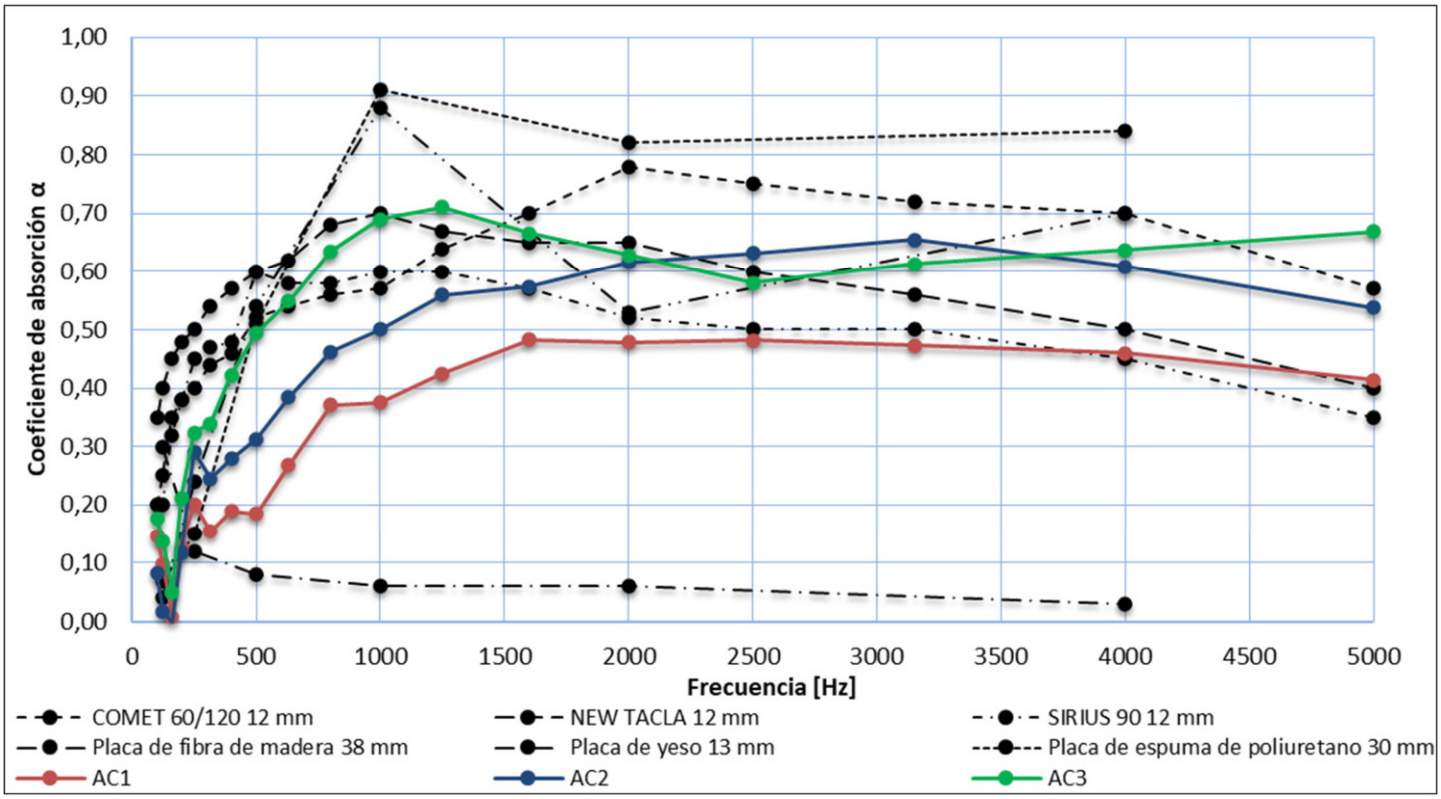



**Figura 3.** Coeficientes de absorción acústica por cámara reverberante de varios tableros.

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se observa que:

a) La aproximación mediante el modelo matemático desarrollado por McGrory et al. (2012:135-142) muestra una tendencia similar para el coeficiente de absorción acústica por cámara reverberante, en comparación con el de tubo de Kundt.

b) Es posible incrementar el coeficiente de absorción acústica de los tableros al reducir su densidad y aumentar su espesor. Se observan mejoras significativas en el rango de frecuencias bajas (hasta 1500 Hz) y altas (de 3500 Hz hasta 5000 Hz), aunque no para frecuencias medias. En estudios previos realizados por Ferrandez-García et al (2020) e Istana et al. (2023) con tableros de diversas fibras vegetales, también se observó un menor rendimiento en el rango de frecuencias medias.

c) El aglomerado AC3 presenta desempeños comparables con la placa de fibra de madera y las series Sirius 90 y New Tacla en frecuencias superiores a 500 Hz, y con las placas de fibra de madera y espuma de poliuretano en las menores frecuencias.

## 4. Conclusiones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los resultados obtenidos muestran que es posible obtener placas absorbentes acústicas con prestaciones similares a elementos disponibles hoy en el mercado nacional. El aumento del espesor y la disminución de la densidad de los tableros permitió mejorar su absorción acústica en frecuencias bajas (hasta 1500 Hz) y altas (de 3500 Hz a 5000 Hz), aunque no en frecuencias medias. Esto se debe al aumento en la porosidad de los tableros, debida también a la menor presión de moldeo, ya que el aumento de la proporción de vacíos contribuye a mejorar la disipación de energía de las ondas acústicas. Es necesario verificar este comportamiento a través de la determinación del coeficiente de absorción en cámara reverberante; no obstante, estas evaluaciones exigen el moldeo de placas a escala prototipo y erogaciones presupuestarias muy importantes.

## Agradecimientos

La concreción de este trabajo fue posible gracias a la colaboración de la desmotadora de algodón ACRIBA S.A de Villa Minetti, Santa Fe, Argentina; al financiamiento de la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional, a las generosas donaciones de productos de las firmas JUCARBE SAIAC, a la asesoría de varios profesionales y a la colaboración del Instituto de Tecnología Celulósica de la FIQ-UNL y del Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (LAL-CIC).

## Referencias bibliográficas

Alma, M. H., Kalaycıoğlu, H., Bektaş, I., & Tutu, A. (2005). “Properties of cotton carpel-based particleboards”, *Industrial Crops and Products*, 22(2), 141-149.

ASTM International. (2019). *ASTM E1050-19: Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system*. ASTM International.

ASTM International. (2022). *ASTM C522-03: Standard test method for airflow resistance of acoustical materials*. ASTM International.

Deambrosi, M. (2012, 3 de febrero). *Teoricos y Tablas*. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República Uruguay. Disponible en https://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/teoricos-y-tablas/.

Durlock. (2024). *Folleto DECO 2024*. Durlock. Disponible en https://durlock.com/files/biblioteca/archivos/folleto-deco-2024.pdf.

Ferrandez-García, M. T., Ferrandez-García, A., García-Ortuño, T., Ferrandez-García, C. E., & Ferrandez-Villena, M. (2020). “Assessment of the Physical, Mechanical and Acoustic Properties of *Arundo donax* L. Biomass in Low Pressure and Temperature Particleboards”, *Polymers*, 12, 1361.

Hassan, T., Jamshaid, H., Mishra, R., Khan, M.Q., Petru, M., Tichy, M., & Muller, M. (2021) “Factors Affecting Acoustic Properties of Natural-Fiber-Based Materials and Composites: A Review”. *Textiles*, 1, 55–85.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2001). *Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad*. (IRAM 9705).

International Organization for Standardization. (2006). *ISO 354:2006 Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room*. ISO.

International Organization for Standardization. (2023). *ISO 10534-2:2023 Acoustics—Determination of acoustic properties in impedance tubes—Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance*. ISO.

Istana, B., Batan, I.M.L., Sutikno, Khem, S., Ubaidillah, U., & Yahya, I. (2023) “Influence of Particle Size and Bulk Density on Sound Absorption Performance of Oil Palm Frond-Reinforced Composites Particleboard”, *Polymers*, 15, 510.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Li, X., Cai, Z., Winandy, J. E. & Basta, A. H. (2010). “Selected properties of particleboard panels manufactured from rice straws of different geometries”, *Bioresource Technology*, 101, 4662-4666.

McGrory, M. & Cirac, D.C. & Gaussen, O. & Cabrera, Densil. (2012). Sound absorption coefficient measurement: Re-examining the relationship between impedance tube and reverberant room methods. Australian Acoustical Society Conference 2012, Acoustics 2012: Acoustics, Development, and the Environment. Frementle, Australia, 21 al 23 de noviembre, 135-142.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2023). *Plan estratégico del algodón 2035*. Disponible en https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/algodon/plan2035/plan-estrategico-del-algodon-2035.pdf

Mohammadi, M., Ridzwan Ishak, M., Sultan, M. T. H., & Zainudin, E. S. (2025). “A Comprehensive Review of Factors Influencing the Sound Absorption Properties of Micro-Perforated Panel Structures”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 13, 319.

Smardzewski, J., Batko, W., Kamisiński, T., Flach, A., Pilch, A., Dziurka, D., Mirski, R., Roszyk, E. & Majewski, A. (2013). “Experimental study of wood acoustic absorption characteristics”, *Holzforschung*, 68, 467-476.

Trevisan, A., Massons, L., Carrasco, M., Grether, R., & González, A. (2021). “Obtención de tableros de partículas a partir de residuo de desmote de algodón y resina urea formaldehído”, *Revista Tecnología y Ciencia*, 42, 68-81.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Venado Tuerto

# Desarrollo de un material compuesto en base a tierra adicionada con cemento portland y reforzado con malla plástica para ser usado como contrapiso en viviendas de interés social

## Development of a composite material based on dirt added with portland cement and reinforced with plastic mesh to be used as a subfloor in housing of social interest

Presentación: 30/10/2025

**Máxima Poldoni**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Laboratorio de Suelos, Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
mpoldoni@frvt.utn.edu.ar

**Marianela Salinas Leiva**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Laboratorio de Suelos, Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
salinasleivamariela@gmail.com.ar

**Troncoso Morena**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Laboratorio de Suelos, Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
Morenatroncoso18@gmail.com.ar

### Resumen

En este trabajo se presentan los resultados experimentales del estudio de mezclas de suelo-cemento fluido con dosificaciones de 5%, 7% y 10% de cemento Portland, curadas en condiciones ambientales. El estudio evalúa la influencia del contenido de cemento y la humedad en la resistencia a compresión simple de probetas cilíndricas, mediante ensayos normalizados. Los resultados demuestran un incremento del 48% en la resistencia promedio al aumentar la dosificación del 5% al 10% (de 1.29 MPa a 1.92 MPa), junto con una reducción significativa en la dispersión de los datos (CV: 18.6% a 9.4%). La humedad de moldeo se identificó como variable crítica, afectando particularmente el desempeño de la dosificación al 7%. Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica del material para aplicaciones de bajo compromiso estructural, como el caso de los contrapisos de viviendas y fundamentan futuras investigaciones sobre refuerzo con mallas plásticas.

**Palabras clave:** Suelo-cemento fluido; resistencia a compresión; dosificación de cemento; construcción sostenible; material compuesto.

### Abstract

This paper presents experimental results of flowable soil-cement mixtures with 5%, 7%, and 10% Portland cement dosages, cured under ambient conditions. The study evaluates the influence of cement content and humidity on the compressive strength of cylindrical specimens through standardized tests. Results show a 48% increase in average strength when increasing dosage from 5% to 10% (from 1.29 MPa to 1.92 MPa), along with a significant reduction in data dispersion (CV: 18.6% to 9.4%). Mold humidity was identified as a critical variable, particularly affecting the 7% dosage performance. These findings support the technical feasibility of the material for low structural commitment applications such as subfloor in homes, and lay the groundwork for future research on plastic mesh reinforcement.

**Keywords:** Flowable soil-cement; compressive strength; cement dosage; sustainable construction; composite material.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

La tierra ha sido utilizada como material de construcción desde los inicios de la humanidad debido a su abundancia, baja energía incorporada y disponibilidad local (Khajeh et al., 2019). Sin embargo, los suelos naturales a menudo presentan limitaciones en su resistencia mecánica y durabilidad, lo que ha impulsado el desarrollo de técnicas de estabilización. La adición de aglomerantes como el cemento Portland o la cal permite transformar suelos finos en materiales competentes mediante reacciones pozojánicas y de cementación que incrementan significativamente la resistencia a compresión y la durabilidad (Gamboa Tolentino et al., 2022). Estudios recientes han demostrado que la estabilización con cemento en suelos arcillosos puede aumentar la resistencia a compresión no confinada hasta en un 300% con dosificaciones del 6-10% (Baldovino et al., 2024).

A pesar de estas ventajas, el suelo-cemento convencional presenta desafíos como la fisuración por retracción y su comportamiento frágil ante cargas de tracción (Carsana y Bertolini, 2012). En este contexto, emerge la tecnología de suelo-*cemento fluido* (también conocido como relleno de densidad controlada - RDC o lodocreto), que combina la trabajabilidad de los morteros fluidos con la resistencia progresiva de los materiales cementantes. Estas mezclas, caracterizadas por su alta fluidez (asentamientos típicos superiores a 15 cm) y capacidad de autonivelación, han sido ampliamente estudiadas para aplicaciones en relleno de zanjas, bases granulares y estabilización de suelos (Santaella Valencia y Salamanca Correa, 2002). Investigaciones a escala real han demostrado su viabilidad técnica y económica incluso en proyectos de gran envergadura, como el relleno de minas inundadas (Bertolini et al., 2010), confirmando su potencial como material versátil y eficiente.

No obstante, su uso en elementos estructurales como contrapisos requiere abordar su baja resistencia a tracción. Una solución prometedora es la incorporación de refuerzos como mallas geosintéticas, que absorben esfuerzos de tracción y reducen la fisuración (Khajeh et al., 2019; Modoni et al., 2019). Este trabajo presenta resultados preliminares sobre el desarrollo de un material compuesto basado en suelo-cemento fluido reforzado con malla plástica, destinado a contrapisos en viviendas de interés social (Kulshreshtha et al., 2020). El estudio evalúa la influencia del contenido de cemento (5%, 7% y 10%) y la humedad en la resistencia a compresión, sentando las bases para futuros ensayos de refuerzo.

# 2. Materiales y métodos

## *2.1. Materiales y caracterización inicial*

El suelo utilizado en este estudio fue obtenido de una única cantera local en la región de Venado Tuerto, Argentina, para minimizar la variabilidad del material. Previo a su uso, el suelo fue secado al aire, homogenizado y cribado mecánicamente para eliminar partículas gruesas.

La caracterización del suelo se realizó de acuerdo con las normas IRAM vigentes. La clasificación se efectuó mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la cual determinó que el material es un limo de baja plasticidad (ML). Esta clasificación se basó en los ensayos de análisis granulométrico por tamizado y por vía húmeda y Límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico), realizados según la norma IRAM 10501.

Como aglomerante, se utilizó cemento Portland comercial (CPC 40, marca Avellaneda), adquirido directamente de silo para garantizar su frescura y evitar problemas de hidratación por envejecimiento.

El programa experimental se diseñó para evaluar el efecto del porcentaje de cemento en la resistencia a compresión del material en estado fluido. Se seleccionaron tres dosificaciones de cemento en peso: 5%, 7% y 10%.

Para cada dosificación, el contenido de agua se ajustó para lograr una consistencia fluida, controlada mediante el ensayo de asentamiento con Cono de Abrams, realizado estrictamente según la norma IRAM 1536:1978. Se estableció un valor de asentamiento objetivo de 18 cm para todas las mezclas, garantizando así una trabajabilidad similar y permitiendo la comparación directa de los resultados.

Para cada dosificación, se elaboró un lote de dieciséis (16) probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

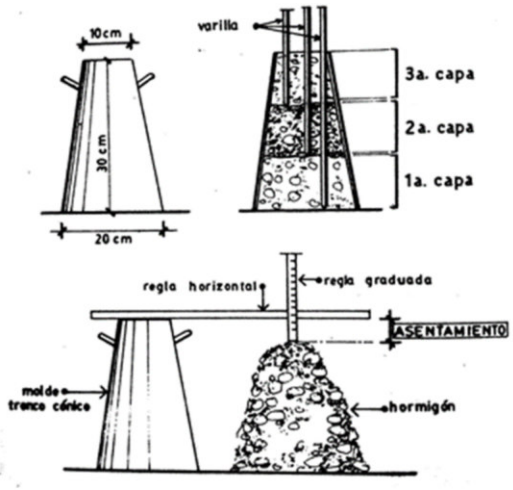



**Figura 1.** Medición del asentamiento con el cono de Abrams.

La preparación, moldeo y curado de las probetas se realizó de acuerdo con la norma IRAM 1534:2004, con una adaptación en las condiciones de curado para simular condiciones reales de obra. El moldeo se realizó en dos capas, compactando cada una con 25 varillados mediante una varilla compactadora de punta redonda.

Las probetas se demoldaron el mismo día de su fabricación y se dejaron curar al aire ambiente del laboratorio (a temperatura ambiente de ~20°C y humedad relativa ambiente) hasta el momento del ensayo, a los 28 días. Esta condición de curado busca representar de manera más realista las condiciones de servicio de un contrapiso.

Transcurrido el período de curado, las probetas fueron ensayadas a compresión simple en una prensa hidráulica de controles manuales, de acuerdo con la norma IRAM 1546:2013. La carga máxima de falla (en kgf) fue registrada para cada probeta y convertida a resistencia a compresión (σc) en MPa utilizando la fórmula:

$$\sigma_C = \frac{P \times 9{,}81}{A} \quad (1)$$

Donde $P$ es la carga máxima (kgf) y $A$ es el área de la sección transversal (7850 mm² para probetas de 100 mm de diámetro).

Adicionalmente, se determinó la humedad de moldeo de cada lote mediante el método gravimétrico (secado en estufa a 110 °C hasta peso constante), para correlacionar este parámetro con la resistencia obtenida.

## 3. Resultados

Los resultados de resistencia se organizaron en series según su dosificación de cemento. Para cada serie (5%, 7%, 10%) se calculó la resistencia promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, con el fin de evaluar la dispersión de los datos. A continuación, se presentan los valores de humedad de moldeo y resistencia a compresión simple a 28 días para las probetas ensayadas.

**Tabla 1**. Humedad de moldeo por serie

| Serie | Nº de probeta | Humedad [%] |
|---|---|---|
| Serie 5% | 16 | 32,71 |
| Serie 7% | 14 | 38,91 |
| Serie 10% | 16 | 38,28 |

**Tabla 2**. Resumen estadístico de los resultados de resistencia a compresión

| Serie | Resistencia promedio (MPa) | Desviación estándar (MPa) | Coeficiente de variación (%) | Resistencia mínima (MPa) | Resistencia máxima (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| 5% cemento | 1.29 | 0.24 | 18.6 | 0.82 | 1.74 |
| 7% cemento | 1.47 | 0.16 | 10.9 | 1.24 | 1.80 |
| 10% cemento | 1.92 | 0.18 | 9.4 | 1.62 | 2.31 |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Se calcularon los parámetros estadísticos fundamentales para cada serie de dosificación. Los resultados se exponen en las figuras 2 y 3.

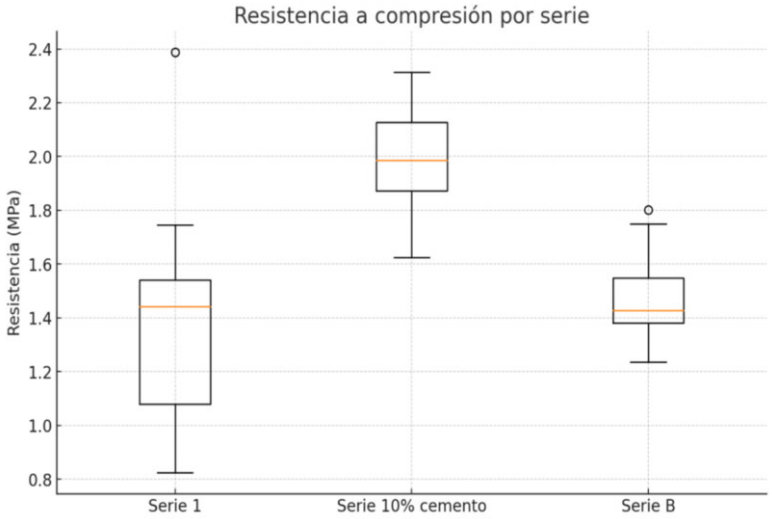



**Figura 2**. Resistencia a compresión por serie (boxplot).

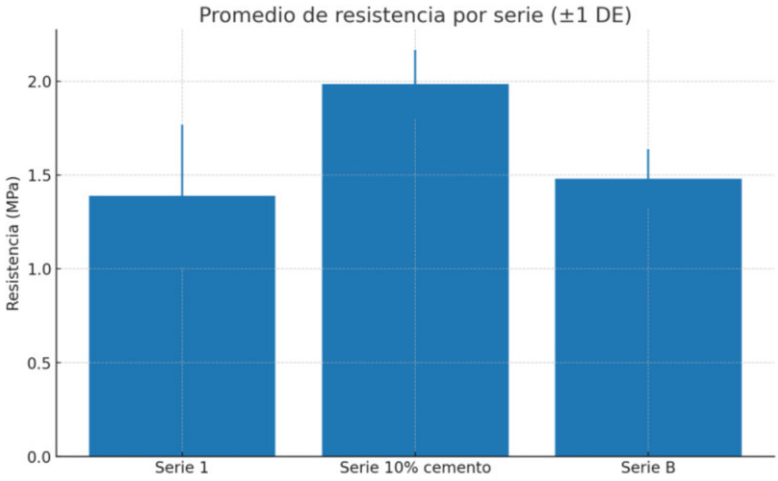



**Figura 3**. Resistencia media por serie (±1 DE).

## 4. Discusión

El análisis de los resultados demuestra una influencia significativa del contenido de cemento en las propiedades mecánicas del suelo-cemento fluido. Como se evidencia en la Tabla 3, se observa un incremento del 48% en la resistencia a compresión promedio al aumentar la dosificación de cemento del 5% al 10%, pasando de 1.29 MPa a 1.92 MPa. Este comportamiento confirma el efecto estabilizador del cemento Portland reportado en la literatura, mediante la formación de productos de hidratación que envuelven las partículas del suelo y forman una matriz cohesiva (Khajeh et al., 2019; Gamboa Tolentino et al., 2022).

Un hallazgo relevante es la notable reducción en la dispersión de los resultados al incrementar el contenido de cemento, evidenciada por la disminución del coeficiente de variación desde 18.6% (serie al 5%) hasta 9.4% (serie al 10%). Esta reducción sugiere que dosificaciones más altas de cemento no solo mejoran el desempeño mecánico, sino que también proporcionan mayor uniformidad y confiabilidad al material.

La serie al 7% de cemento presenta un comportamiento particular, con una resistencia promedio de 1.47 MPa que no muestra la mejora proporcional esperada respecto a la serie al 5%. Este resultado puede atribuirse a la mayor humedad de moldeo registrada en esta serie (38.91%), que habría resultado en una relación agua/cemento elevada y consecuente aumento en la porosidad del material luego del proceso de hidratación y secado (Carsana & Bertolini, 2012).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Estos resultados fundamentan la necesidad de la próxima etapa de investigación, que contempla la incorporación de refuerzos con malla plástica. Dada la naturaleza quebradiza del material cementante, la inclusión de refuerzos geosintéticos se presenta como una solución promisoria para mejorar la resistencia a tracción y mitigar la fisuración, potentially incrementando tanto la capacidad de carga como la durabilidad del composite (Modoni et al., 2019). El desarrollo exitoso de este material compuesto podría ofrecer una solución técnico-económica viable para aplicaciones en contrapisos de viviendas de interés social.

## 4. Conclusiones

Los resultados demuestran que el contenido de cemento incide significativamente en la resistencia a compresión del material. La resistencia media aumentó de 1.29 MPa (serie al 5%) a 1.47 MPa (serie al 7%) y finalmente a 1.92 MPa (serie al 10%), registrándose un incremento del 48% entre los extremos de la dosificación estudiada. Simultáneamente, se observó una notable reducción en la dispersión de los resultados (coeficiente de variación disminuyó del 18.6% al 9.4%), indicando mayor uniformidad y confiabilidad del material con mayores dosificaciones.

La humedad de moldeo se identificó como variable crítica, particularmente en la dosificación del 7% (38.91%), donde valores elevados afectaron negativamente el desarrollo de resistencia. Los hallazgos respaldan la viabilidad técnica del suelo-cemento fluido para aplicaciones de bajo compromiso estructural y fundamentan la próxima etapa de investigación centrada en la incorporación de refuerzos con malla plástica para mejorar el comportamiento ante esfuerzos de tracción y fisuración.

## Referencias bibliográficas

Baldovino, J. A., Núñez de la Rosa, Y. E., y Namdar, A. (2024). Sustainable Cement Stabilization of Plastic Clay Using Ground Municipal Solid Waste: Enhancing Soil Properties for Geotechnical Applications. Sustainability, 16(12), 5195. https://doi.org/10.3390/su16125195

Bertolini, L., Carsana, M., Gastaldi, M., y Lollini, F. (2010). Filling of a Flooded Gypsum Mine with a Flowable Soil-Cement Mix. Journal of Materials in Civil Engineering, 22(6), 628-636. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000062

Carsana, M., y Bertolini, L. (2012). Fluidized soil–cement mixes for backfilling of flooded cavities. Materials and Structures, 45(1), 53-65. https://doi.org/10.1617/s11527-011-9748-3

Gamboa Tolentino, E. O., Chanca Llihua, N. S., Rodriguez, I. L., Inga, A. J. V., Ninahuanca, L. E. E., y Montoya, N. I. V. (2022). Technical Analysis of Soil Cement as A Construction Material Applied in Rural Houses. Civil Engineering and Architecture, 10(7), 3003-3014. https://doi.org/10.13189/cea.2022.100716

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (2007). IRAM 10501: Geotecnia. Determinación del límite líquido (LL) y del límite plástico (LP) de una muestra de suelo. Índice de fluidez (IF) e índice de plasticidad (IP). https://www.iram.org.ar.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (1978). IRAM 1536: Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono. https://www.iram.org.ar.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (2004). IRAM 1534: Hormigón de cemento pórtland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio. https://www.iram.org.ar.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (2013). IRAM 1546: Hormigón de cemento. Ensayo de probetas a la compresión. https://www.iram.org.ar.

Khajeh, A., Jamshidi Chenari, R., y Payan, M. (2019). A Simple Review of Cemented Non-conventional Materials: Soil Composites. Geotechnical and Geological Engineering, 38, 1019-1040. https://doi.org/10.1007/s10706-019-01090-x

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Kulshreshtha, Y., Mota, N., Jagadish, K., Bredenoord, J., Vardon, P., Loosdrecht, M., & Jonkers, H. (2020). The potential and current status of earthen material for low-cost housing in rural India. Construction and Building Materials. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118615.

Modoni, G., Wanik, L., Mascolo, M. C., Salvatore, E., Bzówka, J., Shen, S.-L., Daniele, V., y Pingue, L. (2019). Strength of sandy and clayey soils cemented with single and double fluid jet grouting. Soils and Foundations, 59(3), 942–954. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.007

Santaella Valencia, L. E., y Salamanca Correa, R. (2002). Estado del arte del relleno fluido para subbases y bases granulares (Primera parte). Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 12, 9-22.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Hormigón drenante: efecto del contenido de pasta y energía de compactación sobre sus propiedades físico-mecánicas

## Pervious concrete: effect of cement paste content and compaction energy on its physical and mechanical properties

Presentación: 30/10/2025

**Emiliano Snaider**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
esnaider@frsf.utn.edu.ar

**Bruno Francisco Croce**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
bcroce@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

El hormigón drenante o permeable es un tipo de hormigón especial, caracterizado por tener un esqueleto granular producto de la ausencia parcial o total de agregados finos. En este artículo se presenta cómo la variación de la energía de compactación y el contenido de pasta de cemento, variables fundamentales en la confección de estos hormigones, influyen en sus propiedades físicas y mecánicas, puntualmente en la resistencia a la compresión, densidad, porosidad y permeabilidad. Los resultados indican que un aumento de estos dos factores permite lograr hormigones permeables más densos y resistentes, condicionados por una clara reducción en la porosidad y permeabilidad. Se evaluaron especímenes con tres contenidos diferentes de pasta y tres niveles de energía de compactación, manteniendo fija la granulometría de los agregados pétreos y la relación agua-cemento, obteniendo configuraciones que permiten lograr resistencias favorables sin afectar de forma considerable las propiedades hidráulicas del hormigón.

**Palabras clave:** hormigón drenante, energía de compactación, pasta de cemento, propiedades

### Abstract

Pervious concrete is a special type of concrete characterized by a granular skeleton resulting from the partial or total absence of fine aggregates. This article presents how variations in compaction energy and cement paste content, fundamental variables in the manufacture of these concretes, influence their physical and mechanical properties, specifically compressive strength, density, porosity, and permeability. The results indicate that an increase in these two factors allows for denser and stronger permeable concretes, resulting in a clear reduction in porosity and permeability. Specimens with three different paste contents and three levels of compaction energy were evaluated, maintaining the aggregate particle size distribution and water-cement ratio constant, resulting in configurations that achieve favorable strengths without significantly affecting the concrete's hydraulic properties.

**Keywords:** pervious concrete, compaction energy, cement paste, properties

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El hormigón drenante, también conocido como hormigón permeable, se caracteriza por presentar una estructura porosa que le otorga la capacidad de infiltrar agua, a diferencia del hormigón convencional, que se comporta de manera sumamente impermeable. Esta propiedad lo convierte en un material que ofrece importantes beneficios ambientales y urbanos, ya que reduce el escurrimiento pluvial, elimina en muchos casos la necesidad de infraestructuras costosas de retención, contribuye a la recarga de acuíferos y al desarrollo de la vegetación urbana. Además, permite un uso más eficiente del suelo, disminuye el riesgo de inundaciones y aguas estancadas, y actúa como un filtro natural que limita la entrada de contaminantes a cursos de agua superficiales (M. F. Carrasco et al, 2022). Su desempeño depende de un delicado balance entre resistencia mecánica y capacidad de drenaje que está directamente supeditado a la cantidad de pasta cementicia empleada y el nivel de energía de compactación aplicado durante la fabricación (Mikami et al, 2024).

Se reconoce que los hormigones permeables cuentan con una porosidad que suele variar entre 15 y 35 % (Nguyen et al., 2014), rango considerado necesario para garantizar una adecuada conductividad hidráulica que puede encontrarse entre 0,2 y 5,4 cm/s. (ACI Committee 522, 2010; Mikami et al, 2024). La estructura se basa en el contacto piedra con piedra logrado a través de la compactación, lo que permite que los agregados recubiertos de pasta de cemento se adhieran entre sí (Kováč et al., 2018). En este sentido, tanto el volumen de pasta como la energía de compactación gobiernan el porcentaje de vacíos efectivos y este posee una correlación positiva con la permeabilidad. En un estudio al comparar hormigones con porosidades de 20 y 25 %, el coeficiente de permeabilidad se duplicó, con un valor medio de 1,06 (cm/s) y 2,12 (cm/s) (Rieg et al, 2024: 5-6).

El aspecto principal de este material constructivo que lo diferencia del hormigón tradicional es el bajo contenido de pasta en conjunto a una granulometría que tiende a ser monogranular. Para el primer factor, se recomienda que el material cementicio se encuentre en valores de 270 a 415 kilogramos por metro cúbico (NRMCA, 2004), mientras que el American Concrete Institute (ACI) recomienda el uso de agregados gruesos de tamaño único o con dimensiones comprendidas entre 19 y 9,5 mm para hormigón drenante. Aun así, algunos estudios han utilizado agregados más finos, entre 9,5 y 2,36 mm, con el objetivo de aumentar la resistencia mecánica del material, sin afectar significativamente la distribución de porosidad (Nguyen et al., 2014).

Por otra parte, la resistencia a compresión se ve afectada de manera opuesta a la permeabilidad. Un aumento de porosidad conlleva inevitablemente una reducción de la capacidad portante. Investigaciones previas han mostrado que la resistencia a compresión media disminuye de 25,64 MPa a 12,5 MPa cuando la porosidad se incrementa de 15 a 25 % (Liu et al, 2025).

Otra propiedad de suma importancia es la densidad o peso unitario del hormigón permeable, que se encuentra en el rango de 1600 a 2000 kg/m³, con contenidos de vacíos entre 15 y 25 % (P. D. Tennis et al, 2004).

En síntesis, el comportamiento de todas las propiedades hasta este punto mencionadas está fuertemente influenciado por el nivel de compactación, amén del contenido de pasta. Cuando la energía de compactación aplicada al hormigón permeable aumenta, crece el contacto entre los componentes del hormigón y, por ende, la tortuosidad también lo hace, contribuyendo así a una disminución del coeficiente de permeabilidad (Rieg et at, 2024).

En este artículo se estudia el desempeño del hormigón drenante en función del contenido de pasta y la energía de compactación. Se utilizan diferentes pastones con contenidos de pasta de 15, 20 y 25%, y diferentes niveles de energía de compactación para cada pastón, manteniendo todas las otras variables constantes, como relación agua-cemento y la granulometría de los agregados, para su posterior comparación y estudio de influencias en las propiedades mencionadas.

# 2. Materiales y métodos

2.1 Materiales y dosificación de la mezcla

Se elaboraron diferentes mezclas de hormigón permeable con el objetivo de analizar sus propiedades mecánicas y físicas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los hormigones utilizados se dosificaron de acuerdo con el método propuesto por ACI 522R-10 (ACI Committee 522, 2010), para volúmenes de pasta del 15, 20 y 25%, volumen de vacíos teórico de 20%, incorporación de 16 % de agregado fino y razón agua-cemento igual a 0,35. No se incluyó aditivo químico en ningún caso. Los materiales utilizados en todas las pruebas fueron: cemento portland compuesto CPC-40 (según IRAM 50000) procedente de Córdoba (Argentina), con una densidad absoluta, determinada de acuerdo a la norma IRAM 1624, de 2,98 g/cm³; piedra partida granítica 3-9 [mm] con peso específico en condición SSS de 2,79 g/cm3, absorción 0,70 % (IRAM 1533), densidad a granel compactada de 1459 kg/m3 (IRAM 1548), módulo de finura 5,99 y TMN = 9,5 [mm] (según IRAM 1505); arena de río con peso específico en condición SSS de 2,65 g/cm3, absorción 0,18 % (IRAM 1520) y módulo de finura 1,41; agua potable de red (Según reglamento CIRSOC 201 y Norma IRAM 1601).

Las cantidades finales para la elaboración de un metro cúbico de cada mezcla se indican en la tabla 1:

**Tabla 1**. Dosificaciones de los hormigones para 1 m³.

| Cant. Pasta (%) | Cemento (kg) | Ag. Grueso (kg) | Ag. Fino (kg) | Agua (kg) |
|---|---|---|---|---|
| 15 | 212 | 1331 | 213 | 74 |
| 20 | 283 | 1331 | 213 | 99 |
| 25 | 354 | 1331 | 213 | 124 |

Por cada mezcla se moldearon cuatro probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, dos para ensayos de permeabilidad (y posteriores ensayos físicos), y dos para ensayos de resistencia a compresión simple, a las que se le ejecutó en sus caras planas una capa de pasta de cemento.

La nomenclatura de las probetas indica en primer lugar su contenido de pasta, y en segundo la energía de compactación, siendo la clase A referente a 10 golpes por capa con el martillo Proctor modificado de 30 cm (142,88 kJ/m$^3$), B para 5 golpes por capa (85,73 kJ/m$^3$) y C para 3 golpes por capa (42,86 kJ/m$^3$). Para todas las probetas el moldeo se realizó en 3 capas. De esta forma, se identificaron las muestras como 15-A, 15-B y 15-C (de igual manera para 20 y 25% de pasta).

Las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas del moldeo y, posteriormente, se mantuvieron en curado en pileta de agua con cal a una temperatura controlada de 23 ± 2 °C hasta alcanzar la edad correspondiente para cada ensayo.

2.2 Ensayos

El contenido de vacíos accesibles al agua y la densidad aparente seca se determinaron mediante el método de la balanza hidrostática. Este parámetro indica la proporción total de vacíos a través de los cuales el agua puede circular, constituyendo una propiedad fundamental para evaluar el comportamiento hidrológico y otras características del hormigón permeable (Torres et al., 2015: 850859; Fogliatti et al., 2023: 1840).

La permeabilidad se midió utilizando el método propuesto por Neithalath et al. (2003: 179), basado en un permeámetro de carga variable, mientras que la resistencia a compresión a 28 días se determinó siguiendo la norma IRAM 1546, empleando placas de elastómero no adheridas conforme a la norma IRAM 1709.

## 3. Resultados y discusión

En la tabla 2 se resumen los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados sobre las distintas mezclas.

Se ilustran las relaciones entre las propiedades estudiadas y la energía de compactación empleada para cada muestra en las figuras 1 y 2. En ellas, se puede observar los resultados de resistencia a compresión a 28 días y permeabilidad; y densidad aparente seca y porosidad, respectivamente.

La resistencia a compresión se incrementó a medida que aumentaron la energía de compactación aplicada y el contenido de pasta incorporado (figura 1). Aquellas probetas con 25% de pasta lograron obtener casi tres veces mayor resistencia que las de 15%. Este efecto se debe a que un mayor contenido de pasta cementicia recubre con mayor espesor a las partículas de árido, rellenando huecos y fortaleciendo los puentes de unión entre agregados, lo que mejora la cohesión interna y permite una transmisión más eficiente de los esfuerzos. En etapas previas del proyecto se verificó que el aumento del espesor de la pasta incrementó la resistencia a compresión del hormigón drenante (Fogliatti et al., 2023).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 2**. Resultados obtenidos.

| Probeta | Energía de compactación (kJ/m$^3$) | Resistencia a compresión (MPa) | Permeabilidad (cm/s) | Densidad (kg/m$^3$) | Porosidad (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 25% Pasta | | | | | |
| 25-A | 144,88 | 21,10 | 0,240 | 2047 | 22,2 |
| 25-B | 85,73 | 17,75 | 0,435 | 1991 | 24,5 |
| 25-C | 42,86 | 11,80 | 0,735 | 1852 | 31,0 |
| 20% Pasta | | | | | |
| 20-A | 144,88 | 13,60 | 0,320 | 1968 | 26,6 |
| 20-B | 85,73 | 10,35 | 0,565 | 1873 | 30,4 |
| 20-C | 42,86 | 7,95 | 0,860 | 1773 | 34,5 |
| 15% Pasta | | | | | |
| 15-A | 144,88 | 8,20 | 0,860 | 1872 | 30,5 |
| 15-B | 85,73 | 7,10 | 0,985 | 1838 | 32,2 |
| 15-C | 42,86 | 4,60 | 1,265 | 1715 | 37,8 |

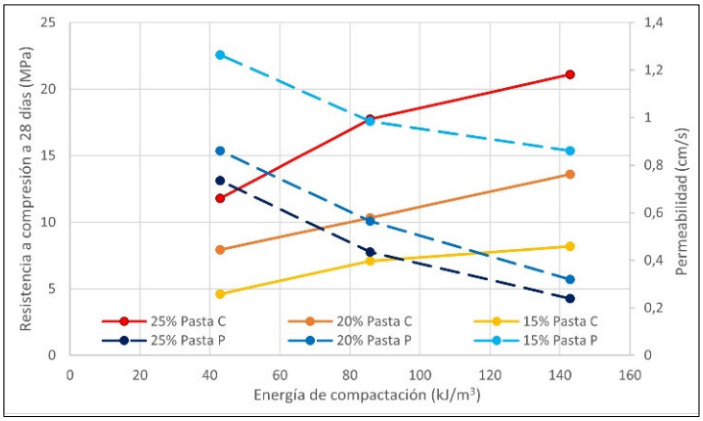



**Figura 1**. Resistencia a compresión a 28 días y permeabilidad.

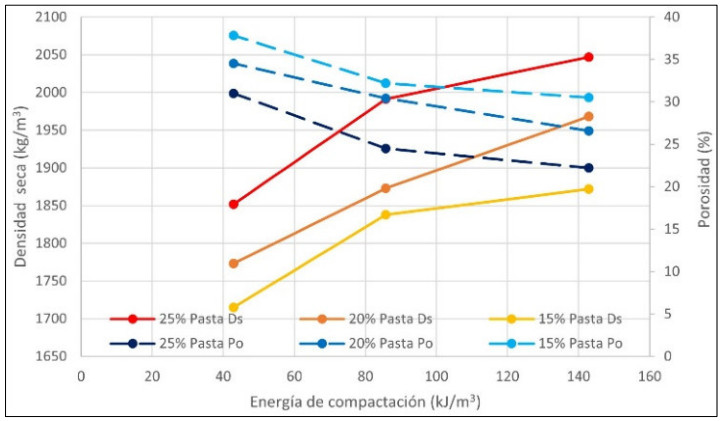



**Figura 2**. Densidad aparente seca y porosidad.

A pesar de ello, el incremento del contenido de pasta reduce la porosidad del hormigón drenante independientemente de la energía de compactación aplicada (figura 2). Una mayor compactación supone un mayor contacto superficial entre agregados, disminuyendo así la interconectividad de los poros y, por ende, su conductividad hidráulica. Un aspecto a resaltar es la baja permeabilidad obtenida en los hormigones de 20 y 25% de pasta, los cuales se comportaron de manera muy similar para todas las energías de compactación, con valores apenas por encima del umbral inferior propuestos en los estudios citados de Mikami et al (0,2 cm/s) y muy por debajo de lo mencionado en el manual ACI 522R-10. Mikami et al (2024), que no incorporan agregado fino a las mezclas, obtuvieron para 30% de pasta permeabilidades de 0,3 y 0,1 cm/s y porosidades de 22 y 17%, para energías de compactación de 95,2 y 142,9 kJ. Estos valores resultan similares a los obtenidos para las mezclas evaluadas en el presente trabajo, pudiéndose explicar las diferencias a partir del contenido de agregado fino y la menor razón a/c utilizada en el trabajo referenciado.

Las tendencias entre la porosidad y la permeabilidad se ven afectadas de manera similar al modificar los contenidos de pasta y la energía de compactación, como se observan en las figuras 1 y 2. Cabe señalar que los valores de permeabilidad arrojan resultados menos precisos, obteniéndose casi cuatro veces menor permeabilidad en los especímenes de 20 y 25% de pasta que en los de 15%. Este comportamiento puede deberse principalmente a cambios en la tortuosidad del esqueleto granular y el espesor del recubrimiento en los agregados, generando poros de menores dimensiones y obturando la interconexión de estos (Aguirre, et al, 2022).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Por otro lado, al aumentar la energía de compactación se logra un aumento de la densidad. Esto se genera por una reducción de los espacios vacíos en la matriz del hormigón, debido al reacomodamiento de las partículas granulares, expulsando el aire atrapado y mejorando la eficiencia del empaquetamiento. Es notable mencionar que, para el máximo nivel de energía de compactación en las probetas de 20 y 25% de pasta (y también para la 25-B), las densidades son muy próximas a 2000 kg/m³, números acordes pero muy cercanos al límite propuesto por los estudios de Tennis et al (2004). Esta reciprocidad entre la porosidad y densidad aparente seca se evidencia claramente en la figura 2, en donde las disminuciones de la primera generan un aumento en concordancia con la segunda. Pese a ello, no sucede lo mismo entre la permeabilidad y la densidad (ver figura 1 y 2), que a pesar de existir pesos unitarios muy diferentes (principalmente entre los especímenes de 20 y 25% de pasta), la permeabilidad se mantuvo prácticamente idéntica.

En este trabajo no se utilizaron aditivos químicos, aunque en hormigones drenantes suelen emplearse reductores de agua y retardadores de fraguado (ACI Committee 522, 2010). Investigaciones previas evidenciaron que los superfluidificantes mejoran la resistencia a compresión al optimizar la retención de la pasta sobre los agregados, mientras que los retardadores resultan útiles en mezclas que requieren mayor tiempo de compactación, sobre todo en condiciones adversas de temperatura o humedad (Fogliatti et al., 2024).

Los resultados muestran que la compactación permite mejorar las propiedades mecánicas sin modificar la dosificación, en concordancia con los estudios de Mikami et al. (2024), aunque al acercarse al límite máximo de compacidad de la mezcla, se dificulta el proceso de compactación, donde dicho umbral comienza a verse afectado por la cantidad de pasta utilizada (figura 1). Asimismo, es necesario alcanzar un nivel mínimo de compactación para evitar el desgranamiento. Cada mezcla presenta un rango óptimo de energía de compactación que permite asegurar integridad y continuidad de la porosidad.

El hormigón drenante se caracteriza por menor densidad y buena capacidad de escurrimiento, a costa de una resistencia inferior, lo que lo hace apropiado para aplicaciones de bajo tránsito como veredas, senderos, plazas, estacionamientos, sub-bases (Huang et al, 2009). No obstante, las limitaciones metodológicas y el reducido tamaño de las muestras condicionan la representatividad de los resultados, resaltando la necesidad de estudios a escala estructural y en diversas condiciones de aplicación.

## 4. Conclusiones

La compactación del hormigón permeable es una fase de la producción de este material que afecta a su rendimiento mecánico e hidráulico. Un aumento de la energía de compactación implica una mayor resistencia a la compresión, pero condicionado por el contenido de pasta incorporada, ya que el efecto de la compactación fue más efectivo en mezclas con mayor contenido de pasta de cemento.

La permeabilidad presentó un comportamiento inverso al aumentar la energía de compactación, verificándose una reducción muy pronunciada, donde las mezclas con mayor contenido de pasta fueron las más perjudicadas.

Tanto el contenido de pasta como la energía de compactación resultan factores importantes para controlar las propiedades del hormigón drenante, y se destaca que mediante un ajuste de la energía de compactación se pueden lograr mejoras en la resistencia, con un impacto menor en la permeabilidad y porosidad.

Sin embargo, se considera necesario avanzar en evaluaciones que permitan confirmar el efecto de estas variables sobre el tamaño de poros generado, su tortuosidad y la distribución de la porosidad resultante en el espesor de hormigón colocado.

## Agradecimientos

La concreción de este trabajo fue posible gracias al financiamiento de la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional.

## Referencias bibliográficas

Aguirre D.D., Fogliatti F.L., Miraglio M.E., (2022). “Efecto de la porosidad y espesor de pasta en el desempeño del hormigón drenante”. Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos (JIT 2022). UTN. Facultad Regional Reconquista, Santa Fe, Argentina. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12272/10124>

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

American Concrete Institute. ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, (2011).

Carrasco M.F.; Rautenberg D.P.; Positieri M.J. (2022). “Hormigón drenante: diseño, características y aplicaciones”, *Revista Hormigón,* 61, 5-23. Disponible en < http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/k8kj29kpr>

Fogliatti, F. L., Carrasco, M. F., Beltramini, L. B., Defagot, C. A., & Grether, R. O. (2023). “Efecto del contenido pasta y agregados finos sobre las propiedades del hormigón drenante”. *Revista Tecnología Y Ciencia*, (46), 18–40. Disponible en <https://doi.org/10.33414/rtyc.46.18-40.2023>

Fogliatti F.L., Goddio R.C., Noguera Vivas S.A., Carrasco M.F., Avendaño M.B, Puga R.E. (2024). “Influencia de las características de la pasta de cemento sobre las propiedades del hormigón drenante”, Actas del XI Congreso Internacional y 25° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba, Argentina, 9 al 13 de septiembre, 67-74.

Huang B, Wu H, Shu X, Burdette EG (2009). “Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete”. Construction and Building Materials, 24:818–823.

Kováč, M.; Sičáková, A. (2018). “Pervious Concrete as an Environmental Solution for Pavements: Focus on Key Properties”, Environments, 5(1), 11. Disponible en <https://doi.org/10.3390/environments5010011>

Liu, F., Li, Z., Liu, B., Yu, Z., Li, Z., Zhu, M., Wang, Y., & Ding, X. (2025). Experimental and Numerical Investigations on the Influences of Target Porosity and w/c Ratio on Strength and Permeability of Pervious Concrete. *Materials*, *18*(17), 3951. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma18173951>

Mikami R., Pieralisi R., Pereira E. (2025). “Influence of compaction energy on pervious concrete properties and vertical porosity distribution.” *Revista IBRACON Estruturas e Materiais* (17), 2-11.

National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). (2004). Pervious in Practice (PIP). Disponible en: <https://www.nrmca.org/association-resources/research-and-engineering/pervious-in-practice-pip/>

Neithalath, N., Weiss, W. J., Olek, J.. “Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials. Final Report”, The Institute for Safe, Quiet and Durable Highways, (2003), 179 pp.

Nguyen D.H., Sebaibi N., Boutouil M., Leleyter L., Baraud F. (2014). “A modified method for the design of pervious concrete mix”. Construction and Building Materials, 73, 271-282.

Rieg A., Pinheiro I., Pinheiro A. (2025). “Analysis of the porous system structure, permeability coefficient and mechanical resistance of pervious concrete.” *Revista Matéria* (30), 5-6.

Tennis, P. D.; Leming, M. L.; Akers, D. J. Pervious concrete pavements. Technical report, EB302.02. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 32p, 200

Torres, A., Hu, J., Ramos, A. (2015). “The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete”. *Construction and Building Materials*, 95, 850-859.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Caracterización de suelos para la producción industrial de bloques de tierra comprimida (BTC): evaluación de su viabilidad técnica

## Technical Advisory on the Industrialized Production of Compressed Earth Blocks: Soil Characterization and Plant Redesign

Presentación: 30/10/2025

**Gonzalo Darras**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
gonzalo.darras@gmail.com

### Resumen

El trabajo se enmarca en un asesoramiento técnico a la empresa Campos de Lapacho S.R.L., con el objetivo de evaluar la aptitud de la materia prima del litoral argentino para la producción de bloques de tierra comprimida (BTC). Se realizaron ensayos de granulometría, plasticidad, retracción y resistencia mecánica en probetas cilíndricas y bloques, siguiendo normas nacionales e internacionales. Los resultados arrojaron que el suelo corresponde a un limo arcilloso de baja plasticidad, con elevada proporción de finos y tendencia a la retracción. La incorporación de arena en proporción 3:1 (tierra:arena), estabilizada con 7,5% de cemento, permitió reducir significativamente las fisuras y alcanzar resistencias superiores a 60 kgf/cm², cumpliendo los requisitos normativos para su uso estructural. Este estudio confirma la viabilidad técnica del suelo disponible como materia prima para BTC y constituye una base sólida para etapas posteriores de industrialización y diseño de planta productiva.

**Palabras clave:** BTC, propiedades físicas, dosificación, normativa, industrialización.

### Abstract

This study presents a technical consultancy for the company Campos de Lapacho S.R.L., aimed at evaluating the suitability of local raw materials for the production of compressed earth blocks (CEB). Laboratory tests included grain size distribution, plasticity, shrinkage, and compressive strength on cylindrical specimens and full-size blocks, following national and international standards. The results showed that the soil corresponds to a low-plasticity clayey silt, with a high percentage of fines and a marked tendency to shrinkage. The addition of sand at a 3:1 soil-to-sand ratio, stabilized with 7.5% cement, significantly reduced cracking and achieved compressive strengths above 60 kgf/cm², meeting regulatory requirements for structural use. These findings confirm the technical feasibility of the soil as a raw material for CEB and provide a solid foundation for future stages of industrial production and plant layout design.

**Keywords:** CEB, physical properties, standard, dosage, industrialization.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El bloque de tierra comprimida (BTC) es un mampuesto fabricado mediante la compresión de un mortero de tierra, generalmente estabilizada con cemento, que se encuentra contenido en el interior de una prensa específicamente diseñada para tal fin. Su accionamiento puede ser manual o automatizado, según el nivel de producción requerido. La forma de estos bloques varía y depende de la matriz utilizada durante su fabricación; pueden ser macizos, huecos o encastrables (Cabrera et al., 2024). Para aumentar la resistencia y durabilidad de estos elementos constructivos, se han usado distintos aditivos en su fabricación (Concha-Riedel et al., 2021; Rodríguez Cuervo, 2020), que van desde sustancias naturales como mucílagos, caseína y celulosa (Vissac et al., 2017) hasta derivados del petróleo, como emulsiones asfálticas (Arteaga Paucar & Loja Saula, 2018). No obstante, desde que se comenzó a usar esta tecnología, el cemento Portland ha sido el estabilizador más común y difundido (Malkanthi et al., 2020). Su uso es tan extendido que, en varios países y regiones de América Latina, estas unidades se conocen como “bloques de suelo-cemento”.

En este marco, el presente trabajo se plantea como un asesoramiento técnico a la empresa Campos de Lapacho S.R.L., ubicada en la ciudad de Rosario, y a la vez como un caso de estudio relevante para analizar la industrialización del BTC en Argentina. La demanda concreta de la empresa se centró en dos cuestiones principales: por un lado, la necesidad de caracterizar la materia prima local para establecer una dosificación óptima en la fabricación de BTC; y, por otro, al incorporar maquinaria importada desde China, solicitó diseñar una distribución de planta eficiente para la producción a escala.

Si bien ambas tareas forman parte de un mismo caso de estudio, el presente trabajo se focaliza exclusivamente en la primera: la caracterización del suelo disponible y la evaluación de su aptitud técnica para la producción de BTC. Este diagnóstico constituye un insumo fundamental para etapas posteriores, ya que define los criterios de selección, corrección granulométrica y estabilización necesarios para garantizar calidad y durabilidad en el producto final previo a la producción en gran escala.

En este sentido, el objetivo general del trabajo es evaluar la tierra suministrada por el comitente mediante ensayos de granulometría, plasticidad, retracción y resistencia mecánica, para poder así determinar su viabilidad como materia prima para la fabricación de BTC, y proponerlos ajustes necesarios.

# 2. Materiales y Métodos

## 2.1 *Materiales*

Se recibieron 250 kg de tierra desterronada aportada por el comitente, con una humedad natural aproximada del 3%. El material se empleó como base para los ensayos de caracterización y para la confección de probetas y BTC. Para la corrección granulométrica se utilizó arena comercial proveniente del río Paraná, con un 95% de cuarzo, partículas mayormente redondeadas de tamaño comprendido entre 0,1 y 0,5 mm. El aditivo estabilizador empleado fue cemento Portland CPF 40, en proporciones variables según las dosificaciones establecidas en el diseño del experimento. El agua se incorporó en función del peso seco total de la mezcla (tierra + arena), con el fin de alcanzar la humedad plástica necesaria para el moldeo.

El equipamiento de laboratorio incluyó moldes cilíndricos de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura, moldes prismáticos de 285 x 38 x 38 mm para ensayos de retracción, un pistón hidráulico para compactación, una prensa manual “Zonni” para la producción de BTC, además de balanzas de precisión y dispositivos para medir diámetro, altura y peso de las probetas. Para los ensayos de resistencia a compresión se elaboraron 8 series de probetas cilíndricas, cada una integrada por 3 probetas, compactadas con pistón hidráulico y curadas durante 7 días. Asimismo, se fabricaron 2 series de BTC en prensa manual, con las dosificaciones más representativas (3:1 y 1:1, ambas con 7,5% de cemento). Cada serie estuvo compuesta por 6 bloques, los cuales fueron cortados a la mitad, obteniéndose así 12 probetas por serie para su ensayo a compresión y erosión.

## 2.2 *Métodos*

La selección de ensayos y normas aplicables no responde a un protocolo de rutina genérico, sino a los requerimientos específicos del comitente. En este sentido, se eligieron metodologías que aseguran reproducibilidad, pertinencia técnica y comparabilidad con estándares normativos locales e internacionales, constituyendo parte fundamental del aporte de este asesoramiento. La caracterización del suelo se llevó a cabo siguiendo normas nacionales e internacionales. En primer lugar,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

se evaluó la granulometría mediante tamizado en seco y húmedo (IRAM 10.512:1977; IRAM 10.507:1986). Los límites líquido y plástico, así como el índice de plasticidad, se determinaron de acuerdo con IRAM 10.501:2007 (ver Figura 1).

El comportamiento frente a la contracción se analizó mediante ensayos de retracción por secado, utilizando los moldes prismáticos descriptos en el apartado anterior y ajustando la humedad de la mezcla al estado plástico (NZS 4298:1998). Se compararon mezclas de tierra sola y con relaciones tierra:arena 3:1 y 1:1, evaluando la reducción de fisuración (ver Figura 2).

**Figura 1**. Realización de los ensayos de tamizado por vía húmeda (izquierda) y determinación del límite líquido (derecha).

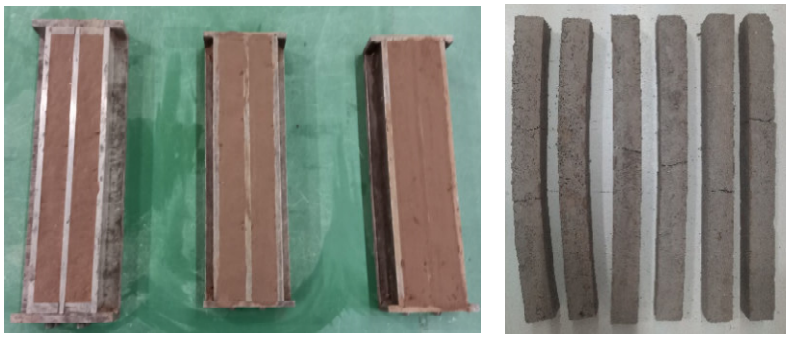


**Figura 2**. Realización del ensayo de retracción por secado. Probetas antes de comenzar el proceso de secado (izquierda) y completamente secas (derecha).

Para los ensayos de resistencia a compresión se confeccionaron series de probetas cilíndricas (5 cm x 10 cm), compactadas con pistón hidráulico hasta alcanzar una densidad seca aproximada de 1700 kg/m³. Se ensayaron diferentes dosificaciones: tierra sola y relaciones tierra:arena de 3:1 y 1:1, con adiciones de 0%, 5%, 7,5% y 10% de cemento. Las probetas fueron curadas durante 7 días, manteniendo las probetas envueltas en film de polietileno y humedecidas periódicamente.

La resistencia a compresión de las probetas se definió según la norma VN-E-33:1967. Adicionalmente, se fabricaron BTC de 25 x 12,5 x 6,5 cm en prensa manual “Zonni”, utilizando las dosificaciones más representativas (3:1 y 1:1, ambas con 7,5% de cemento). Estos bloques fueron ensayados a compresión según UNE 41410:2008. La durabilidad frente al agua se evaluó mediante ensayo de erosión húmeda, consistente en la exposición de media probeta a un chorro de agua continuo durante 60 minutos, registrando la profundidad erosionada. Todos estos procedimientos se ilustran en la Figura 3.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

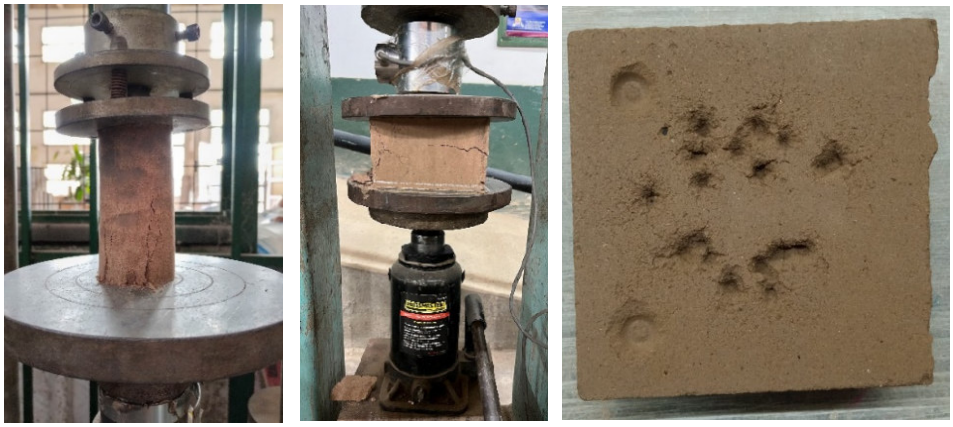


**Figura 3.** Ensayos de laboratorio realizados: a) resistencia a compresión de probetas cilíndricas, b) resistencia a compresión de BTC fabricados en prensa manual y c) ensayo de erosión hídrica mediante exposición a chorro de agua.

## 3. Resultados y discusión

3.1 *Caracterización del suelo*

Los resultados indican que la tierra enviada por el comitente es un limo arcilloso de baja plasticidad con un 95% de partículas finas (tamaño menor a 75 µm). En la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de caracterización realizados sobre la tierra. Los valores de límites líquido (41) y plástico (28) ubican al material como un limo arcilloso de baja plasticidad. Este tipo de suelos, con alta proporción de finos (95%), suelen presentar elevada retracción y baja resistencia si no son corregidos. Estas características justifican la necesidad de su estabilización granulométrica mediante arena y de su estabilización química con cemento.

**Tabla 1.** Resultados de los ensayos de identificación de la tierra

| **Parámetro** | |
|---|---|
| Límite líquido | 41 |
| Límite plástico | 28 |
| Índice de Plasticidad | 13 |
| Pasante tamiz #200 | 95% |
| Clasificación SUCS | ML (CL) |
| Clasificación HRB | A 7-6 (15) |

Como se mencionó previamente, para evaluar el efecto de la incorporación de arena sobre la retracción se elaboró una serie de probetas con suelo natural y dos series adicionales con diferentes contenidos de arena, cuyas dosificaciones se presentan en la Tabla 2. El porcentaje de agua correspondió al peso seco total de los materiales (tierra + arena). Los ensayos de retracción, realizados según NZS 4298:1998, evidenciaron que el suelo natural tiene contracciones significativas, la cual disminuye progresivamente a medida que aumenta el contenido de arena. En particular, la mezcla con relación 3:1 (tierra: arena) mostró una reducción cercana al 50% respecto al suelo sin adiciones, mientras que la proporción 1:1 prácticamente eliminó la fisuración visible. La Figura 4 se representa gráficamente la variación de la retracción en función del contenido de arena incorporado.

**Tabla 2.** Dosificaciones y resultados de los ensayos de retracción

| ID | Relación tierra/arena | Tierra (%) | Arena (%) | (*)Agua (%) | Retracción (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| A-0 | 1:0 | 100 | 0 | 17.2 | 5.4 |
| A-25 | 3:1 | 75 | 25 | 12.9 | 2.4 |
| A-50 | 1:1 | 50 | 50 | 8.6 | 0.5 |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

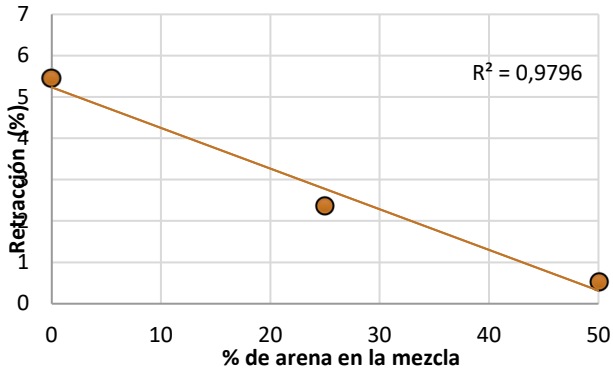



**Figura 4.** Retracción porcentual de la mezcla en función del contenido de arena.

3.2 *Resistencia a compresión de probetas cilíndricas*

Los ensayos de resistencia a compresión sobre probetas cilíndricas revelaron una clara relación entre el contenido de cemento y la resistencia del material. En las series con relación tierra:arena de 3:1, la resistencia media aumentó de 14,1 kgf/cm² en ausencia de cemento a 61,5 kgf/cm² para un contenido de 10% de cemento. De manera similar, en las series 1:1, la resistencia ascendió de 9,3 kgf/cm² (sin cemento) a 38,2 kgf/cm² con 10% de cemento (Tabla 3)

**Tabla 3.** Resultados de los ensayos de resistencia a compresión de las series de probetas cilíndricas.

| Serie | Relación tierra/arena | Cemento (%) | Tierra (%) | Arena (%) | *Agua (%) | Resistencia (kgf/cm2) | Sd (kgf/cm2) | Cv (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A** | 3:1 | 0.00 | 75 | 25 | 9,5 | 14.1 | 0.80 | 5.70 |
| **B** | 3:1 | 5.00 | 71.25 | 23.75 | 9.5 | 42.0 | 0.45 | 1.06 |
| **C** | 3:1 | 7.50 | 69.38 | 23.13 | 9.5 | 49.9 | 0.59 | 1.18 |
| **D** | 3:1 | 10.00 | 67.5 | 22.5 | 9.5 | 61.5 | 3.37 | 5.48 |
| **E** | 1:1 | 0.00 | 50 | 50 | 9.0 | 9.3 | 0.22 | 2.41 |
| **F** | 1:1 | 5.00 | 47.5 | 47.5 | 9.0 | 21.0 | 1.39 | 6.62 |
| **G** | 1:1 | 7.50 | 46.25 | 46.25 | 9.0 | 29.3 | 1.02 | 3.48 |
| **H** | 1:1 | 10.00 | 45 | 45.0 | 9.0 | 38.2 | 0.89 | 2.33 |

Estos resultados indican que, independientemente de la proporción tierra: arena, la adición de cemento incrementa significativamente la resistencia del material (Figura 5). Además, las series con mayor proporción de tierra frente a arena (3:1) mostraron sistemáticamente mayores valores de resistencia a igual porcentaje de cemento, evidenciando que el incremento de arena, aunque necesario para controlar retracciones, tiende a reducir la resistencia mecánica.

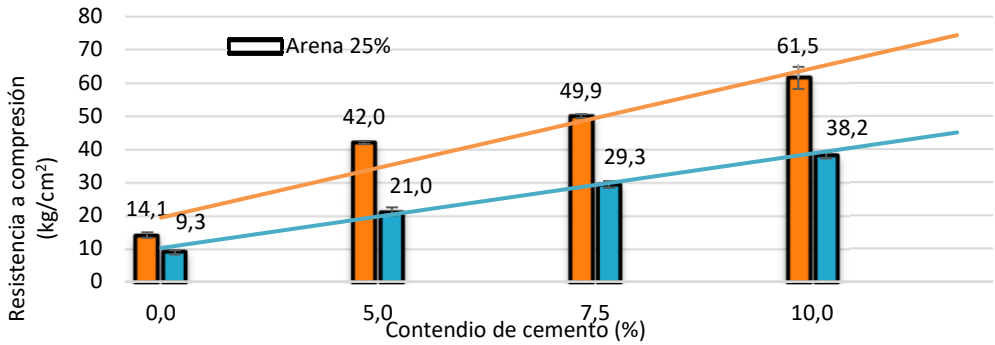



**Figura 5.** Resistencia a compresión media y desviación estándar de cada serie

Considerando los estándares de resistencia mínima para ladrillos cerámicos en Argentina (IRAM 12566, >40 kgf/cm²), los resultados sugieren que una dosificación de 7,5% de cemento proporcionaría una resistencia adecuada para la fabricación de BTC, equilibrando estabilidad dimensiónalo y control de fisuración por retracción.

3.3 *Resistencia a compresión de BTC*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los BTC fabricados con dosificaciones seleccionadas (3:1 y 1:1 con 7,5% de cemento) presentaron diferencias significativas en su resistencia a compresión. La serie 3:1 alcanzó una resistencia media de 62,3 kgf/cm², mientras que la serie 1:1 mostró 40,3 kgf/cm² (Tabla 4). En la tabla4, Sd corresponde a la desviación estándar de los valores medidos y Cv al coeficiente de variación, expresado en porcentaje.

Estos resultados confirman la tendencia observada en probetas cilíndricas: un mayor contenido de arena, aunque útil para minimizar fisuras por retracción, reduce la resistencia mecánica. La desviación estándar y coeficiente de variación relativamente altos (Sd = 11,12 y 7,09 kgf/cm²; Cv ≈ 17,8%) reflejan la heterogeneidad inherente en la fabricación manual de bloques, aunque ambos valores cumplen con la resistencia mínima exigida por normas locales y europeas para elementos constructivos de tierra estabilizada.

**Tabla 4.** Dosificaciones y resultados de los ensayos de compresión sobre BTC.

| **Dosificaciones** | | | | | **Resultados** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ID** | **Tierra (%)** | **Arena (%)** | **Cemento (%)** | **(*)Agua (%)** | **Resistencia (kgf/cm2)** | **Sd (kgf/cm2)** | **Cv (%)** |
| **3:1** | 69.38 | 23.13 | 7.50 | 9.5 | 62.3 | 11.12 | 17.85 |
| **1:1** | 46.25 | 46.25 | 7.50 | 9.0 | 40.33 | 7.09 | 17.6 |

3.4 *Resistencia a erosión húmeda*

El ensayo de erosión por pulverizado de agua reveló que el contenido de arena influye directamente sobre la durabilidad frente a la acción del agua. La serie 3:1 presentó una profundidad de erosión de 6,0 mm, correspondiente al nivel 2 de resistencia a la erosión, mientras que la serie 1:1 mostró una profundidad mayor de 9,5 mm, ubicándose en el nivel 3 (Figura 6).

**Figura 8:** Resultados del ensayo de resistencia a la erosión húmeda por caída de agua sobre las diferentes series de BTC.

Según normas internacionales (IS 1725 y NZS 4298), los elementos con nivel 3 de resistencia pueden emplearse en muros exteriores portantes siempre que se protejan las caras expuestas, mientras que los de nivel 2 requieren protección mediante revoques o aleros en orientaciones desfavorables. Estos resultados indican que, aunque la reducción de arena mejora la resistencia a la compresión, puede mejorar también la durabilidad frente a erosión, equilibrando así las propiedades mecánicas y ambientales del BTC.

## 4. Conclusiones

El estudio realizado permite extraer las siguientes conclusiones:

- La tierra provista por el comitente es un limo arcilloso de baja plasticidad, con un 95% de partículas finas (tamaño menor a 75 µm).
- El elevado contenido de finos genera un índice de retracción por secado de 5,5% para contenidos de humedad cercanos a los empleados en la fabricación de BTC. En consecuencia, resulta indispensable realizar una

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

estabilización granulométrica mediante la incorporación de arena, a fin de reducir la retracción y posibilitar su utilización en la producción de bloques.

- La combinación de la tierra aportada por el comitente con arena comercial permite elaborar BTC que cumplen con los requisitos mínimos estipulados por la normativa internacional para elementos de tierra estabilizada (resistencias > 20 kgf/cm²) y por la normativa argentina para ladrillos y bloques cerámicos portantes (≥ 40 kgf/cm²).
- En función de los resultados de compresión y erosión hídrica, se recomienda producir BTC con una dosificación de 3:1 (tierra: arena en peso) y 7,5% de cemento respecto de la suma tierra + arena. Con esta formulación se alcanzan resistencias a compresión superiores a 60 kgf/cm² y una adecuada durabilidad frente a la erosión húmeda, requiriendo únicamente protección superficial (revoques o aleros) en muros con orientaciones críticas.

En síntesis, los resultados obtenidos no solo confirman la viabilidad técnica del suelo para la producción de BTC, sino que además responden a la demanda del comitente de establecer una dosificación adecuada y verificable bajo normas reconocidas, constituyendo un insumo clave para la planificación de su futura planta productiva."

## Referencias bibliográficas

Arteaga Paucar, J., & Loja Saula, R. (2018). "Uso de emulsiones asfálticas como aditivos en bloques de tierra comprimida", Revista Internacional de Construcción Sostenible, 12(3), 45-53.

Cabrera, L., Fernández, M., & Gómez, P. (2024). "Variaciones en la geometría de bloques de tierra comprimida según el tipo de matriz de moldeo", Actas del Congreso Latinoamericano de Tecnología Constructiva, Buenos Aires, Argentina, 10-12 de marzo, 112-118.

Concha-Riedel, R., Martínez, S., & López, A. (2021). "Aditivos naturales y sintéticos para mejorar la durabilidad de BTC", Revista Iberoamericana de Materiales de Construcción, 18(2), 25-36.

IRAM 10.501:2007. Determinación de los límites líquido y plástico e índice de plasticidad de suelos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.

IRAM 10.507:1986. Ensayo de granulometría de suelos mediante tamizado húmedo. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.

IRAM 10.512:1977. Ensayo de granulometría de suelos mediante tamizado en seco. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.

IRAM 12566. Requisitos de resistencia mínima para ladrillos cerámicos en Argentina. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.

Malkanthi, D., Perera, K., & Silva, R. (2020). "Uso extendido de cemento Portland en bloques de tierra comprimida en América Latina", Journal of Sustainable Construction, 15(4), 77-85.

Rodríguez Cuervo, J. (2020). "Mejoras en la resistencia de bloques de tierra mediante aditivos", Revista Colombiana de Construcción, 11(1), 55-64.

Vissac, C., Dupont, L., & Moreau, F. (2017). "Aditivos naturales en la fabricación de BTC: mucílagos, caseína y celulosa", Construction and Building Materials, 150, 125-133.

UNE 41410:2008. Bloques de tierra comprimida. Ensayo de resistencia a compresión. Asociación Española de Normalización, Madrid, España.

VN-E-33:1967. Ensayo de compresión de probetas de tierra. Vietnam Standards, Hanoi, Vietnam.

NZS 4298:1998. Compressed earth blocks – Methods of test. Standards New Zealand, Wellington, Nueva Zelanda.
IS 1725. Indian Standard for Compressed Stabilized Earth Blocks. Bureau of Indian Standards, Nueva Delhi, India.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Adaptación de un microscopio Arcano XSZ–107 para observación de materiales opacos mediante microscopía óptica digital

## Adaptation of an Arcano XSZ–107 microscope for observation of opaque materials using digital optical microscopy

Presentación: 30/10/2025

**Augusto Baqué**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina.
abaque@frsf.utn.edu.ar

**Gonzalo Barrientos Santini**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina.
gbarrientossantini@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

La microscopía óptica es una herramienta clave en la caracterización de materiales, pero su aplicación en muestras opacas resulta limitada. Este trabajo tuvo como objetivo adaptar un microscopio binocular Arcano XSZ-107, originalmente de transmisión, para la observación digital de materiales opacos en el ámbito del CECOVI. La metodología incluyó la revisión de técnicas y equipos disponibles, la selección y montaje de componentes, y la incorporación de una cámara digital RELIFE M16 con acople C-Mount. Se calibraron aumentos y escalas mediante patrones graduados y se integró el software libre ImageJ para el procesamiento de imágenes. Como aplicación inicial, se analizaron morteros mediante iluminación incidente, logrando medir tamaño de poros y distinguir diferencias estructurales. Los resultados evidenciaron una desviación promedio de 6,2 µm en las mediciones, confirmando la precisión del sistema. La actualización permitió valorizar un equipo en desuso, alineándolo con tendencias actuales de digitalización y análisis computacional.

**Palabras clave:** Microscopía óptica, Materiales opacos, Digitalización de imágenes, ImageJ, Medición de poros.

### Abstract

Optical microscopy is a key tool in the characterization of materials, but its application in opaque samples is limited. The aim of this work was to adapt an Arcano XSZ-107 binocular microscope, originally a transmission microscope, for the digital observation of opaque materials at CECOVI. The methodology included reviewing available techniques and equipment, selecting and assembling components, and incorporating a RELIFE M16 digital camera with C-Mount coupling. Magnifications and scales were calibrated using graduated patterns, and the free ImageJ software was integrated for image processing. As an initial application, mortars were analyzed using incident illumination, making it possible to measure pore size and distinguish structural differences. The results showed an average deviation of 6.2 µm in the measurements, confirming the accuracy of the system. The upgrade allowed for the reuse of unused equipment, aligning it with current trends in digitization and computational analysis.

**Keywords:** Optical microscopy, Opaque materials, Digital observation, ImageJ, Pore size measurement.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

La microscopía es una herramienta empleada en el estudio y caracterización de materiales, permitiendo observar la estructura interna y superficial a diferentes escalas. Dentro de los microscopios ópticos convencionales se distinguen dos modalidades principales: transmisión, donde la luz atraviesa la muestra para formar la imagen, y reflexión, en la que la imagen se genera a partir de la luz reflejada desde la superficie del material. La microscopía óptica se define como cualquier técnica que utiliza luz visible para iluminar y registrar imágenes de la muestra (Jenkins and White, 1957: 45; Phillips, 1971: 12).

Los parámetros que determinan la calidad de la observación en microscopía óptica son el aumento y la resolución. El aumento expresa la relación entre el tamaño aparente de la imagen y el real de la muestra, mientras que la resolución establece la mínima separación a la que dos puntos pueden distinguirse como independientes. Esta última depende de la apertura numérica del objetivo y de la longitud de onda de la luz. La apertura numérica refleja la capacidad de captar luz, relacionada con el ángulo de incidencia de los rayos y el índice de refracción del medio. Aunque el aumento puede incrementarse mediante combinaciones de lentes, la resolución física está limitada por la longitud de onda mínima de la luz visible, que impide distinguir detalles menores a 0,2 µm (Mancuso et al., 2015: 117).

La integración de sistemas de captura digital ha dado lugar a la microscopía óptica digital, que combina adquisición de imágenes con procesamiento computacional. Esta estrategia permite optimizar tareas repetitivas y generar resultados cuantificables, cuyos análisis estadísticos son más sólidos que la observación cualitativa (Schindelin et al., 2015: 7-8). La digitalización facilita el almacenamiento de imágenes y su procesamiento posterior, incluyendo corrección de brillo y contraste, segmentación de regiones de interés, cuantificación de parámetros morfológicos y análisis de textura, aplicable en la caracterización de poros, fibras y defectos superficiales.

El desarrollo de métodos de adquisición más complejos produce conjuntos de datos multidimensionales, lo que exige software capaz de gestionarlos. ImageJ, plataforma de código abierto, se ha consolidado en la investigación de materiales gracias a su capacidad de adaptación mediante complementos y extensiones para necesidades específicas, como análisis de tamaño de partículas, distribución de poros y orientación de fibras (Schindelin et al., 2020: 1).

La elección del microscopio óptico depende de la naturaleza de la muestra: los microscopios de transmisión son adecuados para materiales translúcidos, mientras que su aplicación es limitada en materiales opacos, como morteros y hormigones. En estos casos, la iluminación incidente y los sistemas de reflexión permiten registrar topografía, textura superficial y defectos, extendiendo el alcance de la observación.

El Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI) realiza actividades vinculadas a la caracterización de materiales, evaluación de su estado de conservación y desarrollo de nuevos materiales. En este contexto, el laboratorio contaba con un microscopio binocular Arcano XSZ-107, que permanecía en desuso debido a su configuración original (microscopio de transmisión), orientada a la observación de muestras translúcidas. Ante la relevancia de la observación microscópica para el análisis de materiales opacos, se planteó la adaptación del equipo a nuevas aplicaciones, incorporando un sistema digital de captura que permite el almacenamiento y el análisis posterior de las imágenes. De esta manera, el trabajo tiene como objetivo principal poner en valor un microscopio existente, alineándolo con las tendencias actuales de digitalización y procesamiento de imágenes, y ampliando su aplicabilidad en la investigación y caracterización de materiales opacos.

## 2. Materiales y métodos

El laboratorio contaba con un microscopio binocular Arcano XSZ-107, equipado con cuatro objetivos acromáticos: 4x/N.A 0.10, 10x/N.A 0.25, 40x(r)/N.A 0.65 y 100x(r)/N.A 1.25 (oil), conforme a la norma DIN. La cabeza binocular tipo Sliding tenía inclinación de 45° y permitía rotación de 360°. El portaoculares contaba con distancia interpupilar ajustable entre 55 y 75 mm y regulación dióptrica individual ±5 d. Se disponía de un par de oculares 10x WF, alcanzando aumentos totales de hasta 1000x. La platina mecánica medía 14,8 × 12,3 cm con mando coaxial bajo. El condensador de Abbe, N.A. 1.2, era regulable en altura y recentrado, con diafragma iris y porta filtro. El enfoque era macro y micrométrico coaxial bilateral, con división mínima de 2 µm, foco de límite y ajuste de tensión en el micrométrico. Esta configuración estaba originalmente orientada a la observación de muestras translúcidas, lo que limitaba su aplicación directa a materiales opacos típicos en el ámbito de la ingeniería civil.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Para evaluar la posibilidad de ampliar la aplicabilidad del microscopio, se realizó una revisión bibliográfica sobre técnicas de microscopía óptica aplicables a materiales opacos y se relevó el mercado de equipos disponibles. Además, se consultó con proveedores y docentes investigadores de la Universidad Tecnológica Nacional, sobre la viabilidad de realizar adaptaciones que permitan observar con iluminación incidente y reflexión los materiales con los que se trabaja típicamente en el ámbito del CECOVI. Con base en esta información, se seleccionaron los elementos necesarios para la actualización del equipo.

La actualización consistió en el montaje de los componentes seleccionados, seguido de pruebas de funcionamiento y calibración del campo observable utilizando escalas graduadas. Para la captura de imágenes se empleó el software OBS de código abierto. Posteriormente, se instaló y configuró el software ImageJ. Los autores del trabajo se capacitaron en la adquisición y procesamiento digital de imágenes. Finalmente, se realizó un primer trabajo de microscopia óptica digital cuyo objetivo era evaluar diferencias y similitudes entre dos morteros existentes.

### 2.1 *Configuración del microscopio*

Las observaciones microscópicas se realizaron empleando un microscopio trinocular modificado Arcano XSZ-107, adaptado para la visualización de materiales opacos. El cabezal binocular permitía a un solo usuario ver a través de los lentes y no se podía registrar lo observado de manera digital a buena resolución y con una escala adecuada. Fue retirado y reemplazado por uno trinocular con la disposición del nuevo hueco orientado a 90° junto a un tubo empalme. Esta adaptación habilito la incorporación y uso de la cámara marca RELIFE modelo M16, a través de un acople entre los instrumentos, que permite digitalizar las observaciones de las muestras con los aumentos disponibles. Esta conexión se trata de un ocular C-Mount de 0.5X (B&S 1/2"), que se utilizó para acoplar la cámara digital al microscopio (figura 1). Reduce la imagen proyectada por el microscopio para que coincida con el tamaño del sensor de la cámara. Permitió obtener una visualización correcta sin recorte ni distorsión. La designación “1/2"” hace referencia a que está diseñado para sensores de cámara de hasta 1/2 pulgada. Previa captura de las imágenes se realizó una calibración con los aumentos (4x y 10x), con el fin de determinar la correspondencia entre el tamaño de píxel y su equivalencia en milímetros para este trabajo. Esta calibración permitió incorporar una escala de referencia en las imágenes digitales y posibilitó la medición del tamaño de los poros de interés en las muestras analizadas.

**Figura 1**. Cámara RELIFE M16, lente de acople ½” y escala grafica numérica usada para calibración.

Con el microscopio ya modificado el montaje de los otros elementos comenzó en primer lugar, enroscando el acople ocular a la cámara. Seguido se realizaron las conexiones vía cable hacia el monitor de control y la computadora con la que se trabajó, luego se lo calzó cuidadosamente en el tubo de soporte a 90º del trinocuar fijándolos. Cuando se montó el conjunto debió ser calibrado a través de la escala grafica numérica, finalmente quedo listo para ver y digitalizar las muestras que se cuantificaron (figura 2).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

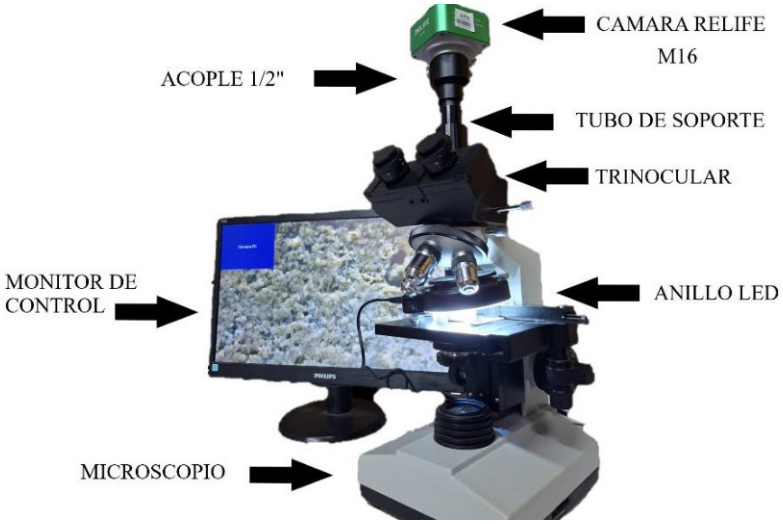



**Figura 2**. Ensamblaje final del conjunto cámara, monitor, acoples y microscopio óptico.

## 3. Resultados y discusión

3.1 Procedimiento definido de trabajo

Los objetos en estudio serán en su mayoría muestras opacas y no traslucidas, como se acostumbra a usar en microscopios, debido a la composición de estos: suelos, morteros, metales, etc. que no dejan pasar la luz parcial o totalmente. Por ende, para obtener imágenes de la calidad deseada se los debió iluminar con elementos por fuera del microscopio en su perímetro. Los resultados obtenidos permitieron realizar servicios a propios y terceros, con un grado de precisión con el que no se contaba hasta la fecha. Quedando un sistema de fácil manipulación que solo requiere un entendimiento básico del software para el procesado, y las capturas las puede tomar cualquier usuario de computadora o desde un control remoto (figura 3).

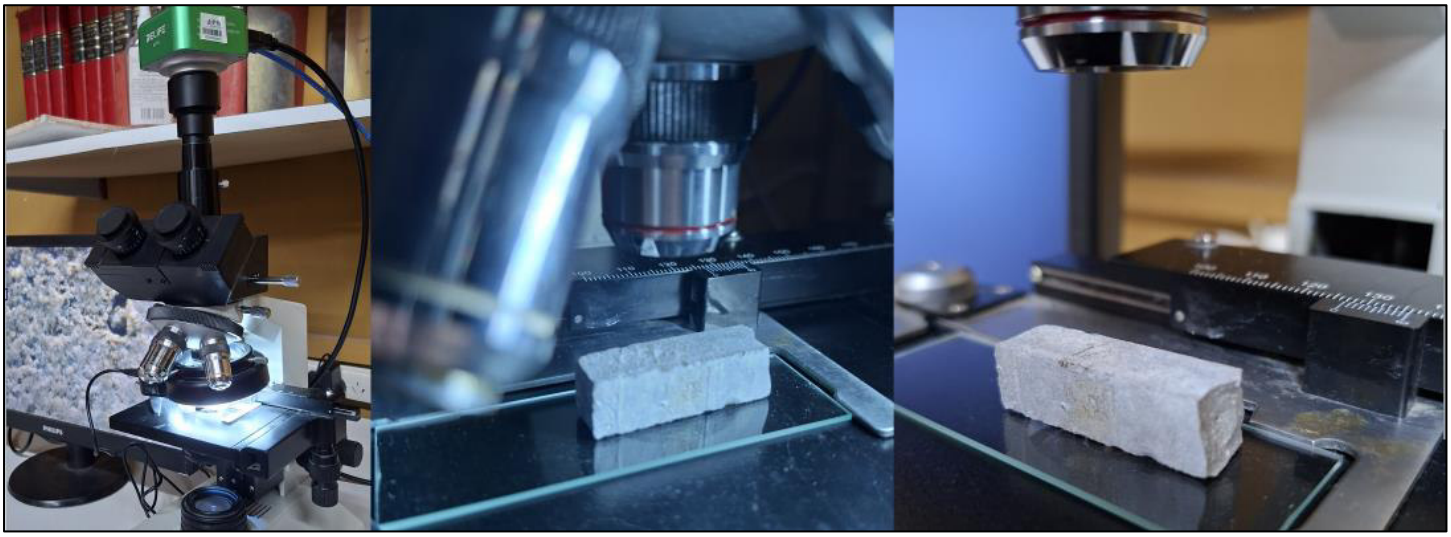


**Figura 3**. Cámara RELIFE M16 acoplada al microscopio trinocular Arcano, con una muestra de mortero.

Para establecer escalas entre digitalizaciones se usó un elemento graduado específico para microscopios, donde trae impreso una escala de longitudes y grados, para así configurar lo que se observó con la cámara a través de los instrumentos y lo que posteriormente se capturó y analizó. Se observó a través del conjunto cámara-microscopio la escala grafico numérica y se obtuvo una foto lo más centrada posible a la grilla de esta con el centro de la imagen provista por la cámara, luego a través del software ImageJ se tomaron el promedio de mediciones entre las marcas de graduación y se asignó el promedio de estas al valor unitario provisto por la escala.

Las muestras para ser observadas se iluminaron con un anillo led perimétrico al lente que refleje la mayor cantidad de luz posible, para apreciar todos los detalles en el relieve de la superficie a observar. El aumento se realizó a través de la graduación

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

que provee el microscopio y el aumento digital de la cámara se dejó fijo para no perder la escala. Una vez se enfocó el objetivo las digitalizaciones de las imágenes de la cámara se obtuvieron a través de capturas de video y pantalla con uso de OBS studio.

Finalmente, la incorporación de las escalas correspondientes al zoom usado en cada imagen se asignó con el software ImageJ, previamente calibrado con el elemento graduado, estableciendo la relación micras/pixeles presentes en la imagen a analizar, además de correcciones que se creyeron pertinentes en cuanto a color, balance de blancos, contraste, etc.

Como aplicación, se buscó medir el tamaño de poros en muestras del laboratorio, provenientes de un revoque añejo. Se utilizó el lente 4x del microscopio trinocular. Obteniendo las siguientes capturas digitales con su correspondiente escala:

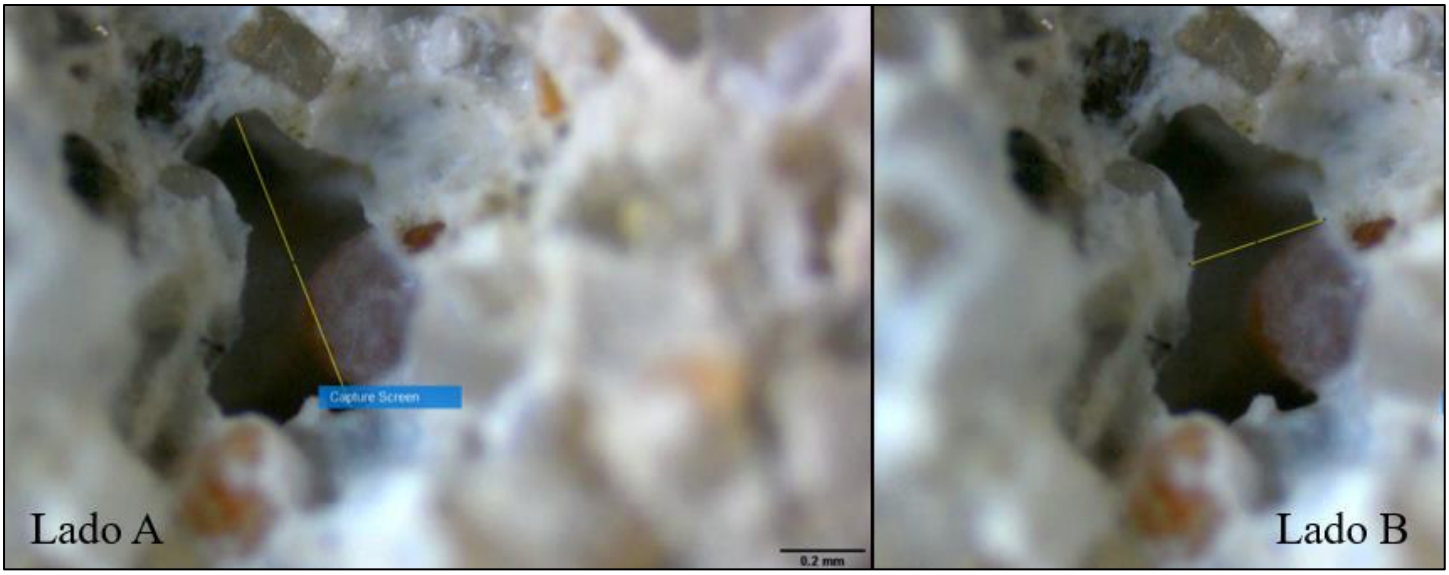



**Figura 4**. Medición de lados de un poro M1, con uso de ImageJ®, con escala grafica de 0,2 (mm).

**Figura 5**. Medición de lados de un poro M2, con uso de ImageJ®, con escala grafica de 0,2 (mm).

Los resultados obtenidos tuvieron una desviación en promedio de 6,2 (µm), corresponde a decenas de píxeles (según configuración), por lo que no es un “ruido de sub-píxel” sino una desviación cuantificable. Con valores medios conforme a lo esperado en cuanto al tamaño de los poros, al tratarse de un revoque con varios años de antigüedad (tabla 1).

**Tabla 1**. Mediciones realizadas en las muestras M1 y M2 (figura 4 y 5)

| | MEDIA (mm) | DESVIACION (mm) | MIN (mm) | MAX (mm) |
|---|---|---|---|---|

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| M1 LADO A | 0,344 | 0,011 | 0,327 | 0,364 |
| M1 LADO B | 0,739 | 0,006 | 0,733 | 0,751 |
| M2 LADO A | 0,165 | 0,005 | 0,157 | 0,175 |
| M2 LADO B | 0,308 | 0,006 | 0,295 | 0,316 |

## 4. Conclusiones

Finalmente, el equipo quedó instalado y operativo en nuestra biblioteca. Restringiendo el acceso solo a quien lo solicite, para cuidar la integridad y uso responsable del mismo. Las imágenes que se obtengan serán compartidas y aplicadas a los informes que lo requieran a partir de la fecha. Esta actualización y puesta en valor del microscopio con la incorporación de la cámara posiciono al centro a un mayor nivel en cuanto a tecnología aplicada a la investigación. Los nuevos materiales estudiados por los profesionales tendrán esta opción de medición, que aporta a la caracterización de muestras opacas. El Alcance del proyecto es aplicable a cualquier material y forma, por ende, es transversal a todas las ramas de la investigación que necesiten emplearlo.

Se propone a corto plazo el armando de un recinto aislado y hermético, que permita dejar la cámara y el microscopio fijos, y así se pueda trabajar con comodidad, dejando los equipos a resguardo de ajenos y del polvo. A futuro se espera incorporar la lupa, para sumar un aumento de 6x al sistema. Nuevos lentes para la cámara, así como filtros de luz y mejores luces perimétricas dentro del gabinete, para obtener tomas mejor iluminadas, dotándolas de mayor definición y contraste entre capas y objetos.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF) y a todos los compañeros del Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI).

## Referencias bibliográficas

Jenkins, F. A. y White, H. E. (1957). Fundamentals of Optics. Nueva York: McGraw-Hill.

Phillips, C. S. G. (1971). The Use of the Microscope in Chemistry. Londres: Royal Institute of Chemistry.

Mancuso, J. J., Chen, Y., Li, X., Xue, Z., & Wong, S. T. (2015). “Microscopy”, en A. S. H. G. & M. J. B. (Eds.), Guide to Research Techniques in Neuroscience (2nd ed.). San Diego, CA: Elsevier. pp. 117-143. Disponible en http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-800511-8.00005-8.

Schindelin, J., Curtis, G. J., Rueden, C., Hiner, M., Eliceiri, K. W., & otros. (2015). “The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis”, *Molecular Reproduction and Development*, 82(7-8), 518–529. Wiley. Disponible en https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mrd.22489.

Schindelin, J., Curtis, G. J., Rueden, C., Hiner, M., Eliceiri, K. W., & otros. (2020). “The ImageJ ecosystem: Open-source software for image visualization, processing, and analysis”, *Protein Science*, 29(1), 120–135. Wiley. Disponible en https://doi.org/10.1002/pro.3993.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Resistencia a la compresión y erosión húmeda en bloques de tierra comprimida fabricados en Mendoza

## Compressive strength and wet erosion resistance of compressed earth blocks manufactured in Mendoza

Presentación: 30/10/2025

**Lara Mariam Auday Cruz**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra (TIERRA FIRME), Santa Fe, Argentina.
laudaycruz@frsf.utn.edu.ar

**Renato Adolfo Pilatti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra (TIERRA FIRME), Santa Fe, Argentina.
rpilatti@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

En la industria de la construcción se busca avanzar hacia prácticas más sostenibles, evaluando la viabilidad de distintos materiales y técnicas. Entre ellas, los bloques de tierra comprimida (BTC) constituyen una opción con mejor desempeño térmico que los muros tradicionales. El objetivo de este trabajo fue evaluar la resistencia a compresión y a erosión húmeda de BTC fabricados en la provincia de Mendoza. Para ello se realizaron ensayos normalizados a cargo del Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra (UTN FRSF), cuyos resultados se compararon con normativas internacionales. Se concluyó que las muestras analizadas cumplen con todos los requerimientos establecidos, demostrando su factibilidad en construcciones no portantes.

**Palabras clave:** BTC, resistencia, normativa.

### Abstract

In the construction industry, efforts are being made to move towards more sustainable practices by evaluating the feasibility of different materials and techniques. Among them, compressed earth blocks (CEB) represent an option with better thermal performance than traditional masonry walls. The aim of this study was to assess the compressive strength and wet erosion resistance of CEB manufactured in the province of Mendoza. Standardized tests were carried out by Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra (the Research and Development Group on Earth Construction Techniques), and the results were compared with international regulations. It was concluded that the analyzed samples meet all established requirements, demonstrating their feasibility for use in non-load-bearing constructions.

**Keywords:** CEB, endurance, regulation.

## 1. Introducción

En la industria de la construcción se emplean diversos materiales para la fabricación de mampuestos. Entre estos se destaca la tierra, que, mediante distintas técnicas, puede transformarse en adobes o en bloques de tierra comprimida (BTC).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los BTC son confeccionados mediante la mezcla de tierra, arena y generalmente aditivos minerales (cal o cemento) que ayudan a mejorar su capacidad resistente (Dorado et al., 2022). La mezcla obtenida es colocada en máquinas especialmente diseñadas, las cuales, por medio de matrices, generan una presión en el material de 20 a 70 kgf/cm$^2$, formando así el mampuesto (Cabrera et al., 2024).

De esta manera es que el BTC, así como otras técnicas de construcción con tierra, presentan diversas ventajas frente a los demás materiales. Poseen un mejor desempeño térmico que los tradicionales muros de ladrillo cerámico macizo o bloques de hormigón, requiriéndose menores espesores para lograr iguales niveles de aislación térmica y teniendo un bajo impacto ambiental, ya que su uso minimiza las pérdidas y ganancias de calor interior durante el invierno y verano, respectivamente (Constantini- Romero et al., 2022).

Otro aspecto relevante que lleva a que sea una alternativa viable para construir de manera sustentable, es la posibilidad de fabricar los elementos constructivos sin consumir energías contaminantes y sin la necesidad de someter al recurso principal (tierra) a procedimientos que exijan altas temperaturas. De esta forma, la materia prima puede encontrarse de manera natural prácticamente en cualquier lugar del planeta, reduciendo así los costes asociados al transporte. Además, la utilización del agua durante su elaboración es escasa, requiriendo menos de un 25% en relación al volumen del mampuesto: una diferencia notable frente a los sistemas constructivos convencionales (Guerrero, 2007).

En este contexto, este artículo tiene como objetivo evaluar la resistencia a compresión y erosión húmeda de bloques de tierra comprimida fabricados en la provincia de Mendoza, para verificar sus propiedades físicas y mecánicas de acuerdo a normativas internacionales que determinan la viabilidad de estos para su uso en la construcción.

## 2. Materiales y métodos

Con el fin de analizar una serie de bloques de tierra comprimida realizados por una fábrica en la región mencionada anteriormente, se llevaron a cabo una serie de ensayos característicos que estipulan la factibilidad de los mismos.

### *2.1. Estabilidad dimensional*

Inicialmente se verificó la estabilidad dimensional de un lote, comparando las dimensiones efectivas y el peso de los mampuestos con respecto a lo informado por el fabricante. Para ello se seleccionaron 22 bloques de tierra comprimida y se los colocó en la estufa a 105 °C durante 24 horas. En estado seco se definieron las características físicas a evaluar; medidas tridimensionales y masa de cada unidad, por medio de una balanza analítica y el uso del calibre.

### *2.2. Resistencia a compresión*

Según lo establecido en la norma española UNE 41410 (2008), el ensayo a compresión debe realizarse en bloques enteros con la superficie de apoyo perfectamente plana. Este acabado puede obtenerse por medio de una capa fina de mortero de cemento o yeso de alta resistencia, tal como lo contempla la norma.

Para llevar a cabo el ensayo se utilizó una prensa con una capacidad de 60 toneladas. En los cinco bloques seleccionados se aplicó una fuerza axial constante de manera perpendicular a la cara de compresión. Dado que presentan una matriz macho-hembra, la preparación previa consistió en la eliminación del reborde superior (macho) y el relleno del encastre inferior (hembra). Esta tarea denominada “encabezado”, tiene como finalidad corregir las irregularidades de las caras y evitar la concentración de cargas en puntos específicos indeseados. En la Figura 1 se puede observar el estado de las probetas una vez concluido el ensayo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 1.** BTC ensayados a compresión simple (fotografía, 2025).

*2.3. Resistencia a erosión húmeda*

El procedimiento experimental se realizó en tres BTC, empleando una variante del ensayo de erosión por pulverización de agua a presión, establecido en la norma NZS 4298 (1998), con el propósito de evaluar la resistencia del material frente a la acción erosiva del agua.

El equipo utilizado para la ejecución del ensayo consta de un recipiente cerrado con una ducha interna que genera el pulverizado del líquido (véase Figura 2) desde una altura de 20 centímetros. El fluido es impulsado por una bomba eléctrica que transporta el agua almacenada en un depósito ubicado en la parte inferior. La presión suministrada al bloque se regula mediante un manómetro, estableciéndose en 1 PSI durante un período de 60 minutos.

**Figura 2.** Equipo para ensayo de resistencia a la erosión húmeda (fotografía del ensayo, 2025).

## 3. Resultados

Con los datos obtenidos de los ensayos realizados se procedió con la sistematización de los mismos para su posterior verificación con las normativas correspondientes. En la Tabla 1, pueden apreciarse los resultados del ensayo de estabilidad dimensional mientras que en la Tabla 2, del ensayo de resistencia a compresión. Finalmente, en lo que respecta al ensayo de resistencia a la erosión húmeda, sus resultados se exponen en la Figura 3, dado que este procedimiento evidencia principalmente efectos de carácter cualitativo, los cuales se constatan mediante la observación de los bloques al concluir el tiempo estipulado.

**Figura 3.** BTC antes (izq.) y después (der.) de ser sometidos al ensayo de resistencia a erosión húmeda (fotografía, 2025).

**Tabla 1.** Resultados de las mediciones efectuadas sobre cada BTC.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| Nº | Largo (mm) | Ancho (mm) | Altura (mm) | Masa (kg) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 250 | 126 | 71,5 | 3,305 |
| 2 | 250 | 126 | 71,4 | 3,340 |
| 3 | 250 | 126 | 71,4 | 3,630 |
| 4 | 250 | 126 | 70,3 | 3,475 |
| 5 | 250 | 126 | 71,2 | 3,495 |
| 6 | 250 | 126 | 71,4 | 3,525 |
| 7 | 250 | 126 | 71,4 | 3,525 |
| 8 | 250 | 126 | 71,6 | 3,700 |
| 9 | 250 | 126 | 71,6 | 3,720 |
| 10 | 250 | 126 | 71,1 | 3,610 |
| 11 | 250 | 126 | 71,5 | 3,355 |
| 12 | 250 | 126 | 70,9 | 3,340 |
| 13 | 250 | 126 | 70,2 | 3,400 |
| 14 | 250 | 126 | 71,3 | 3,505 |
| 15 | 250 | 126 | 71,2 | 3,175 |
| 16 | 250 | 126 | 72,9 | 3,605 |
| 17 | 250 | 126 | 71,7 | 3,520 |
| 18 | 250 | 126 | 72,1 | 3,655 |
| 19 | 250 | 126 | 71,9 | 3,630 |
| 20 | 250 | 126 | 72,1 | 3,370 |
| 21 | 250 | 126 | 71,7 | 3,395 |
| 22 | 250 | 126 | 71,7 | 3,655 |
| **Promedio:** | | | **71,45** | **3,497** |
| **Desviación estándar Sd:** | | | **0,56** | **0,146** |

**Tabla 2.** Resultados de los ensayos de resistencia a compresión.

| Nº | Área Neta (cm²) | Carga (kgf) | Resistencia bruta (kgf/cm²) |
|---|---|---|---|
| 1 | 289,98 | 18666 | 64,37 |
| 2 | 290,60 | 19306 | 66,44 |
| 3 | 289,80 | 23730 | 81,88 |
| 4 | 289,84 | 18306 | 63,16 |
| 5 | 290,72 | 21147 | 72,74 |
| **Promedio:** | | | **69,72** |
| **Desviación estándar Sd:** | | | **7,74** |

En primera instancia, se advierte en la Tabla 1 que la única dimensión que presenta variaciones entre los distintos mampuestos corresponde a la altura, mientras que el largo y el ancho permanecen constantes. Ello se debe a que, durante la fabricación de los BTC, se emplea una prensa que comprime el material, generando diferencias en la altura en función de la cantidad incorporada en la matriz. De este modo, la determinación de dicha dimensión responde a un criterio volumétrico.

Asimismo, al considerar las tolerancias de las dimensiones efectivas respecto de las nominales recomendadas por la normativa argentina para ladrillos comunes (IRAM12566-1) y por la normativa española para BTC (UNE EN 41410), se verificó que la totalidad de los bloques se encuentran dentro de los parámetros estipulados por ambas normas.

**Tabla 3.** Tolerancias dimensionales para BTC (UNE EN 41410)

| Variación | Tolerancia |
|---|---|
| Exceso | 5 mm |
| Defecto | 2 mm |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En segundo lugar, se efectuó la comparación de los valores obtenidos en el ensayo a compresión simple, observados en la Tabla **2**, con los requerimientos establecidos por las normativas internacionales vigentes. Para ello, se consideraron distintos niveles de exigencia correspondientes a bloques destinados a uso no portante en cinco países: Francia (AFNOR, 2017), Estados Unidos (NMAC, 2009), España (AENOR, 2008) y Nueva Zelanda (SNZ, 1998).

Del análisis de los resultados se muestra en la Tabla 4 que los cinco bloques ensayados satisfacen la resistencia bruta dispuesta en la totalidad de las normativas evaluadas.

**Tabla 4.** Análisis de cumplimiento de norma de cada BTC.

| Nº | Resistencia bruta (kgf/cm²) | ¿Cumple con el requerimiento por norma? | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Francia 20 (kgf/cm²) | EEUU 21 (kgf/cm²) | España 13 (kgf/cm²) | Nueva Zelanda 20 (kgf/cm²) | Red Protierra* 20 (kgf/cm²) |
| 1 | 64,37 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 2 | 66,44 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 3 | 81,88 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 4 | 63,16 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 5 | 72,74 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

* Resistencia mínima recomendada por la Red Argentina de Construcción con Tierra, PROTIERRA.

Por último, al observar la Figura 3, en la cual se expone el estado de los bloques una vez finalizado el ensayo a erosión húmeda, se evidencia que estos no presentan un nivel de erosión significativo por acción del agua y, en consecuencia, resultan aptos para su utilización dentro de la construcción en condiciones de exposición a la intemperie o lluvia.

## 4. Conclusiones

La serie de ensayos realizados sobre los bloques de tierra comprimida fabricado en la provincia de Mendoza, dan la pauta de que los mampuestos cumplen con los requisitos dimensionales y de resistencia a la compresión, estipuladas por las especificaciones técnicas en las normativas internacionales y por las recomendaciones nacionales vigentes.

A su vez, el ensayo a la erosión húmeda puso en evidencia resultados altamente satisfactorios demostrando que el material puede ser expuesto al contacto prolongado con el agua, sin presenciar daños significativos en su estructura superficial. En consecuencia, los bloques pueden ser colocados en condiciones ambientales normales, con exposición a la intemperie y lluvia.

En resumen, los BTC analizados se caracterizan como mampuestos aptos para su utilización en construcciones no portantes dado que presentan un buen desempeño mecánico y, no se observa deterioro del material frente al agua. Constituyendo una alternativa ambiental favorable frente a los materiales empleados en los sistemas constructivos convencionales.

## Referencias bibliográficas

AENOR. (2008). *UNE 41410: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*.

AFNOR. (2017). *XP P13-901: Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions, spécifications, méthodes d'essais, conditions de réception*.

Cabrera, S., Darras, G., & Losa, N. (2024). Evaluación del proceso de prensado en la fabricación de bloques de tierra comprimida. *Informes de la Construcción, 76*(574), e6524. https://doi.org/10.3989/ic.6524

Cabrera, S., Elert, K., Guilarducci, A., & Margasin, A. (2022). The effect of local pozzolans and lime additions on the mineralogical, physical and mechanical properties of compressed earth blocks in Argentina. *Revista de la Construcción, 21*(2), 248–263. https://doi.org/10.7764/RDLC.21.2.248

Costantini-Romero, A. B., & Francisca, F. M. (2022). Construcción con bloques de suelo-cemento como alternativa sostenible para envolvente edilicia. *Hábitat Sustentable, 12*(1), 114–125. https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.08

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Dorado, P., Cabrera, S., & Rolón, G. (2022). Contemporary difficulties and challenges for the implementation and development of compressed earth block building technology in Argentina. *Journal of Building Engineering, 46,* 103748. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103748

Guerrero, L. (2016). Certificación de materiales sostenibles para la conservación arquitectónica. *Revista Conservación y Restauración.*

NMAC. (2009). *NMAC 14.7.4: New Mexico earthen building material code.*

Red Protierra Argentina. (2020). *Protocolo de ensayos sobre elementos constructivos para la construcción con tierra*. http://redprotierra.com.ar/2020/10/28/protocolos-de-ensayo-para-la-construccion-con-tierra/

SNZ. (1998). *NZS 4298: Materials and workmanship for earth building.*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Materiales
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Lineamientos para la evaluación de morteros de cemento para impresión 3D

## Guidelines for the evaluation of cement mortars for 3D printing

Presentación: 30/10/2025

**Franco Aguado**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
faguado@frsf.utn.edu.ar

**Gonzalo González**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
gugonzalez@frsf.utn.edu.ar

**Sharon Rupp**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
srupp@frsf.utn.edu.ar

**Francisco Oliva**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Santa Fe, Argentina.
foliva@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

Los morteros de impresión 3D representan una innovación en la industria de la construcción. Este material requiere de propiedades específicas, distintas a las demandadas a un mortero convencional. Debe tener la capacidad de fluir a través de la boquilla de la impresora y a su vez debe mantener su forma al depositarse, adherirse a las capas precedentes y soportar el peso de las siguientes sin colapsar. En la actualidad, no existen normativas nacionales que establezcan requisitos a cumplir ni técnicas estandarizadas que permitan caracterizar este tipo de material. El presente trabajo propone la adaptación de la norma IRAM 1570:1994 con el objetivo de evaluar la aptitud de morteros para su uso en la técnica de impresión 3D en función de los valores de asentamiento y escurrimiento con ella obtenidos. Complementariamente se propone evaluar la extrudabilidad del mortero empleando una calafateadora.

**Palabras clave:** Impresión 3D, Asentamiento, Escurrimiento, Extrudabilidad, Morteros

### Abstract

3D printing mortars represent an innovation in the construction industry. This material requires specific properties, different from those demanded of conventional mortar. It must be able to flow through the printer nozzle and, at the same time, maintain its shape when deposited, adhere to the preceding layers, and support the weight of the following layers without collapsing. Currently, there are not Argentinian regulations establishing requirements to be met or standardized techniques for characterizing this type of material. This paper proposes the adaptation of the IRAM 1570:1994 standard with the aim of evaluating the suitability of mortars for use in 3D printing based on the slump and flow values obtained with it. In addition, it proposes evaluating the extrudability of the mortar using a caulking gun.

**Keywords:** 3D printing, Slump, Slump flow, extrudability, mortars

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

Los morteros para impresión 3D, denominados también compuestos cementicios imprimibles, son materiales específicamente diseñados para ser procesados mediante tecnologías de construcción aditiva. Esta técnica, también conocida como fabricación aditiva es definida por la ASTM como el proceso de unir materiales para crear objetos, generalmente capa sobre capa (Khalil et al., 2017, p. 382). Se basa en la deposición capa por capa de un material cementicio, siguiendo un modelo digital previamente definido. De esta manera, se busca generar estructuras con un mayor grado de automatización.

La impresión 3D aplicada a la construcción se presenta como una alternativa innovadora que permite disminuir costos, optimizar tiempos de ejecución y mejorar la sostenibilidad del sector. Elimina la necesidad de encofrado, que suele representar gran porcentaje del costo total de construcción, puede disminuir potencialmente la generación de residuos de construcción en comparación con los métodos tradicionales, reducir los costos de mano de obra y los riesgos en la construcción. Además, esta técnica permite fabricar estructuras complejas en cuestión de horas (Rahman et al., 2024, p. 2).

Sin embargo, el desarrollo de morteros imprimibles plantea desafíos particulares, especialmente en lo que respecta a su comportamiento en estado fresco. Para que un mortero pueda ser utilizado de manera eficiente en impresión 3D, debe cumplir con una serie de propiedades específicas que garanticen tanto su procesabilidad en estado fresco como su desempeño en estado endurecido. En el proceso de impresión con morteros, el material se bombea, se extruye a través de una boquilla y se deposita en capas. El material extruido debe ser capaz de soportar su propio peso y mantener su forma sin necesidad de encofrado, a la vez que se adhiere firmemente a la capa adyacente (Rahman et al., 2024, p. 1-2).

Khalil et al. (2017) introducen dos especificaciones básicas que un mortero debe cumplir para ser considerado “imprimible”: extrudabilidad y edificabilidad. La extrudabilidad se define como la capacidad del mortero de fluir de manera continua a través de la boquilla de la impresora. La edificabilidad refiere a la necesidad del material de mantener su forma, adherirse adecuadamente a las capas previamente depositadas y soportar el peso de las siguientes sin colapsar ni deformarse (p. 382). Además de estas, Rahman et al. (2024) mencionan otras características importantes a tener en cuenta a la hora de caracterizar morteros para uso en impresión 3D como son: bombeabilidad, tiempo abierto y propiedades reológicas (p. 3-23). La bombeabilidad es la capacidad del material de ser transportado a través de tuberías bajo presión hasta la boquilla de impresión sin pérdida significativa de sus propiedades reológicas ni segregación de componentes. El tiempo abierto es el rango de tiempo en cual el mortero puede ser extruido eficazmente manteniendo sus propiedades reológicas antes de que ocurra un endurecimiento excesivo que limite su trabajabilidad. Las propiedades reológicas engloban parámetros como la fluidez, la viscosidad plástica y la resistencia a la deformación, las cuales son fundamentales, a la hora de determinar la extrudabilidad, la estabilidad dimensional y la adherencia entre capas.

Estas propiedades, en conjunto, definen la llamada “Región imprimible” del material, es decir, el rango de condiciones en el que el mortero puede ser procesado de manera óptima mediante impresión 3D (Tay et al., 2019, p. 1). En este sentido, resulta relevante señalar la ausencia de una normativa nacional estandarizada que permita evaluar de manera integral estas propiedades clave que garantizan la calidad de las estructuras obtenidas. Además, en la actualidad, existen pocas publicaciones que aborden los métodos de caracterización de estos morteros tan particulares.

El presente trabajo se orienta a analizar la posibilidad de adaptar normas IRAM existentes, aplicadas tradicionalmente a morteros convencionales, con el fin de evaluar su pertinencia en la caracterización del asentamiento y escurrimiento de morteros destinados a la impresión 3D. Además, se busca adoptar una técnica que permita evaluar los parámetros de extrudabilidad y edificabilidad. De esta manera, se busca aportar lineamientos iniciales que contribuyan a la futura normalización de este tipo de materiales y a la consolidación de la tecnología en el ámbito constructivo.

## 2. Materiales y métodos

La metodología utilizada para el desarrollo del presente trabajo consistió en dos etapas. Inicialmente se llevó a cabo una revisión de literatura para identificar parámetros críticos y métodos propuestos. Posteriormente, en la etapa experimental, se evaluaron distintos procedimientos de caracterización, con el objetivo de analizar su aplicabilidad a morteros imprimibles.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

### 2.1 *Materiales empleados*

El objetivo del presente trabajo es analizar la aplicabilidad de una serie de técnicas de ensayos para la caracterización de morteros imprimibles. Para ello se empleó una premezcla de base cementícea para la elaboración de morteros cuando se adiciona agua.

### 2.2 *Técnicas de ensayo evaluadas*

Las técnicas de ensayo incluyen tanto adaptaciones de técnicas tradicionales, mediante los ajustes necesarios para responder a las particularidades de los morteros imprimibles, como propuestas metodológicas complementarias.

Rahman et al., (2024) en su revisión resaltan que, a la hora de evaluar la reología del material, los resultados obtenidos de diferentes reómetros para mezclas impresas en 3D muestran una variación significativa en los valores registrados. Esto implica que, en su estado actual sin estandarización, los reómetros no son ideales para una evaluación consistente y fiable (p. 23). Debido a esto, Tay et al., (2019) proponen utilizar pruebas de consistencia de cono y mesa de flujo, consideradas más tradicionales, para su estudio (p. 1).

### 2.3 *Asentamiento*

El valor de asentamiento de un mortero está relacionado con el estado sólido de la microestructura, la tensión de fluencia estática y la edificabilidad. Tay et al., (2019) indican el uso de la norma ASTM C230 para las pruebas de asentamiento (p. 3-6). El procedimiento de prueba de asentamiento consiste en llenar un molde troncocónico con mortero. El exceso de material se retira enrasando el mortero con una llana. Posteriormente, se retira el molde que contiene el mortero y el descenso de la pasta se registra como el valor de asentamiento.

### 2.4 *Escurrimiento*

El valor de escurrimiento, también llamado flujo de asentamiento (slump-flow test) es el diámetro de expansión del mortero. La bibliografía propone como metodología de ensayo la establecida en la norma ASTM C1437. Esta establece que se llena con mortero un molde troncocónico siguiendo el mismo procedimiento que en el ensayo de asentamiento. Posteriormente, se retira el molde troncocónico que contiene la pasta y se deja caer la mesa de flujo 25 veces. Después de caer 25 veces, el material se extiende sobre la placa y el diámetro se mide como el valor de escurrimiento (Tay et al., 2019, p. 6). Los valores de escurrimiento se encuentran ligados a la tensión de fluencia dinámica y la bombeabilidad del mortero (Tay et al., 2019, p. 3).

En el presente trabajo se propone la adaptación de la norma IRAM 1570:1994. Mortero para mampostería. Determinación de la consistencia. Método de escurrimiento.

### 2.5 *Extrudabilidad y edificabilidad*

La extrudabilidad de los morteros está relacionada con la propiedad de estos para ser bombeados a través de la boquilla de la impresora. La edificabilidad, por su parte, está vinculada con la aptitud del mortero de ser depositado en capas, una sobre otra, manteniendo la calidad de estas y sin colapsar. En la actualidad, no existe una técnica normalizada para evaluar estas propiedades. Khalil et al. (2017) simularon el proceso de impresión 3D a escala de laboratorio a partir de una pistola de silicio. Establecieron que una vez extruido todo el mortero sin obstrucciones, filtraciones, segregaciones ni exudaciones, se puede considerar extruible (p. 383-384). A la hora de evaluar la edificabilidad del mortero, la bibliografía propone valorarla cualitativamente, imprimiendo cordones de mortero uno sobre otro. Una vez cargada la herramienta con la que se realizara el ensayo se procede a hacer cordones de mortero apilándolos hasta llegar al límite que permita la mezcla, sin colapsar o deformarse excesivamente (Khalil et al., 2017, p. 385-386).

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 *Preparación del mortero*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Al momento de comenzar a caracterizar el material se utilizó la metodología establecida en la Norma IRAM 1622:2002. Cemento Pórtland. Determinación de resistencias mecánicas. La misma establece en el punto 6.2 el proceso de mezclado. Para esto fue necesario hacer unas modificaciones ya que el material comercial utilizado incluye la arena en su composición. La mitad de este se incorporó antes de arrancar el mezclado en lugar del cemento y la fracción restante se incorporó en lugar de la arena, establecidos en la metodología de la norma.

3.2 *Asentamiento y escurrimiento*

Para la determinación de estas propiedades, se realiza una adaptación de la norma IRAM 1570:1994. *Mortero para mampostería. Determinación de la consistencia. Método de escurrimiento*. El procedimiento utilizado es el siguiente:

a) Sobre la mesa de escurrimiento (flow table) se apoya un molde troncocónico de 50mm de alto, 70mm de diámetro superior y 100mm de diámetro inferior con una película fina de desmoldante.
b) Colocar dentro del molde troncocónico una primera capa de mortero de aproximadamente 25mm. Como indica la Figura 1(a).
c) Acomodar el mortero con una varilla de apisonar (madera 13x26x130mm) desde el centro hacia las paredes con 20 golpes.
d) Llenar el molde troncocónico con una segunda capa con mortero. Como ilustra la Figura 1(b).
e) Acomodar el mortero con varilla de apisonar desde el centro hacia las paredes con 20 golpes.
f) Enrasar con llana. Ilustración en la Figura 1(c).

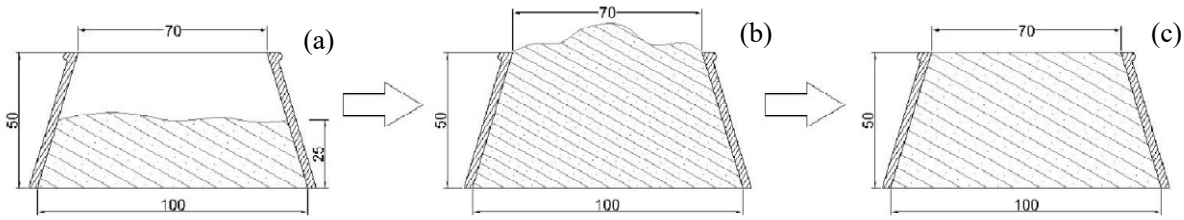



**Figura 1**. Proceso de llenado de molde troncocónico

g) Limpiar y secar cuidadosamente el disco de la flow table, asegurándose que no quede agua de mezclado en la superficie que rodea al molde.
h) Retirar el molde con cuidado. Se debe verificar que al retirar el molde no queden vacíos contra las paredes.
i) Se mide el valor de asentamiento, que es la altura del asentamiento después de que se levanta el molde (Figura 2).
j) Inmediatamente después se acciona la flow table haciendo caer libre, sucesiva y regularmente, el disco 25 veces en 15 segundos.
k) Se miden, como mínimo, cuatro diámetros del mortero escurrido a espacios aproximadamente iguales, utilizando la regla graduada, registrando las mediciones al milímetro (Figura 3). El promedio de los 4 diámetros será el valor de escurrimiento.

A partir de estas propiedades del mortero la bibliografía define el concepto de región imprimible (Tay et al., 2019, p. 1) (Rahman et al., 2024, p. 6-7). Esta región, refiere al rango de valores de asentamiento y escurrimiento que una mezcla cementicia debe presentar para ser aplicables en la técnica de impresión 3D.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 2**. Medición del asentamiento

**Figura 3**. Medición del escurrimiento

De acuerdo con Tay et al. (2019), valores bajos de fluidez (<130 mm) generan mezclas demasiado rígidas, mientras que valores excesivamente altos (>210 mm) conducen al colapso de las capas por insuficiente cohesión. El estudio concluyó que las mezclas con un valor de fluidez entre 150 y 190 mm y asentamientos entre 4 a 8 mm tuvieron un rendimiento óptimo para la impresión 3D (p. 13-18). Dentro de esta región se obtiene una superficie lisa y con buena edificabilidad.

3.3 *Extrudabilidad y edificabilidad*

Como se mencionó anteriormente, diversos estudios establecen que la extrudabilidad y edificabilidad son dos parámetros fundamentales para calificar un mortero como “imprimible”. En el presente trabajo se estudió la posibilidad de evaluar la capacidad de morteros de ser extruidos mediante el uso de una pistola calafateadora como la que se ilustra a modo de ejemplo en la Figura 5. En un extremo, se puede aplicar presión manual para la extrusión y en el otro extremo se coloca una boquilla con un diámetro de 18mm.

**Figura 4**. Pistola calafateadora. Fuente: https://www.brementools.com/

El procedimiento de ensayo consistió en llenar el dispositivo con el mortero y proceder a la extrusión de cordones de aproximadamente 18mm de diámetro y 250 mm de longitud, sobre un vidrio (Figura 6). La extrusión se realizó teniendo la precaución de ejecutar la misma en un tiempo de 9 ± 1 min desde el contacto del agua y el material cementíceo.

**Figura 5**. Cordones de morteros realizados con pistola calafateadora

Antes de extruir es necesario realizar una inspección visual y de contacto directo. Esto permite al operador calificar su aptitud para fluir por la boquilla de la pistola. También, se debe valorar la capacidad de material de mantener su forma, si presenta adherencia excesiva (pegajosidad) al entrar en contacto con las superficies. Los cordones resultantes deben ser evaluados cualitativamente, sometiéndolos a una inspección visual y verificando: la continuidad del mismo y la presencia de oquedades.

Una vez extruido el mortero, se evaluó la segunda característica: la edificabilidad (Khalil et al., 2017: 382–391). Para su evaluación cualitativa se imprimieron con la pistola cordones de mortero uno sobre otro, verificando su estabilidad al

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

superponer capas. Las características de los cordones no permitieron apilar más de dos capas sin que la estructura colapsara. En este sentido es necesario explorar otras técnicas de ensayo para evaluar la capacidad de edificabilidad de los morteros imprimibles.

## 4. Conclusiones

Se pudo adaptar la norma IRAM 1570:1994. Mortero para mampostería. Determinación de la consistencia. Método de escurrimiento para evaluar parámetros de asentamiento y escurrimiento de morteros para impresión 3D. La técnica adoptada permitió constatar la reproducibilidad de los resultados, obteniéndose valores representativos y comparables con los resultados de otros autores.

Fue posible obtener una extrusión sencilla y efectiva, a partir del uso de una pistola calafateadora. Esto permitió simular la impresión 3D del mortero a escala de laboratorio. Se produjeron cordones de mortero que sirvieron para evaluarlo cualitativamente.

No se consiguió establecer un método simple y confiable para la evaluación de la edificabilidad utilizando la pistola extrusora. Por lo que se establece como acciones futuras el diseño de un dispositivo y/o técnica que permita esta evaluación a escala laboratorio.

## Agradecimientos

Se agradece a la Ing. Gonzalez Dianela por su colaboración en la elaboración del presente trabajo.

## Referencias bibliográficas

Instituto Argentino de Normalización y Certificacion IRAM, (2002). *Cemento Pórtland. Determinación de resistencias mecánicas* (Norma núm. 1622). https://iramcoleccion.org.ar/colecaogrid.aspx

Instituto Argentino de Normalización y Certificacion IRAM. (1994), *Mortero para mampostería. Determinación de la consistencia. Método de escurrimiento* (Norma núm. 1570). https://iramcoleccion.org.ar/norma.aspx?ID=7194#

Khalil, N., Aouad, G., El Cheikh, K., & Rémond, S. (2017). Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. *Construction and Building Materials, 157*, 382–391. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.114

Rahman, M., Rawat, S., Yang, R. (Chunhui), Mahil, A., & Zhang, Y. X. (2024). A comprehensive review on fresh and rheological properties of 3D printable cementitious composites. *Journal of Building Engineering, 91*, 109719. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109719

Tay, Y. W. D., Qian, Y., & Tan, M. J. (2019). Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering, 174*, 106968. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106968

Varela, H., Barluenga, G., & Sonebi, M. (2023). Rheology characterization of 3D printing mortars with nanoclays and basalt fibers. *Materials Today: Proceedings, En prensa.* https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.151

Eje temático

# Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional:** Rosario

# Avances recientes en tecnologías de captura de $CO_2$

## Recent advances in $CO_2$ capture technologies

Presentación: 30/10/2025

**Daira Agostina Longo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Rosario, Santa Fe, Argentina
dlongo@frro.utn.edu.ar

### Resumen

Este trabajo realiza una revisión bibliográfica de los avances recientes en métodos de captura de dióxido de carbono ($CO_2$), centrándose en la absorción con aminas, separación por membranas y sistemas híbridos. Se analizan sus ventajas, limitaciones y viabilidad técnico-económica, con base en literatura científica indexada en los últimos cinco años. Los resultados destacan que, las aminas ofrecen alta eficiencia, pero alto consumo energético, mientras que las membranas presentan menor demanda energética pero sensibilidad a impurezas. Los sistemas híbridos emergen como la alternativa más prometedora, combinando selectividad y eficiencia. El estudio concluye que la elección de disolventes, el diseño de diferentes configuraciones y el desarrollo y optimización de modelos matemáticos robustos son clave para maximizar la eficiencia y minimizar costos en la captura de $CO_2$.

**Palabras clave:** captura de $CO_2$, aminas, membranas, sistemas híbridos, revisión bibliográfica

### Abstract

This work conducts a literature review of recent advances in capture methods, focusing on amine-based absorption, membrane separation, and hybrid systems. Their advantages, limitations, and techno-economic feasibility are analyzed based on high-quality scientific literature published in the last five years. Results highlight that amines offer high efficiency but high energy consumption, while membranes present lower energy demand but sensitivity to impurities. Hybrid systems emerge as the most promising alternative, combining selectivity and efficiency. The study concludes that solvent selection, design of different configurations, and the development and optimization of robust mathematical models are key to maximizing efficiency and minimizing costs in $CO_2$ capture.

**Keywords:** $CO_2$ capture, amines, membranes, hybrid systems, literature review

## 1. Introducción

*1.1 Consideraciones generales*

La crisis climática, evidenciada a través del cambio climático y el calentamiento global, ha intensificado la necesidad de desarrollar estrategias para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés), particularmente de $CO_2$. En este contexto, las tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés) son un medio clave para reducir emisiones en sectores críticos como la generación de energía y procesos industriales (Yu et al., 2023). No obstante, la transición hacia modelos industriales sostenibles exige considerar no solo su viabilidad técnica, sino también sus implicaciones económicas y sociales. En la Fig. 1 pueden observarse las emisiones globales de $CO_2$ procedentes de la combustión de energía y los procesos industriales y su variación anual.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

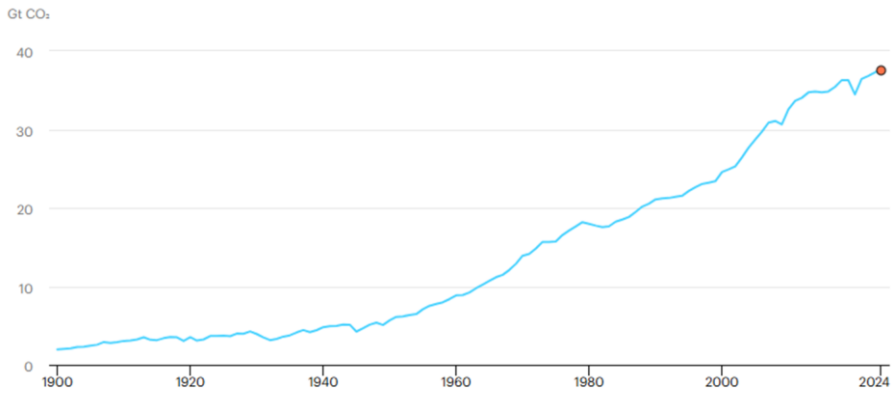



**Figura 1**. Emisiones globales de $CO_2$ generadas por la combustión en aplicaciones relacionadas con la energía y procesos industriales entre 1900 y 2024 (IEA, 2025).

Dentro de las tecnologías más consolidadas para CCUS destacan la absorción química con aminas y la separación por membranas. La primera, con mayor grado de madurez tecnológica, destaca por su elevada eficiencia de captura, pero enfrenta desafíos como el alto consumo energético durante la regeneración del solvente y su degradación química (Liu et al., 2024; Pires et al., 2025). Por su parte, los sistemas basados en membranas presentan ventajas operativas, como una menor huella de carbono y un consumo energético reducido, aunque su desempeño puede verse afectado por la presencia de impurezas y la necesidad de operar a altas presiones (Arias et al., 2023; Ren et al., 2020).

Por otro lado, los sistemas híbridos han emergido como una alternativa prometedora. Estudios recientes demuestran que esta estrategia puede reducir los requerimientos térmicos en comparación con los métodos tradicionales, sin comprometer la pureza ni la recuperación del CO2 capturado (Torres et al., 2021). Estos avances sugieren que los enfoques híbridos podrían representar una solución técnicamente viable y económicamente competitiva para industrias con altas emisiones de CO2.

Este trabajo presenta una revisión bibliográfica de 9 trabajos que tratan sobre avances recientes en tecnologías de CO2, exponiendo sus ventajas y desventajas. Mediante un análisis comparativo, se identifican las alternativas con mayor potencial técnico y económico, con el fin de orientar futuras investigaciones y aplicaciones industriales.

## 2. Metodología

Se realizó la revisión de 9 trabajos centrada en los avances en tecnologías de captura de $CO_2$ desarrollados en los últimos 5 años. El estudio abarcó métodos tales como absorción con aminas, tecnologías basadas en membranas y sistemas híbridos. Se priorizaron estudios que abordan diferentes enfoques, tales como modelado por simulación, estrategias de optimización, integración energética, entre otros. Como se observa en la Tabla 1, la búsqueda se limitó a artículos publicados en revistas indexadas (Q1 y Q2 según Scimago Journal Rank, SJR).

**Tabla 1**. Revistas consideradas y su índice según Scimago.

| Revista | Índice | Referencia |
|---|---|---|
| Chemical Engineering Research and Design | Q2 | (Pires et al., 2025) |
| Carbon Capture Science and Technology | Q1 | (Liu et al., 2024) |
| Results in Engineering | Q1 | (Moghaddam et al., 2024) |
| Journal of Cleaner Production | Q1 | (Song et al., 2024) |
| International Journal of Greenhouse Gas Control | Q1 | (Arias et al., 2023; Khalilpour & Zafaranloo, 2020) |
| Membranes | Q2 | (Hara et al., 2025) |
| Journal of Membrane Science | Q1 | (Ren et al., 2020) |
| Advanced Membranes | Q1 | (Yu et al., 2023) |

### *2.1. Absorción con aminas*

Existen numerosos trabajos sobre captura de $CO_2$ mediante absorción con aminas que se abordan desde múltiples enfoques. Por ejemplo, (Pires et al., 2025) desarrollaron un modelo en Aspen Plus para un sistema basado en monoetanolamina (MEA) aplicado a gases de hornos de arco eléctrico (EAF). Mediante la optimización de parámetros como la carga de solvente, la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

altura de empaquetamiento y la presión, lograron una eficiencia de captura del 90% con un coste estimado de 116 USD/t $CO_2$. Además, propusieron un modo de operación flexible para adaptarse a la intermitencia de los gases de EAF. Por otro lado, (Moghaddam et al., 2024) abordaron la optimización del proceso mediante simulaciones en Aspen-Hysys, integrando metodologías de Diseño de Experimentos (DoE) y Superficie de Respuesta (RSM). Además, desarrollan modelos estadísticos para predecir el comportamiento del sistema y realizan un análisis de sensibilidad para identificar factores críticos que influyen en el rendimiento del mismo. De esta forma, la optimización mediante funciones de deseabilidad (desirability functions) permite evaluar diferentes estrategias, equilibrando eficiencia, consumo energético y costos. Otro aspecto crítico en estos sistemas son las emisiones de aminas a la atmósfera, las cuales pueden generar problemas ambientales y operativos. (Liu et al., 2024) investigaron las emisiones de aerosoles en sistemas con mezclas de 2-amino-2-metil-1-propanol/piperazina (AMP/PZ), analizando el efecto de la temperatura, relación líquido/gas (L/G) y carga de $CO_2$. Identificaron que el aumento de temperatura favorece las emisiones, mientras que mayores relaciones L/G y carga de $CO_2$ las reducen. También evaluaron medidas de mitigación, destacando la importancia de controlar estas emisiones para minimizar pérdidas de solvente y contaminación.

### *2.2. Membranas*

Diversos estudios han explorado el diseño de configuraciones de membranas y la optimización de parámetros operativos para maximizar su rendimiento. Por ejemplo, (Song et al., 2024) emplearon un marco basado en superestructuras para optimizar redes de membranas multietapa, analizando las interacciones entre configuración, características de los gases de combustión y desempeño de la membrana. Su enfoque combinó un análisis tecno económico para determinar simultáneamente la configuración óptima y las variables operativas. Por su parte, (Arias et al., 2023) optimizaron un sistema de membranas para captura de $CO_2$ en plantas de cemento, considerando el efecto del contenido de agua en la mezcla gaseosa. Propusieron una superestructura de cuatro etapas con diferentes opciones de conexión y métodos para generar fuerza impulsora (compresores, bombas de vacío). El objetivo fue minimizar el costo anual total específico (STAC) mientras se alcanzaba un 90% de recuperación y un 95% de pureza de $CO_2$. A su vez, (Hara et al., 2025) desarrollaron un método de optimización biobjetivo para el diseño de membranas de una sola etapa, considerando costo y emisiones de $CO_2$ como criterios. Su algoritmo combinó diseño adaptativo de experimentos, aprendizaje automático, algoritmos genéticos y optimización bayesiana, permitiendo un equilibrio entre eficiencia económica y sostenibilidad.

### *2.3. Procesos híbridos*

Dentro del ámbito de los procesos híbridos de captura de $CO_2$, algunas de las configuraciones que es posible identificar son las siguientes: sistemas de absorción optimizados mediante integración energética y de flujos para mejorar su eficiencia; procesos basado en membranas dispuestas en arreglos multietapa con diferentes configuraciones, que aprovechan las ventajas de materiales con diferentes selectividades para incrementar la eficiencia de la separación; y sistemas que combinan unidades de absorción con etapas de membranas, con el objetivo de integrar la alta selectividad de los solventes químicos con la menor demanda energética y escalabilidad de los módulos de membranas. Por ejemplo, (Khalilpour & Zafaranloo, 2020) presentaron una metodología de optimización, utilizando el software MATLAB, que busca equilibrar el diseño y la operación de una planta de captura de carbono en postcombustión con solventes (Sol-PCC) considerando restricciones técnicas y económicas. El objetivo fue encontrar la mejor configuración posible de manera eficiente, minimizando costos y maximizando rendimientos. En la Fig. 2 se presenta un esquema de dicha configuración. Por otro lado, (Ren et al., 2020) utiliza simulaciones en Aspen Plus para evaluar el diseño de un proceso con membranas, considerando parámetros clave como la relación de presión, la selectividad de las mismas y los costos operativos. Se analiza el comportamiento de membranas selectivas a $CO_2$, así como membranas selectivas a $N_2$. Como se observa en la Fig. 3, el proceso consta de dos etapas principales. En la primera, la membrana selectiva a $N_2$ concentra el $CO_2$, mientras que, en la segunda, una membrana selectiva a $CO_2$ purifica aún más el flujo. Esta configuración busca maximizar la recuperación de $CO_2$ y minimizar el consumo energético. Por su parte, (Yu et al., 2023) expone un análisis exhaustivo de los avances recientes en el campo de captura de $CO_2$ basado en sistemas que combinan columnas de absorción con etapas de membranas, centrándose en el diseño, rendimiento y viabilidad técnico-económica de estos sistemas. En la Fig. 4 se presenta un ejemplo de estos sistemas. Desde una perspectiva económica, estos procesos demostraron reducir los costos de captura entre 20-50USD/t $CO_2$ para flujos con concentraciones de $CO_2$ del 10-50%, en comparación con tecnologías convencionales. No obstante, el artículo identifica desafíos clave, como la necesidad

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

de mejorar la estabilidad a largo plazo de las membranas en condiciones industriales y la optimización de configuraciones integradas para reducir costos de capital (CAPEX) y operación (OPEX).

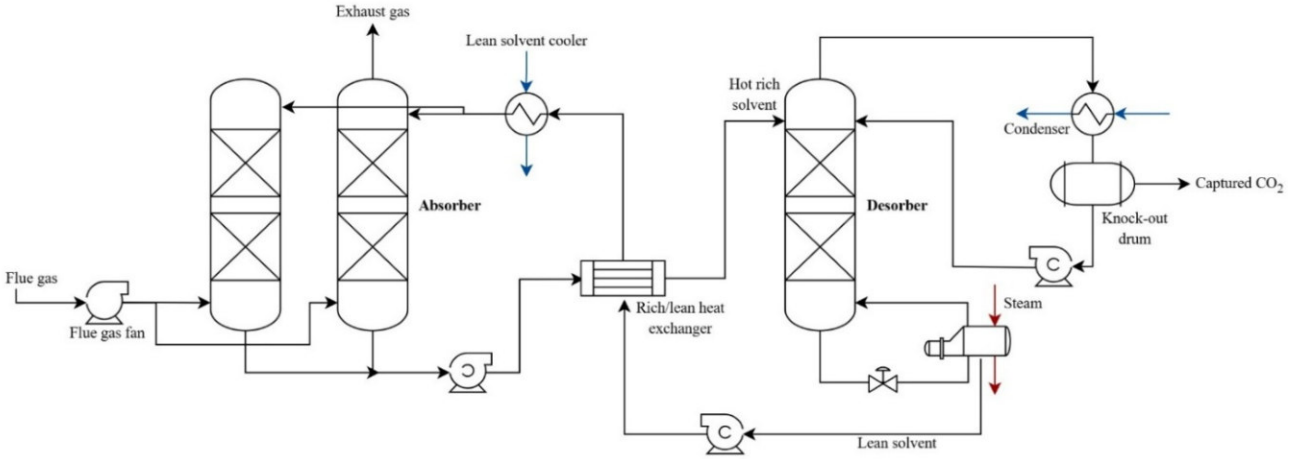



**Figura 2**. Esquema de la configuración del proceso PCC basado en disolventes para una central eléctrica de carbón de 300 MW (Khalilpour & Zafaranloo, 2020).

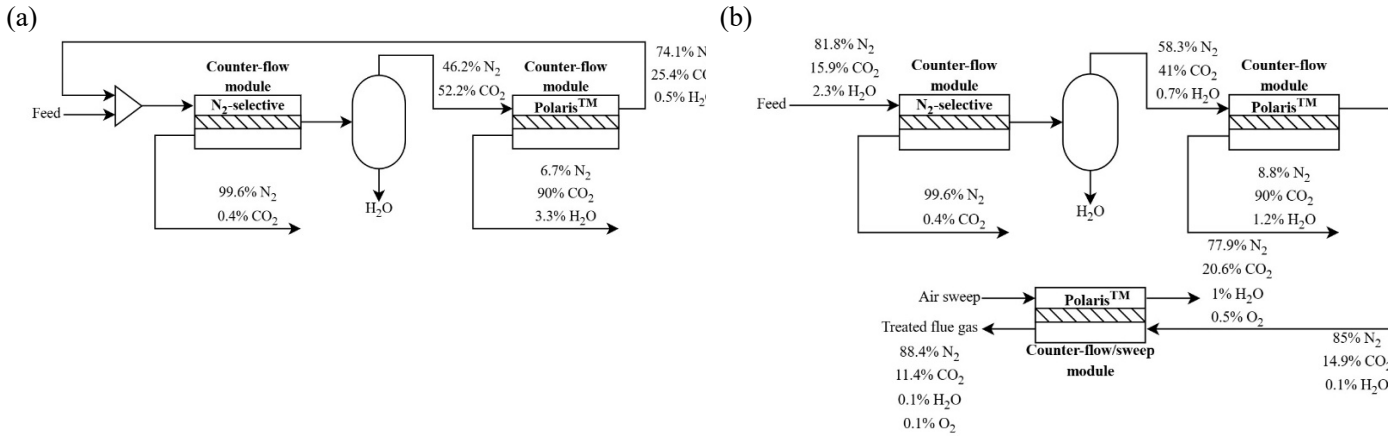



**Figura 3**. Diseño óptimo del proceso híbrido de membrana propuesto: (a) sin barrido de aire, y (b) con barrido de aire (Ren et al., 2020).

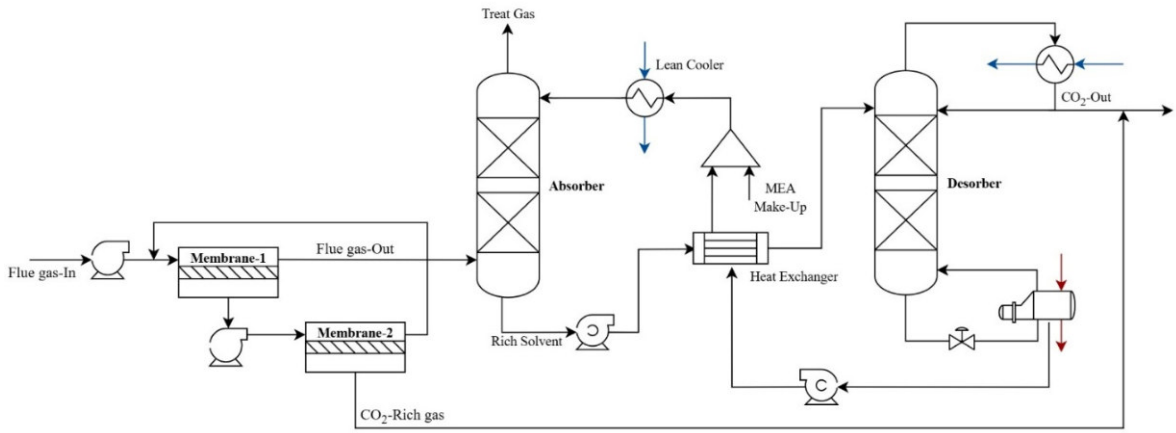



**Figura 4**. Proceso híbrido de membranas y absorción química para tratar los gases de combustión de una planta cementera (Yu et al., 2023).

Finalmente, se presenta en la Tabla 2 un resumen comparativo de las diferentes tecnologías de captura expuestas en este trabajo. Como se ha mencionado, la absorción con aminas resulta satisfactoria ya que presenta una alta eficiencia de captura y madurez tecnológica, pero presenta desafíos clave como el alto consumo energético y la emisión de aminas. A su vez, las membranas logran reducir el consumo energético, pero se ven limitadas a operar en ciertos rangos de presión y concentraciones del gas de alimentación. Por otro lado, los sistemas híbridos resultan una tecnología emergente con múltiples puntos de interés. Con los mismos, es posible lograr una alta eficiencia de captura, un costo considerablemente menor en comparación con tecnologías convencionales y un menor consumo de energía. Además, en trabajos tales como

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

el de (Torres et al., 2021) se observa que con estos sistemas es posible reducir el tamaño de los equipos, así como el flujo de solvente.

**Tabla 2.** Comparación entre tecnologías de captura.

| Tecnología | Absorción | Membranas | Sistemas híbridos |
|---|---|---|---|
| **Eficiencia de captura (%)** | 90–98 (Moghaddam et al., 2024; Pires et al., 2025) | 85-95 (Song et al., 2024) | > 90 (Yu et al., 2023) |
| **Madurez tecnológica** | Alta | Media-Alta | Emergente |
| **Costo estimado (USD/t CO2)** | 116 (Pires et al., 2025) | 50–88 (Arias et al., 2023; Hara et al., 2025) | 20–50% menos que convencional (Yu et al., 2023) |
| **Consumo energético (MJ/kg CO2)** | 0.99–4.0 (Moghaddam et al., 2024; Pires et al., 2025) | 0.72–2.16 (Hara et al., 2025) | Intermedio entre aminas y membranas (Torres et al., 2021) |
| **Ventajas** | Alta eficiencia, tecnología consolidada, aplicable a bajas concentraciones | Bajo consumo energético, modularidad | Combina selectividad y bajo consumo energético |
| **Desventajas** | Alto consumo energético, emisiones de aerosoles (Liu et al., 2024), degradación del solvente | Sensible a impurezas, alta presión | Complejidad integración |

## 3. Perspectivas

De acuerdo con la bibliografía expuesta en este trabajo, la optimización de la eficiencia energética y económica de los procesos de captura de $CO_2$ requiere profundizar en diversos factores; en primer lugar, es necesario analizar diferentes aminas y/o sus mezclas que presenten una menor demanda energética para su regeneración, una mayor estabilidad térmica para reducir la descomposición, y una menor volatilidad para mitigar sus emisiones atmosféricas. Como estrategia complementaria para reducir dichas emisiones, se propone evaluar la incorporación de etapas de lavado en la configuración del proceso.

Paralelamente, se busca desarrollar y optimizar mediante el modelo matemático riguroso un sistema híbrido, con el objetivo final de maximizar la eficiencia de captura y minimizar los costos asociados. Para ello, se requiere inicialmente el desarrollo de un modelo fisicoquímico riguroso que describa el comportamiento del sistema agua-$CO_2$-amina o mezcla de aminas. Asimismo, es necesario formular los balances de materia y energía, incorporando las restricciones que rigen los fenómenos en cada equipo, estimación de propiedades físico-químicas y de transporte, etc. Además, el modelo debe incluir restricciones tecnológicas, operativas, ambientales, entre otras, permitiendo evaluar configuraciones alternativas con el objetivo de optimizar la eficacia y minimizar los costos asociados.

## 4. Conclusiones

A partir de esta revisión, se evidencia la necesidad de continuar el estudio y desarrollo de las tecnologías presentadas. Es fundamental evaluar nuevos solventes que requieran menor consumo energético para su regeneración, posean una mayor estabilidad térmica y una menor volatilidad. Asimismo, resulta necesario identificar materiales para membranas que ofrezcan una mayor selectividad y resistencia a impurezas. Por otro lado, dada la condición emergente de los sistemas híbridos, se debe avanzar en el diseño de nuevas configuraciones y optimización de las mismas con el fin de mejorar los parámetros operativos y avanzar hacia su implementación industrial.

## Agradecimientos

Se desea agradecer el apoyo brindado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), el Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI) y la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario (UTN FRRo). Además, se agradece la guía de la Dra. Patricia Mores y el Dr. Juan Ignacio Manassaldi.

## Referencias bibliográficas

Arias, A. M., Scenna, N. J., & Mores, P. L. (2023). "Membrane superstructure optimization for carbon capture from cement plants. Water content influence on optimal solution.", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 129, 103964.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Hara, N., Taniguchi, S., Yamaki, T., Nguyen, T., & Kataoka, S. (2025). "Bi-Objective Optimization of Techno-Economic and Environmental Performance for Membrane-Based CO2 Capture via Single-Stage Membrane Separation.", *Membranes*, 15, 57.

IEA. (2025). CO2 Emissions – Global Energy Review 2025 – Analysis. IEA. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions

Khalilpour, K., & Zafaranloo, A. (2020). "Generic techno-economic optimization methodology for concurrent design and operation of solvent-based PCC processes.", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 99, 103079.

Liu, L., Wang, X., Wang, H., Wang, T., & Fang, M. (2024). "Aerosol emissions and mitigation of aqueous AMP/PZ solvent for postcombustion CO2 capture.", *Carbon Capture Science & Technology*, 13, 100273.

Moghaddam, A. H., Esfandyari, M., & Sakhaeinia, H. (2024). "Optimization of amine-based carbon capture: Simulation and energy efficiency analysis of absorption section.", *Results in Engineering*, 24, 103574.

Pires, J. M. M., Moioli, S., & Pellegrini, L. A. (2025). "First techno-economic assessment of a monoethanolamine-based CO2 capture plant applied downstream the Electric Arc Furnace for steel production.", *Chemical Engineering Research and Design*, 218, 247-263.

Ren, L.-X., Chang, F.-L., Kang, D.-Y., & Chen, C.-L. (2020). "Hybrid membrane process for post-combustion CO2 capture from coal-fired power plant.", *Journal of Membrane Science*, 603, 118001.

Song, Y., Kim, S.-J., Lee, S., Lee, J. H., Yeo, J.-G., & Kim, J.-K. (2024). "Process design and optimization of membrane-based CO2 capture process with experimental performance data for a steam methane reforming hydrogen plant and a coal-fired power plant.", *Journal of Cleaner Production*, 475, 143643.

Torres, F. B., Gutierrez, J. P., Ruiz, L. A., Bertuzzi, M. A., & Erdmann, E. (2021). "Comparative analysis of absorption, membrane, and hybrid technologies for CO2 recovery.", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 94, 104082.

Yu, M.-C., Bai, L.-J., Moioli, S., Tontiwachwuthikul, P., Plisko, T. V., Bildyukevich, A. V., Feng, Y.-N., & Liu, H. (2023). "Hybrid CO2 capture processes consisting of membranes: A technical and techno-economic review.", *Advanced Membranes*, 3, 100071.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Reconquista

# Evaluación del comportamiento térmico de un calentador solar de agua sanitaria con materiales económicos

## Evaluation of the Thermal Behavior of a Low-Cost Domestic Solar Water Heater

Presentación: 30/10/2025

**Facundo Chamarez**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe
facundochamarez@gmail.com

**Santiago Masin**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe
santimasin10@gmail.com

### Resumen

Este trabajo presenta la evaluación térmica de un calentador solar de agua de bajo costo, orientado a su implementación en sectores rurales y vulnerables. El sistema consta de un tanque acumulador de 60 litros y un captador solar hecho con caño de polietileno negro de ¾" dispuesto en espiral sobre una estructura piramidal escalonada, encerrada en una caja de nylon transparente para generar efecto invernadero. En una jornada de prueba, con irradiancia máxima cercana a los 970 W/m², se registraron temperaturas de salida del captador de hasta 41 °C, partiendo de 27 °C en la entrada. En el tanque se evidenció estratificación térmica, con 40 °C en el tercio superior y 35 °C en el tercio inferior de su altura. Estos resultados preliminares indican una captación y acumulación térmica eficiente, validando la viabilidad técnica del prototipo y su potencial como solución accesible para la provisión de agua caliente sanitaria en contextos de bajos recursos.

**Palabras claves:** Sistema Térmico Solar, Calentador de agua, Materiales de bajos costo.

### Abstract

This work presents the thermal evaluation of a low-cost solar water heater, aimed at implementation in rural and vulnerable areas. The system consists of a 60-liter storage tank and a solar collector made with ¾" black polyethylene pipe arranged in a spiral over a stepped pyramidal structure, enclosed in a transparent nylon box to create a greenhouse effect. During a test day, with a maximum irradiance close to 970 W/m², outlet temperatures of up to 41 °C were recorded, starting from 27 °C at the inlet. Thermal stratification was observed in the tank, with 40 °C in the upper third and 35 °C in the lower third of its height. These preliminary results indicate efficient thermal capture and storage, validating the technical feasibility of the prototype and its potential as an accessible solution for providing domestic hot water in low-resource contexts.

**Keywords:** Solar Thermal System, Water Heater, Low-Cost Materials.

## 1. Introducción

El aprovechamiento de la energía solar térmica representa una alternativa sostenible y económicamente viable para la provisión de agua caliente sanitaria, especialmente en contextos rurales o con recursos limitados (Monge Malo, 2010; Rufes

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Martínez, 2010). Dentro de este marco, el presente trabajo se enfoca en la evaluación del rendimiento térmico de un calentador solar de agua de bajo costo, construido con materiales accesibles y emplazado en el predio de la Facultad Regional Reconquista de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), ubicada en la ciudad de Reconquista, provincia de Santa Fe, Argentina.

El aprovechamiento de la energía solar térmica para el calentamiento de agua se basa en principios de captación, transferencia y acumulación de calor, los cuales han sido ampliamente estudiados y aplicados en diversas tecnologías (Meinel & Meinel, 1982). La estratificación térmica en el tanque acumulador juega un rol fundamental en la eficiencia del sistema, permitiendo mantener el agua caliente en capas superiores mientras el agua más fría permanece en la parte inferior (Rufes Martínez, 2010). Además, el uso de materiales económicos y accesibles, como tuberías de polietileno negro para captadores solares, ha sido demostrado como una solución viable para reducir costos sin comprometer el desempeño térmico (Aramburu, Díaz, Iriarte, & Saravia, 2006; Monge Malo, 2010).

El sistema bajo estudio está conformado por un captador solar elaborado con caños de polietileno negro K2.4 con una longitud de 20 m, dispuesto en espiral sobre una estructura piramidal escalonada de madera (tipo "pirámide azteca"), y un tanque acumulador de agua de 60 litros. Su diseño busca maximizar la exposición a la radiación solar y aprovechar el comportamiento natural de estratificación térmica del agua (Meinel & Meinel, 1982).

La evaluación experimental del sistema se realizará durante una única jornada de estudio, en condiciones climáticas naturales, abarcando un intervalo horario comprendido entre las 8:00 y las 18:00 horas. Durante este período, se registrarán datos con una frecuencia de una medición por hora, utilizando cuatro sensores de temperatura ubicados estratégicamente en distintos puntos del sistema: uno en la entrada del captador, otro en la salida del captador, un tercero ubicado a dos tercios de la altura del tanque (zona de acumulación de agua caliente), y un cuarto a un tercio de la altura del mismo (zona de agua fría). Además, se registrarán los valores de irradiancia solar horaria a lo largo del día, permitiendo correlacionar la disponibilidad energética con el comportamiento térmico del sistema.

A través de esta evaluación puntual, se busca analizar el desempeño térmico del prototipo, identificando su eficiencia en condiciones reales de funcionamiento y su potencial aplicación como tecnología apropiada en entornos de bajos recursos (Aramburu, Díaz, Iriarte, & Saravia, 2006).

## 2. Materiales y métodos

El sistema de calentamiento solar de agua evaluado está compuesto por los siguientes elementos principales:

- Captador solar: Construido con caño de polietileno negro de ¾” – K2.4 y 20 metros de longitud útil, dispuesto en forma de espiral ascendente de 0,4 m de altura sobre una estructura piramidal escalonada (tipo pirámide azteca), con una base de madera de pino de 1x 1m. Posee un cerramiento con una lámina de Nylon Cristal 200 Micrones transparente que cumple la función de realizar el efecto invernadero con una geometría cubierta de paralelepípedo de 1x1m y 0,45m de altura (Figura 1).
- Estructura de soporte: Fabricada con listones de madera pino de 1x1”, diseñada en forma de pirámide con escalones por medio de clavos para alojar cada vuelta de la espiral.
- Tanque acumulador: Depósito plástico blanco para agua potable de 60 litros, utilizado para el almacenamiento de agua caliente. El tanque cuenta con aislamiento térmico adicional, aislante térmico de espuma de polietileno aluminizado de 10 mm y un tacho metálico de 200 litros que cumple con la función de protegerlo mecánicamente y contra la intemperie. Este sistema de almacenamiento se encuentra soportado por un trípode de caño estructural con una elevación de 1,1m desde el suelo y a 0,5 m de la salida de agua caliente del sistema captador para lograr el efecto de termosifón, ver figura 1.
- Sensores de temperatura: Se utilizaron cuatro sensores digitales (modelo: panel sensor con sonda), ver figura 2, ubicados estratégicamente en:
    - Entrada del captador solar.
    - Salida del captador solar.
    - Sector superior del tanque (2/3 de altura, zona de agua caliente).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- Sector inferior del tanque (1/3 de altura, zona de agua fría).

- Medidor de irradiancia solar: Se tomaron valores de potencia lumínica de la estación meteorológica PEGASUS, Modelo EP0304 N° 3704, que se encuentra también emplazado en el predio de la Facultad Regional Reconquista.

**Figura 1**. Sistema de almacenamiento de agua y sistema captador/calentador a energía solar.

El estudio se llevó a cabo en el predio de la Facultad Regional Reconquista (FRRq-UTN), ubicado en la ciudad de Reconquista, provincia de Santa Fe, durante una única jornada con condiciones climáticas estables y/o despejadas.

Se definió un período de medición de 10 horas, comprendido entre las 08:00 h y las 18:00 h, con una frecuencia de registro cada una hora. Para cada intervalo horario se recolectaron los siguientes datos:

- Temperatura de ingreso al captador.
- Temperatura de salida del captador.
- Temperatura a 1/3 de altura del tanque de almacenamiento.
- Temperatura a 2/3 de altura del tanque de almacenamiento.
- Irradiancia solar incidente sobre el plano del captador, en W/m² (I).

Los datos se registraron manualmente y fueron tabulados para su posterior análisis. El sistema opera por termoconvección natural (fenómeno de termosifón), lo cual permite evaluar su rendimiento sin intervención mecánica ni consumo eléctrico.

En la tabla 1 siguiente se observan los datos registrados de; valores de Irradiancia, temperaturas de ingreso y salida del captador solar, y a 1/3 y 2/3 de altura dentro del tanque de almacenamiento, por cada hora en un intervalo de 8 a 18 horas, para el día 3 de setiembre de 2025.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 1.** Valores de Irradiancia, temperaturas de ingreso y salida del captador solar, y a 1/3 y 2/3 de altura en el tanque de almacenamiento, por cada hora en un intervalo de 8 a 18 horas (03/09/2025).

| Hora | Irradiancia W/m2 | Temperatura ambiente (°C) | Temperatura ingreso captador (°C) | Temperatura salida captador (°C) | Temperatura 1/3 almacenamiento (°C) | Temperatura 2/3 almacenamiento (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 405,4 | 14 | 18 | 24 | 20 | 22 |
| 9 | 634,4 | 16 | 20 | 29 | 23 | 27 |
| 10 | 817 | 18 | 22 | 33 | 26 | 31 |
| 11 | 931,1 | 20 | 24 | 37 | 30 | 35 |
| 12 | 969,6 | 22 | 26 | 40 | 33 | 38 |
| 13 | 929,3 | 24 | 27 | 41 | 35 | 40 |
| 14 | 813,4 | 24 | 26 | 39 | 34 | 39 |
| 15 | 631,4 | 22 | 24 | 35 | 33 | 37 |
| 16 | 399,4 | 20 | 22 | 30 | 32 | 36 |
| 17 | 145,1 | 18 | 20 | 25 | 31 | 35 |
| 18 | 21 | 16 | 19 | 22 | 30 | 34 |

2.1 *Consideraciones*

- Entrada del captador: se asume que toma agua del fondo del tanque (1/3), por eso parte de un valor inferior y sube levemente en la medida que asciende el agua en el circuito (espiral ascendente).
- Salida del captador: se incrementa en función de la irradiancia y alcanza su máximo entre 12h y 13h.
- Tanque (1/3 y 2/3): hay una clara estratificación térmica: la parte superior (2/3) siempre más caliente, gracias al ascenso natural del agua caliente.

En la figura 2 siguiente se observa la posición de las 4 sondas termométricas, dos para el interior del tanque de almacenamiento a 1/3 y 2/3 de su altura y las otras 2 para la entrada y salida del sistema captador.

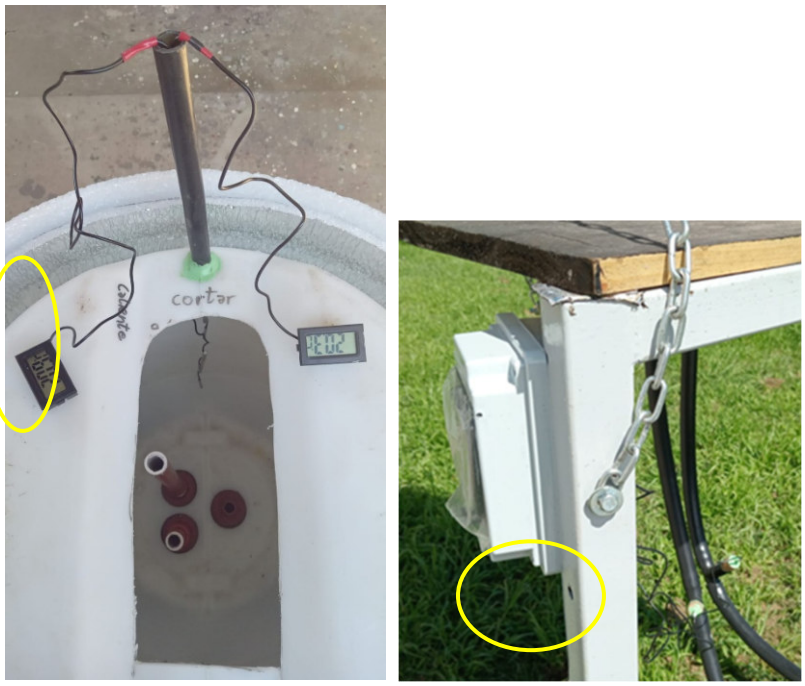



**Figura 2**. Acceso en el interior del tanque de almacenamiento a 2/3 y 1/3 de su altura y ubicaciones de los sensores de temperatura para la entrada y salida del colector respectivamente.

En la figura 3 siguiente se observa la gráfica, de la tabla 1, de los valores de las 4 temperaturas dadas por los sensores en función a sus ubicaciones en el sistema (dato a registrar) para cada hora en el intervalo de 8 a 18h (03/09/2025).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

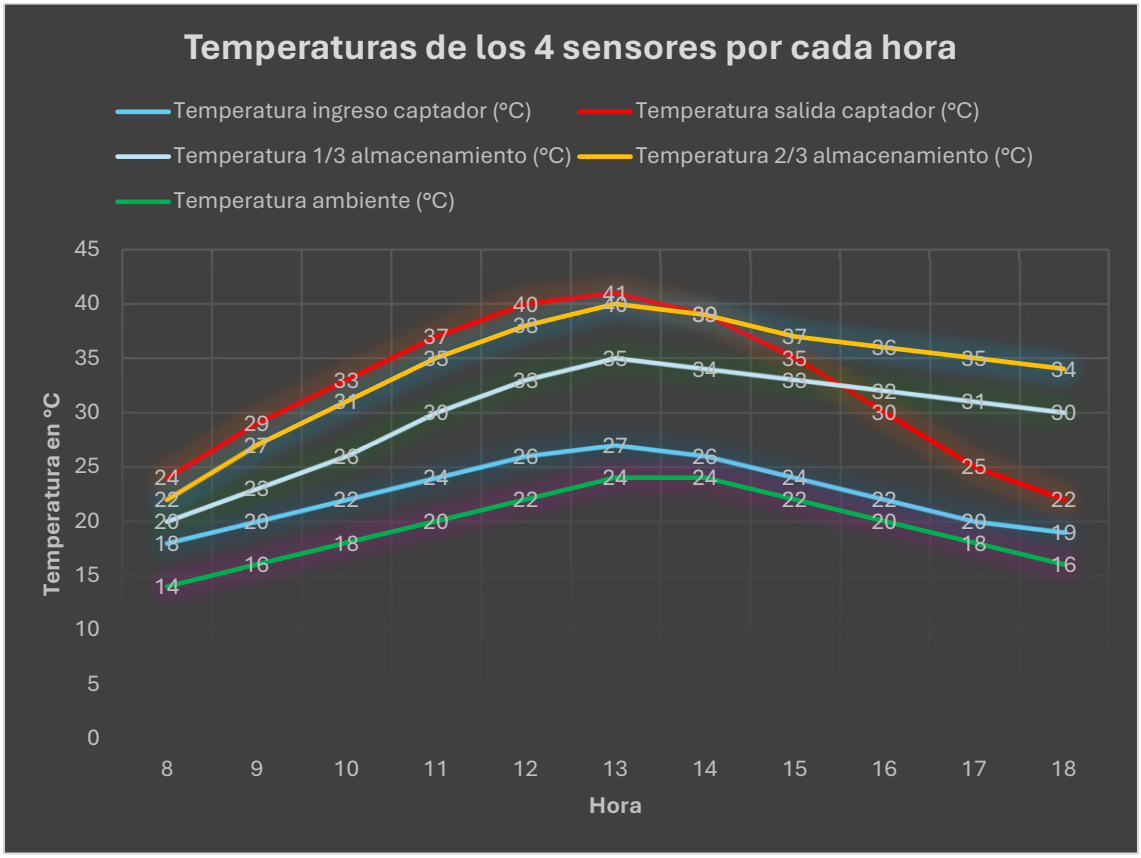



**Figura 3**. Datos correspondientes a la tabla 1.

## 3. Resultados y discusión

Como se puede observar, el sistema comienza a captar energía solar desde las 8:00 h, alcanzando su punto de máxima irradiancia alrededor del mediodía, con valores cercanos a los 970 W/m². Esta elevada radiación permite alcanzar temperaturas de salida del captador de hasta 41 °C, partiendo de una entrada de 27 °C. La diferencia térmica entre entrada y salida (ΔT) muestra un rendimiento progresivo hasta el mediodía, y luego una leve disminución hacia la tarde, en consonancia con la disminución de irradiancia.

En cuanto al tanque acumulador, se observa una clara estratificación térmica: la capa superior (2/3 de altura) alcanza una temperatura máxima de 40 °C, mientras que la capa inferior (1/3) ronda los 35 °C en las horas pico. Esto evidencia una acumulación efectiva del calor durante el día, con una pérdida térmica moderada hacia el final de la jornada, atribuida a la disminución del aporte solar y al enfriamiento ambiental. No obstante, gracias al aislamiento del tanque (espuma de polietileno aluminizado, plancha de Telgopor y cubierta exterior metálica), la pérdida de temperatura es mínima (alrededor de 1 °C por hora en promedio) en las últimas horas del día.

Desde el punto de vista energético y funcional, los resultados permiten inferir que el sistema es viable para el precalentamiento de agua sanitaria, especialmente en entornos rurales o de bajos recursos. Su construcción con materiales accesibles y de bajo costo, junto con la simplicidad del diseño, favorecen su replicabilidad en otras regiones con condiciones solares similares.

## 4. Conclusiones

Durante una jornada representativa del mes de septiembre en la ciudad de Reconquista, el sistema logra alcanzar temperaturas de salida del captador superiores a los 40 °C, con un adecuado gradiente térmico en el acumulador, evidenciando una efectiva estratificación del agua caliente. El tanque, gracias a su aislamiento térmico, conserva el calor acumulado con mínimas pérdidas hacia el final del día.

Se concluye que el sistema es técnicamente viable, económicamente accesible y fácilmente replicable con materiales disponibles en el mercado local pues logra temperaturas moderadas para su uso sanitario en el mes promedio de radiación solar durante un año.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Reconquista.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Referencias bibliográficas

Aramburu, V., Díaz, N., Iriarte, A., & Saravia, L. (2006*). Calentamiento de agua por convección natural utilizando un concentrador solar. Primeras experiencias*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, *10*, 45-52. ISSN 0329-5184.

Meinel, A., & Meinel, M. (1982). *Aplicaciones de la energía solar*. Editorial Reverté.

Monge Malo, L. (2010). *Instalaciones de energía solar térmica* (2ª ed.). Editorial Marcombo.

Rufes Martínez, P. (2010). *Energía solar térmica: Técnicas para su aprovechamiento*. Editorial Marcombo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional**: Reconquista

# Impacto de los RSU en la composición química elemental de aguas superficiales y subterráneas del distrito General Obligado (Avance: selección de puntos de muestreo)

## Impact of MSW on the elemental chemical composition of surface and groundwater in the General Obligado district (Progress: sampling point selection)

Presentación: 30/10/2025

**Agustín Echeverría**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
agustine002002@gmail.com

### Resumen

La calidad del agua es esencial para la salud y el ambiente, pero en el norte de la provincia de Santa Fe muchas comunidades carecen de acceso pleno a agua potable. Diversos estudios han documentado la presencia de arsénico y otros contaminantes inorgánicos en aguas subterráneas de la llanura Chaco-Pampeana (Nicolli et al., 2012; Litter et al., 2019), lo que incrementa la vulnerabilidad de la población local. Ante la falta de información específica sobre la influencia de los residuos sólidos urbanos en las fuentes utilizadas para consumo humano y animal, este proyecto busca relevar la composición química elemental de aguas superficiales y subterráneas, con énfasis en metales de origen antropogénico. El presente informe corresponde a un avance inicial centrado en la selección de puntos de muestreo. Para esta tarea se utilizaron herramientas digitales de análisis territorial y visualización satelital, junto con el conocimiento local del autor, lo que permitió identificar sitios estratégicos en Reconquista, Avellaneda, San Antonio de Obligado, Las Toscas, Tacuarendí y Villa Ocampo. Esta etapa constituye la base necesaria para la recolección de muestras y su posterior análisis químico, garantizando representatividad y utilidad de los resultados.

**Palabras clave:** calidad del agua; contaminantes metálicos; residuos sólidos urbanos; muestreo; Santa Fe

### Abstract

Water quality is essential for human health and the environment, but in the north of Santa Fe province many communities lack full access to drinking water. Previous studies have reported the presence of arsenic and other inorganic contaminants in groundwater from the Chaco-Pampean plain (Nicolli et al., 2012; Litter et al., 2019), which increases the vulnerability of local populations. In the absence of specific information on the influence of municipal solid waste on the sources used for human and animal consumption, this project aims to survey the elemental chemical composition of surface and groundwater, with emphasis on metallic contaminants of anthropogenic origin. This report corresponds to an initial progress focused on the selection of sampling points. For this task, digital tools for territorial analysis and satellite visualization were used, combined with the author's local knowledge, which allowed the identification of strategic sites in Reconquista, Avellaneda, San Antonio de Obligado, Las Toscas, Tacuarendí and Villa Ocampo. This stage constitutes the necessary basis for sample collection and subsequent chemical analysis, ensuring the representativeness and usefulness of the results.

**Keywords:** water quality; metallic contaminants; municipal solid waste; sampling; Santa Fe

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

El agua es un recurso indispensable para la vida y el desarrollo económico de los pueblos. Sin embargo, su calidad puede verse afectada por diversas fuentes de contaminación, entre ellas los residuos sólidos urbanos (RSU) que, al no ser gestionados adecuadamente, generan lixiviados capaces de infiltrar napas subterráneas o alcanzar cursos superficiales de agua. Este problema es particularmente relevante en el norte de la provincia de Santa Fe, donde numerosas comunidades no poseen acceso pleno a la red de agua potable.

En Argentina, la presencia de arsénico y otros elementos traza en aguas subterráneas ha sido ampliamente documentada, especialmente en la llanura Chaco-Pampeana, con efectos sanitarios que han motivado preocupación nacional e internacional (Nicolli et al., 2012; Litter et al., 2019). A esto se suma el impacto potencial de los RSU, que pueden liberar metales y compuestos nocivos hacia las fuentes hídricas. Experiencias de monitoreo ambiental en los principales afluentes de los ríos Paraná y Paraguay han puesto de relieve la necesidad de evaluar sistemáticamente los aportes de origen antrópico (Ronco et al., 2011).

En las últimas décadas, el distrito General Obligado ha experimentado un crecimiento poblacional que trajo aparejado un incremento en la generación de RSU. La acumulación en sitios no regulados plantea un riesgo sanitario y ambiental aún poco documentado. Con el objetivo de cubrir esta brecha, se diseñó un proyecto orientado a evaluar la composición química elemental de aguas superficiales y subterráneas, identificando metales potencialmente tóxicos como plomo, cromo, cadmio, níquel y mercurio.

Este informe presenta el primer avance del proyecto, correspondiente a la selección de los puntos de muestreo en diferentes localidades del distrito General Obligado. Esta etapa resulta crucial, ya que determina la representatividad espacial del estudio y condiciona la calidad de la información que se obtendrá en las fases analíticas posteriores.

## 2. Materiales y métodos

Para la selección de sitios se utilizaron herramientas digitales de análisis territorial y visualización satelital, principalmente Google Earth Pro y la plataforma Planificar Santa Fe (Gobierno de Santa Fe, 2025). La decisión final sobre los puntos incorporó también el conocimiento local del autor sobre accesibilidad y condiciones ambientales de cada localidad.

En etapas posteriores del proyecto, la toma y análisis de muestras se realizará siguiendo las normas IRAM correspondientes, a fin de garantizar la confiabilidad y comparabilidad de los resultados. Para el diseño y ejecución de programas de muestreo se contemplarán las normas IRAM 29012-1 (diseño de programas de muestreo), IRAM 29012-2 (técnicas de muestreo), IRAM 29012-3 (preservación y manipulación de muestras), IRAM 29012-4 (muestreo en lagos), IRAM 29012-10 (muestreo de aguas residuales) e IRAM 29012-11 (muestreo de aguas subterráneas).

## 3. Resultados y discusión

La red de muestreo diseñada se centra principalmente en áreas urbanas, dado que el objetivo del proyecto es analizar la influencia de los residuos sólidos urbanos (RSU) sobre la calidad del agua. En consecuencia, los sitios más relevantes son aquellos ubicados en zonas urbanas y periurbanas de Reconquista, Avellaneda, Villa Ocampo y Las Toscas, donde la generación y disposición de RSU puede impactar directamente en fuentes de agua subterránea y superficial. Estos puntos incluyen perforaciones en barrios, arroyos urbanos, aguas residuales y zonas próximas a basurales.

Paralelamente, se incorporaron sitios rurales de localidades como San Antonio de Obligado y Tacuarendí, así como ciertos puntos complementarios en el entorno de las demás ciudades. Si bien estos no están directamente vinculados con la generación de RSU, resultan relevantes para el estudio por otras razones: abastecen a comunidades que dependen de pozos de agua, atraviesan áreas agrícolas o actúan como conectores entre zonas urbanas y rurales, como ocurre con el Arroyo del Rey en Reconquista y Avellaneda. Además, estos puntos permiten evaluar la posible influencia de prácticas agropecuarias sobre la calidad de las aguas y brindan una referencia comparativa frente a los valores observados en entornos urbanos. De este modo, el componente rural no solo complementa el análisis de los RSU, sino que amplía la comprensión integral de las fuentes de contaminación potenciales en la región.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Para organizar los sitios seleccionados se empleó un esquema de codificación por colores, que diferencia el tipo de fuente hídrica:

- Azul: aguas de perforación.
- Rojo: aguas superficiales.
- Blanco: aguas residuales.
- Verde: aguas superficiales próximas a sitios de disposición final.
- Amarillo: sitios de disposición final (informales o controlados).

Los puntos señalados en amarillo, provenientes de un estudio previo cuyos resultados están disponibles en la plataforma Planificar Santa Fe (Gobierno de Santa Fe, 2025), complementan esta selección. Además, existe la posibilidad de relevar canillas domiciliarias en viviendas próximas, con el fin de contrastar aguas subterráneas de uso directo con fuentes superficiales cercanas.

Los puntos señalados en amarillo, provenientes de un estudio previo cuyos resultados están disponibles en la plataforma Planificar Santa Fe (Gobierno de Santa Fe, 2025), complementan esta selección. Además, existe la posibilidad de relevar canillas domiciliarias en viviendas próximas, con el fin de contrastar aguas subterráneas de uso directo con fuentes superficiales cercanas.

La diversidad de puntos incorporados asegura la representatividad espacial y funcional del muestreo. Mientras que las aguas de perforación (azules) aportarán información sobre la calidad del agua subterránea consumida por la población, las aguas superficiales (rojas) permitirán observar la dinámica de contaminantes en arroyos y ríos locales. Los puntos de aguas residuales (blancos) constituirán un indicador del impacto directo de descargas domésticas o industriales, y los verdes, al estar próximos a sitios de disposición final, permitirán evaluar la movilidad de contaminantes desde los RSU hacia cuerpos de agua cercanos.

Esta distinción entre puntos urbanos y rurales fortalece el alcance del estudio. Por un lado, permite evaluar de manera específica los efectos de los RSU sobre los recursos hídricos urbanos; y por otro, posibilita contrastar estos resultados con ambientes rurales, generando un diagnóstico más integral sobre la calidad del agua en el distrito General Obligado.

La elección metodológica responde a criterios similares a los utilizados en investigaciones previas sobre calidad de aguas y contaminantes inorgánicos en la región (Nicolli et al., 2012; Litter et al., 2019). Asimismo, experiencias de monitoreo ambiental en ríos del sistema Paraná–Paraguay respaldan la inclusión de diversos tipos de fuentes hídricas en el muestreo (Ronco et al., 2011).

Finalmente, se destaca que esta primera red de puntos no es definitiva: existe la posibilidad de incorporar nuevas localidades o sitios específicos en función de los resultados preliminares y de la identificación de áreas críticas. Asimismo, debe considerarse la influencia de la estacionalidad, ya que las condiciones de sequía o crecidas pueden modificar de manera significativa la concentración y movilidad de contaminantes en las aguas superficiales y subterráneas. Este carácter dinámico del diseño asegura que el proyecto pueda adaptarse tanto a la realidad socioambiental del distrito General Obligado como a las variaciones temporales propias de su régimen hídrico.

En Reconquista se seleccionaron puntos de muestreo debido a su carácter de centro urbano más poblado de la región. La presencia de basurales a cielo abierto y descargas no controladas constituye un riesgo potencial para las fuentes de agua superficial y subterránea. La elección de estos puntos busca evaluar el impacto de la urbanización sobre el recurso hídrico. Mientras que Avellaneda fue incorporada por su cercanía a Reconquista y por presentar áreas suburbanas con acceso limitado a agua potable. La presencia de industrias y basurales informales justifica la selección de sitios que permitan evaluar posibles contaminaciones derivadas de la actividad humana.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 1.** Puntos de muestreo seleccionados en Reconquista (izq) y en Avellaneda (der.)(Google Earth Pro)

En San Antonio de Obligado se seleccionaron puntos de muestreo representativos de zonas rurales. La población depende mayormente de pozos de agua, por lo que resulta relevante estudiar la posible presencia de contaminantes en fuentes subterráneas. Este caso aportará datos para comparar ambientes urbanos con rurales. Por otro lado, en Las Toscas se eligieron puntos en sectores que combinan población urbana y periurbana. El crecimiento demográfico en los últimos años incrementó la generación de residuos, lo que convierte a esta localidad en un área prioritaria para observar potenciales impactos en la calidad del agua.

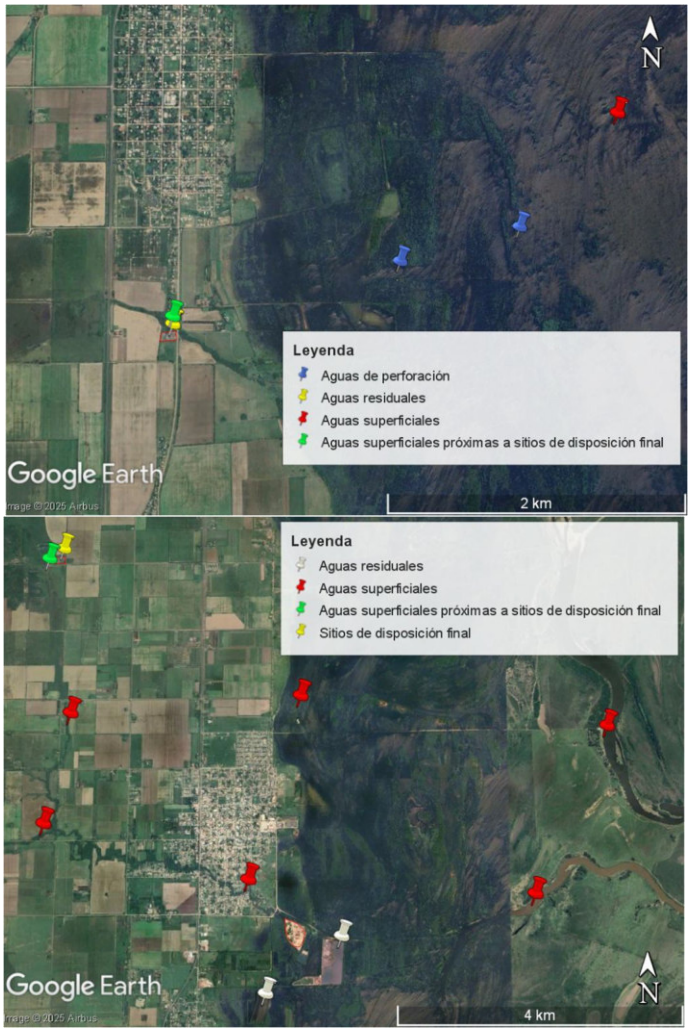



**Figura 2.** Puntos de muestreo seleccionados en San Antonio de Obligado (izq) y Las Tosca (der) (Google Earth Pro)

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En Tacuarendí se consideró un sitio clave por su ubicación intermedia dentro del distrito General Obligado. Su inclusión amplía la cobertura espacial del estudio y permite evaluar un ambiente con características productivas diferentes, complementando así la representatividad regional del muestreo, y en Villa Ocampo se seleccionaron puntos próximos a fuentes de agua utilizadas para consumo humano y animal. La ciudad posee relevancia regional por su actividad agrícola e industrial, factores que podrían influir en la calidad del agua subterránea y superficial. Este muestreo permitirá analizar la relación entre producción, residuos y recurso hídrico.

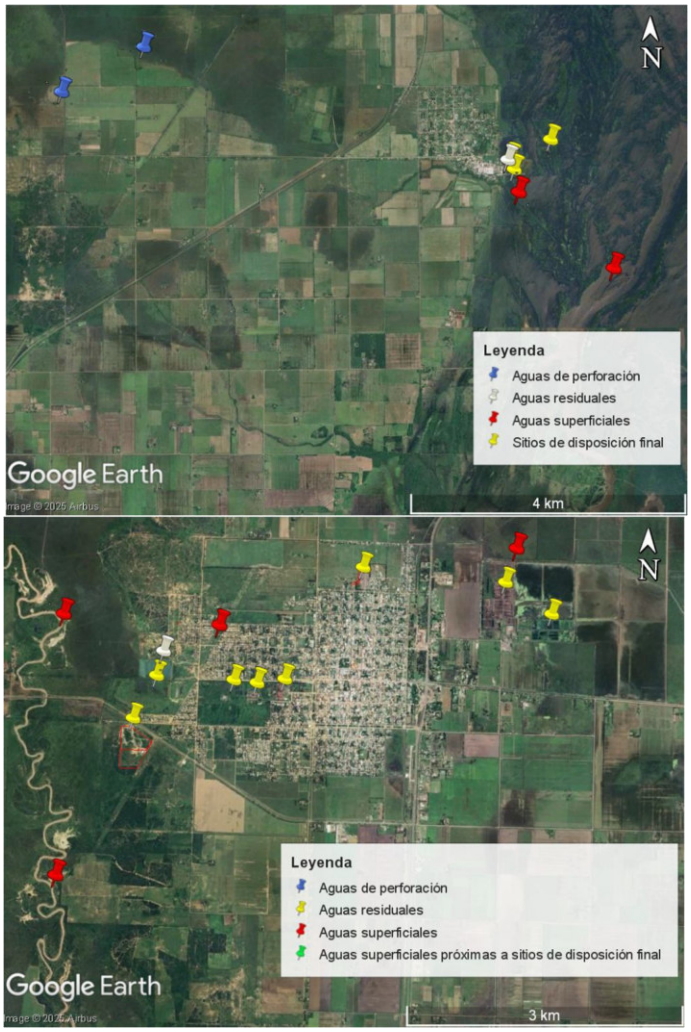



**Figura 3.** Puntos de muestreo seleccionados en Tacuarendí (izq) y Villa Ocampo (der) (Google Earth Pro)

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

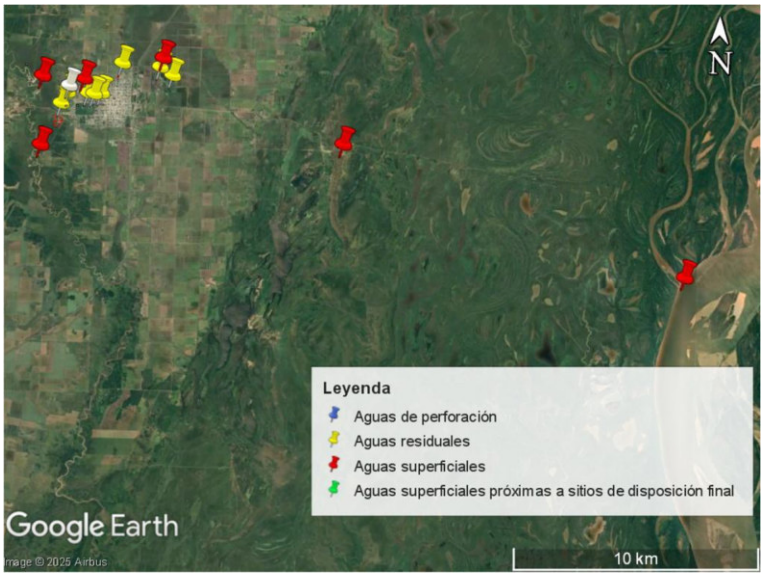



**Figura 4**. Puntos de muestreo seleccionados en Villa Ocampo (Google Earth Pro) [Se incluye Puerto Ocampo]

## 4. Conclusiones

La selección de puntos de muestreo constituye un primer avance fundamental para el proyecto, al establecer una red inicial de sitios representativos en seis localidades del distrito General Obligado. Se diferenciaron claramente los sitios urbanos, vinculados directamente a la generación y disposición de RSU, de los sitios rurales, incorporados como complemento para ampliar la perspectiva y facilitar comparaciones entre contextos urbanos y no urbanos.

El esquema de clasificación por colores (aguas de perforación, superficiales, residuales y asociadas a sitios de disposición final de RSU) garantiza diversidad en los escenarios a evaluar. En particular, la incorporación de sitios en el Arroyo del Rey, que atraviesa Avellaneda y Reconquista, permitirá analizar un curso de agua de gran relevancia social y ambiental. Asimismo, los puntos amarillos, provenientes de proyectos previos (Gobierno de Santa Fe, 2025), enriquecen el presente estudio y brindan la posibilidad de complementar el muestreo con canillas de viviendas cercanas.

La literatura existente sobre contaminación por arsénico y metales en aguas subterráneas de la región (Nicolli et al., 2012; Litter et al., 2019), junto con los antecedentes de monitoreo ambiental en sistemas hídricos de la cuenca del Paraná (Ronco et al., 2011), subraya la pertinencia de este diseño de muestreo.

Se reconoce que esta red inicial no es definitiva: existe la posibilidad de incorporar nuevas localidades y sitios específicos en función de los resultados preliminares y de la detección de áreas críticas. Este carácter dinámico asegurará que el proyecto pueda adaptarse a la compleja realidad socioambiental del distrito General Obligado y aportar información útil para la gestión del recurso hídrico.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Reconquista (UTN-FRRq) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## Referencias bibliográficas

Gobierno de Santa Fe. (2025). Planificar Santa Fe: Plataforma de planificación territorial y ambiental de la provincia de Santa Fe. Disponible en https://www.frrq.utn.edu.ar/planificar-santafe/

Litter, M. I., Nicolli, H. B., García, J. W., & Tineo, B. (2019). “Contaminación del agua subterránea por arsénico en Argentina: estado del conocimiento y perspectivas”. Ciencia e Investigación, 69(1), 27-44.

Nicolli, H. B., Suriano, J. M., Ferpozzi, L. H., Baleani, O. A., & Bocanegra, E. M. (2012). “Groundwater contamination by arsenic in Argentina: A review”. Applied Geochemistry, 27(6), 121-139.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Ronco, A. E., Peluso, M. L., & Repetti, M. R. (2011). “Monitoring of organochlorine pesticides in surface waters of Argentina”. Environmental Monitoring and Assessment, 172(1-4), 249-262.

IRAM – Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2012-2023). Normas de calidad de agua y análisis químico. Serie IRAM 29010, 29012, 29013, 29020, 29021, 29022, 29023, 29030, 29031, 29032, 29034. Buenos Aires: IRAM.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Evaluación estacional de la calidad del aire mediante monitoreo de material particulado ($PM_{2.5}$) en la ciudad de Rafaela, Santa Fe (AR)

## Seasonal assesment of air quality through particulate matter ($PM_{2.5}$) in the city of Rafaela, Santa Fe (AR)

Presentación: 30/10/2025

**Mariana Carrel**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación en Aplicación de Métodos Numéricos en Ciencia e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina
mcarrel99@gmail.com

**Martina Costanzo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación en Aplicación de Métodos Numéricos en Ciencia e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina
marticostanzo77@gmail.com

**Nain Schmidt**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación en Aplicación de Métodos Numéricos en Ciencia e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina
01nainschmidt@gmail.com

**Ariana Castro**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación en Aplicación de Métodos Numéricos en Ciencia e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina
arianacastro1510@gmail.com

### Resumen

La atmosfera es la envoltura gaseosa que rodea el planeta y está compuesta por una mezcla de diferentes gases conformando una capa de aire de varios kilómetros de altura. La contaminación del mismo se debe a la presencia de gases tóxicos y material particulado (PM), en altas concentraciones provocando afectaciones a la salud humana. El objetivo de este trabajo es la evaluación estacional de la calidad del aire urbano en la ciudad de Rafaela utilizando instrumentos digitales de medición continua (AirVisual Pro) colocados en dos puntos estratégicos del área de estudio. Los resultados del $MP_{2.5}$ obtenidos aplicando el índice US-AQI muestran que la calidad del aire en la ciudad es buena a moderada con picos estacionales de concentración de material particulado durante los meses de invierno coincidiendo con el aumento del uso de leña para calefacción y alta circulación vehicular.

**Palabras clave:** Calidad de aire, Material Particulado, Rafaela, Índice US-AQI.

### Abstract

The atmosphere is the gaseous layer that surrounds the planet and is composed of a mixture of different gases forming a layer of air several kilometers high. Its pollution is due to the presence of toxic gases and particulate matter (PM), in high concentrations causing effects on human health. The aim of this work is the seasonal assessment of urban air quality in the city of Rafaela using digital continuous measurement instruments (AirVisual Pro) placed at two strategic points in the study area. The $MP_{2.5}$ results obtained by applying the US-AQI index show that air quality in the city is good to moderate category

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

with seasonal peaks in concentration of particulate matter during the winter months coinciding with the increase in the use of firewood for heating and high vehicular circulation.

**Keywords:** Air quality, Particulate Matter, Rafaela, US-AQI Index.

## 1. Introducción

La atmosfera es la envoltura gaseosa que rodea el planeta y está compuesta por una mezcla de diferentes gases conformando una capa de aire de varios kilómetros de altura (Ahrens y Henson, 2018). De acuerdo a la OMS (2021) la salud y la calidad de vida de la población están directamente relacionadas con el aire limpio ya que su contaminación representa un riesgo ambiental significativo para la salud, afectando principalmente el sistema respiratorio y cardiovascular de la población. La vulnerabilidad del aire se refiere al daño que la contaminación atmosférica causa a la salud humana y al medio ambiente, aumentando el riesgo de enfermedades, cáncer y afectando al desarrollo principalmente niños y otras enfermedades crónicas en adultos (Clark et al., 2020).

La presencia de material particulado (PM) y gases tóxicos afectan la calidad del aire y por consecuencia su aspecto el cual se observa como una neblina grisácea (Daly y Cognuck González, 2021). Según una evaluación de la OMS (2018), son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año por los efectos de la contaminación del aire en espacios urbanos abiertos y cerrados.

De acuerdo a Shiva Nagendra et al. (2021) la quema de combustibles fósiles para el transporte, los procesos industriales, las actividades agrícolas y ganaderas, la quema de bosques y residuos sólidos y la energía doméstica son la principal fuente de emisión de PM y en especial aquellas que tienen 2.5 micras ($PM_{2.5}$) las cuales se consideran las más dañinas ya que por su tamaño pueden atravesar los alveolos pulmonares e ingresar en el torrente sanguíneo (Suarez et al., 2014).

La geografía, la meteorología y las fuentes específicas de contaminantes atmosféricos de cada lugar es probable que sean la principal fuente de variación de la concentración de material particulado entre las ciudades en todo el mundo (Daly y Cognuck González; Shiva Nagendra et al., 2021). El objetivo de este trabajo es evaluar la calidad del aire en las distintas estaciones del año en la ciudad de Rafaela mediante el monitoreo continuo de material particulado ($PM_{2.5}$).

## 2. Materiales y métodos

La Figura 1 presenta el área de estudio donde se lleva a cabo el trabajo la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Rafaela, departamento Castellanos, en el centro oeste de la provincia de Santa Fe. La localidad está representada demográficamente por una población de 110.000 habitantes (ICEDEL, 2010) y posee una superficie de 36.48 $km^2$, mientras que todo el distrito (urbano y rural) abarca aproximadamente 158 $km^2$. De acuerdo a los registros climáticos (serie histórica 1970-2020) Rafaela posee una temperatura media anual de 19.29 °C, una precipitación anual media de 961.50 mm, una humedad relativa media anual de 71.42 % y una velocidad media del viento de 9.15 km/h (Petrabisi et al., 2020).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

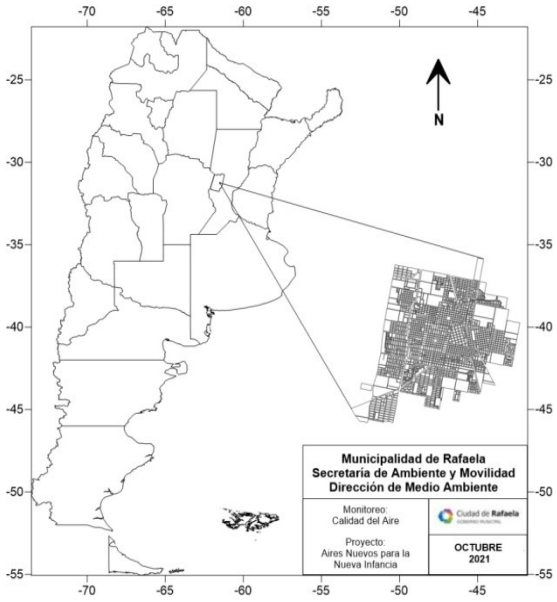



**Figura 1.** Ubicación geográfica del área de estudio (ciudad de Rafaela).

Para medir la calidad del aire urbano se utilizó una metodología que contempla el uso de instrumentos digitales de medición continua de material particulado AirVisual Pro (conteo laser de material particulado $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$, expresado en $ug/m^3$) (Zamora et al., 2020) (Figura 2) los cuales están dotados con tecnología láser, control de flujo de aire y autocalibración paramétrica, almacenamiento de datos y conexión de red tipo inalámbrica (WIFI). En este trabajo se adoptan como criterio los niveles límites de exposición de material particulado propuestos por la OMS (2021) y la actualización de la norma US-EPA (2024) para poder estandarizar y orientar la construcción de políticas públicas para combatir la contaminación del aire en la ciudad de Rafaela. En este marco, los niveles definidos para exposición promedio anual a $PM_{2.5}$ son 5 $\mu g/m^3$ para la OMS (2021) y 9 $\mu g/m^3$ con respecto a US-EPA (2024).

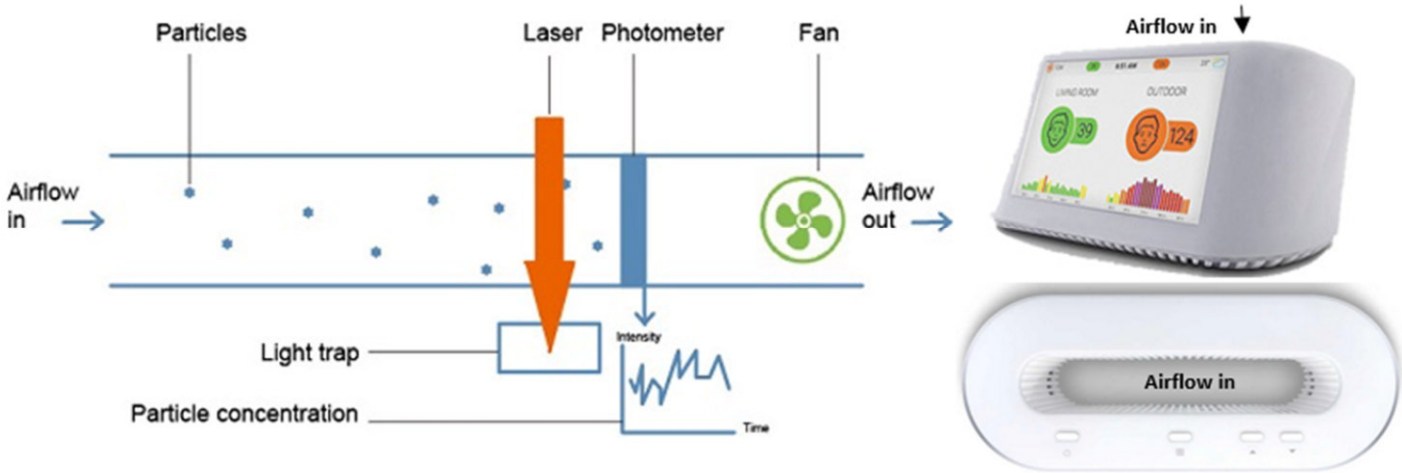



**Figura 2**. Medidor de calidad de aire AirVisual Pro (IQAIR).

En la Figura 3 se observan los puntos en donde se colocaron en el mes de abril del año 2021 dos medidores que abarcan un radio de acción de 5 km, la ubicación del medidor N° 1 es en una institución educativa de primera infancia y el medidor N° 2 en una institución local, siendo el primero el Jardín de infantes Boschetto (centro de la ciudad) y el otro en la sede de la Guardia Urbana de Rafaela (GUR) (fuera del casco céntrico). Los sensores registran una medición cada 15 minutos de $PM_{2.5}$, $PM_{10}$, $CO_2$, T° y H° y son descargados vía web para luego ser procesadas estadísticamente de acuerdo con la concentración media estacional a lo largo de los años de estudio (periodo 2021 – 2024).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

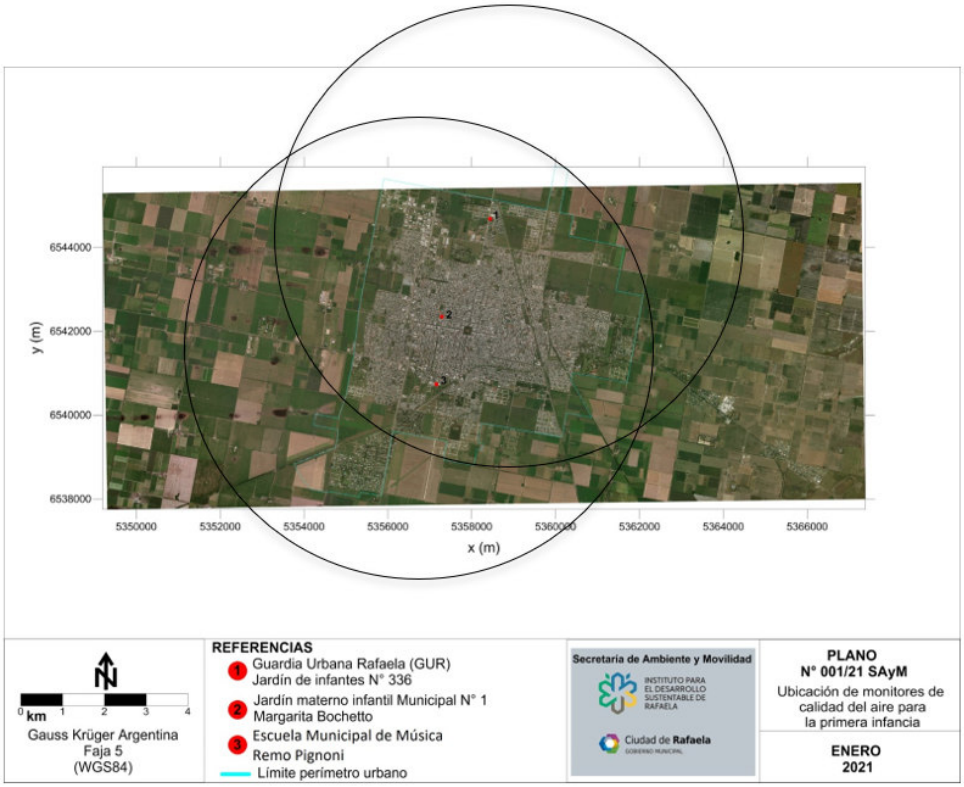



**Figura 3.** Mapa de ubicación de medidores en el área de estudio.

Por último, se estima el Índice de Calidad de Aire (AQI) referido a la variable material particulado de acuerdo con la Ecuación 1 desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, 2018).

$$AQI = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}}(C_i - BP_{LO}) + I_{LO} \quad (1)$$

Donde AQI es el índice de calidad del aire, ILO es el valor del índice en el límite inferior de la categoría AQI, IHI es el valor del índice en el límite superior de la categoría AQI, BPLO es el punto de quiebre de la concentración en el límite inferior de la categoría AQI, BPHI es el punto de quiebre de la concentración en el límite superior de la categoría AQI y Ci es la concentración del contaminante.

El índice AQI es un número adimensional que, actualmente, puede tomar valores en un rango de 0 a 300 unidades y que por convención se ha dividido en seis categorías, cada una con un grado de diferente afectación a corto plazo a la salud pública. En la Tabla 1 se detallan los valores de calidad del aire establecidos por la agencia US-EPA 2024 con su respectiva concentración y significado de acuerdo al impacto causado en la población.

**Tabla 1.** Categorías correspondientes al Índice de Calidad del Aire US-AQI-(2024)

| **Categoría AQI** | **Concentración ($ug/m^3$)** | **Rango AQI** | **Significado** |
|---|---|---|---|
| Buena | 0 – 9 | 0 – 50 | La calidad del aire se considera satisfactoria y la contaminación atmosférica presenta un riesgo escaso o nulo. |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | | |
|---|---|---|---|
| Moderada | 9.1 – 35.4 | 51 – 100 | La calidad del aire es aceptable, pero para algunos contaminantes podría existir una preocupación moderada para la salud de un grupo muy pequeño de personas excepcionalmente sensibles a la contaminación ambiental. |
| Insalubre para grupos sensibles | 35.5 – 55.4 | 101 – 150 | Los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos en la salud. Probablemente no afectará a las personas en general. |
| Insalubre | 55.5 – 125.4 | 151 – 200 | Todos pueden comenzar a padecer efectos en la salud y los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos más graves. |
| Muy Insalubre | 125.5 – 225.4 | 201 – 300 | Advertencias sanitarias de condiciones de emergencia. Son mayores las probabilidades de que toda la población esté afectada. |
| Peligroso | > 225.5 | > 301 | Alerta sanitaria: todos pueden padecer efectos sanitarios más graves. |

## 3. Resultados y discusión

De acuerdo con el registro continuo de la concentración de material particulado (PM2.5) durante el período de 4 años (2021-2024), en la Figura 4 se observa que la media estacional del Índice de Calidad del Aire presenta una variación de buena a moderada en los puntos de monitoreo Boschetto y GUR. Además, se puede observar un pico estacional invernal en ambos lugares de muestreo que se encuentra por encima de los límites admisibles (AQI 50), pero aun, sigue correspondiendo una categoría aceptable o moderada de calidad de aire.

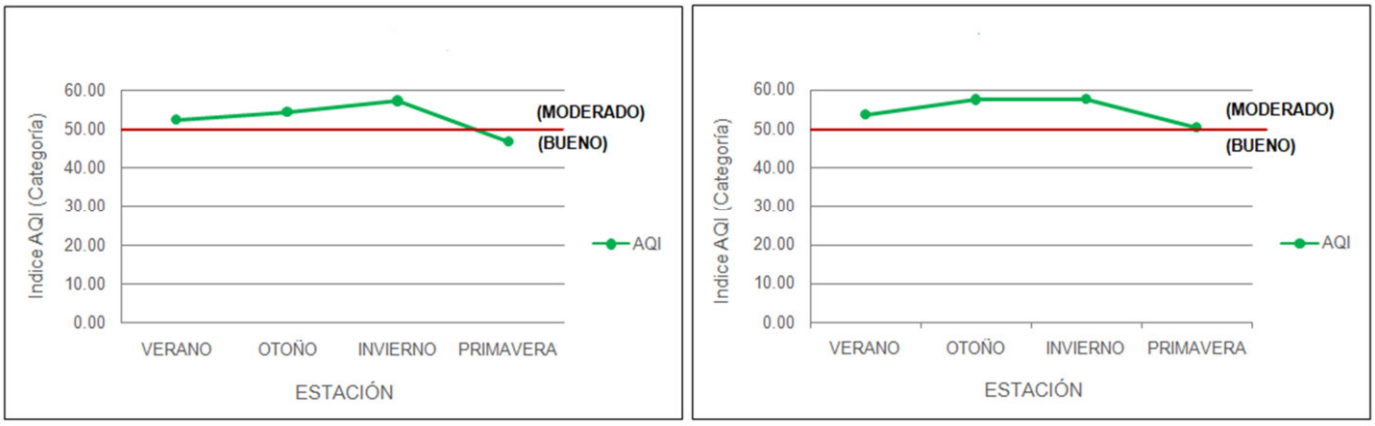



**Figura 4.** Evolución media estacional del Índice de Calidad del Aire (US-AQI-2024) para el periodo 2021-2024 en la ciudad de Rafaela. Izquierda: Boschetto y Derecha: GUR.

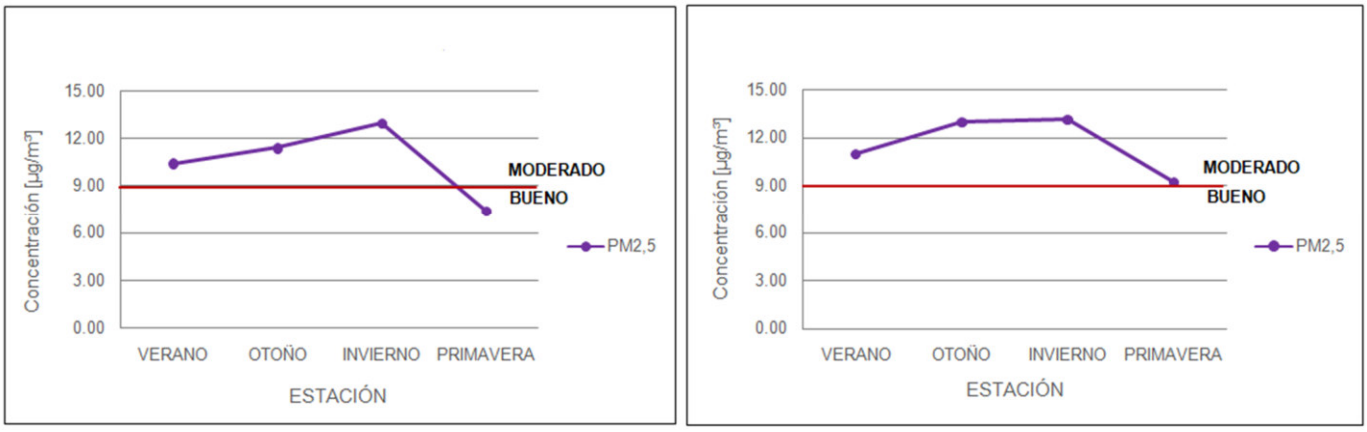



**Figura 5.** Evolución media estacional de la concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) en los sitios de monitoreo del área de estudio para el periodo 2021-2024. Izquierda: Boschetto y Derecha: GUR.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En la Figura 5 se observa que la concentración de material particulado 2.5 ($PM_{2.5}$) se supera en todas las estaciones del año el límite admisible de concentración establecidos por OMS (2021) (5 microgramos/$m^3$) siendo la estación invernal la más crítica y, en algunas estaciones, como la primaveral, que se encuentra por debajo o muy cercano de las limitaciones establecidas por US-EPA (2024) (9 microgramos/$m^3$), indicando así una situación crítica a mejorar. También, puede observarse los mismos picos estacionales que se correlacionan con el índice AQI.

## 4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados observados, se puede concluir que para el periodo de análisis (2021- 2024) la estación invernal es la más afectada en cuanto a calidad del aire urbano en la ciudad de Rafaela, aunque en general, el índice de Calidad de Aire (AQI) ha sido de buena a moderada. Los picos estacionales de concentración de material particulado en la estación de invierno se pueden atribuir a que los ciudadanos en las estaciones frías calefaccionan sus hogares con el uso de leña y se movilizan con mayor frecuencia en vehículos motorizados.

También, se puede observar que los límites de concentración media anual de $PM_{2.5}$ establecidos por la OMS (2021) y las normas US-EPA (2024), 5 µg/$m^3$ y 9 µg/$m^3$ respectivamente, se superan debido a los hábitos de vida y a la falta de conciencia ambiental ciudadana y que para revertir esta situación y prevenir futuros efectos adversos sobre la salud humana como la agudización de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares se debe comenzar con la concientización ciudadana, además de establecer Normas restrictivas y su correcta implementación, como así también incentivar el uso de medios de transporte menos contaminantes, viviendas energéticamente eficientes, construcciones sustentables, generación de energías limpias y mejor gestión de residuos industriales y municipales.

## Agradecimientos

Se agradece especialmente a la Dirección de Medio Ambiente de la Municipalidad de Rafaela por el apoyo técnico e institucional. Además, se agradece a la empresa Suiza IQAir por el aporte de los medidores en el marco del proyecto internacional "aires nuevos para la nueva infancia" presentado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26), Glasgow, Escocia. También, se agradece la Dirección científica del trabajo al Director del Grupo GIAMNCI y el Instituto IEMTEDS Dr. Ing. Juan NITTMANN y a la Arq. Lara FERRARI por el acompañamiento técnico y académico en el desarrollo de este trabajo.

## Referencias bibliográficas

Ahrens C. D., Henson R. 2018. Essentials of meteorology: An invitation to the atmosphere. CENGAGE Learning. 550 pp.

Clark H., Coll-Seck A. M., Banerjee A., Peterson A., Dalglish S. L., Ameratunga S. 2020. "A future for the world's children?" The Lancet. 54 pp.

Daly A., Cognuk González S. 2021. Calidad del aire: es el momento de actuar. Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). 64 pp.

Instituto de Capacitación y Estudios para el Desarrollo Local (ICEDEL). 2010. Datos poblacionales de Rafaela - Censo 2010. Municipalidad de Rafaela. 14 pp.

IQAIR-AirVisual. 2019. Pro Tech Spec. CDI1092.3 INT 171227. 1 pp.

Organización Mundial de la Salud (OMS).2018. ¿La herencia de un mundo sostenible? Atlas sobre salud infantil y medio ambiente. Ginebra. 164 pp.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 2021. Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Ginebra. 16 pp.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Petrabisi H., Sapino V., Franco L. 2020. Anuario meteorológico 2020 de la Ciudad de Rafaela. INTA Estación Agropecuaria Rafaela. 12 pp.

Shiva Nagendra S. M., Schlink U., Müller A., Khare M. 2021. Urban air quality monitoring, modeling and human exposure assesment. Springer. 454 pp.

Suarez L., Mesías S., Iglesias V., Silva C., Cáceres D., Ruiz Rudolph R. 2014. Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle, car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile. Environ. Sci. Process Impacts. (16):1309-1317 pp.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). 2018. Technical Assistance document for the reporting of daily Air Quality - The Air Quality Index (AQI). EPA 454/B-18-007. 22 pp

United States Environmental Protection Agency (US EPA). 2024. UPDATE - Technical Assistance document for the reporting of daily Air Quality - The Air Quality Index (AQI). EPA 454/B-18-007. 3 pp

Zamora L. M., Rice J., Koehler K. 2020. One year evaluation of three low cost PM2.5 monitors. Atmospheric Environment. (235): 1 – 11 pp.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Huellas ambientales en industrias lácteas de Rafaela y la región

## Environmental footprints in Dairy Industries of Rafaela and the region

Presentación: 30/10/2025

**Marisol Belén Farías**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
marisol.farias@frra.utn.edu.ar

**Alejandro Lo Presti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
alejandrolopresti7@gmail.com

**Francisco De Michelis**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
franciscodemicheli1@gmail.com

### Resumen

El agua es un recurso esencial cuya gestión sostenible se ha convertido en uno de los grandes desafíos ambientales actuales. En los últimos años, la huella hídrica (HH) y la huella de agua (HA) se han consolidado como herramientas clave para cuantificar consumos a nivel industrial y evaluar impactos ambientales asociados al uso del recurso. La industria láctea, particularmente relevante en Rafaela y región, es uno de los sectores productivos con mayor demanda de agua y generación de efluentes, sin embargo, en Argentina los estudios disponibles se han centrado principalmente en la etapa primaria, dejando en segundo plano la fase industrial. Este trabajo busca cuantificar el consumo de agua en industrias lácteas de diferentes escalas, evaluar los impactos asociados y analizar la eficiencia de sus sistemas de tratamiento de efluentes. Los resultados contribuirán a generar información local y al diseño de estrategias de economía circular orientadas a una producción sostenible.

**Palabras clave:** Huellas ambientales, Industrias Lácteas, Rafaela y zona

### Abstract

Water is an essential resource whose sustainable management has become one of the greatest environmental challenges of our time. In recent years, water footprints have become key tools to quantify consumption and assess environmental impacts associated with water use. The dairy industry, particularly relevant in Rafaela and its surrounding region, is among the most water-intensive productive sectors and generates significant volumes of effluents. However, in Argentina, most studies have focused primarily on the primary production stage, leaving the industrial phase in the background. This study aims to quantify water consumption in dairy industries of different scales, evaluate the associated impacts, and analyze the efficiency of their wastewater treatment systems. The results are expected to provide local information and support the design of circular economy strategies oriented toward more sustainable production practices.

**Keywords:** Environmental Footprints, Dairy Industries, Rafaela and surrounding area.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El agua constituye un recurso esencial para la vida, la salud y el desarrollo de las sociedades, sin embargo, a pesar de su carácter vital, la humanidad enfrenta serios desafíos en torno a su disponibilidad, su calidad y su gestión. En ese sentido, actualmente se dispone de herramientas que permiten evaluar y gestionar de manera eficiente el uso del agua en los distintos sectores productivos, contribuyendo así a una distribución más equitativa y a la preservación del recurso.

En los últimos años, se han estudiado y desarrollado diversos indicadores para ilustrar la sustentabilidad de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios de las sociedades. El concepto de huella hídrica (HH) fue introducido por Hoekstra y Hung (2002) como un indicador que permite cuantificar, tanto el uso directo como indirecto del agua por parte de productores y consumidores, visibilizando cómo este recurso fluye a través de las cadenas de suministro y comercialización. Posteriormente, la Organización Internacional de Normalización (ISO) publicó la norma ISO 14046 (2014) que introduce el concepto de huella de agua (HA). Esta metodología comparte el objetivo de evaluar el uso del recurso hídrico, pero amplía el análisis bajo un enfoque de ciclo de vida (ACV), considerando no sólo volúmenes de agua consumidos sino también su impacto potencial en diversas categorías ambientales, como eutrofización y acidificación acuática, ecotoxicidad, radiación ionizante o uso del suelo.

A nivel internacional, estos enfoques han sido ampliamente aplicados en sectores como la agricultura, la energía y, particularmente, la industria alimentaria. Asimismo, numerosos autores han hecho uso de estas herramientas en nuestro país y para diversos sistemas productivos (Alvarado et al., 2022; Ferrero et al., 2022; Jozami et al.,2022; Mainardi Remis & Gutiérrez Cacciabue, 2024; Piastrellini et al.,2024; Di Bona et al., 2025), sin embargo, estas metodologías no han alcanzado un grado de desarrollo suficiente, por lo que resulta interesante su adecuación para ser empleadas como indicador regional del uso y consumo de agua y su impacto sobre la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico.

En particular, la producción láctea es reconocida por ser una de las actividades más intensivas en el uso de este recurso, siendo la etapa primaria la de mayor contribución. Diversos estudios internacionales han señalado que la mayor parte del consumo está asociado principalmente al agua para bebida del ganado y al riego de cultivos forrajeros (Camargo et al., 2017; Murphy et al., 2017; Gutiérrez-León et al., 2024; Higham et al., 2024). En Argentina también se han efectuado trabajos sobre el consumo de agua en la cadena láctea, la mayoría de ellos focalizados en los establecimientos tamberos (Charlón et al., 2015; 2016; Cisneros Basualdo, 2015; Moyano Salcedo et al., 2015)

Rafaela se destaca por su fuerte perfil industrial y su modelo de desarrollo local basado en la articulación entre el sector productivo, el sistema educativo y la comunidad. Dentro de la industria alimentaria, el sector lácteo ocupa un lugar central. En particular, la ciudad alberga la sede central de la principal industria procesadora de leche del país que, de acuerdo con el Observatorio de la Cadena Láctea Argentina (OCLA, 2024), concentra aproximadamente el 12,5% de la producción industrial total a nivel nacional. Sin embargo, la importancia de la industria láctea en Rafaela no puede entenderse de forma aislada, ya que se inserta en un entramado productivo más amplio que abarca gran parte del Departamento Castellanos. Esta región conforma una de las principales cuencas lecheras del país, con una densa red de tambos y pequeñas localidades que albergan establecimientos procesadores de leche y sus derivados.

La elaboración de productos lácteos implica procesos que requieren grandes volúmenes de agua, tanto para la producción en sí misma, como para la limpieza de equipos y superficies. Los procesos industriales generan, en consecuencia, aguas residuales que presentan una alta concentración de nutrientes y compuestos orgánicos e inorgánicos. Además, pueden contener diversos agentes esterilizantes y una amplia gama de detergentes ácidos y alcalinos (Ahmad et al., 2019; Boguniewicz-Zablocka et al., 2019; Rodriguez et al., 2019). En la zona de estudio, la mayoría de los establecimientos productivos, particularmente aquellos de mediana y pequeña escala, suelen utilizar sistemas de tratamiento de efluentes basados en lagunas de estabilización. Este tipo de sistema puede ser eficiente para cumplir con la reglamentación, pero sólo si está correctamente diseñado, operado y supervisado; sin embargo, en muchas localidades de la región los controles son insuficientes y los sistemas no funcionan correctamente. Diversos estudios han señalado que en Argentina, especialmente en establecimientos de menor escala o con deficiente mantenimiento, los efluentes tratados no cumplen con los límites permitidos para parámetros clave como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos totales (SST) o los nutrientes (nitrógeno y

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

fósforo), comprometiendo la calidad de los cuerpos receptores y generando impactos negativos sobre los recursos hídricos (Pérez Jesica, 2020; Rolando Rocío de las Nieves, 2020; Corengia et al.,2022).

Frente a este escenario, la escasez de estudios específicos sobre la temática en Argentina, sumada a la complejidad de obtener datos precisos sobre consumos en el sector industrial lácteo, plantea un vacío de información que es necesario abordar. Considerando la importancia de este sector en Rafaela y localidades aledañas, y su rol en la economía regional, resulta pertinente la aplicación de estas metodologías para contribuir a establecer una línea de base de consumos y emisiones, aportar evidencia local para la toma de decisiones empresariales y de política pública y, a su vez, permitir comparar resultados con estudios internacionales.

En este contexto, el presente trabajo se enmarca en un plan de tesis cuyo objetivo general es contribuir al uso eficiente de los recursos hídricos en las industrias lácteas de Rafaela y la región, a partir de resultados de huellas ambientales, para diseñar estrategias de mitigación y reducción de impactos.

## 2. Materiales y métodos

Se tomará como área de estudio la ciudad de Rafaela (Santa Fe) y su zona de influencia. La metodología propuesta combina la recolección de datos primarios y secundarios, el monitoreo de consumos y efluentes, y el cálculo y evaluación de huellas ambientales.

### 2.1 *Caracterización y cuantificación de recursos hídricos en industrias lácteas*

Se trabajará con empresas de diferentes escalas, con las que el Grupo de Estudios de Medio Ambiente (GEM) de la UTN Facultad Regional Rafaela mantiene vínculos de colaboración y que han aceptado participar en este estudio. Los datos primarios de producción, uso y manejo del agua se recopilarán a través de visitas y entrevistas directas con profesionales de cada empresa, a lo largo de todas las fases del estudio. Se elaborarán inventarios de consumos de agua y, en los casos en que los establecimientos no dispongan de la información requerida, se realizarán mediciones de caudales empleando caudalímetros u horómetros. Respecto a los efluentes, se relevarán o estimarán los caudales generados, se tomarán muestras a la salida de los sistemas de tratamiento existentes en cada caso y se realizarán análisis fisicoquímicos de las mismas.

### 2.2 *Monitoreo de agua y efluentes*

Se evaluarán desde un punto de vista técnico-económico y ambiental los sistemas de tratamiento de efluentes existentes, monitoreando parámetros específicos de las aguas residuales a la entrada y salida de los mismos, a fin de determinar su eficiencia y nivel de cumplimiento con la normativa vigente. En aquellos casos que no dispongan de tratamiento o que los mismos no sean apropiados, se estudiarán y propondrán mejoras con el fin de optimizarlos y lograr un manejo ambiental adecuado.

### 2.3 *Determinación de la huella hídrica y los impactos del uso del agua (perfil de huella de agua).*

La huella hídrica (HH) de los productos se estimará siguiendo la metodología de Hoekstra et al. (2011), considerando el consumo de agua en todas las etapas de la producción.

La huella hídrica se compone de tres elementos diferenciados, los cuales se pueden apreciar en la Figura 1:

- Huella Hídrica Azul (HHa): volumen de agua superficial y subterránea consumido durante el proceso productivo.
- Huella Hídrica Verde (HHv): agua de lluvia almacenada en el suelo y utilizada principalmente por cultivos forrajeros. Corresponde a la porción captada por las áreas verdes proveniente de las precipitaciones.
- Huella Hídrica Gris (HHg): volumen de agua teórico necesario para diluir los contaminantes hasta alcanzar estándares de calidad aceptables.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Figura 1.** Componentes Huella Hídrica. Elaboración propia.

Para el cálculo de la Huella de Agua (HA) se seguirá la Norma ISO 14046 (ISO, 2014), que proporciona principios, requisitos y directrices para la determinación de un perfil de HA de productos y organizaciones con enfoque de ciclo de vida. Se evaluará el perfil de HA asociado a cada caso, considerando los impactos relacionados con el agua como escasez, eutrofización y acidificación acuática.

2.4 *Formulación y propuesta de estrategias de mitigación con enfoque de circularidad.*

A partir de la HH, se estimará la diferencia de consumos hídricos antes y después de las mejoras propuestas, seguido del cálculo de HHg lo cual permitiría identificar en forma teórica su potencial disminución de impacto volumétrico. Por otro lado, disponiendo de la caracterización fisicoquímica de efluentes pre y post escenarios, seguido de sus factores de emisión específicos para cada tipo de agua residual, se contabilizarán en el inventario y se determinará su porcentaje de contribución al Perfil de HA de cada caso. Finalmente, a partir de cada escenario óptimo obtenido, se verificará la existencia o no de reducción de impacto ambiental y se analizará al menos una estrategia de reutilización de efluentes tratados dentro del proceso, no sólo teniendo presente las eficiencias de remoción en cada uno de ellos sino también, sus posibles usos tendientes a la disminución del consumo de agua.

## 3. Resultados

Este trabajo se encuentra enmarcado dentro de la categoría "*Work in Progress*", motivo por el cual aún no se dispone de resultados específicos que puedan ser informados. Actualmente, se encuentra en ejecución la primera etapa metodológica, la cual se centra en la caracterización y cuantificación de los recursos hídricos en industrias lácteas. En esta fase inicial se han mantenido entrevistas exploratorias con las empresas participantes y se ha comenzado con el relevamiento de información primaria vinculada a consumos de agua y generación de efluentes. No obstante, aunque no se cuente con datos específicos, se considera pertinente presentar, por un lado, los antecedentes y los resultados obtenidos en investigaciones previas y, por otro lado, los resultados esperados a partir de la implementación de las tareas propuestas anteriormente.

3.1. *Resultados previos*

Tanto a nivel internacional como nacional, la literatura evidencia una escasez de estudios específicos en la etapa industrial de la cadena láctea. La complejidad del entramado productivo y la dificultad de recopilar datos precisos sobre consumos hídricos en las plantas procesadoras constituyen un obstáculo para avanzar en diagnósticos integrales (Ajiero & Campbell, 2018). Aun así, desde el GEM se han realizado en los últimos años diversos estudios que abarcan, tanto la etapa primaria como la industrial, enfocándose en el cálculo de huellas ambientales en la producción de quesos de pasta semidura de dos industrias de diferente escala (Jennerich L., 2025).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En dicho estudio se pudo observar, conforme a la metodología de HH, que la planta de mayor escala presentó un uso más eficiente del agua, con menores valores de huella hídrica por kilogramo de producto, mientras que la planta de menor escala mostró mayores consumos relativos (directos) y limitaciones en la gestión de efluentes, lo que incrementó su HHg. Sin embargo, al aplicar la metodología de HA, los resultados obtenidos fueron inversos debido a que la industria de mayor escala fue la que presentó los mayores impactos ambientales por unidad de producto, tanto en indicadores de escasez y uso de agua como en las categorías de acidificación terrestre y eutrofización acuática. Estos resultados se relacionan principalmente a los altos volúmenes de consumo de agua y a la mayor generación de efluentes propios de su mayor capacidad productiva. En cambio, la industria de menor escala mostró impactos considerablemente menores en las categorías analizadas.

La diferencia entre ambos enfoques se puede explicar en el hecho de que, en este caso, la metodología de HH se centró sólo en los consumos directos de agua durante el proceso productivo, mientras que en la HA de la norma ISO 14046 se incorporaron consumos directos e indirectos y se contemplaron los impactos producidos a lo largo de toda la cadena de suministro. De este modo, los resultados contrapuestos permiten reflejan cómo la elección de la metodología condiciona la interpretación de los impactos y aportan miradas complementarias sobre la gestión hídrica en la fase industrial de la cadena láctea.

Con este trabajo se pretende dar continuidad y ampliar esta línea de investigación del GEM, abordando el análisis ambiental en la producción de otros tipos de productos lácteos de industrias de diferentes escalas, en la búsqueda de generar información comparativa que contribuya a una caracterización más completa y representativa del sector.

### 3.2. *Resultados esperados*

De la aplicación de la metodología propuesta en el Punto 2 se espera identificar los puntos críticos de consumo de agua de los procesos productivos de distintas escalas industriales; evaluar la eficiencia y las limitaciones de los sistemas de tratamiento de efluentes bajo análisis. Por último, estimar y comparar los indicadores de HH y HA en, al menos, un nuevo producto lácteo que permita proporcionar información nueva al sector, o ampliar la ya existente, con el objeto de facilitar la toma de decisiones orientadas a la reducción de los impactos y al diseño de estrategias de economía circular.

## 4. Conclusiones

El agua es un recurso crítico cuya gestión sostenible constituye uno de los principales desafíos ambientales y productivos actuales. La aplicación de herramientas como la huella hídrica y la huella de agua permite no sólo cuantificar los consumos y emisiones asociados a la producción láctea, sino también visibilizar sus impactos ambientales, aportando información clave para la toma de decisiones.

En la región centro-oeste de la Provincia de Santa Fe, particularmente en la ciudad de Rafaela y su zona de influencia, la industria láctea representa un sector estratégico con alto consumo de agua y generación de efluentes, pero aún existe un déficit de estudios que integren la etapa industrial dentro de los análisis ambientales. Este trabajo busca contribuir a la ampliación de la información disponible, estableciendo una línea de base de consumos hídricos e impactos asociados, comparando diferentes escalas productivas y evaluando la eficiencia de los sistemas de tratamiento de efluentes.

Los resultados esperados permitirán identificar oportunidades de mejora y diseñar estrategias de economía circular orientadas a optimizar el uso del recurso, reducir la contaminación y, de esta manera, contribuir a una producción láctea más eficiente y responsable con el medioambiente.

## Referencias bibliográficas

Ahmad, T., Aadil, R. M., Ahmed, H., ur Rahman, U., Soares, B. C., Souza, S. L., ... & Cruz, A. G. (2019). Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *88*, 361-372. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.003

Ajiero, I., & Campbell, D. (2018). Benchmarking water use in the UK food and drink sector: Case study of three water-intensive dairy products. Water Conservation Science and Engineering, 3(1), 1-17. DOI: https://doi.org/10.1007/s41101-017-0036-0

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Alvarado, P. V. A., Paz, W. F. D., Barboza, A. G. S., Seghezzo, L., & Iribarnegaray, M. A. (2022). Huella hídrica como indicador del consumo de agua en la minería del litio en la Puna argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA, 26, 223-234.

Boguniewicz-Zablocka, J., Klosok-Bazan, I., & Naddeo, V. (2019). Water quality and resource management in the dairy industry. Environmental science and pollution research, 26(2), 1208-1216. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-017-0608-8

Camargo, E. S. C., Escobar, E. S. C., & Barón, E. M. P. (2017). Estimación de la huella hídrica para la producción de leche en Tunja, Boyacá. *Revista Ciencia y Agricultura*, *14*(2), 7-17. DOI: https://doi.org/10.19053/01228420.v14.n2.2017.7144

Charlón, V.; Manazza, J. F.; Tieri, M. P.; Rodríguez, C.; Engler, P. (2015). Huella hídrica en tambos según diferentes sistemas de producción. Avances y estado de situación en análisis de ciclo de vida y huellas ambientales en Argentina. Actas ENARCIV 2015, Córdoba, Argentina.

Charlon, V., Tieri, M., Frank, F., & Engler, P. (2016). La huella del agua en la producción primaria de leche en Argentina. *Información técnica de producción animal*, 10-15.

Cisneros Basualdo, N. E. (2015). Diagnóstico ambiental de dos tambos en la cuenca Mar y Sierras, Tandil, Provincia de Buenos Aires. Tesis de grado, Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Humanas, Licenciatura en Diagnóstico y Gestión Ambiental. Recuperado de:

https://ridaa.unicen.edu.ar:8443/server/api/core/bitstreams/6d2ad6bb-0240-4ddb-a760-5f0ea3cc8967/content

Corengia, M. C., Barranquero, R. S., & Cortelezzi, A. (2022). Ciclo del agua en una industria de la cuenca lechera Mar y Sierras (Argentina). DOI: https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v2i2.1581

Di Bona, A., De Marco, S., Piccolo, M. C., & Marcovecchio, J. (2025). Analysis of water footprint of kiwi production in General Pueyrredon district (Buenos Aires, Argentina). Sustainable Water Resources Management, 11(4), 76. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s40899-025-01249-w

Ferrero, L. M. M., Araujo, P. Z., Valdeón, D. H., Hun, A. L. N., & Mele, F. D. (2022). Water footprint of lemon production in Argentina. Science of the Total Environment, 816, 151614. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151614

Gutiérrez-León, F. A., Briones Zavala, S. P., & Lastra-Bravo, X. B. (2024). Estimación de la huella hídrica de la ganadería de leche en la Sierra Centro Norte del Ecuador. Chilean journal of agricultural & animal sciences, 40(2), 362-375. DOI: https://doi.org/10.29393/CHJAAS40-31EEFX30031

Higham, C. D., Singh, R., & Horne, D. J. (2024). The water footprint of pastoral dairy farming: The effect of water footprint methods, data sources and spatial scale. Water, 16(3), 391. DOI: https://doi.org/10.3390/w16030391

Hoekstra, A., Hung, P., (2002). Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade. Value of Water Research Report Series No. 11. UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Hoekstra, A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., Mekonnen M.M. The Water Footprint Assessment Manual, Setting the Global Standard. Earthscan. London, Washington DC, 199 p, 2011.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

ISO 14046 (2014): Environmental Management – Water Footprint – Principles, Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Jennerich, L. B. (2025). Economía ambiental del uso del agua en el sector agroindustrial lácteo del centro oeste de Santa Fe (Argentina). Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ciencias Agrarias, Argentina. Recuperado de: https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/8522

Jozami, E., Mele, F. D., Piastrellini, R., Civit, B. M., & Feldman, S. R. (2022). Life cycle assessment of bioenergy from lignocellulosic herbaceous biomass: The case study of Spartina argentinensis. Energy, 254, 124215. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124215

Mainardi Remis, J. M., & Gutiérrez Cacciabue, D. (2024). Variación de la huella hídrica en procesos industriales según el alcance establecido para su cálculo: El caso de una embotelladora, una curtiembre y una cervecera de la provincia de Salta, Argentina.

Moyano Salcedo, A., Tieri, M. P., & Herrero, M. A. (2015). Huella hídrica en establecimientos lecheros de Buenos Aires, Argentina. Avances y estado de situación en análisis de ciclo de vida y huellas ambientales en Argentina, actas del IV Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y III Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica.

Murphy, E., De Boer, I. J. M., Van Middelaar, C. E., Holden, N. M., Shalloo, L., Curran, T. P., & Upton, J. (2017). Water footprinting of dairy farming in Ireland. Journal of Cleaner Production, 140, 547-555. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.199

Observatorio de la Cadena Láctea Argentina. (2025, 22 de julio). *Argentina: Ranking de Industrias Lácteas 2024-2025*. OCLA. Recuperado de: https://www.ocla.org.ar/noticias/33770740-argentina-ranking-de-industrias-lacteas-2024-2025

Pérez, J. (2020). *Huella hídrica de la leche y el queso en un tambo-fábrica de Tandil*. Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Humanas, Licenciatura en Diagnóstico y Gestión Ambiental. Recuperado de: https://ridaa.unicen.edu.ar:8443/server/api/core/bitstreams/8d07d2f3-cf69-4de0-ae7c-e412b07c3162/content

Piastrellini, R., Rótolo, G. C., Arena, A. P., Civit, B. M., & Curadelli, S. (2024). Evaluation of the environmental sustainability of agricultural production using the methodologies of emergy analysis and life cycle assessment. Case study, tomato grown in Mendoza (Argentina). Cleaner and Circular Bioeconomy, 8, 100082. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100082

Rodriguez, C., Sosa, R. A., & Fanelli, S. L. (2019). Evaluación del posible riesgo ambiental asociado a la presencia de contaminantes en efluentes generados por establecimientos lecheros y la industria láctea. In X Congreso de Ecología y Manejo de Ecosistemas Acuáticos Pampeanos (Azul, 20 al 22 de noviembre de 2019).

Rolando, Rocío de las Nieves. (2020). *Diagnóstico ambiental de una fábrica de quesos y dulce de leche del partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires*. Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Humanas, Licenciatura en Diagnóstico y Gestión Ambiental. Recuperado de: https://ridaa.unicen.edu.ar:8443/server/api/core/bitstreams/7008ac99-f285-4a46-a475-e615605f761f/content

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

MENCIÓN ESPECIAL

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional:** Villa María

# Estudio preliminar de *biofilms* bacterianos en superficies de acero inoxidable

## Preliminary study of bacterial biofilms on stainless steel surfaces

Presentación:30/10/2025

**Melisa Romina Baumann**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Villa María, Villa María, Córdoba, Argentina.
melisabaumann4@gmail.com

### Resumen

La formación de biofilm sobre superficies de acero inoxidable representa un desafío para el control microbiológico en establecimientos lecheros y en la industria alimentaria. Se realizaron curvas de crecimiento para definir parámetros cinéticos de *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis*. Se determinó cualitativa y cuantitativamente la capacidad de ambos microorganismos de formar biofilms bajo diferentes concentraciones de glucosa sobre vidrio, poliestireno y acero inoxidable. Ambas especies son formadoras de biofilms en los materiales estudiados. *E. coli* mostró un patrón dependiente de la concentración de glucosa, *E. faecalis*, si bien requiere glucosa para optimizar la producción, una vez estimulada desarrolla biofilms robustos y estables. Esto constituye la base experimental para estudios destinados a evaluar el uso de agua activada con plasma no térmico (PAW) como estrategia innovadora para inhibir o retardar la formación de biofilms de estos microorganismos en aguas subterráneas de establecimientos agropecuarios utilizadas en procesos de la industria láctea.

**Palabras clave:** Biofilm, acero inoxidable, agua subterránea.

### Abstract

Biofilm formation on stainless steel surfaces represents a challenge for microbiological control in dairy farms and the food industry. Growth curves were developed to define kinetic parameters of *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis*. The ability of both microorganisms to form biofilms under different glucose concentrations on glass, polystyrene, and stainless steel was qualitatively and quantitatively determined. Both species are biofilm formers on the studied materials. *E. coli* displayed a glucose concentration-dependent pattern, *E. faecalis*, although it requires glucose to optimize production, develops robust and stable biofilms once stimulated. This constitutes the experimental basis for studies aimed at evaluating the use of non-thermal plasma-activated water (PAW) as an innovative strategy to inhibit or delay biofilm formation by these microorganisms in groundwater from agricultural facilities used in dairy industry processes.

**Keywords:** Biofilm, stainless steel, groundwater.

## 1. Introducción

El agua subterránea constituye la principal fuente de abastecimiento en numerosas regiones, especialmente en zonas rurales que carecen de suministro de agua potable o de red. En Argentina, más de 1,2 millones de personas dependen de esta fuente para consumo humano, riego, producción de alimentos y limpieza de instalaciones (Lutri et al., 2020). La región pampeana es una de las zonas agrícolas-ganaderas más importantes de mundo, el 75 % de la agricultura y el 90 % de la producción lechera se concentra en ella (Bettera et al., 2011). El peligro más común y difundido relativo al agua es el riesgo de contaminación biológica por los patógenos presentes en las heces de animales. Estos pueden infiltrarse en los cuerpos de agua, lo cual se evidencia por la presencia de bacterias indicadoras de contaminación fecal como *E. coli* (Urseler et al., 2019).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Como estrategia de supervivencia, estas bacterias pueden formar biofilms, es decir, comunidades microbianas adheridas a sustratos y embebidas en una matriz polimérica extracelular (Carton et al., 2011). La formación de biofilm incrementa su resistencia a antimicrobianos (Xia et al., 2023) y representa un riesgo significativo para la higiene y seguridad de instalaciones agropecuarias. En la industria alimentaria es muy común la presencia de biopelículas en cañerías y equipos compuestos por diferentes materiales (incluyendo plástico, cristal, madera, acero inoxidable) e incluso sobre los alimentos producidos (Cáceres et al., 2019). Por ello, es fundamental la detección *in situ* y temprana de la formación de los mismos (Xia et al., 2023).

En este contexto, resulta esencial estudiar la formación de biofilms sobre acero inoxidable y explorar estrategias innovadoras para su control. En años recientes, el plasma no térmico y su aplicación en agua (PAW) se han postulado como alternativas prometedoras y sostenibles. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la formación de biofilms de *E. coli* y *E. faecalis* bajo distintas condiciones y superficies de materiales, como etapa previa para futuros ensayos en la determinación del efecto del PAW, tanto sobre bacterias en estado planctónico como sobre la formación y erradicación de biofilms en acero inoxidable, explorando su potencial como estrategia innovadora de control microbiológico en sistemas de agua e instalaciones agroalimentarias.

## 2. Metodología

2.1. Cinética de crecimiento

Se utilizaron cepas puras de *E. coli (ATCC 25922)* y *E. faecalis (ATCC 29212)*, mantenidas en placas con agar Luria-Bertani (LB) y repicadas cada 15 días. Las placas se conservaron a 4 ºC, mientras que para el almacenamiento a largo plazo se mantuvieron a -80 ºC. Se prepararon preinóculos *overnight* (ON) de ambas bacterias en 5 ml de LB, incubados con agitación (150 rpm) a 30 °C durante 12 h hasta alcanzar la fase exponencial ($DO_{600}$ *E. coli*: 0,566, *E. faecalis*: 0,469). Para las curvas de crecimiento, una alícuota del preinóculo se adicionó a 30 mL de LB en erlenmeyers, ajustando la concentración bacteriana inicial a una $DO_{600}$ de 0,01 (≈$1 \times 10^6$ UFC/ml). Los ensayos se realizaron por triplicado. Se cuantificó el crecimiento bacteriano por dos métodos: 1) Determinación de la masa celular por turbidimetría. Se midió la densidad óptica ($DO_{600}$), crecimiento celular de los cultivos de ambas cepas. 2) Determinación del número de células viables por recuento en placa en superficie. Se tomaron alícuotas de cada cultivo y se realizaron diluciones seriadas decimales, hasta llegar a la dilución $10^{-6}$. Se sembraron las últimas 3 diluciones seriadas en placas con agar LB, en condiciones de esterilidad, mediante la técnica de microgota (tres gotas de 10 µl), y se incubaron a 28 °C durante 12 h. Se realizó el recuento en placa en superficie y se calculó el promedio del número de células viables/ml (UFC/ml).

Se calcularon los parámetros cinéticos: tiempo generacional ($g$) y velocidad instantánea de crecimiento ($\mu$) mediante regresión lineal del tramo exponencial de ambas curvas de crecimiento. Además, se utilizaron las ecuaciones 1 y 2 (Muloiwa et al., 2020) donde N1 y N2 corresponde a las UFC a t1: inicio de la fase exponencial y t2: fin de la fase exponencial.

$$g = \frac{t}{n} \tag{1}$$

$$\mu = 2{,}303 \frac{Log\ N2 - logN1}{(t2 - t1)} \tag{2}$$

dónde $t$: tiempo de crecimiento exponencial, $n$: número de generaciones, $N1$ y $N2$: UFC en los tiempos exponenciales $t_1$ y $t_2$.

2.2 Ensayo de formación de biofilm por tinción con cristal violeta

Se utilizo esta técnica para evaluar la formación de biofilm de las cepas en estudio sobre: a. vidrio: estudio cualitativo. b. microplacas de poliestireno: estudios cualitativos y cuantitativos. c. chapas de acero inoxidable AISI 304L: estudios cualitativos y cuantitativos.

Se evaluó el efecto del agregado de glucosa y el tiempo de incubación sobre la capacidad formadora de biofilm en poliestireno y acero inoxidable, utilizando las condiciones que se muestran en la Tabla 1.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 1**. Concentraciones de glucosa y tiempo de incubación de ensayos de biofilm de *E. coli* y *E. faecalis*.

| **Superficies materiales** | **Poliestireno** | | **Acero inoxidable** |
|---|---|---|---|
| **Tiempo de incubación** | **48 h** | **120 h** | **48 h** |
| **Concentración de Glucosa** | 0,00 % | 0,00 % | 0,00 % |
| | 0,25 % | 0,50 % | 0,50 % |
| | 0,75 % | 0,75 % | 0,75 % |
| | Control (LB) | Control (LB) | Control (LB) |

2.2.1 Inóculo: Las cepas puras de *E. coli* y *E. faecalis* se repicaron en placas con agar LB a 28 °C durante 24 h. Se prepararon los cultivos (ON) en 5 ml de LB, por triplicado, y se incubaron en condiciones estáticas a 28 °C durante 12 h.

2.2.2 Siembra en microplaca: Se seleccionaron los cultivos con mayor $DO_{600}$ para cada especie. En cada pocillo de microplaca de 24 wells se adicionaron 1000 µl de LB, glucosa y los inóculos correspondientes a la dilución 1/20 (50 µl), y se incubó la placa de cultivo en condiciones estáticas a 28 °C a los tiempos correspondientes.

2.2.3 Tinción con cristal violeta: Se descartó el medio de la placa y se lavaron las superficies con agua destilada para asegurar la eliminación de las bacterias no adheridas. Se fijaron las superficies en estufa a 60 °C durante 60 min. Se agregó 1000 µl de cristal violeta al 0,1 % a cada material y se dejó actuar por 15 min a temperatura ambiente. Se lavaron las superficies con agua de grifo hasta eliminar el exceso de colorante y se dejó secar (ON) a temperatura ambiente.

Ensayo cualitativo: Se tomaron fotografías de los materiales para observar la coloración residual.

Ensayo cuantitativo: Tras el secado, el colorante retenido en las superficies se solubilizó con el mismo volumen de etanol al 96 % (1000 µl), y se dejó actuar por 40 min. La cuantificación se realizó mediante absorbancia a 570 nm ($DO_{570}$).

## 3. Resultados y discusión

3.1 Curva de crecimiento

En la Tabla 2 se muestran los parámetros cinéticos de crecimiento determinados para ambas bacterias. *E. coli* presentó una velocidad específica de crecimiento de $\mu = 1{,}21\ h^{-1}$ y un tiempo generacional de 34 min, mientras que *E. faecalis* mostró $\mu = 1{,}38\ h^{-1}$ y $g = 30$ min. La regresión lineal del tramo exponencial de ambas curvas de crecimiento presentó valores de coeficiente de determinación ($R^2 > 0{,}95$).

Los valores reportados en bibliografía afirman que *E. coli* presenta tiempos generacionales alrededor de los 20 min, considerando condiciones óptimas (37 °C en condiciones aeróbicas) (Son, M. & Taylor, R., 2021). Mientras que en *E. faecalis* se ha reportado el rango de 28–40 min (Licht, T. et al., 2001) y 25,9 min (Siegal-Gaskins & Crosson., 2008). Los resultados mostrados en la Tabla 2 indican que, bajo las condiciones ensayadas, ambas especies presentan tasas de duplicación en tiempos esperables. *E. faecalis* exhibe un crecimiento ligeramente más acelerado que *E. coli.* La temperatura seleccionada en el diseño experimental fue de 30 °C por ser más representativa de una condición de crecimiento de microorganismos en condiciones ambientales típicas de la provincia de Córdoba. La estimación de estos parámetros es esencial, ya que la capacidad de multiplicación de cada microorganismo condiciona su potencial de colonización de superficies y la posterior formación de biofilms, aspectos críticos para la evaluación de tratamientos alternativos como el PAW.

**Tabla 2**. Parámetros cinéticos de crecimiento de *E. coli* y *E. faecalis*

| **Parámetros** | ***E. coli*** | ***E. faecalis*** |
|---|---|---|
| **t1 y t2 (Ec. 2) en h** | 3,0 – 6,0 | 3,5 – 5,0 |
| **Tiempo generacional (g) min** | 34 | 30 |
| **Velocidad instantánea de crecimiento (µ) en 1/h** | 1,21 | 1,38 |

La Figura 1 muestra las curvas de crecimiento de *E. coli* y *E. faecalis* determinadas mediante densidad óptica ($DO_{600}$) y recuento viable (UFC/ml).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

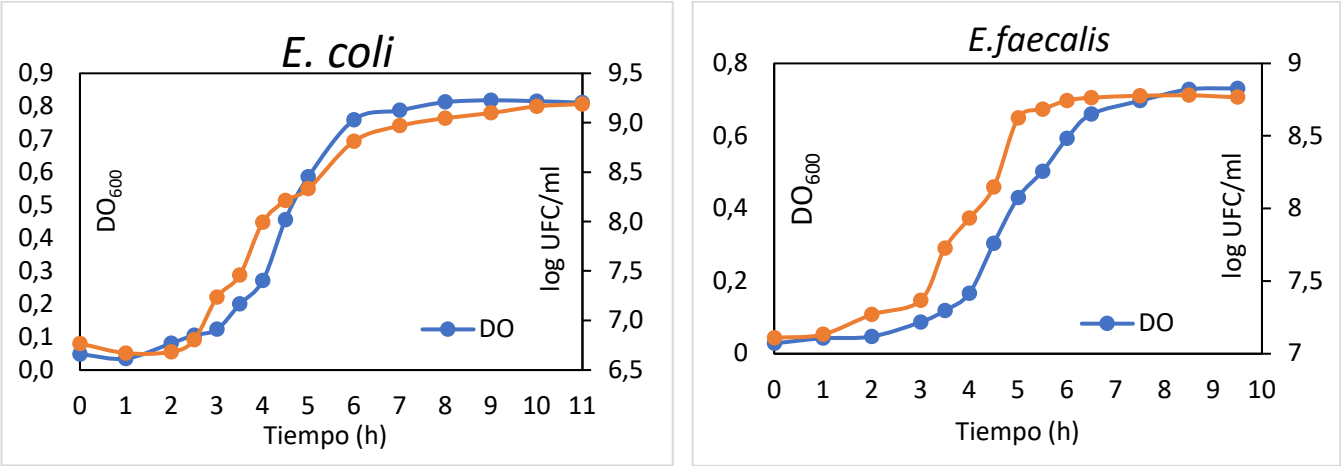



**Figura 1**. Curvas de crecimiento de *E. coli* y *E. faecalis*

3.2 Formación de biofilm por tinción con cristal violeta

Estudio cualitativo de formación de biofilm: En la Figura 2 se observa la formación de biofilm sobre todas las superficies estudiadas, evidenciadas por la coloración violeta luego de 48 h de incubación.

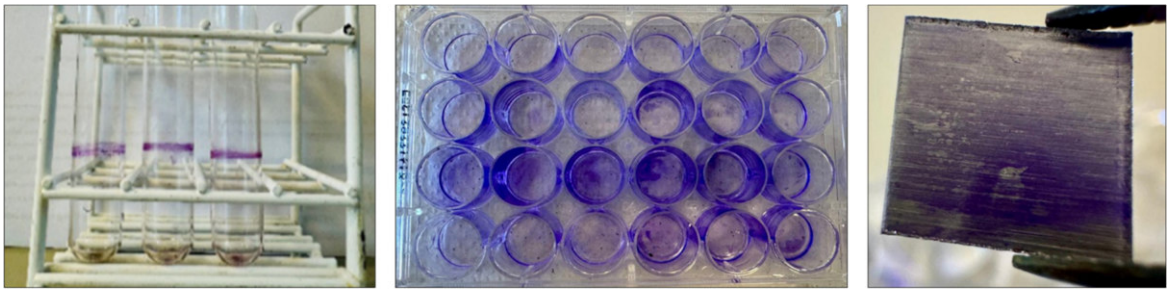



**Figura 2**. Formación de biofilm sobre las superficies. a) vidrio. b) placas de poliestireno. c) chapas de acero inoxidable.

Estudio cuantitativo de formación de biofilm:

Etapa 1: Cuantificación preliminar por $DO_{570}$ sobre acero inoxidable. El análisis de un único tiempo de incubación (48 h) y alta concentración de glucosa (0,75 %), tuvo el objetivo de validar la cuantificación de la formación de biofilm sobre acero inoxidable, material de amplio uso en sistemas de agua e instalaciones agroalimentarias. Esta prueba permitió confirmar cuantitativamente que tanto *E. coli* como *E. faecalis* son capaces de adherirse y formar biofilm sobre esta superficie. *E. coli* presentó un valor promedio de absorbancia de (0,13 ± 0,05), con mayor variabilidad entre las réplicas, mientras que *E. faecalis* alcanzó valores más altos de absorbancias (0,19 ± 0,02) y menor variabilidad en las réplicas.

Etapa 2: Efecto del agregado de glucosa, tiempos de incubación y superficies sobre la formación de biofilms.

La Tabla 3 resume los valores medios de $DO_{570}$ (media ± DE) en microplacas de poliestireno y en chapas de acero inoxidable AISI 304L, suplementadas con diferentes concentraciones de glucosa. Se incluyen control con medio LB.

**Tabla 3**. Valores medios de $DO_{570}$ (media ± DE) de *E. coli* y *E. faecalis* en microplacas de poliestireno y en acero inoxidable.

| **Concentración de Glucosa (%)** | **Poliestireno** | | | | **Acero inoxidable** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **48 h** | | **120 h** | | **48 h** | |
| | ***E. coli*** | ***E. faecalis*** | ***E. coli*** | ***E. faecalis*** | ***E. coli*** | ***E. faecalis*** |
| **0,00 %** | 0,111 ± 0,001 | 0,16 ± 0,02 | 0,06 ±0,01 | 0,10 ± 0,02 | 0,10 ± 0,02 | 0,061 ± 0,004 |
| **0,25 %** | 0,16 ± 0,02 | 0,21 ± 0,03 | s/e | s/e | s/e | s/e |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,50 %** | s/e | 0,275 ± 0,003 | 0,14 ± 0,02 | 0,25 ± 0,03 | 0,11 ± 0,03 | 0,21 ± 0,01 |
| **0,75 %** | 0,27 ± 0,03 | 0,25 ± 0,03 | 0,18 ± 0,04 | 0,26 ± 0,03 | 0,16 ± 0,02 | 0,22 ± 0,03 |
| **Control (LB)** | 0,15 ± 0,04 | | 0,07 ± 0,02 | | 0,064 ± 0,002 | |

-s/e: condición no ensayada.

Los resultados evidencian que ambos microorganismos poseen capacidad de formar biofilm bajo las condiciones ensayadas. En todos los casos se observa que la formación de biofilm tanto de de *E. coli* como de *E. faecalis* se ve beneficiada por el agregado de glucosa en ambas superficies. Esto concuerda con otras investigaciones que han reportado que esta incorporación resultó favorecedora para al desarrollo de la biopelícula, posiblemente debido a que este hidrato de carbono serviría como sustrato para la formación de la matriz de exopolisacáridos y, por ende, aumentaría la cuantificación de la biomasa total (Cáceres et al., 2019). Se observa que para el caso de *E. coli* la biomasa de biofilm aumentó en función de la concentración de glucosa, alcanzando su máximo a 0,75 % (sobre todas las superficies), lo que confirma la dependencia de esta especie de fuentes adicionales de carbohidratos para potenciar la producción de matriz extracelular, en concordancia con lo reportado previamente en relación al rol de la glucosa en la regulación de la formación de biofilm (Tremoulet et al., 2002; García-Gómez et al., 2016). En contraste, *E. faecalis* presentó una respuesta diferente, en ausencia de glucosa, la formación de biofilm fue baja, pero la suplementación generó un incremento con valores superiores a los de *E. coli*. Este patrón indica que, si bien *E. faecalis* requiere glucosa para optimizar la producción de biofilm, una vez estimulada, su capacidad de adhesión sería más robusta y estable, en concordancia con reportes que destacan la alta capacidad de esta especie para persistir en superficies abióticas y en ambientes hostiles (Mohamed & Huang, 2007; Mohamed & Murray, 2005). Más recientemente, Kim et al. (2020) demostraron que la disponibilidad de azúcares como glucosa y sacarosa modula la viabilidad y la producción de matriz extracelular en biofilms de *E. faecalis*.

No se ven diferencias importantes en la magnitud de los biofilm formados sobre las diferentes superficies estudiadas. Con respecto a los tiempos de incubación de ambos microorganismos, que fueron estudiados sobre las microplacas de poliestireno, se observa que para *E. coli* a medida que aumenta el tiempo, el biofilm formado se ve debilitado, mientras que para el *E. faecalis* no se observan diferencias. Está planificado realizar el mismo estudio sobre acero inoxidable en una etapa posterior.

## 4. Conclusiones

Las curvas de crecimiento de *E. coli* y *E. faecalis* presentaron parámetros cinéticos acordes a la bibliografía, evidenciando diferencias fisiológicas relevantes: *E. coli* mostró menor eficiencia en la duplicación que *E. faecalis*, caracterizado por sus tiempos generacionales. Esta información era imprescindible para considerar en etapas posteriores la eficacia del PAW frente a estas bacterias modelo.

Los ensayos confirmaron la capacidad de ambas especies de formar biofilm en diferentes concentraciones de nutrientes (glucosa) y sobre los diferentes materiales. En *E. coli*, la formación resulto más dependiente de la concentración de glucosa, mientras que *E. faecalis* si bien requiere glucosa para optimizar la producción de biofilm, una vez estimulada, su capacidad de adhesión es más robusta y estable, incluso en acero inoxidable. Este hallazgo es relevante dado el uso extendido de este material en sistemas de agua e industrias alimentarias y refuerza la necesidad de evaluar tecnologías innovadoras como el PAW para su remoción.

En conjunto, los resultados constituyen evidencia preliminar y punto de partida para nuestros estudios sobre el efecto del PAW en bacterias patógenas formadoras de biofilm en superficies metálicas.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Villa María (UTN-FRVM), al Instituto Multidisciplinario de Investigación y Transferencia Agroalimentaria y Biotecnológica (IMITAB-CONICET), PFI, PIFIC.

## Referencias bibliográficas

Bettera, S., Dieser, S., Vissio, C., Geuna, G., Díaz, C., Larriestra, A., Odierno, L., Frigerio, C. (2011). Calidad microbiológica del agua utilizada en establecimientos lecheros de la zona de Villa María (Córdoba). Rev.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Argent. Microbiol. vol.43 N°2. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0325-75412011000200008

Carton, F., Orihuel Iranzo, E., Berto Navarro, R., Lopez Torino, C. (2011). Control de la presencia de *biofilms* en las industrias alimentarias. ISSN 0212-1689, Nº 264.

Cáceres, M., Etcheverría, A., Padola, N., (2019). Efectos del medio de cultivo y de la metodología aplicada sobre la formación de biopelículas de 2cepas de Escherichia coli diarreagénicas, Revista Argentina de Microbiología, Vol 51 (3). doi:10.1016/j.ram.2018.04.007.

García-Gómez, E., Espinosa, J., de la Cruz, F., Delgado, A. (2016). Role of carbon sources in biofilm formation by Escherichia coli. Journal of Basic Microbiology, 56(10), 1138–1148. doi:10.1002/jobm.201600123

Kim, M., Rosa, V., Min, K. (2020). Characterization of Enterococcus faecalis in different culture conditions. Scientific Reports, 10, 21867. doi:10.1038/s41598-020-78998-5

Licht, T., Hammerum, A., Jensen, L., Jacobsen, B. (2001). Effect of pheromone induction on transfer of the Enterococcus faecalis plasmid pCF10 in intestinal mucus ex vivo, FEMS Microbiology Letters, 204 (2), 305-309, doi:10.1016/S0378-1097(01)00408-6.

Lutri, V., Matteoda, E., Blarasin, M., Aparicio, V., Giacobone, D., Maldonado, L., Becher Quinodoz, F., Cabrera, A., Giuliano Albo, J. (2020).Hydrogeological features affecting spatial distribution of glyphosate and AMPA in groundwater and surface water in an agroecosystem. Córdoba, Argentina, Science of The Total Environment, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134557.

Mohamed, J. A., & Murray, B. E. (2005). Lack of correlation of gelatinase production and biofilm formation in a large collection of Enterococcus faecalis isolates. Journal of Clinical Microbiology, 43(10), 5405–5407. doi:10.1128/JCM.43.10.5405-5407.2005

Mohamed, J. A., & Huang, D. B. (2007). Biofilm formation by Enterococci. Journal of Medical Microbiology, 56(12), 1581–1588. doi:10.1099/jmm.0.47331-0

Muloiwa, M., Nyende-Byakika, S., Dinka, M. (2020). Comparison of unstructured kinetic bacterial growth models.,South African Journal of Chemical Engineering, doi:10.1016/j.sajce.2020.07.006.

Siegal-Gaskins, D. & Crosson, S. (2008) Tightly Regulated and Heritable Division Control in Single Bacterial Cells, Biophysical Journal, 95 (4), 2063-2072, doi: 10.1529/biophysj.108.128785.

Son, M. & Taylor, R. (2021). Growth and Maintenance of Escherichia coli Laboratory Strains. National Library of Medicine. Curr Protoc doi: 10.1002/cpz1.20

Tremoulet, F., Duché, O., Namane, A., Martinie, B., & Labadie, J. (2002). A proteomic study of Escherichia coli O157:H7 biofilm formation under glucose stimulation. FEMS Microbiology Letters, 215(1), 105–111. doi: 10.1111/j.1574-6968.2002.tb11363.x

Urseler, N., Bachetti, R., Damilano, G., Morgante, V., Ingaramo, R., Saino, y otros. (2019). Calidad microbiológica del agua subterránea en establecimientos agropecuarios del centro-sur de Córdoba, Argentina: aptitudes y usos. doi: 10.20937/RICA.2019.35.04.06

Xia, B., Kumari Nilesh Vyas, H., Zhou, R., Zhang, T., Hong, J., Rothwell, J., y otros. (2023). The importance of superoxide anion for Escherichia coli biofilm removal using plasma-activated water. doi: 10.1016/j.jece.2023.109977

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Análisis de paridad de red en sistemas fotovoltaicos de baja potencia instalados en la ciudad de Santa Fe. Impacto del Programa Prosumidores 4.0

## Grid parity analysis of low-power photovoltaic systems installed in Santa Fe city. Impact of Prosumer 4.0 program

Presentación: 30/10/2025

**Agustina Fiorella Solís**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina
asolis@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

Desde la implementación del programa Prosumidores en 2015, la Provincia de Santa Fe se ha consolidado como líder nacional en generación distribuida. El presente trabajo analiza la paridad de red de sistemas fotovoltaicos para determinar su factibilidad económica bajo el nuevo marco del programa Prosumidores 4.0. La evaluación se realiza para distintos perfiles de usuario, aplicando tres indicadores económicos en escenarios alternativos. Los resultados obtenidos indican que, bajo las condiciones estudiadas, la inversión alcanza la paridad de red en un período inferior a 8 años, con tasas internas de retorno que exceden el 15%. Dichos valores contrastan significativamente con estudios anteriores, en los cuales la factibilidad económica no se lograba dentro de la vida útil de los sistemas, lo que evidencia el impacto positivo del nuevo programa en la viabilidad de estas tecnologías.

**Palabras clave:** Paridad de red, sistema fotovoltaico, costo nivelado de energía, energías renovables

### Abstract

Since the implementation of the Prosumidores program in 2015, the Province of Santa Fe has established itself as a national leader in distributed generation. This study analyzes the grid parity of photovoltaic systems to determine their economic feasibility under the new framework of the Prosumidores 4.0 program. The assessment is conducted for different user profiles, applying three economic indicators across alternative scenarios. The results indicate that, under the evaluated conditions, the investment reaches grid parity in less than 8 years, with internal rates of return exceeding 15%. These values contrast significantly with previous studies, in which economic feasibility was not achieved within the systems' expected lifespan, demonstrating the positive impact of the new program on the viability of these technologies.

**Keywords:** grid parity, photovoltaic system, levelized cost of energy, renewable energy.

## 1. Introducción

Ante la urgencia por mitigar el cambio climático, el Gobierno de la Provincia de Santa Fe (GSF) determinó como misión velar por el cumplimiento de las propuestas en la agenda 2030 de Naciones Unidas. En particular, la generación distribuida mediante energía solar fotovoltaica se presenta como una solución estratégica, al reducir pérdidas en la red, fomentar el autoconsumo y disminuir la demanda sobre los sistemas tradicionales. Sin embargo, el alto costo de inversión de capital inicial

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

hace necesario un estudio técnico-económico para evaluar la posibilidad de llevar adelante la instalación. En respuesta, el programa Prosumidores 4.0 del GSF busca fomentar la adopción de energías renovables, ofreciendo beneficios tangibles en la facturación eléctrica de los usuarios (Gobierno de la Provinicia de Santa Fe, 2024).

La paridad de red (PR) es un concepto extensamente investigado en la literatura internacional (García, J., Martínez, L., Rodríguez, P., Fernández, A. , 2018). Sin embargo, los estudios precedentes en el contexto argentino, y en particular en Santa Fe, han perdido vigencia debido a las modificaciones en el marco regulatorio. Por lo tanto, el presente estudio se distingue por analizar el impacto combinado de la disminución de los costos de inversión tecnológica y los efectos de los incentivos específicos del programa Prosumidores 4.0 en la factibilidad económica para diversos tipos de usuario.

## 2. Materiales y métodos

2.1. *Metodología aplicada para cálculo de paridad de red y evaluación de rentabilidad económica del sistema fotovoltaico*

Para evaluar la PR y la rentabilidad económica de un sistema fotovoltaico (SFV) de baja potencia, se define previamente el perfil de los usuarios objetivo, ya que dicho perfil determina directamente el costo de la energía eléctrica, para luego realizar el análisis económico según el diagrama de la figura 1.

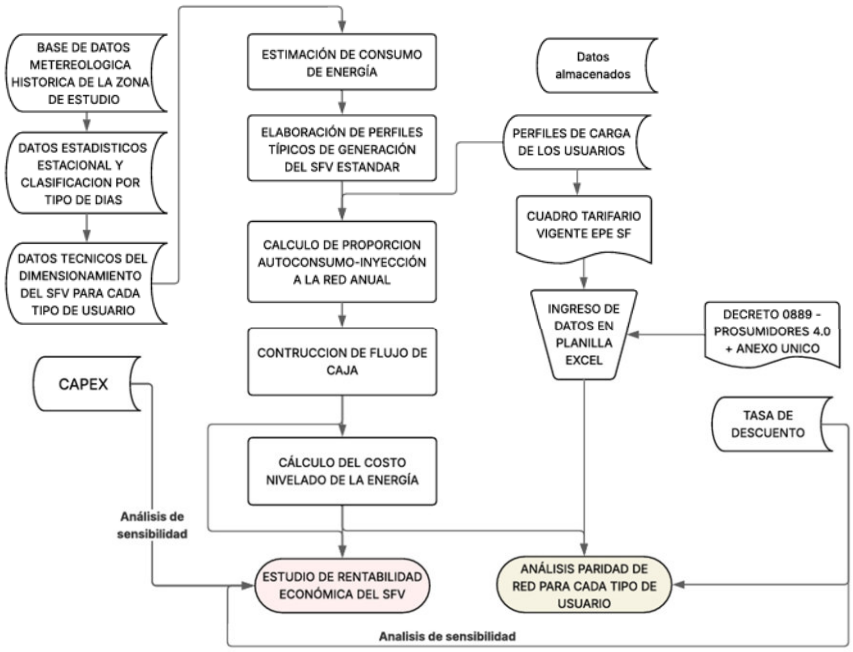



**Figura 1**. Flujograma de actividades para el análisis de rentabilidad económica y paridad de red para el SFV.

En este estudio, se consideran tres categorías de consumidores:

- Usuario residencial (Nivel 1): Se considera la Tarifa Residencial Urbana para hogares de altos ingresos (N1), sin subsidios. La tarifa es monómica y se factura bimestralmente, basada únicamente en el consumo de energía.
- Usuario comercial (UC1): Se adopta la tarifa UC1. Para el caso de estudio, se asume un consumo bimestral de 7.000 kWh y una potencia máxima de 8 kW. Al igual que en el caso residencial, la tarifa es monómica y bimestral, representativa de un comercio mediano con actividad estable.
- Usuario industrial (categoría 2B1): Se aplica la tarifa binómica 2B1, destinada a usuarios industriales en baja tensión con demanda hasta 300 kW. Esta tarifa incluye componentes por energía y por potencia contratada, con facturación mensual. Debido a su heterogeneidad, los parámetros se basan en datos reales de un consumidor industrial de la ciudad de Santa Fe.

Para cada categoría, se recopilan los valores tarifarios vigentes establecidos por la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe (EPESF), incluyendo todos los cargos y tributos aplicables, para la estimación del costo de la energía comprada a la red, condición necesaria para evaluar los ahorros generados por la generación distribuida. Adicionalmente, a partir de datos meteorológicos históricos, se incorporan curvas de irradiación representativas correspondientes a días típicos — soleados y nublados— durante los períodos estival e invernal. Estas curvas permiten modelar el rendimiento energético del SFV bajo

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

condiciones climáticas variables, estimando con precisión su producción, su capacidad de autoconsumo y excedentes inyectados a la red.

### 2.2. *Definiciones clave*

- Paridad de red: es el punto clave en donde el costo nivelado de la energía (LCOE) de una fuente de energía renovable (FER), en este caso un SFV es igual o inferior al costo de adquisición de la misma energía a través de la red, clave al analizar cuán competitiva es la FER frente a las convencionales y dentro de qué parámetros, se convierte en una alternativa viable.
- CAPEX: corresponde a la inversión dirigida a la compra de equipos, insumos y gastos necesarios para la puesta en marcha de la instalación del SFV. Este concepto es clave para evaluar la viabilidad del proyecto.
- Costo Nivelado de la Energía (LCOE): es un indicador del costo promedio por unidad de energía producida si se considera toda la vida útil y todos los costos del SFV traídos al valor actual.

La forma en la que se plantea el LCOE se presenta en la ecuación (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y es una modificación de la ecuación estandarizada (Corporate Finance Institute - CFI Team, 2025), adaptada a el caso de estudio (con incentivos, costos adicionales, etc).

$$LCOE = \frac{CAPEX - B0 + \sum_{t=1}^{N} \frac{CTt - Bt}{(1+r)^t} - \frac{VR}{(1+r)^N}}{\sum_{t=1}^{N} \frac{Et}{(1+r)^t}} + AC_{O\&M} \quad (1)$$

Donde *Ct* son los costos en el año *t*, *Et* la energía útil producida en el año *t*, *r* la tasa de descuento, *N* el período de análisis (para el caso, coincidente con la vida útil del SFV), *t* el tiempo en año bajo análisis, *CAPEX* el costo total de la inversión del SFV, *CTt* los costos totales en el año *t* (seguros, reposiciones, etc), *B0* y *Bt* los beneficios iniciales y en el año *t* respectivamente (incentivos y subsidios iniciales y anuales), *VR* el valor residual (al final del proyecto) y $AC_{O\&M}$ es un término anualizado adicional de tareas de operación y mantenimiento (O&M)

### 2.3. *Consideraciones técnicas y económicas adoptadas*

Para evaluar la viabilidad técnico-económica de cada SFV en las características previamente mencionadas en cuanto a los escenarios y considerando para cada uno de ellos las distintas variables como el precio de las tarifas eléctricas, los costos de inversión, etc., se adopta una metodología cuantitativa basada en el LCOE. A esto se le suma un análisis de sensibilidad para prever cómo impactan las variaciones en parámetros importantes. Bajo esta primicia, se plantean entonces los siguientes supuestos:

- El análisis del proyecto tiene una vida útil de 25 años, que corresponde a la vida útil del SFV, y considerando el reemplazo de un inversor a mitad de la vida útil del mismo con un costo del 25% del CAPEX.
- El CAPEX del SFV posee un valor de 950 USD/kW instalados. Esto incluye todo el equipamiento. Se asume que los costos específicos no disminuyen al aumentar la magnitud de la instalación del SFV.
- Costos de operación y mantenimiento de 0,75% del CAPEX anual.
- Se asume una degradación anual del 0,5%. Al finalizar el ciclo de vida útil, el valor residual de la instalación es de 5%.
- Se adoptan como referencia las tarifas de la EPESF correspondientes al mes de julio del 2025, junto con los incentivos indicados en el programa Prosumidores 4.0.
- La tasa de descuento aplicada es del 8% anual en USD como escenario base.

Los datos climáticos se obtienen de la base de datos meteorológica histórica de la NASA con resolución horaria para la zona de estudio (NASA, 2025).

### 2.4 *Perfiles de generación*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La estimación inicial de los perfiles de generación es de vital importancia si se busca realizar un análisis de PR del SFV, estos se calculan para una instalación tipo de 1 kWp. Estos perfiles derivan de los datos meteorológicos ya mencionados. La potencia generada por un SFV se determina mediante la ecuación (2).

$$P_{G-SFV} = N \cdot P_{pico} \cdot \frac{G}{G_{STD}} \cdot \left[1 + k_p \cdot (T_C - T_R)\right] \cdot \eta_G \quad (2)$$

Donde $N$ es la cantidad de módulos fotovoltaicos, $P_{\text{pico}}$ la potencia nominal por modulo (Wp), $G$ la irradiancia global instantánea (W/m2), $G_{\text{STD}}$ la irradiancia estándar (1000 W/m2), $k_{\text{p}}$ el coeficiente de corrección térmica (p.u.), $T_c$ la temperatura normalizada de 25 °C, $T_{\text{R}}$ la Temperatura ambiente en (°C) y $\eta_{\text{G}}$ el rendimiento global del sistema (p.u.) que incluye pérdidas eléctricas y térmicas.

A partir de perfiles de irradiancia representativos para la ciudad de Santa Fe, correspondientes a días soleados y nublados durante las estaciones estival e invernal, se obtuvieron las curvas de generación diaria de un SFV típico. Estas curvas permiten visualizar la variabilidad horaria y estacional del recurso solar, fundamental para evaluar su impacto en la producción energética del sistema.

2.5 *Curvas típicas de demandas*

La viabilidad económica de un SFV depende de la coincidencia temporal entre generación y autoconsumo, lo que exige analizar los perfiles de demanda según el tipo de usuario. Cada segmento presenta patrones de carga distintos, condicionando el aprovechamiento energético. A partir de campañas de monitoreo realizados por la EPESF se pueden identificar variaciones estacionales claves entre invierno y verano, con estos datos, se estima el precio promedio de la energía eléctrica (en USD/kWh) para cada tipo de usuario, considerando el régimen tarifario vigente en la jurisdicción de la EPESF y el impacto de la segmentación de subsidios establecida por el Decreto N°332/22 (Gobierno de la Provincia de Santa Fe, 2022). El análisis se centra en los tres perfiles representativos descriptos anteriormente. Esta caracterización tarifaria permite evaluar con mayor precisión la rentabilidad de sistemas fotovoltaicos, al incorporar las particularidades económicas y técnicas de cada segmento. Bajo estas categorías, se obtiene el precio de la energía para cada tipo de usuario, contemplando todos los impuestos, nacionales y municipales (EPESF, 2025) (Ver Tabla 1).

## 3. Resultados y discusión

3.1 *Análisis de paridad de red y de sensibilidad de la tasa de descuento para distintos segmentos de usuarios*

Este análisis se basa en la comparación entre el LCOE del SFV y las tarifas eléctricas vigentes para los distintos perfiles de usuario. El LCOE resultante es de 0,0617 USD/kWh, valor que se aplica uniformemente a los tres perfiles de usuario analizados, dado que la tecnología y las condiciones de instalación se consideran homogéneas en todos los casos. En la Tabla 1 se presenta el resumen comparativo del LCOE y la tarifa de red para cada segmento de usuario.

**Tabla 1**. Análisis de PR para cada tipo de usuario.

| Tipo de cliente | LCOE SFV [USD/kWh] | Tarifa Red [USD/kWh] | Diferencia |
|---|---|---|---|
| Residencial | 0,061701 | 0,21851 | -71,8% |
| Comercial | 0,061701 | 0,20902 | -70,5% |
| Industrial | 0,061701 | 0,23593 | -73,8% |

Los resultados obtenidos muestran que el LCOE del SFV es significativamente inferior a las tarifas eléctricas vigentes para todos los perfiles de usuario analizados. En este escenario, el SFV resulta entre un 70 % y 74 % más económico que la energía de red durante su vida útil, incluso sin subsidios. El mayor ahorro se registra en el usuario industrial (2B1), con una reducción del 73,8 %, favorecido por su estructura tarifaria y alta demanda.

Con el fin de evaluar la robustez económica del sistema frente a condiciones de mercado adversas, se realiza un análisis de sensibilidad bajo un escenario restrictivo caracterizado por la ausencia de financiamiento accesible y elevados costos de capital.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

El análisis de sensibilidad con tasa de descuento del 12 % confirma la viabilidad del SFV en escenarios financieros adversos: el LCOE se mantiene por debajo de las tarifas de red en todos los perfiles, consolidando la PR y demostrando la resiliencia económica del sistema (ver Figura 2). El análisis de sensibilidad demuestra, por tanto, que la rentabilidad del SFV es robusta ante incertidumbres financieras, reforzando su atractivo como opción de generación distribuida en contextos reales y variables.

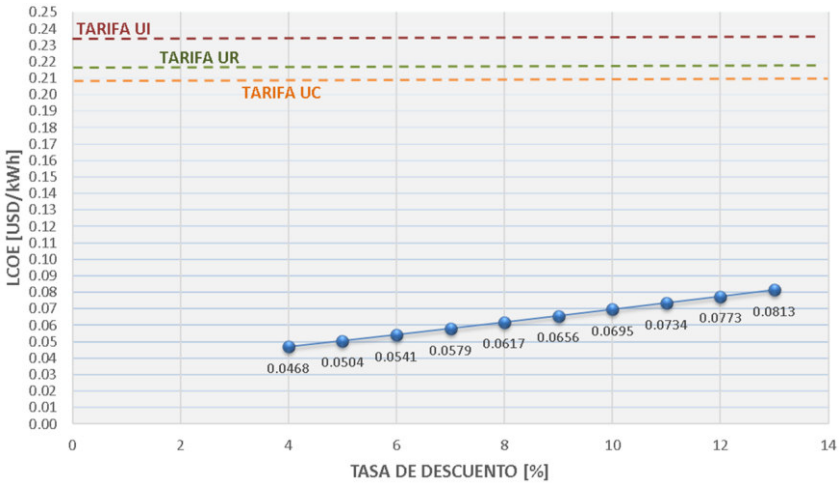



**Figura 2**. Sensibilidad del LCOE en función de la tasa de descuento.

3.2 *Rentabilidad económica del SFV para los segmentos definidos, en el marco del programa incentivo Prosumidores 4.0*

El programa Prosumidores 4.0, promueve la generación distribuida mediante FER en la provincia de Santa Fe. Su principal mecanismo es el balance neto de facturación, complementado con el *Valor Unificado de Incentivos Renovables* (VUIR), que agrega al precio mayorista de la energía inyectada un incentivo económico otorgado por el GSF (EPESF, 2025).

Dentro del programa, los prosumidores productivos -incluyendo grandes y pequeñas demandas- reciben un incentivo adicional de 29,16 $/kWh sobre el reconocimiento de la energía inyectada por la distribuidora, en reconocimiento a los beneficios ambientales de la generación renovable. El usuario industrial analizado en este estudio se encuadra en esta categoría. Por otro lado, los pequeños prosumidores, que no cumplen con los requisitos para ser considerados productivos, perciben un incentivo menor, de 17,47 $/kWh, también aplicado sobre el valor de la energía inyectada. Este último caso incluye al usuario residencial (Nivel 1) considerado en el análisis. Estos incentivos mejoran significativamente la rentabilidad de los SFV, especialmente en escenarios de alta inyección a la red. El precio de compra de la energía inyectada que realiza la distribuidora depende del tipo de usuario, según se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 1**. Precio de compra de la energía inyectada por el usuario-generador a la red.

| Tipo de programa | Tipo de Usuario | Precio de compra ($/kWh) |
|---|---|---|
| TODOS | Residencial Nivel 1 | 97,96628 |
| | No residencial | 96,73372 |

El análisis de rentabilidad económica del SFV se realiza mediante el flujo de caja proyectado que considera los egresos asociados al CAPEX, costos anuales de O&M, ahorros por autoconsumo, compensación por excedentes inyectados a la red e incentivos vigentes – incluyendo el VUIR–, más un valor residual al final del ciclo de vida útil.

Estos flujos se actualizan con una tasa de descuento del 8% y un CAPEX de 0,95 USD/W en el escenario base, que asume condiciones ideales de inversión y permite calcular indicadores como el VAN, TIR y payback. Estos permiten evaluar y comparar la viabilidad financiera del SFV frente a las tarifas eléctricas de referencia, para cada perfil de usuario analizado. Este caso base asume condiciones ideales: ausencia de costos financieros adicionales (por ejemplo, por financiamiento), operación continua sin interrupciones ni fallos, y estabilidad tarifaria y de incentivos durante todo el horizonte de análisis. Si bien simplifica ciertas incertidumbres, permite establecer un punto de partida robusto para el análisis económico y su posterior extensión mediante estudios de sensibilidad.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los indicadores económicos de rentabilidad mostrados en la Tabla 4, 5 y 6 indican diferencias significativas en la conveniencia del proyecto según el segmento considerado y la tasa de interés y CAPEX alternativos.

**Tabla 2**. Valores económicos clave para distintos tipos de usuarios. Caso Base: tasa de descuento 8%.

| | U. Residencial | U. comercial | U. Industrial |
|---|---|---|---|
| VAN [USD] | 2873 | 1762 | 19714 |
| TIR [%] | 22,8 | 10,5 | 12,5 |
| PAYBACK [Años] | 4 | 4 | 8 |

`

**Tabla 3**. Valores económicos clave para distintos tipos de usuarios. Caso alternativo: tasa de descuento 12%.

| | U. Residencial | U. comercial | U. Industrial |
|---|---|---|---|
| VAN [USD] | 1632 | -855 | 1724 |
| TIR [%] | 22,8 | 10,5 | 12,5 |
| PAYBACK [Años] | 4 | 4 | 8 |

**Tabla 4**. Valores económicos clave para distintos tipos de usuarios. Caso Alternativo: CAPEX: 1,2 USD/W

| | U. Residencial | U. comercial | U. Industrial |
|---|---|---|---|
| VAN [USD] | 2069 | -3999 | 5312 |
| TIR [%] | 16,3 | 3,6 | 9,0 |
| PAYBACK [Años] | 5 | 14 | 10 |

## 4. Conclusiones

El estudio demostró que para los distintos perfiles y considerando las condiciones locales de Santa Fe, considerando escenarios de inversión “base” propuestos, la PR se alcanza en todos los casos, evidenciado por el valor del LCOE frente a las tarifas convencionales vigentes. Esta situación positivista se da incluso en los escenarios alternativos que se evaluaron siendo, en general, el usuario residencial es más atractivo y recuperación rápida. Por su parte, el usuario comercial es quien más sensible resulta frente al aumento del CAPEX y la tasa de descuento, por lo que podría indicarse que requiere incentivos adicionales para ser rentable económicamente. El usuario industrial evaluado, recupera el capital invertido en plazos más amplios, sin embargo, ante cambios en el mercado sigue siendo rentable, con un VAN positivo y un TIR moderado, posicionándolo como una opción viable a mediano plazo.

## Referencias bibliográficas

Corporate Finance Institute - CFI Team. (2025, 09). *Levelized Cost of Energy (LCOE)*. From https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/levelized-cost-of-energy-lcoe/

EPESF. (2025, 06). *Cargo Ley 12692 - Incentivos y VIUG.* From https://epe.santafe.gov.ar/renovables/wp-content/themes/prosumidores/documentos/Cargo%20Ley%2012692%20-%20Incentivos%20y%20VUIG_2025-06.pdf

García, J., Martínez, L., Rodríguez, P., Fernández, A. . (2018). Análisis de la Paridad de Red en Sistemas Fotovoltaicos Residenciales en Argentina. *Revista de Energías Renovables de Argentina*.

Gobierno de la Provincia de Santa Fe. (2022, Oct. 12). *Decreto N. 332/2022.* From https://www.santafe.gov.ar/boletinoficial/ver.php?seccion=2022/2022-10-12avisos.html

Gobierno de la Provinicia de Santa Fe. (2024). *Programa Prosumidores 4.0.* From https://www.santafe.gov.ar/boletinoficial/ver.php?seccion=2024/2024-07-01decreto0889-2024.html

*NASA*. (2025). From NASA POWER Data Access Viewer [Online]: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Modelo Simplificado para la dispersión de cloro mediante simulación Monte Carlo

## Simplified Model for chlorine dispersion using Monte Carlo simulation

Presentación: 30/10/2025

**Delfina Apiz**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.
delfinaapiz@gmail.com

### Resumen

La estimación de concentraciones tras una fuga accidental de sustancia peligrosa constituye un desafío clave en el cálculo de distancias seguras, dada la complejidad y variabilidad de los factores involucrados. En este trabajo se desarrolla una metodología para obtener un modelo simplificado (MS) aplicable a la dispersión de cloro, gas denso y tóxico, bajo distintas condiciones de fuga. Se empleó DEGADIS como modelo de referencia (MR) y se incorporó la variabilidad meteorológica mediante simulaciones Monte Carlo. A partir de los mapas de concentración generados, se seleccionó un Mapa de Concentración Base (MCB) y, en función de éste, se derivaron relaciones que permiten estimar escenarios alternativos de forma ágil y confiable. Como aplicación, se evaluó el caso de una planta potabilizadora que almacena cloro presurizado, comprobando la validez del MS frente al MR. Este enfoque constituye una herramienta eficiente para el análisis de riesgos y la planificación de medidas de seguridad.

**Palabras clave:** Monte Carlo, Modelo simplificado, DEGADIS, Mapa de Concentración Base.

### Abstract

The estimation of concentrations following an accidental release of a hazardous substance represents a key challenge in the calculation of safety distances, given the complexity and variability of the factors involved. In this work, a methodology is developed to obtain a simplified model (SM) applicable to the dispersion of chlorine, a dense and toxic gas, under different release conditions. DEGADIS was employed as the reference model (RM), and meteorological variability was incorporated through Monte Carlo Simulations. From the generated concentration maps, a Base Concentration Map (BCM) was selected, and based on this, functional relationships were derived to estimate alternative scenarios in an agile and reliable manner. As an application, the case of a water treatment plant storing pressurized chlorine was evaluated, confirming the validity of the SM against the RM. This approach provides an efficient tool for risk analysis and the planning of safety measures.

**Keywords:** Monte Carlo, Simple model, DEGADIS, Base Concentration Map.

## 1. Introducción

Ante una fuga accidental de sustancias peligrosas, resulta esencial determinar las distancias seguras (DSs) respecto del punto de liberación, a fin de diseñar planes de acción adecuados. Sin embargo, la estimación de dichas distancias implica considerar variables que no pueden preverse con exactitud, tales como las condiciones meteorológicas y las características del escenario de fuga. La combinación de estas variables, sumada a la complejidad de los modelos de dispersión, dificulta el proceso de predicción.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Para abordar esta problemática, el presente trabajo emplea el método de simulación Monte Carlo (SMC), que permite manejar las variables estocásticas asociadas, como la dirección y velocidad del viento, en conjunto con el modelo de dispersión de gases densos DEGADIS, conformando el Modelo de Referencia (MR). A partir de esta integración, se desarrolló un modelo simplificado (MS) que compara los mapas de concentración generados bajo distintas condiciones de fuga con un Mapa de Concentración Base (MCB). Este modelo permite cuantificar el impacto del escenario accidental en función de la presión y del diámetro de fuga, facilitando la determinación de las distancias correspondientes a un valor umbral de concentración.

El estudio se centra en la dispersión de cloro ($Cl_2$), un gas tóxico y denso, utilizado ampliamente en la industria, lo que aumenta su probabilidad de provocar accidentes, que pueden generar graves consecuencias sobre la salud humana y el ambiente. El cloro constituye una materia prima básica para procesos industriales como el tratamiento de agua potable y piscinas, producción de compuestos orgánicos clorados, blanqueo en la industria papelera, entre otros. Se transporta y almacena como líquido presurizado en cilindros o tanques de acero, y en caso de fuga accidental, el cloro líquido se vaporiza rápidamente formando una nube densa que tiende a acumularse en zonas bajas, aumentando su peligrosidad para las personas presentes en el área afectada.

La inhalación de cloro puede provocar desde irritación ocular y respiratoria a bajas concentraciones, hasta edema pulmonar y la muerte a niveles superiores, siendo los valores críticos: IDLH de 10 ppm y los valores ERPG-2 y ERPG-3 de 3 y 20 ppm (60 min), respectivamente. Estas características convierten al cloro en una sustancia crítica en estudios de dispersión atmosférica y en la determinación de distancias seguras en escenarios de riesgo.

## 2. Materiales y métodos

La obtención de un MS para la dispersión de un tóxico, con significancia estadística contemplando las distribuciones de probabilidad de las variables involucradas, constituye un desafío complejo. Aquí se implementó una metodología que combina principalmente el uso de Ms. Excel y Matlab, con el objetivo de obtener el mapa de concentraciones de manera rápida y práctica, facilitando posteriormente la obtención del modelo deseado para la estimación de DSs ante una fuga de un gas denso, en este caso, cloro. La secuencia metodológica utilizada para este fin se sintetiza en la Figura 1.

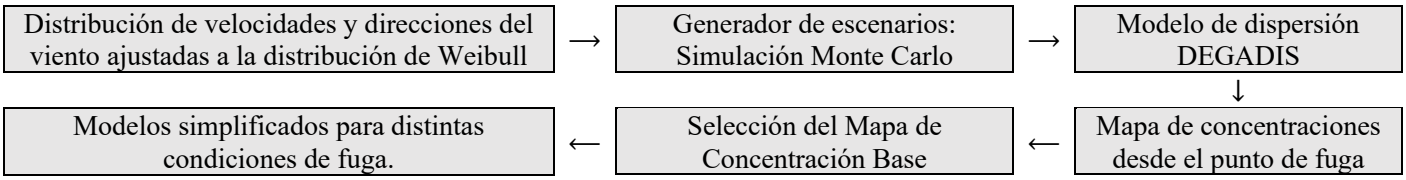



**Figura 1**. Metodología para la estimación de modelos subrogados dada la dispersión de gases densos.

A partir de los datos históricos meteorológicos recopilados para la ciudad de Rosario, se obtuvieron para cada dirección de viento, las velocidades ajustadas según la distribución de Weibull. Luego, se aplicó la SMC, para así generar un conjunto de escenarios representativos, mediante la implementación del modelo de dispersión DEGADIS. Con estos resultados, se construyeron mapas de concentraciones correspondientes al percentil 95, es decir, el valor de concentración que en cada punto de la zona afectada solo se supera en un 5% de los escenarios simulados. Se selecciona un Mapa de Concentración Base (MCB) para efectuar las comparaciones, considerando como escenario base la presión de fuga mínima y el diámetro de orificio máximo. Finalmente, se comparan relativamente los distintos mapas obtenidos, para obtener las funcionalidades que conforman el MS que capture la influencia de la presión y el diámetro de la fuga. A continuación, se detalla cada uno de los bloques presentados en la Figura 1.

### 2.1. *Variables estocásticas y simulación Monte Carlo*

Las variables ambientales son fundamentales para analizar el impacto de una fuga de una sustancia. Dada la imprevisibilidad de estas variables, se las analiza como un fenómeno estocástico, lo que hace necesario recurrir a bases de datos históricos y caracterizarlas mediante la obtención de distribuciones de probabilidad. Esta información permite la implementación de las SMC obteniendo un conjunto de escenarios ambientales representativos de la zona de estudio.

Las variables que más influyen en la dispersión son las direcciones y velocidades de viento, con las cuales también se puede estimar la estabilidad atmosférica, diferenciando los periodos de día y de noche. En este trabajo se seleccionó la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

condición diurna para las simulaciones. La información recopilada para este fin proviene del Servicio Meteorológico Nacional, referida a la ciudad de Rosario, localidad de la Provincia de Santa Fe.

Para la generación de los escenarios aleatorios a simular, se definieron las variables estocásticas siguiendo una secuencia de pasos. En primer lugar, se seleccionó la dirección del viento correspondiente, de acuerdo con la distribución de probabilidad ajustada a los datos históricos. Posteriormente, y considerando la condición del día y la dirección previamente determinadas, se procedió a la obtención de la velocidad de viento. Para ello, la base de datos histórica fue dividida en 16 sectores direccionales, y dentro de cada partición se analizó la distribución de probabilidad de la velocidad. La distribución de Weibull (que posee dos parámetros) es el estándar para modelar las distribuciones de velocidades debido a su flexibilidad para modelar diferentes patrones de viento.

Finalmente, cada escenario aleatorio generado quedó caracterizado por tres variables principales: dirección y velocidad del viento y la estabilidad atmosférica (estimada a partir de la especificación de las variables anteriores). Se consideraron un total de 10.000 escenarios aleatorios, abarcando una amplia variabilidad de condiciones posibles.

*2.2. Escenarios accidentales*

La estimación de la tasa de liberación a la atmosfera de cloro se efectúa considerando flujo bifásico a través de un orificio (DIERS, 1986), requiriendo variables relacionadas a las propiedades de la sustancia, las condiciones de P-T y el tamaño de fuga.

Para definir los escenarios accidentales, se consideran tres presiones internas comúnmente asociadas al almacenamiento de cloro: $P_1 = 6{,}01\ bar$, $P_2 = 6{,}51\ bar$ y $P_3 = 7{,}01\ bar$ (Li et al., 2023). En cuanto a la definición adecuada de los posibles diámetros de orificio en un escenario de fuga, al ser una variable con incertidumbre, la selección de sus valores debe realizarse cautelosamente considerando la frecuencia de ocurrencia de los distintos tamaños de apertura en recipientes de cloro. Por lo tanto, se toman los valores aconsejados por la metodología HSE (HSE, 2017) y se particiona esta variable en 3: $d_1 = 13\ mm$, $d_2 = 25\ mm$ y $d_3 = 50\ mm$.

A partir de estas combinaciones de presiones y diámetros, junto con los 10.000 escenarios meteorológicos aleatorios, se configuró el conjunto de datos necesario para las simulaciones del MR. Este enfoque garantiza que cada escenario considere la interacción entre las condiciones de fuga y la variabilidad ambiental.

*2.3. Modelo de dispersión DEGADIS*

Muy sucintamente, el modelo DEGADIS describe la distribución de la concentración de la nube de gas con la Ec. (1):

$$C(x,y,z) = \begin{cases} C_c(x) \cdot \exp\left[-\left(\dfrac{|y| - b}{S_y}\right)^2 - \dfrac{z^{1+n}}{S_z}\right], |y| > b(x) \\ C_c(x) \cdot \exp\left[-\dfrac{z^{1+n}}{S_z}\right], |y| \leq b(x) \end{cases} \quad (1)$$

Donde $C_c(x)$ es la concentración en el eje central a nivel del suelo. $S_z$ y $S_y$ son los coeficientes de dispersión vertical y horizontal, respectivamente; y $b(x)$ es el ancho efectivo de la fuente (Spicer & Havens, 1989).

*2.4 Formulación de los modelos simplificados*

Los mapas de concentración se generan para cada escenario accidental (tasa másica de fuga) considerando como variables de caracterización la presión y el diámetro de orificio. Cada escenario meteorológico se simula dada una tasa de fuga ubicada en el origen de una grilla espacial definida en coordenadas polares. Las concentraciones obtenidas se almacenan para cada punto de la grilla (distancia, ángulo) obteniéndose un conjunto de 10.000 concentraciones. Para representar este conjunto mediante un único valor con respaldo estadístico, se adopta el percentil 95. Esta elección es habitual, ya que constituye un criterio conservador, cubriendo las situaciones más severas sin imponer exigencias técnicas o económicas excesivas al determinar las distancias de seguridad (DS).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Para evaluar la influencia de las variables que caracterizan a los escenarios accidentales, se define el Mapa de Concentración Base (MCB), escenario accidental de referencia, considerando la menor presión interna y el mayor diámetro de fuga considerado: $P_1 = 6{,}01\ bar$ y $d_3 = 50\ mm$. Esta elección corresponde a criterios conservadores: la menor presión interna representa el caso menos severo en cuanto a energía de liberación, generando un punto de referencia seguro a partir del cual escalar los escenarios más críticos; y el mayor diámetro de fuga implica la máxima tasa de liberación de masa, condición que define la pluma de dispersión más representativa para establecer correlaciones.

Inicialmente, se analiza la influencia de la presión de fuga, comparando relativamente los mapas de concentraciones generados por fugas a distintas presiones internas con respecto al MCB, definiéndose así la variable $RP_{MR1i}$ según la Ec. (2):

$$RP_{MR1i} = \frac{conc_{P_i d_j} - conc_{P_1 d_j}}{conc_{P_1 d_j}} \tag{2}$$

De manera análoga, se procede a comparar los mapas de concentración considerando la variación del diámetro de orificio para una misma presión interna dada, definiendo así la variable $RD_{MRj3}$ con la Ec. (3):

$$RD_{MRj3} = \frac{conc_{P_i d_j}}{conc_{P_i d_3}} \tag{3}$$

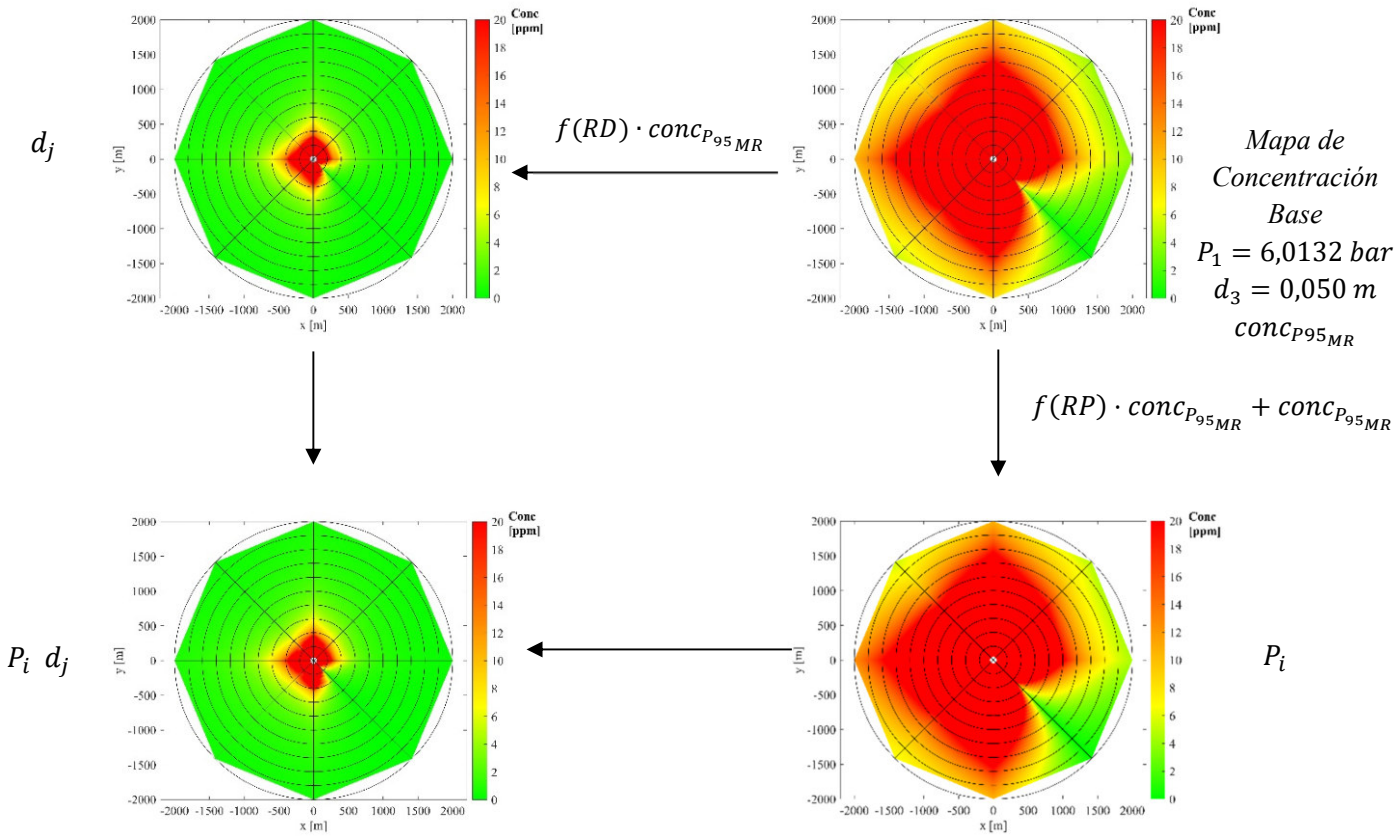



**Figura 2**. Procedimiento de obtención de mapa de concentraciones a diversas condiciones accidentales partiendo del MCB.

Se realizan estas comparaciones a los efectos de comprobar si existen relaciones sencillas y válidas $RP$ y $RD$ en función solo de la presión interna y el diámetro de fuga, respectivamente, a lo largo y ancho de cada mapa de concentración analizado. Luego, de verificarse estas dos relaciones, sería posible plantear dos modelos sencillos: un modelo simplificado $RP$ que permite obtener un mapa de concentración para distintas condiciones de presiones internas, y un modelo simplificado $RD$, que permite obtener un mapa de concentración para distintos diámetros de fuga, ambos en función del MCB, como se indica en la Figura 2.

## 3. Resultados y discusión

3.1. *Obtención de las expresiones matemáticas que conforman el MS*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

A partir de los distintos mapas de concentración obtenidos a distintas presiones y diámetros de orificio, se pretende verificar las hipótesis propuestas. Para ello, las simulaciones del MR y la generación de los mapas de concentraciones, procedimientos efectuados mediante programación matemática en Matlab, se vuelcan en planillas de cálculo de Ms. Excel. En este entorno, se evalúan las relaciones propuestas (RD y RP), cubriendo todos los puntos en los que fueron discretizados los mapas de concentraciones, y todo el rango de valores de la presión interna y el diámetro de fuga considerados. Se concluye que la relación $RD$ entre un mapa de concentraciones a un diámetro de fuga $d_j$, con respecto al MCB, se puede ajustar con una función polinómica de grado 2, como podemos observar en la Figura 3.

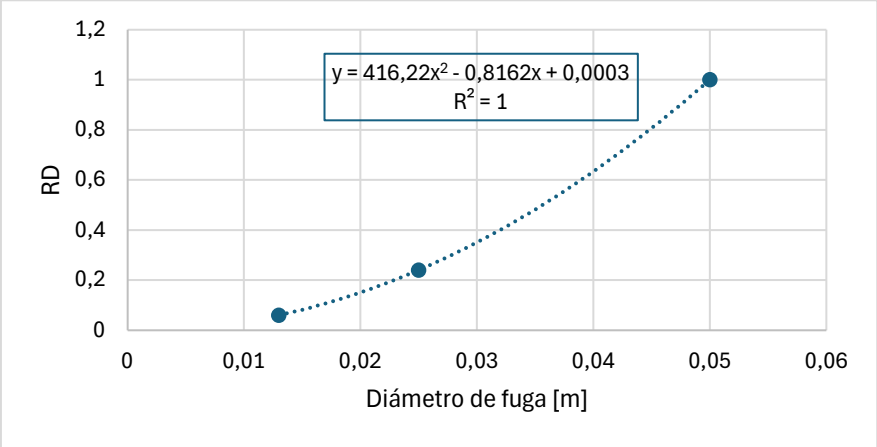



**Figura 3**. Relación de los mapas de concentración para distintos diámetros de fuga.

La expresión de la función polinómica de grado 2 que describe la relación entre los mapas de concentración de la zona de impacto, con el diámetro de fuga es descrita por la Ec. (4):

$$RD_{MS} = 416{,}22\, d^2 - 0{,}8162\, d + 0{,}0003 \tag{4}$$

En el caso de la relación $RP$, se observa una tendencia lineal; aunque para cada diámetro hay variaciones en la pendiente y en la ordenada de la función, como se muestra en la Figura 4:

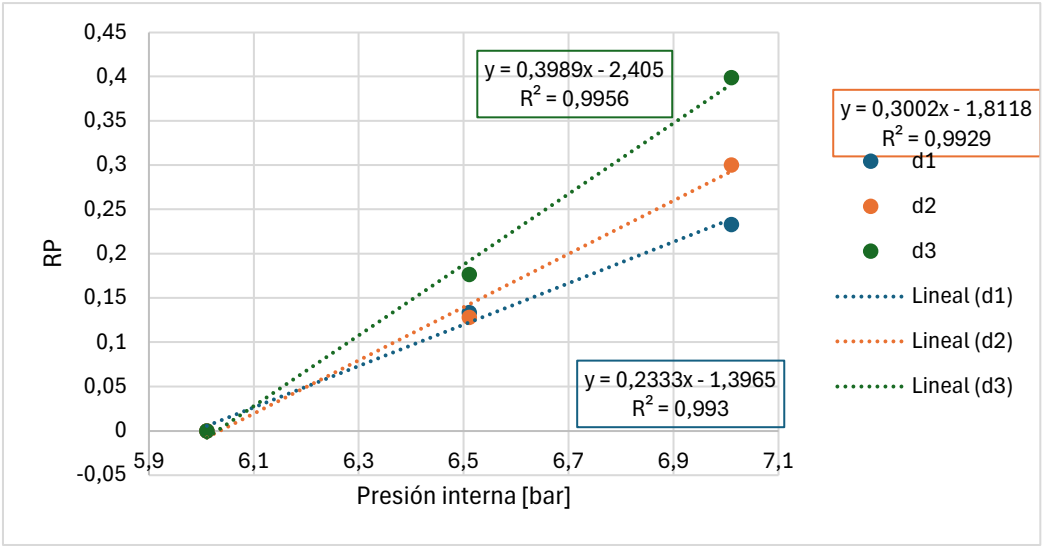



**Figura 4**. Relación de los mapas de concentración para distintas presiones internas.

Se propone entonces la relación de la pendiente y la ordenada de las relaciones RP con el diámetro de fuga, obteniendo las tendencias observadas en la Figura 5a y b. Es decir, la pendiente y la ordenada de la relación $RP$ pueden ajustarse linealmente con respecto al diámetro de fuga como lo indican las Ec. (5) y (6).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

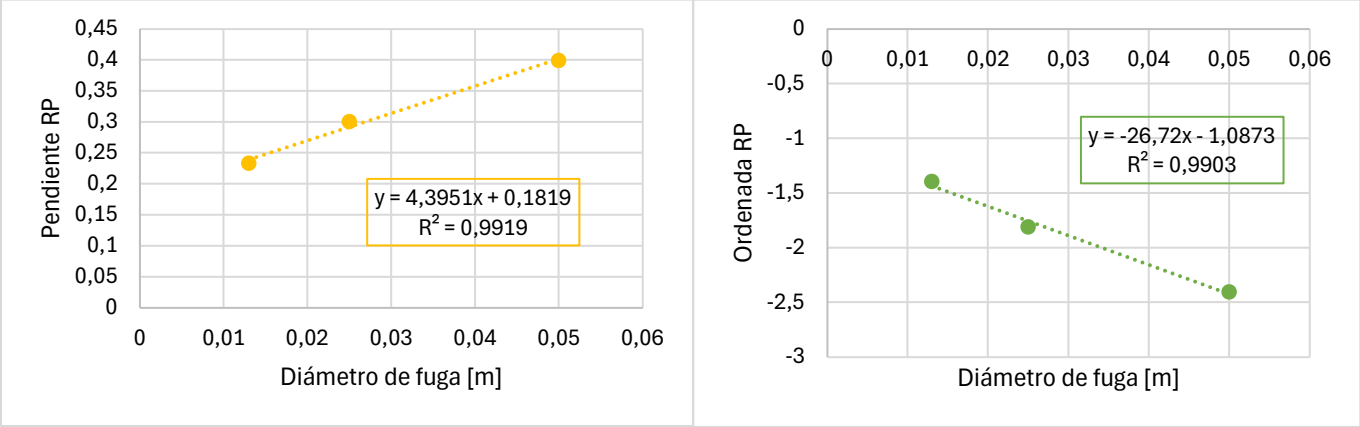



**Figura 5**. (a) Relación de las pendientes de RP con el diámetro de fuga y (b) Relación de las ordenadas de RP con el diámetro de fuga.

$$m_{RP} = 4{,}3951\, d + 0{,}1819 \quad (5)$$

$$h_{RP} = -26{,}72\, d - 1{,}0873 \quad (6)$$

Por lo tanto, la relación $RP$ se puede expresar como la Ec. (7).

$$RP_{MS} = m_{RP} P + h_{RP} \quad (7)$$

3.2. *Caso de estudio*

En una planta potabilizadora de agua se almacena cloro presurizado a 7,01 bar. Se evalúa una potencial falla en las conexiones del tanque considerando un diámetro de fuga de 13 mm. El establecimiento urbano más cercano se encuentra a 1450 m (dirección Oeste). Ubicando esas coordenadas en el MCB se reporta una concentración de 19,8 ppm muy cercana al valor umbral ERPG-3 (20 ppm), límite por encima del cual pueden presentarse efectos adversos graves en la población expuesta.

Sin embargo, las condiciones de fuga difieren del MCB, por tanto a este dato se le deben aplicar los factores de relación propuestos en los MS. Inicialmente, se aplica la corrección de presión $RP$ (Ec. 7) (MCB 6,01 bar → escenario a evaluar 7,01 bar), empleando los valores de pendiente y ordenada para el diámetro de MCB (50 mm) (traslación vertical Figura 2). En este punto, la concentración obtenida a 1450 m corresponde al escenario accidental 7,01 bar y 50 mm, por lo que en una segunda instancia de cálculo se aplica el factor de corrección de diámetro $RD$ (Ec. 4), para obtener el escenario real (7,01 bar y 13 mm) (desplazamiento horizontal Figura 2). El valor obtenido por este procedimiento simplificado es 1,7 ppm, mientras que el estimado empleando el MR es de 15 ppm, mostrando una buena concordancia y validando la aplicabilidad del MS para estimaciones rápidas en escenarios de emergencia.

## 4. Conclusiones

Los modelos simplificados demostraron ser una herramienta ágil y confiable para estimar concentraciones y distancias seguras en escenarios de fuga de cloro, reduciendo el costo computacional del análisis de múltiples accidentes potenciales. Este enfoque, además de fortalecer la planificación de emergencias y apoyar la toma de decisiones en seguridad industrial y ambiental, ofrece estimaciones conservadoras que pueden servir de referencia en criterios normativos. Si bien el estudio se centró en cloro, la metodología es transferible a otros gases densos, cuya evaluación se plantea como una línea de trabajo futura para ampliar el alcance y la aplicabilidad de esta propuesta en la gestión de riesgos industriales.

## Referencias bibliográficas

DIERS. (1986). Emergency Relief Systems for Runaway Chemical Reactions and Storage Vessels: A Summary of Multiphase Flow Models.

HSE (2017). *Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments*.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Li, Y., Wang, Y., Lai, Y., Shuai, J., & Zhang, L. (2023). Monte Carlo-based quantitative risk assessment of parking areas for vehicles carrying hazardous chemicals. *Reliability Engineering & System Safety*, *231*, 109010. https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.109010

Spicer, T., & Havens, J. (1989). *User's Guide for the Degadis 2.1 Dense Gas Dispersion Model* [Reporte].

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Educación ambiental en ingeniería con metodología de Aprendizaje Basada en Proyectos

## Environmental Education in Engineering with Project-Based Learning Methodology

Presentación: 30/10/2025

**Esteban Montalvo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
emontalvo@frsf.utn.edu.ar

**Martina Carraro**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
marticarraro6@gmail.com

**Guillermina Lesca**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
guillerminalesca@gmail.com

**Luis Utz Goettig**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
luisutzgoettigutn@outlook.com

### Resumen

El presente trabajo presenta una actividad que fue llevada a cabo en la asignatura Química General de las carreras de Ingeniería Mecánica, en Energía Eléctrica y Civil de la Facultad Regional Santa Fe. El objetivo fue implementar una metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), para que los estudiantes identificaran y analizaran problemáticas ambientales regionales vinculadas a su perfil profesional. Los alumnos formaron equipos que trabajaron de manera ágil, integrando contenidos con aspectos ambientales y regulatorios, y presentaron sus conclusiones en un evento institucional abierto. La evaluación se realizó mediante una Lista de Cotejo, aplicada por docentes, investigadores, becarios y representantes de instituciones externas. Los resultados muestran un desempeño sólido en la organización escrita y el uso de fuentes, aunque con variabilidad en el análisis crítico y las conclusiones. Asimismo, se demuestra el valor del ABP para fomentar competencias técnicas y un aprendizaje contextualizado orientado al desarrollo sostenible.

**Palabras clave:** Educación ambiental, Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), Ingeniería

### Abstract

This paper presents an activity that was carried out in the General Chemistry course for the Mechanical, Electrical, and Civil Engineering programs at the Regional Faculty of Santa Fe. The objective was to implement a Project-Based Learning (PBL) methodology so that students could identify and analyze regional environmental problems related to their professional profiles. The students formed teams that worked in an agile manner, integrating content with environmental and regulatory aspects. They presented their conclusions at an open institutional event. The evaluation was conducted using a Checklist, applied by professors, researchers, fellows, and representatives from external institutions. The results show a solid performance in written organization and the use of sources, although with variability in critical analysis and conclusions.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Likewise, the value of PBL is demonstrated for fostering technical skills and a contextualized learning approach oriented toward sustainable development.

**Keywords:** Environmental education, Project-Based Learning (PBL), Engineering

## 1. Introducción

En la actualidad, el aumento de las problemáticas vinculadas al medio ambiente plantea nuevos desafíos para la formación universitaria, especialmente en las ingenierías, donde resulta sustancial preparar profesionales competentes de afrontar problemas interdisciplinarios con creatividad, pensamiento crítico y compromiso social. En este sentido, se discute replantear las metodologías de enseñanza, que favorezca no solo la adquisición de conocimientos científicos, sino también su integración con problemáticas reales del entorno.

La propuesta presentada en este trabajo busca contribuir a la formación de estudiantes de Ingeniería mediante la implementación de estrategias de aprendizaje basado en proyectos (ABP) (Barrows, 2000; Rodríguez, 2004). Esta metodología se apoya en un modelo de enseñanza centrado en el estudiante, donde asume un rol activo en su proceso de aprendizaje, mientras que el docente se convierte en mediador y facilitador, guiando la construcción de competencias a través de actividades prácticas y colaborativas. A su vez, con la incorporación de métodos ágiles de enseñanza y aprendizaje (Agile Driven Education, ADE), se promueve la comunicación, la autoorganización y la innovación, mejorando el desempeño de los equipos (Adkins, 2010; Bollati, 2022).

A través del APB se busca que los alumnos desarrollen competencias vinculadas a la identificación y análisis problemáticas ambientales regionales vinculadas a su perfil profesional, fomentando una cultura científica crítica, alfabetización ambiental y compromiso ético con la sociedad y el medio ambiente. Estos elementos son esenciales para formar ingenieros capaces de diseñar soluciones responsables y sostenibles (Kuhn, 2000).

Dentro de este marco, la experiencia se llevó a cabo en la asignatura Química General, dictada en el primer año de las carreras de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Civil de la Facultad Regional Santa Fe. A través de la conformación de grupos ágiles y la aplicación del ABP, los estudiantes trabajaron en la identificación y análisis de problemáticas ambientales regionales, desarrollando competencias que favorecen el diseño de soluciones responsables y sostenibles.

## 2. Materiales y métodos

El desarrollo de la actividad fue en el marco de la asignatura Química General para las carreras Ingeniaría Mecánica, Ingeniería en Energía Eléctrica e Ingeniería Civil, dictada en el primer año de estas en la Facultad Regional Santa Fe. Esta se implementó bajo la metodología de aprendizaje basado en proyectos (ABP), con el objetivo de integrar los contenidos disciplinares de química sobre problemáticas ambientales relevantes para la región.

Las problemáticas fueron seleccionadas por los estudiantes de acuerdo con el vínculo con el perfil profesional de sus carreras. Según la cantidad de estudiantes de cada comisión, se organizaron grupos ágiles de 4 a 6 integrantes, siendo la elección del tema realizada de manera consensuada dentro de cada grupo. En todo momento se presentó acompañamiento docente, sumando la posibilidad de realizar consultas a profesionales de distintas áreas como también docentes investigadores de la Facultad. Asimismo, se les brindó a los grupos un listado de tutores disponibles para brindar sugerencias e información sobre los temas seleccionados.

El contenido del trabajo debía incluir:

- ✓ Identificación de sustancias químicas y descripción de procesos asociados.
- ✓ Vinculación con contenidos de otras asignaturas del ciclo básico y/o superior.
- ✓ Aspectos regulatorios y de gestión ambiental.
- ✓ Posibles soluciones, recomendaciones o propuestas de mejora.

La estructura de la presentación debía contemplar los siguientes apartados:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

1. Tema y título del trabajo.
2. Grupo e integrantes.
3. Carrera y comisión.
4. Introducción al tema.
5. Desarrollo de la problemática investigada.
6. Conclusiones, recomendaciones y/o sugerencias.
7. Referencias bibliográficas.

Para la exposición de los trabajos, se le concedió a cada grupo decidir que recursos audiovisuales utilizar, como ser fotografías, videos, música o testimonios, considerando siempre que estos contribuyeran a la claridad y calidad del mensaje a transmitir. Las presentaciones se realizaron en eventos institucionales abiertos donde, además de alumnos y docentes, se sumaron aquellos profesionales y docentes investigadores invitados o interesados en el tema. La duración máxima de exposición para cada grupo era de 10 minutos. Pasados estos, se sumaban 5 minutos para preguntas y respuestas. Los encargados de evaluar estas presentaciones fueron becarios, docentes, investigadores y representantes de instituciones externas vinculadas con la gestión ambiental gubernamental y del sector privado.

La evaluación de las presentaciones se llevó a cabo a través de una Lista de Cotejo (LC) diseñada por la cátedra, que se presenta en la Tabla 1, considerándose en su elaboración criterios vinculados con la originalidad de la presentación, a la adecuación del tema desarrollado, la profundidad de la investigación, el análisis de referencias bibliográficas y otras fuentes, y el uso de recursos informáticos y de comunicación. Cada uno de estos criterios fue evaluado según el cumplimiento o no de estos.

Asimismo, la LC incluía una última columna de observaciones, donde los evaluadores podían indicar aquellos detalles de las presentaciones que consideraron importantes para destacar, según el criterio de cada uno. Al final de la lista, por debajo de la tabla, se podían dejar expresados comentarios generales y sugerencias a modo de retroalimentación para cada grupo de los alumnos, de forma que puedan mejorar sus presentaciones de cara al futuro, o bien ser felicitados por estas. La calificación asociada a la evaluación de los criterios daba como Aprobado el trabajo con seis (6) aciertos, Competente con siete (7) u ocho (8), y Avanzado con nueve (9) a once (11) aciertos.

**Tabla 1.** Lista de Cotejo (LC) para evaluar la ACNP

| No | Criterios | Cumplimiento | | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| | | Sí | No | |
| 1 | El trabajo cumple con el formato acerca del contenido (autores, título, tema, introducción, desarrollo y conclusiones). | | | |
| 2 | El trabajo tiene una buena edición, con un correcto uso de la gramática (buena ortografía, signos de puntuación, acentuación). | | | |
| 3 | La información presentada es actual, tiene un lenguaje sencillo y se da a conocer el objetivo específico del trabajo que resulta de interés para (estudiantes, docentes y no docentes) universitarios y público en general. | | | |
| 4 | La diversidad de materiales y fuentes consultadas son adecuados. | | | |
| 5 | Se hace uso de recursos técnicos (aplicaciones, softwares, gráficos, tablas, imágenes) adecuados. | | | |
| 6 | El video tiene una buena dinámica (sin cortes o interrupciones) y se ajusta al tiempo sugerido de la presentación (alrededor de 6 minutos de duración). | | | |
| 7 | La dicción de los oradores es correcta. Se hace buen uso del lenguaje oral. | | | |
| 8 | Específicamente se hace referencia a compuestos, reacciones o procesos químicos relacionados con el ambiente. | | | |
| 9 | Específicamente se hace referencia a legislaciones, normativas o proyectos de las instituciones o gobiernos de la Región. | | | |
| 10 | Específicamente se hace referencia a actividades, acciones o al compromiso que tienen los estudiantes universitarios y futuros profesionales con el cuidado del medio ambiente. | | | |
| 11 | Las conclusiones o sugerencias del trabajo dan lugar a la reflexión y/o motivan a continuar investigando y adquiriendo conocimientos sobre el tema. | | | |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 3. Resultados y discusión

Los criterios de evaluación de la LC fueron organizados en tres ejes: Formato escrito (criterios 1 a 4), Presentación/Exposición (criterios 5 a 7) y Análisis y conclusión (criterios 8 a 11).

Se presentaron cuatro categorías de evaluadores: docentes de la cátedra, docentes de la facultad de otras cátedras, especialistas en temática ambiental, empresarios y funcionarios gubernamentales del área ambiental, y, por último, becarios que colaboran en la asignatura.

En Ingeniería Mecánica, los resultados obtenidos (Figura 1) presentan un desempeño alto y uniforme en el eje de Formato escrito, siendo los valores cercanos al máximo en todas las categorías de evaluadores, destacando la valoración positiva por parte de los docentes de la facultad y los especialistas externos. Por otra parte, en el eje de Presentación/Exposición, se registraron altos niveles, aunque también una disminución en la valoración por parte de docentes de la cátedra y becarios. En el último eje, Análisis y conclusión, las evaluaciones fueron más dispersas, presentándose calificaciones bajas por parte del equipo docente de la cátedra, y altas por parte de los becarios.

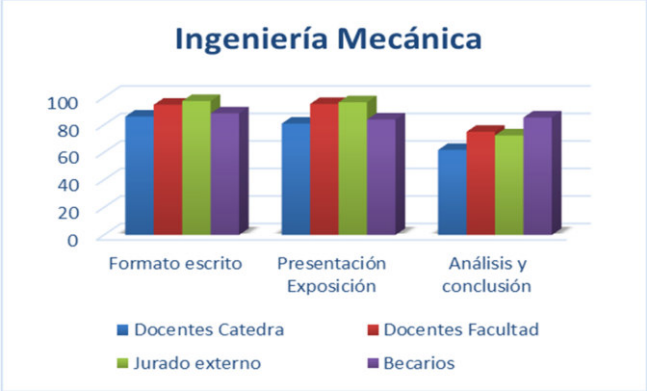



**Figura 1.** Resultados de las LC registrados en Ingeniería Mecánica, según los diferentes grupos de evaluadores.

En Ingeniería en Energía Eléctrica (Figura 2), el Formato escrito fue consistente y con gran valoración por todos los grupos, El eje de Presentación/Exposición presentó mayores diferencias: docentes de la cátedra y jurados externos asignaron mayor puntaje, mientras que los docentes de la facultad y becarios mostraron resultados menores. En el último eje, los resultados fueron más uniformes, siendo estos de mediana valoración.

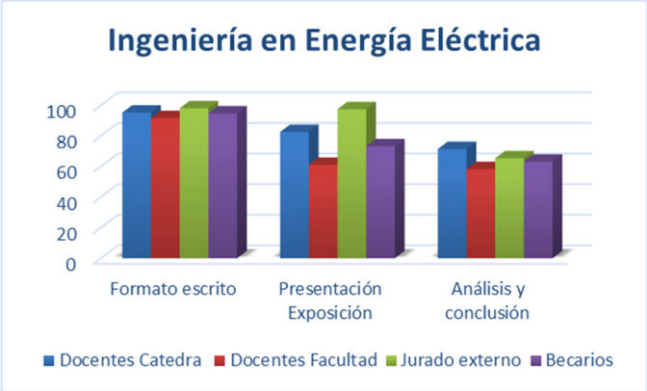



**Figura 2.** Resultados de las LC registrados en Ingeniería en Energía Eléctrica, según los diferentes grupos de evaluadores.

Por último, Ingeniería Civil (Figura 3) presentó muy buenos resultados y uniformes entre todos los tipos de evaluadores en el eje de Formato escrito, con una ligera disminución de apreciación por parte del jurado externo. En la Presentación/Exposición, se detectó un patrón más dispar: los docentes de catedra y de la facultad valoraron muy bien el

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

trabajo, mientras que el jurado externo fue más exigente. El eje de Análisis y conclusión recibió las calificaciones más altas comparadas a las previas ingenierías, indicando un buen nivel de integración de los contenidos y propuestas presentadas.

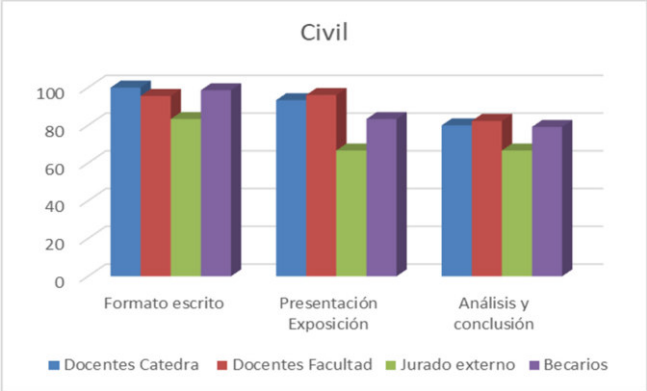



**Figura 3.** Resultados de las LC registrados en Ingeniería Civil, según los diferentes grupos de evaluadores.

En conjunto, los resultados indican que la estrategia implementada en las tres ingenierías logró alcanzar un alto nivel de organización y presentación escrita, constituyendo una fortaleza del proyecto. Aun así, las diferencias observadas en la calidad de las presentaciones y exposiciones y, en la solidez de los análisis y conclusiones, sugieren que aún es necesario reforzar las competencias vinculadas a la comunicación y críticas de los estudiantes.

Las variaciones registradas en el eje de Análisis y conclusión muestran que los estudiantes tienden a desenvolverse con mayor seguridad en aspectos formales y descriptivos, pero presentan mayores dificultades al momento de integrar los contenidos disciplinares en aplicaciones vinculadas a los perfiles de sus carreras, como en este caso son las propuestas de acción concretas. Esto plantea la necesidad de fortalecer las instancias de orientación metodológica e incorporación de pautas más claras para la elaboración de conclusiones y recomendaciones, incentivando mayor profundidad en el razonamiento y proyección práctica más sólida.

## 4. Conclusiones

La implementación de la estrategia de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) en la asignatura Química General, combinada con la organización en equipos ágiles, demostró ser una herramienta eficaz para promover la integración de contenidos disciplinares con problemáticas ambientales reales, vinculadas al perfil profesional de los estudiantes de ingeniería. Asimismo, se concluye que el uso del ABP fortalece el aprendizaje autónomo y contextualizado, aunque su efectividad depende en gran medida del acompañamiento docente y de la participación de los alumnos en la dinámica grupal.

Los resultados obtenidos a partir de la lista de cotejo evidencian un alto nivel de cumplimiento en el Formato escrito, con presentaciones bien estructuradas y con un adecuado manejo de las fuentes bibliográficas y de los aspectos normativos.

Por otra parte, si bien las valoraciones de Presentación/Exposición fueron positivas, se detectaron diferencias leves entre los distintos grupos de evaluadores, lo que sugiere la necesidad de fortalecer las competencias comunicacionales y orales de los estudiantes.

El eje de Análisis y conclusión mostró mayor variabilidad, evidenciando que la capacidad de integrar conocimientos, proponer soluciones y reflexionar críticamente aún depende de factores como la dinámica interna de los grupos, el acompañamiento docente y el grado de vinculación de los estudiantes con el tema elegido.

Finalizadas las exposiciones, los alumnos, a través de sus comentarios, retroalimentaron la actividad de manera positiva, proporcionando también sugerencias de mejora. Esta retroalimentación valiosa justifica la continuidad de la actividad en futuras cohortes, facilitando la incorporación de los ajustes propuestos por los estudiantes para optimizar la metodología.

Por otra parte, esta experiencia hizo posible constatar la importancia de involucrar actores externos en la evaluación, ya que su mirada complementaria aporta realismo y relevancia a la propuesta. El diálogo entre el ámbito académico, el sector profesional y las instituciones gubernamentales enriquece el proceso formativo, al tiempo que ofrece a los estudiantes una

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

visión más amplia de los desafíos ambientales y de las expectativas que enfrentan como futuros ingenieros. Esta articulación constituye, sin duda, un valor agregado de la propuesta y un aspecto clave a consolidar en futuras implementaciones.

Desde nuestra visión como estudiantes avanzados, que colaboramos en actividades de docencia e investigación, representa una oportunidad para adquirir habilidades de comunicación frente a alumnos, impartir contenido académico, evaluar aprendizajes a través de taxonomías, recopilar datos de investigación, organizar equipos agiles y manejar estrategias de evaluación con rúbricas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los Proyectos de Investigación PID TETCFE0010163TC y PID FETETCI354 y de la UTN Regional Santa Fe. Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario (UTN-FRRo) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por sus apoyos financieros al congreso. También agradecer a los becarios de investigación de ambos proyectos por su contribución a la actividad, siendo los estudiantes: Eric Caberos, Facundo Guglielmone, Agustín Perotti, Mateo Imaz, Pilar Lequi, Gonzalo Morel.

## Referencias bibliográficas

Adkins, L. (2010). Coaching Agile Teams: A Companion for ScrumMasters, Agile Coaches, and Project Managers in Transition Addison-Wesley Signature Series (Cohn). Nueva York: Addison-Wesley.

Barrows, H. (2000). Problem-Based Learning Applied to Medical Education. Springfield, IL: SIU: School of Medicine.

Bollati, V.A., Arias, M., Sandobal, V. y Cuenca, L. (2022). "Una estrategia ágil de enseñanza-aprendizaje", Actas del 10mo Congreso Nacional de Ingeniería Informática / Sistemas de Información, Facultad Regional Concepción del Uruguay.

Rodríguez, J. (2004). El aprendizaje basado en problemas. Madrid: Editorial Médica Panamericana.

Khun, D. (2000). Metacognitive Development. Sage Publications Inc. 9 (5).,178-181

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Reconquista

# Análisis de dosis de fertilizante líquido aplicado por camiones cisterna en entornos agrícolas del norte de Santa Fe

## Analysis of liquid fertilizer doses applied by tanker trucks in agricultural environments in northern Santa Fe

Presentación: 30/10/2025

**Francisco Dominguez**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
Estación Experimental Agropecuaria Reconquista, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA Reconquista, INTA), Reconquista, Santa Fe, Argentina
fdominguez2467@comunidad.frrq.utn.edu.ar

**Lucas Damián Snaider**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
Estación Experimental Agropecuaria Reconquista, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA Reconquista, INTA), Reconquista, Santa Fe, Argentina
lsnaider2324@comunidad.frrq.utn.edu.ar

### Resumen

Este trabajo analiza la aplicación de fertilizante líquido (digestato) con camiones cisterna en campos agrícolas del norte de Santa Fe. El objetivo fue evaluar diferentes metodologías de medición de dosis aplicadas y su uniformidad, proponiendo un protocolo de medición que permita validar y mejorar la práctica. Se compararon dos disposiciones de bandejas colectoras: una con bandejas pequeñas en mayor número y otra con bandejas grandes en menor cantidad, complementadas con datos de GPS para estimar la dosis global promedio. Los resultados indicaron que las bandejas pequeñas ofrecieron valores más cercanos al promedio global y menor error, evidenciando mayor exactitud. En cuanto a la distribución transversal, los coeficientes de variación no mostraron tendencias claras, por lo que se requieren nuevas mediciones. El protocolo constituye un aporte metodológico para optimizar la gestión de la fertilización orgánica líquida.

**Palabras clave:** Digestato, Fertilización Líquida, Medición de Dosis, Uniformidad de Aplicación.

### Abstract

This study analyzes the application of liquid fertilizer (digestate) using tanker trucks in agricultural fields in northern Santa Fe. The objective was to evaluate different methodologies for measuring applied doses and their uniformity, proposing a measurement protocol that allows for the validation and improvement of the practice. Two collection tray arrangements were compared: one with a greater number of small trays and another with a smaller number of large trays, complemented by GPS data to estimate the average overall dose. The results indicated that the small trays offered values closer to the overall average and lower error, demonstrating greater accuracy. Regarding cross-sectional distribution, the coefficients of variation did not show clear trends, so further measurements are required. The protocol constitutes a methodological contribution to optimize the management of liquid organic fertilization.

**Keywords:** Digestate, Liquid Fertilization, Dose measurement, Application Uniformity.

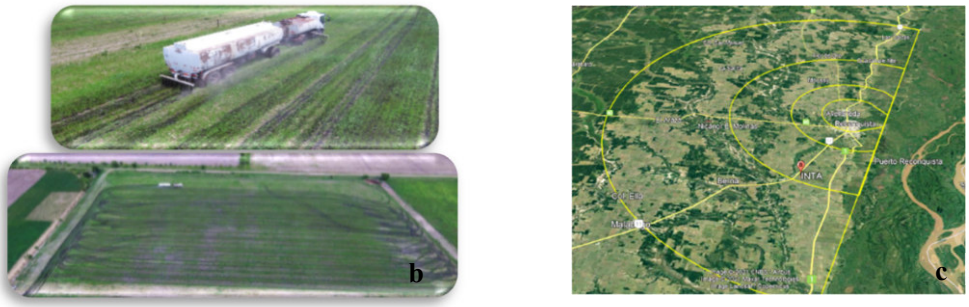
AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

En el norte de la provincia de Santa Fe se observa un auge en la utilización de prácticas productivas agropecuarias tendientes al uso de residuos orgánicos, provenientes de otros sistemas productivos, como fertilizantes para tierras destinadas a producción agropecuaria (figuras 1a y 1b). En gran parte, los residuos utilizados son líquidos y se aplican de manera directa a los lotes de producción. Este tipo de prácticas productivas son parte de un nuevo enfoque en agricultura, representando una excelente posibilidad de reducción de costos y de desarrollo de economía circular que colabora en una transición hacia sistemas productivos socio-ambientalmente responsables. Diversos ensayos agronómicos llevados adelante en la zona demuestran que muchos de estos productos líquidos presentan excelentes propiedades para ser utilizados como fertilizantes. Mieres et al. 2023 analizaron la aplicación de digerido en suelos agrícolas y ganaderos de Santa Fe, mostrando mejoras en la fertilidad y la productividad forrajera. También se detectaron mejoras en los niveles disponibles de N, P y K (Nitrógeno, Fósforo y Potasio, respectivamente) en suelo y aumentos en el rendimiento de trigo y soja de segunda (Mieres et al., 2021). En entornos de producción ganadera las mejoras se hicieron presentes dado que la aplicación de digestato permitió una mayor productividad en alfalfa y disponibilidad de nutrientes en el suelo (Mieres et al., 2024).

En la región existe una planta productora de biogás a partir de biodigestores que como residuo genera un producto llamado “digestato”. Este producto presenta excelentes propiedades como fertilizante orgánico (Mieres et al., 2021) y es utilizado en zonas rurales cercanas a su área de influencia (figura 1c). Se sabe que para que la logística de traslado del producto a los campos sea viable económicamente la zona de utilización agrícola debe encontrarse en un radio no mayor a los 40 km de radio respecto del punto de producción del desecho industrial. De acuerdo con la capacidad de producción de digerido de la planta y la realidad productiva actual, existen 150.000 hectáreas potenciales que podrían aprovechar los beneficios de la fertilización con este tipo de subproductos industriales.

El hecho de que la aplicación de estos abonos se encuentre en un rápido crecimiento, provocó que el desarrollo de las tecnologías relacionadas no acompañe el ímpetu de los productores que ven los beneficios de su uso. Los sistemas actuales de aplicación mecanizada de abonos orgánicos a campo necesitan ser mejorados, tanto en lo que respecta a la manera en la que estos abonos son aplicados al terreno, así como también el grado de precisión y adaptabilidad que se logra en su dosificación. En este sentido, en la Facultad Regional Reconquista de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) se viene trabajando en el proyecto PID: “Desarrollo de alternativas de mecanización para distribución y aplicación de abonos orgánicos líquidos en sistemas agropecuarios” (AMECRQ0010130), en concordancia también se vienen realizando trabajos relacionados a la temática en la Estación Experimental Agropecuaria Reconquista de INTA (EEA Reconquista), y en vinculación con la Facultad Regional Reconquista de la UTN. En nuestra zona se realizan aplicaciones de digestato mediante el uso de camiones cisterna adaptados para realizar un regado superficial en el terreno, con una escasa tecnología para el control de la dosis y uniformidad de aplicación poco controladas, además del hecho de no ser herramientas pensadas para su uso en agricultura (figura 1a).




**Figuras 1a, 1b y 1c**. Aplicación de digestato como fertilizante en el Norte de Santa Fe

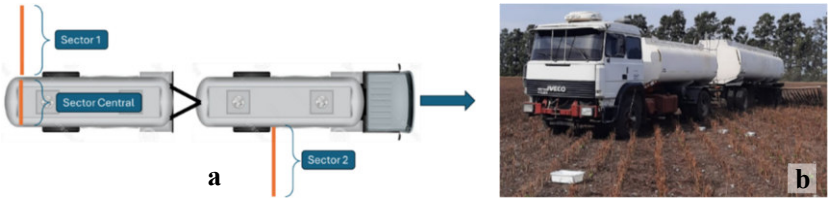
Una de las problemáticas de los métodos de aplicación actuales radica en que no son conocidas con exactitud las dosis que se aplican en los lotes y tampoco es fiable el método que se utiliza para controlarla. Si bien se fijan dosis objetivo de aplicación que rondan entre los 18.000 y 40.000 litros por hectárea (Mieres et al., 2024), actualmente no existen mediciones objetivas para comprobar la dosis efectivamente aplicada. Por otra parte, la uniformidad de la dosis aplicada en la superficie del terreno tampoco es conocida ni ha sido estudiada.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Analizar la dosis aplicada en diferentes momentos durante el trabajo del camión aplicador en el campo es uno de los objetivos de este trabajo. También se pretende establecer un protocolo de medición que a futuro nos permita tener resultados comparativos.

## 2. Materiales y métodos

Este ensayo se realizó en el campo de la EEA Reconquista de INTA. El lote en el que se realizó la medición es plano y se encontraba con rastrojo de algodón al momento del ensayo. Se tomaron mediciones de 2 camiones aplicadores de digestato con sistemas regadores de 7,5 m de ancho de regado efectivo, con velocidades de avance de entre 7 y 10 km/h. En su paso por el lugar trabajado los camiones realizaban una pasada de "ida" recorriendo toda la longitud del lote de sur a norte, seguida de una pasada de "vuelta" paralela a la anterior recorriendo la longitud del lote de norte a sur. Los camiones aplicadores analizados tienen la construcción funcional general que se muestra en la figura 2a.




**Figuras 2**. (a) y (b) Camión aplicador

Para la determinación de las dosis aplicadas, en diferentes puntos se dispusieron bandejas de captación de área superficial conocida y se midió el volumen de fluido captado por cada bandeja al pasar el camión aplicador por sobre ellas. En la figura 2b y 3c se observa el camión aplicador pasando por uno de los puntos de medición con las bandejas de captación colocadas. Se determinó la dosis aplicada en el área específica de las bandejas colectoras según la ecuación (1).

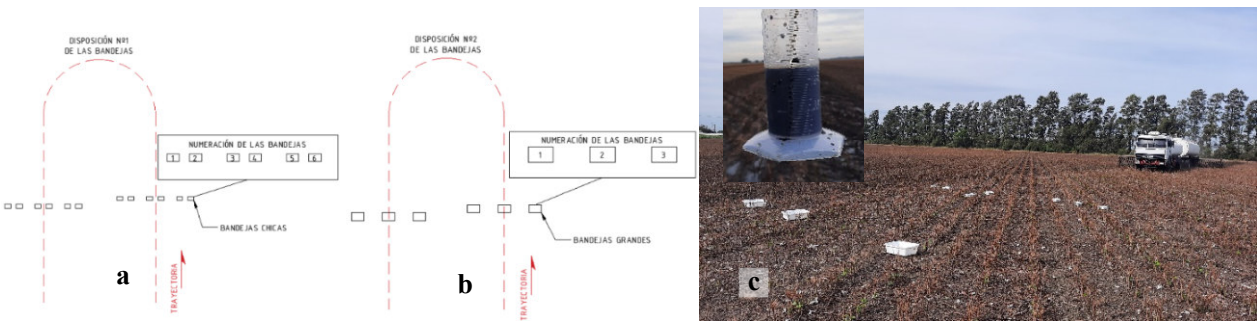
$$\text{Dosis}\left[\frac{\text{l}}{\text{ha}}\right] = \frac{\text{Volumen captado}}{\text{Área de captación de la bandeja}} \quad (1)$$

En este trabajo se hicieron mediciones con diferentes tamaños y cantidades de bandejas, distribuidas en una línea recta transversalmente a la dirección de avance del camión aplicador (figuras 3a y 3b). Las bandejas usadas son de un diseño prismático trapezoidal donde su cara inferior es más pequeña que la superior, la cual se encuentra abierta. En concreto, se utilizaron dos tipos de bandejas:

- Bandejas Chicas: de 28 × 20 cm, con un área de captación de 0,056 $m^2$ c/u.
- Bandejas Grandes: de 38,5 × 27 cm, con un área de captación de 0,104 $m^2$ c/u.

Se colocaron bandejas en las disposiciones que se aprecian en la figura 3a (bandejas chicas) y 3b (bandejas grandes). Para cada una de las disposiciones adoptadas se tomaron mediciones en dos puntos de la trayectoria del camión, uno en el trayecto de "ida" y otro en el de "vuelta". Repitiéndose esta medición en 2 camiones.

La disposición Nº1 corresponde a una medición con 6 bandejas chicas por punto de medición con una distribución de 2 bandejas para cada sector de descarga del camión (figura 3a), mientras que para la disposición Nº2 se tiene a una medición con 3 bandejas grandes por punto de medición, con una distribución de 1 bandeja por cada sector de descarga (figura 3b).




**Figuras 3**. (a), (b) y (c) disposición de las bandejas de medición y medición de volúmenes captados.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Mediante probetas calibradas de 500 ml se realizó la medición del volumen de digestato colectado por cada bandeja (figura 3c). Por otra parte, se colocó sobre el camión un sistema de traqueo (seguimiento satelital) de trayectoria mediante el uso de GPS. Luego se determinó la longitud total de la trayectoria. Con la longitud total de la trayectoria, el ancho de regado y la cantidad de litros totales disponibles en los tanques del camión se determinó la dosis total promedio global mediante la ecuación (2).

$$\text{Dosis promedio global}\left[\frac{\text{l}}{\text{ha}}\right] = \frac{\text{Volumen total de líquido descargado}}{\text{Longitud total de la trayectoria} \times \text{ancho de regado del camión}} \quad (2)$$

## 3. Resultados y discusión

Los resultados de volúmenes registrados en las aplicaciones se encuentran resumidos en la Tabla 1. Los valores para la determinación de la dosis promedio global registrados son los que se muestran en la Tabla 2. Donde la longitud de la trayectoria se extrajo del seguimiento GPS, el ancho de labor fue medido de manera directa y el volumen total fue provisto desde el lugar de carga del camión en la planta productora de digestato.

**Tabla 1**. Volúmenes medidos en las bandejas colectoras según disposiciones.

| | | | Volumen medido | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Número de bandeja | IDA (Medición 1) | VUELTA (Medición 1) | IDA (Medición 2) | VUELTA (Medición 2) |
| | | | [ml] | [ml] | [ml] | [ml] |
| Bandejas chicas (Disposición N° 1) | Sector 1 | 1 | 135 | 85 | 165 | 90 |
| | | 2 | 90 | 65 | 170 | 55 |
| | Sector central | 3 | 105 | 120 | 95 | 205 |
| | | 4 | 120 | 115 | 50 | 90 |
| | Sector 2 | 5 | -* | 75 | 175 | 215 |
| | | 6 | 135 | 135 | 45 | 260 |
| | Promedio | N/A | 117 | 99 | 117 | 153 |
| Bandejas grandes (Disposición N° 2) | Sector 1 | 1 | 110 | 95 | 225 | 160 |
| | Sector central | 2 | 100 | 105 | 165 | 220 |
| | Sector 2 | 3 | 155 | 115 | 720 | 235 |
| | Promedio | N/A | 122 | 105 | 370 | 205 |

**Las celdas que no poseen datos "-" representan mediciones que no pudieron ser realizadas, consecuentemente estos datos fueron despreciados a la hora de realizar los cálculos.*

**Tabla 2**. Datos registrados para determinación de dosis promedio global.

| Medición | Longitud de Trayectoria [m] | Ancho de Regado [m] | Volumen total [l] |
|---|---|---|---|
| 1 | 1.727,5 | 7,5 | 29.000 |
| 2 | 1.628 | 7,5 | 29.000 |

Para el análisis de los datos se tomaron los valores medidos y se procesaron según las ecuaciones (1) y (2). La dosis aplicada es la relación entre el volumen de fertilizante recolectado por la bandeja y la superficie de captación. Teniendo en cuenta las unidades de las magnitudes físicas la dosis se determina según la ecuación (3).

$$\text{Dosis}\left[\frac{l}{ha}\right] = \frac{100.000 \times V}{S} \quad (3)$$

Donde $V$ es el volumen captado por la bandeja y medido con la probeta en [ml], $S$ es el área de la boca de la bandeja en [cm2] y 100.000 una constante de conversión

Mediante las ecuaciones (2) y (3) se procesaron los valores de las mediciones obteniendo los resultados de dosis medida que se muestran en la Tabla 3. Por otra parte, se determinó el coeficiente de variación transversal de la dosis teniendo en cuenta la ecuación (4).

$$\text{Coeficiente de variacion transversal}\,[\%] = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (4)$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Donde $\sigma$ es la desviación estándar de la dosis en la disposición de bandejas de cada punto de medición y $\bar{x}$ la media de la dosis en la disposición de bandejas de cada punto de medición

**Tabla 3.** Resumen de dosis aplicadas según las mediciones de cada bandeja.

| | | Dosis aplicada | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Número de bandeja | Unidad | Medición 1 | | Medición 2 | |
| | | | | IDA | VUELTA | IDA | VUELTA |
| Bandejas chicas (Disposición N° 1) | Sector 1 | 1 | l/ha | 24.107 | 15.179 | 29.464 | 16.071 |
| | | 2 | | 16.071 | 11.607 | 30.357 | 9.821 |
| | Sector central | 3 | | 18.750 | 21.429 | 16.964 | 36.607 |
| | | 4 | | 21.429 | 20.536 | 8.929 | 16.071 |
| | Sector 2 | 5 | | - | 13.393 | 31.250 | 38.393 |
| | | 6 | | 24.107 | 24.107 | 8.036 | 46.429 |
| | Promedio | N/A | | 20.893 | 17.708 | 20.833 | 27.232 |
| | Coeficiente de variación transversal | N/A | - | 17% | 28% | 52% | 55% |
| | Promedio Medido por Bandejas | N/A | l/ha | 19.301 | | 24.033 | |
| Bandejas grandes (Disposición N° 2) | Sector 1 | 1 | l/ha | 10.582 | 9.139 | 21.645 | 15.392 |
| | Sector central | 2 | | 9.620 | 10.101 | 15.873 | 21.164 |
| | Sector 2 | 3 | | 14.911 | 11.063 | 69.264 | 22.607 |
| | Promedio | N/A | | 11.704 | 10.101 | 35.594 | 19.721 |
| | Coeficiente de variación transversal | N/A | - | 24% | 10% | 82% | 19% |
| | Promedio Medido por Bandejas | N/A | l/ha | 10.903 | | 27.658 | |
| Dosis global | Promedio global | N/A | l/ha | 22.520 | | 23.751 | |

**Tabla 4.** Diferencias porcentuales entre las dosis medidas por bandejas y las dosis promedio globales.

| | | Medición 1 | | Medición 2 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | IDA | VUELTA | IDA | VUELTA |
| Bandejas chicas (Disp. N° 1) | Comparación entre el promedio medido por bandejas y el promedio global | -7,2% | -21,4% | -12,3% | +14,7% |
| | Comparación entre el promedio de la repetición y el promedio global | -14,3% | | 1,2% | |
| Bandejas grandes (Disp. N° 2) | Comparación entre el promedio medido por bandejas y el promedio global | -48,0% | -55,1% | 49,9% | -17,0% |
| | Comparación entre el promedio de la repetición y el promedio global | -51,6% | | 16,4% | |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

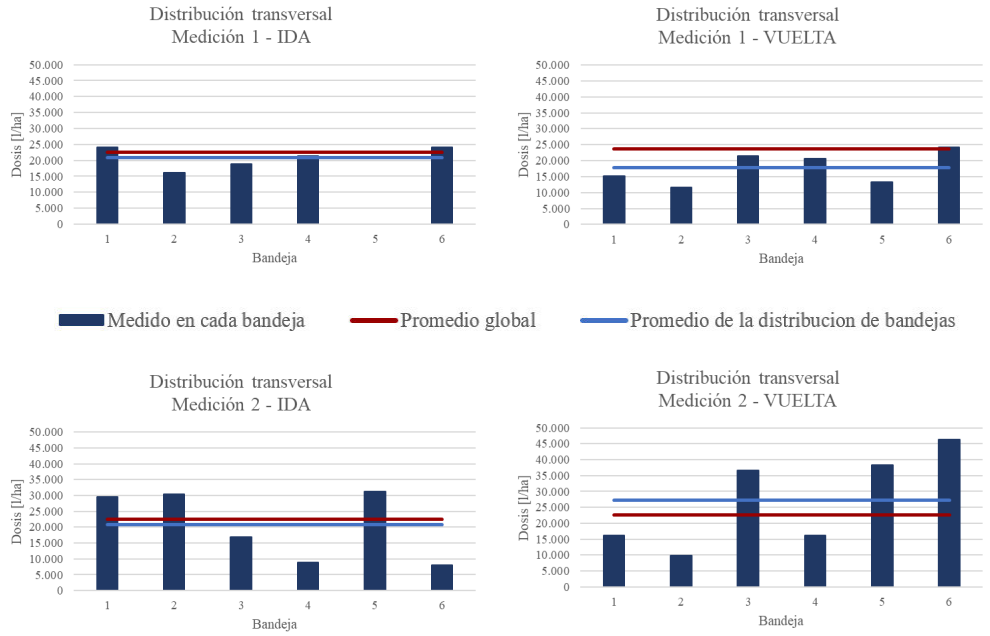



**Figura 1**. Comparativa gráfica de las dosis aplicadas en cada bandeja con respecto al promedio global y por cada medición de ida y vuelta

Analizando los resultados de la tabla 4 se observa que el uso de la disposición N° 1 presenta una diferencia menor con respecto al promedio global que la disposición Nº 2, es decir que la disposición con bandejas chicas evidencia más exactitud que la disposición con bandejas grandes. La explicación se podría adjudicar al hecho de que en la disposición Nº 2 las bandejas están más puntualizadas en las zonas donde se recolecta el fertilizante y se vuelve más propenso a errores de captación debidos a la baja uniformidad de funcionamiento del sistema distribuidor de fertilizante a lo largo del ancho de regado total.

Teniendo en cuenta que la metodología de las bandejas pequeñas nos arroja resultados más próximos al promedio global se muestra en el gráfico 1 una comparativa de las dosis aplicadas en cada bandeja con respecto al promedio global y por cada medición de ida y vuelta. Lo que nos presenta una idea del grado de des uniformidad que muestra esta forma de aplicación de fertilizante en el terreno y deja planteada la clara necesidad de avanzar a futuro con más mediciones para analizar la uniformidad en la dosis aplicada.

En lo referente a la uniformidad de la aplicación, no se obtuvieron resultados concluyentes con las muestras obtenidas entre los dos métodos, para obtener un valor numérico de la uniformidad a futuro se plantearán más ensayos.

## 4. Conclusiones

Podemos concluir que para las dosis aplicadas de digestato, los valores rondan los 23.000 [l/ha] (tabla 3), la cual representa una dosis más cercana a los valores mínimos de aplicación usados agronómicamente. Ahora bien, para el caso de las disposiciones, si bien el trabajar con bandejas pequeñas requiere de una mayor cantidad de estas y un mayor número de mediciones, se obtienen resultados de las dosis aplicadas con mayor exactitud que empleando bandejas grandes. Con respecto a la uniformidad de la distribución transversal no se obtuvieron resultados concluyentes debido a que el coeficiente de variación (tabla 3) en las mediciones realizadas no presenta una clara tendencia hacia alguno de los métodos planteados.

A futuro se proyectan más ensayos para poder recopilar más datos y obtener resultados más concluyentes. Tomando la metodología de 6 bandejas por punto de medición como protocolo establecido y aumentando la cantidad de repeticiones de las mediciones.

## Agradecimientos

Se agradece la gestión realizada por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Reconquista (UTN-FRRq) y del Instituto Nacional de Tecnología Agrícola – Estación Experimental Reconquista de INTA por proporcionar los fondos, los recursos y la predisposición de su personal para la realización del presente trabajo.

## Referencias bibliográficas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Mieres, L., Brach, M. A., Sandoval, M., Castro, C. G., & Leonhardt, M. O. (2023). *Experiencias en abonado de suelos agrícolas y ganaderos con digerido en Santa Fe*. En K. García, P. Monetta, P. F. Rizzo, N. Sosa, & B. Young (Comps.), *Estudio del impacto ambiental, gestión y tratamiento de residuos y efluentes sobre sistemas agropecuarios y agroindustriales para su valorización agronómica: Resultados obtenidos 2019-2022* (pp. 131–135). Ediciones INTA.

Mieres Venturini, L., Brach, A., & Sandoval, M. (2021). *Abonado de trigo y soja con digerido proveniente de biodigestores*. Voces y Ecos, 42, 50–54. INTA EEA Reconquista.

Mieres, L. N., Spontón, J. M., & Lorenzini, H. (2024, septiembre). *Producción de forraje de alfalfa bajo estrategias de fertilización con digerido en Santa Fe, Argentina*. En 47º Congreso Argentino de Producción Animal (Revista Argentina de Producción Animal, Supl. 1, pp. 357-359). Asociación Argentina de Producción Animal. https://www.researchgate.net/publication/389778022

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Evaluación de riesgo en industrias de procesos: un enfoque probabilístico mediante árboles de eventos y función probit

## Assessing the risk in process industries: a probabilistic approach using event trees and probit functions

Presentación: 30/10/2025

**Maylen Rocio Cocca**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.
maylen-rocio@hotmail.com

**Pilar Di Loreto**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.
pilar2003diloreto@gmail.com

**Valentina Lourdes Rodríguez**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.
rodriguezvalentinafac@gmail.com

### Resumen
El Análisis Cuantitativo de Riesgo (ACR) evalúa la probabilidad y las consecuencias de accidentes en instalaciones con sustancias peligrosas. Los métodos tradicionales requieren software especializado y alto costo computacional, lo que limita su aplicación práctica. Este trabajo presenta una metodología de ACR implementada en Excel, que permite evaluar de manera rápida y eficiente múltiples eventos accidentales y sus impactos sobre la seguridad de las personas y la integridad del proceso. La estructura de las planillas asegura trazabilidad, flexibilidad y fácil adaptación a distintos escenarios. Un caso de estudio de referencia valida el enfoque, demostrando su utilidad para la toma de decisiones, identificación de unidades críticas, priorización de medidas preventivas y planificación segura del entorno.

**Palabras clave:** probabilidad de muerte, pérdida de contención, probit, ACR.

### Abstract
Quantitative Risk Analysis (QRA) evaluates the probability and consequences of accidents in hazardous substance facilities. Traditional methods require specialized software and high computational resources, limiting practical use. This work presents a QRA methodology implemented in Excel, enabling rapid and efficient assessment of multiple accidental events and their impacts on human safety and process integrity. The spreadsheet design ensures traceability, flexibility, and easy adaptation to different scenarios. A reference case study validates the approach, demonstrating its value for decision-making, identifying critical units, prioritizing preventive measures, and supporting safe land-use planning.

**Keywords:** probability of death, loss of containment, probit, QRA.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

En la industria de procesos, los recipientes de almacenamiento de sustancias peligrosas —como GLP o etanol— constituyen fuentes de riesgo con potencial de originar eventos accidentales de elevada severidad. La pérdida de contención se reconoce como el evento iniciador más relevante, dado que puede dar lugar a incendios, explosiones o nubes tóxicas, con consecuencias que comprometen tanto la integridad de los equipos de proceso como la seguridad de las personas, incrementando significativamente la probabilidad de fatalidad.

El análisis cuantitativo de riesgos (ACR) se configura como una herramienta esencial para dimensionar estos daños, ya que permite integrar la frecuencia de ocurrencia de los eventos con la magnitud de sus consecuencias. Un análisis riguroso requiere contemplar la variabilidad en los tamaños de fuga, la influencia de las condiciones meteorológicas y la propagación de escenarios accidentales mediante árboles de eventos. Esta complejidad se intensifica en instalaciones con múltiples tanques de almacenamiento, donde el riesgo total resulta de la contribución acumulada de cada unidad.

Aunque este nivel de detalle suele demandar modelos rigurosos y software especializado, en este trabajo se propone un enfoque alternativo basado en modelos simplificados (MS) para la estimación de consecuencias. Estos permiten incorporar de manera práctica las frecuencias de falla, las condiciones ambientales y el aporte individual de cada tanque al riesgo total. Una ventaja destacada es la posibilidad de implementar la metodología en planillas de cálculo de Ms. Excel, lo que facilita la realización de análisis exhaustivos sin perder rigurosidad, ampliando así su aplicabilidad tanto en etapas preliminares de diseño como en la gestión integral de la seguridad en plantas que manipulan sustancias peligrosas.

# 2. Materiales y métodos

En este trabajo se realizará el ACR correspondiente al layout de la planta propuesto por (Alileche et al., 2017) presentado en la Figura 1.

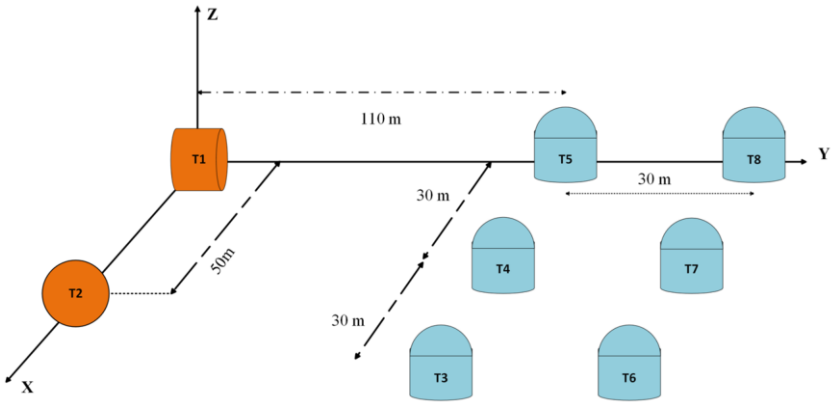



**Figura 1**. Layout de la planta.

Como se puede observar en la figura 1, en el caso de estudio se tienen en cuenta 6 tanques atmosféricos de almacenamiento de etanol (tanques del 3 al 8) y, por otro lado, dos tanques de almacenamiento de propano licuado (tanque 1 y 2). En la tabla 1 se expresan las dimensiones y datos del caso de estudio.

**Tabla 1.** Dimensiones y datos de los tanques en el caso de estudio

| Tanque(s) | Tipo | V [$m^3$] | D [m] | H [m] | Material | Fase de guardado |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Presurizado (cilindro horizontal) | 250 | 3,8 | 4,8 | Propano | L-V |
| 2 | Presurizado (esfera) | 1766 | 15 | 16 | Propano | L-V |
| 3-8 | Techo cónico atmosférico | 1030 | 9 | 16,2 | Etanol | L |

Donde *V* es el volumen, *D* el diámetro, *H* la altura de cada tanque, *L-V* el equilibrio líquido-vapor, y *L* líquido.

*2.1 Cálculo de riesgo*

El riesgo de fatalidad en un punto (x,y) se compone de la probabilidad de ocurrencia de los eventos accidentales y de la magnitud de sus consecuencias. Para ello, se determinaron las frecuencias asociadas a los escenarios de pérdida de contención

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

($f_{LOC_l}$) y las condiciones del entorno: por un lado las condiciones meteorológicas $f_{cond.amb_{ca}}$ y por otro: la presencia de fuente de ignición, congestión y confinamiento que afectan a la frecuencia de los eventos accidentales (incendios y explosiones) $f_{evento_k}$ y se analizaron los efectos sobre la población $C_{l,k,ca}$ mediante el método de vulnerabilidad Probit. La integración de estos resultados permitió cuantificar la contribución de cada evento al riesgo total, de acuerdo con la relación:

$$R_{xy} = \sum_{l \epsilon LOC} \sum_{k \epsilon K} \sum_{ca \epsilon CA} f_{LOC_l} f_{cond.amb_{ca}} f_{evento_k} C_{l,k,ca} \quad (1)$$

A continuación, se describe cada uno de los componentes que integran esta definición. La región evaluada se creó como una grilla de 15 filas y 15 columnas, ubicando los tanques en las coordenadas correspondientes según se muestra en la Figura 1. Para estimar el aporte del Riesgo de cada equipo las distancias fueron calculadas de acuerdo a la posición relativa del mismo ubicándolo en el (0,0), es decir se generaron 8 grillas (una por cada tanque) un tamaño de 15x15 estimando la distancia de separación de cada celda en función de la ubicación del tanque a evaluar.

*2.2 Cálculo de frecuencias*

*2.2.1.* Pérdida de contención - frecuencia de falla

La pérdida de contención (LOC por sus siglas en inglés) constituye el evento iniciador más relevante en accidentes con sustancias peligrosas, pues determina tanto el escenario resultante como su probabilidad. La frecuencia de falla del recipiente contenedor se caracteriza por el tipo de equipo y sus condiciones operativas. En este trabajo se adoptó la clasificación del Purple Book, que distingue tres tipos de pérdidas de contención: liberación instantánea del inventario completo (G1), liberación continua del inventario completo en 10 minutos a caudal constante (G2) y liberación continua a través de un orificio de 10 mm de diámetro efectivo (G3). Se emplean las frecuencias de esta clasificación para tanques de almacenamiento presurizados (cuando se analiza el aporte al riesgo en un punto de los tanques 1 y 2) y para tanques de almacenamiento atmosféricos (tanques 3-8).

*2.2.2* Condiciones ambientales

En lo referido a las condiciones ambientales, se seleccionaron tres conjuntos de parámetros meteorológicos propuestos por (Alileche et al., 2017). Para todos los conjuntos se mantuvieron constantes los valores de temperatura (10 °C), presión (1,013 bar), humedad relativa (47 %) e irradiación solar (500 kW/m²) variando las restantes condiciones como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Condiciones ambientales (SET) utilizados en el caso de estudio

| Condiciones | Condiciones Meteorológicas (SET) | | |
|---|---|---|---|
| | Set 1 | Set 2 | Set 3 |
| Probabilidad | 0,2 | 0,3 | 0,5 |
| Clase de estabilidad | B | D | D |
| Velocidad del viento (uw) [m/s] | 2 | 5 | 8 |
| Dirección del viento | Oeste (270°) | Noroeste (313°) | Sur (180°) |

2.2.3. Árboles de eventos

La probabilidad de ocurrencia de los eventos accidentales se estimó empleando los árboles de eventos genéricos desarrollados por (Vílchez et al. 2011). Cada árbol incorpora probabilidades intermedias —como ignición inmediata, ignición retardada o aceleración del frente de llama— y considera las propiedades del material involucrado (inflamabilidad, volatilidad y toxicidad). De esta manera, para cada tanque se aplican los árboles correspondientes, lo que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento accidental bajo condiciones ambientales específicas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

De acuerdo a las características definidas para el caso de estudio, para la sustancia propano licuado se consideran: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE), incendio de chorro, explosiones de nube de vapor (VCE) mientras que para el etanol se contempló solamente incendio de charco.

### 2.3 *Cálculo de consecuencias*

Las funciones Probit (FP) son herramientas estadísticas que describen cómo un impacto físico —como radiación térmica o sobrepresión — se traduce en una probabilidad de daño a la población expuesta, ya sea lesiones o mortalidad. Su fundamento es que las personas no reaccionan de manera uniforme ante una misma dosis o nivel de exposición, por lo que la respuesta colectiva se ajusta a una distribución estadística, típicamente una curva normal acumulada. En análisis de riesgos de procesos, este enfoque permite cuantificar los efectos esperados en los distintos eventos accidentales, convirtiendo magnitudes físicas en consecuencias humanas expresadas en términos probabilísticos (TNO, 2005). Entonces, se debe estimar el impacto: sobrepresión (BLEVE y VCE), intensidad de radiación térmica (incendio de chorro, incendio de charco) en cada punto para cada tanque según corresponda. Tal procedimiento se efectúa con modelos simplificados (MS) que dependen de la naturaleza de la sustancia (propiedades de simple acceso), variables de diseño (presión al momento de la falla, volumen de tanque), variable de accidente (masa total o diámetro de agujero asociado al LOC) y separación entra la fuente de peligro y el punto (x,y). A continuación, se presentan los MS implementados.

#### 2.3.1 BLEVE

Esta explosión es el producto de una falla catastrófica (LOC1) de una sustancia almacenada como gas licuado. Se determina la sobrepresión (ΔP) como una función potencial de la distancia de separación d, el volumen almacenado FD, la presión atmosférica Po y el número de Jakob (Ja) con las Ecs. (2)-(3) en desarrollo en el marco de una tesis doctoral en el CAIMI.

$$\Delta P = \left[10{,}75 \cdot \left(\frac{Ja}{1000}\right)^{0{,}444}\right] \cdot (F_D)^{0{,}431} \cdot \left(\frac{d}{\sqrt[3]{V}}\right)^{-1{,}356} \cdot P_0 \qquad Si\ \frac{(F_D \cdot V\ )^{1/3}}{d_i} \cdot 100 < 13{,}57 \tag{2}$$

$$\Delta P = \left[35{,}062 \cdot \left(\frac{Ja}{1000}\right)^{0{,}564}\right] \cdot (F_D)^{0{,}539} \cdot \left(\frac{d}{\sqrt[3]{V}}\right)^{-1{,}836} \cdot P_0 \qquad Si\ \frac{(F_D \cdot V\ )^{1/3}}{d} \cdot 100 \geq 13{,}57 \tag{3}$$

#### 2.3.2 VCE

Para este evento aún no se cuenta con un MS para su cálculo, por lo que se simuló al mismo en el software ALOHA. Luego, se ajustaron los datos resultantes empleando una regresión potencial en Ms. Excel en función de la distancia, obteniendo los parámetros de ajuste para cada pérdida de contención y cada set de condiciones meteorológicas.

#### 2.3.3. Incendio de chorro

El cálculo de la intensidad de radiación (I) para este evento se efectúa sólo cuando ocurren las pérdidas de contención LOC2 y LOC3 según indica la selección de árboles de eventos. Se estimó mediante un MS en desarrollo en CAIMI (Ec. 4), que considera distancia, velocidad del viento y humedad relativa. La diferencia entre ecuaciones se relaciona con la constante $c_1$ que adopta valores de 658349 y 37511 de acuerdo al tamaño de orificio: LOC2 y LOC3, respectivamente.

$$I = c_1 \cdot (uw^{-0{,}99345} + 0{,}23226) \cdot (0{,}01 \cdot RH^{-0{,}018690} \cdot d^{-2{,}43999}) \tag{4}$$

Dado que la ubicación del orificio es incierta, se divide la frecuencia de ocurrencia por número de segmentos, es decir dividiendo el perímetro del tanque (posible ubicación de la fuga) en 16 partes (direcciones) para reflejar esa variabilidad. Así, es posible estimar los efectos del evento simulando la intensidad de radiación para cada una de esas orientaciones alrededor del tanque.

#### 2.3.4 Incendio de charco

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La intensidad de radiación (I) se calcula en función de la tasa de liberación de calor (HRR) y el diámetro del dique ($D_{dique}$) en función del volumen del tanque. Para tanques atmosféricos, el incendio de charco es el único evento considerado, utilizando el MS presentado en (Orellano et al. 2024) de acuerdo a Ec. (5):

$$I = \left( \left( \frac{d}{0{,}3179} \cdot \left( HRR^{(0{,}5798)} - 0{,}3698 \right) \cdot \left( D_{dique} \right)^{0{,}4175} \right)^{\left( \frac{1}{0{,}6889} \right)} \right) + 0{,}0395^{\left( -\frac{1}{0{,}7913} \right)} \quad (5)$$

## 3. Resultados y discusión

El riesgo total obtenido es representado en un mapa de colores (Figura 2) que muestra la distribución espacial del riesgo, donde las zonas en rojo corresponden a las áreas con mayor probabilidad de fatalidad. Esta representación facilita la identificación de sectores críticos en el entorno de los tanques. Al mismo tiempo, el aporte al riesgo total de cada equipo está representado por las curvas de isoriesgo, observándose un mayor aporte del riesgo para el tanque 2.

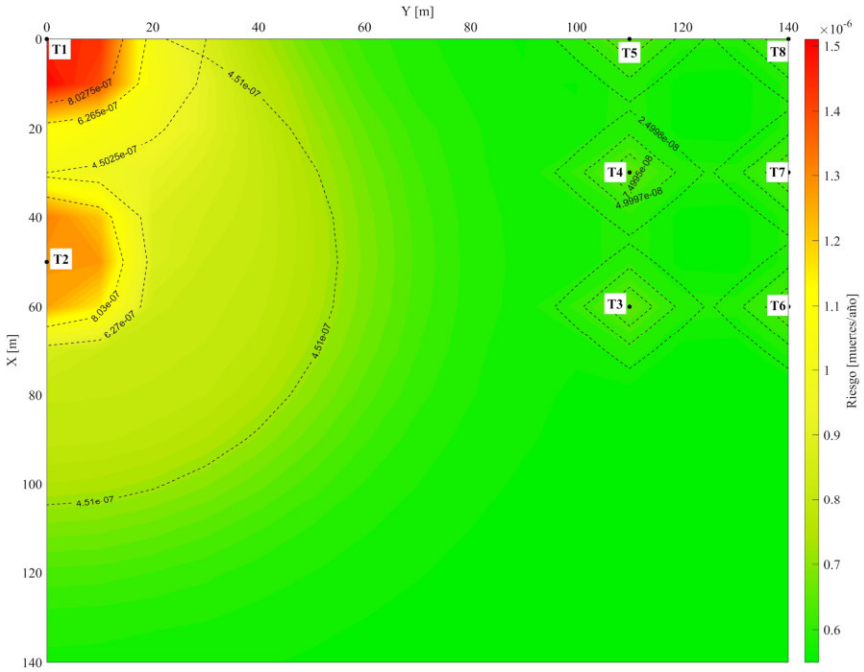



**Figura 2**. Mapa de Riesgo total y curvas de isoriesgo (aporte individual de cada equipo).

## 4. Conclusiones

La aceptación de los resultados de un análisis cuantitativo de riesgos depende de los criterios de cada organización y de las normativas vigentes, cuya aplicación corresponde a la autoridad competente. Por ello, las decisiones de diseño o rediseño de layout deben considerar no solo los valores obtenidos, sino también el marco regulatorio, el contexto social y la cultura organizacional en materia de seguridad.

El desarrollo en Excel se estructuró con referencias cruzadas que garantizan coherencia, trazabilidad y reutilización metodológica. Las planillas, diseñadas con un esquema de granulación espacial, permiten representar de manera sistemática las frecuencias de ocurrencia y los riesgos asociados a cada evento accidental en hojas interconectadas e independientes. Esta organización facilita la adaptación del modelo a distintos escenarios industriales al modificar parámetros como sustancia, volumen de tanques, ubicación de equipos o frecuencias. La única limitación corresponde a los VCE, cuyos resultados dependen de simulaciones en ALOHA. En conjunto, el trabajo consolida una herramienta flexible, práctica y versátil para el análisis y gestión del riesgo en procesos industriales. Si bien los valores obtenidos para el riesgo total son bajos, su aceptación depende de los criterios de cada organización, que varían según política de seguridad, actividad, tolerancia al riesgo y recursos disponibles. No obstante, existen normativas que definen la “tolerabilidad” y cuya aplicación corresponde a la autoridad competente. Por ello, las decisiones sobre el diseño o rediseño del layout deben considerar no solo los resultados del ACR y la normativa vigente, sino también el contexto social y la cultura organizacional en materia de seguridad.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Agradecimientos

Se desea agradecer el apoyo brindado por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario (UTN FRRo). Además, se agradece la guía de la Ing. Romina Kraft y el Dr. Nicolás Scenna.

## Referencias bibliográficas

Alileche, N., Olivier, D., Estel, L., & Cozzani, V. (2017). Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method. Saf. Sci., 97, 10-19. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.028

Orellano, S., Kraft, R. A., Rodriguez, Nestor. H., & Scenna, N. J. (2024). Large pool fires in the process industry. A simple model for safety distances estimation. Latin American Applied Research, 54(3), 395-406. https://doi.org/10.52292/j.laar.2024.3239

TNO. (2005). Guideline for quantitative risk assessment—Purple Book (3rd Ed.). Committee for the Prevention of Disasters.

Vílchez, J. A., Espejo, V., & Casal, J. (2011). Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24, 281-287. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.01.005

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

MENCIÓN ESPECIAL

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiante de grado
**Facultad Regional:** Venado Tuerto

# Resultados preliminares de inactivación bacteriana mediada por plasma no-térmico utilizando un reactor a escala-piloto

## Preliminary results of non-thermal plasma-mediated bacterial inactivation using a pilot-scale reactor

Presentación: 30/10/2025

**Ornella Ridissi Pregno**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Descargas Eléctricas (GDE), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
oridissipregno@frvt.utn.edu.ar

**Lisbeth Abigail Pujol**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Descargas Eléctricas (GDE), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina
lisabipujol15@gmail.com

### Resumen

La creciente demanda de alternativas sostenibles para la desinfección de agua impulsa la investigación de tecnologías emergentes como el plasma no térmico. En este trabajo se evaluó un reactor a escala piloto basado en una descarga corona pulsada para la inactivación de bacterias presentes en suspensiones acuosas. Se utilizaron *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae* y *Pseudomonas aeruginosa,* y se trataron con el reactor en soluciones prefabricadas de 20 L durante 120 min. Los resultados mostraron una rápida eliminación de *P. aeruginosa*, mientras que *K. pneumoniae* y *E. coli* presentaron mayor resistencia, requiriendo tiempos más prolongados de exposición. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que resaltan la sensibilidad diferencial de los microorganismos y evidencian el potencial del plasma no térmico como alternativa competitiva para el saneamiento de aguas. Además, este trabajo demuestra la capacidad de operar a mayor escala, superando las limitaciones de estudios previos que generalmente utilizan volúmenes mucho menores.

**Palabras clave:** corona pulsada; desinfección de agua; inactivación bacteriana; plasma no térmico

### Abstract

The growing demand for sustainable alternatives for water disinfection drives research on emerging technologies such as non-thermal plasma. In this work, a pilot-scale reactor based on pulsed corona discharge was evaluated for the inactivation of bacteria in aqueous suspensions. *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, and *Pseudomonas aeruginosa* were used as test organisms and treated in prefabricated 20 L solutions for 120 min. The results showed a rapid elimination of *P. aeruginosa*, while *K. pneumoniae* and *E. coli* exhibited higher resistance, requiring longer exposure times. These findings are consistent with previous studies that highlight the differential sensitivity of microorganisms, while demonstrating the potential of non-thermal plasma as a competitive alternative for water sanitation. Moreover, this work demonstrates the feasibility of operation at a larger scale, overcoming the limitations of previous studies that generally operate with much smaller volumes.

**Keywords:** bacterial inactivation; non-thermal plasma; pulsed corona; water disinfection

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El acceso a agua de calidad constituye uno de los desafíos más críticos del siglo XXI, tanto desde la perspectiva ambiental como sanitaria. La creciente presión antrópica sobre los recursos hídricos —a través de descargas industriales, prácticas agrícolas intensivas y deficiencias en los sistemas de saneamiento— ha generado una contaminación cada vez más diversa y compleja, en la que convergen compuestos químicos persistentes, metales pesados, nutrientes en exceso y una amplia gama de microorganismos patógenos. Este escenario compromete la disponibilidad de agua dulce y plantea serias amenazas para la salud pública y la sostenibilidad de los ecosistemas (OMS, 2024; APRA, 2016).

Las tecnologías convencionales de tratamiento de agua como la cloración, el uso de ozono o la filtración por membranas han demostrado limitaciones significativas frente a contaminantes emergentes y microorganismos resistentes, y generan subproductos secundarios que implican riesgos ambientales (Foster, 2017). En este contexto, surge la necesidad de explorar métodos innovadores, capaces de garantizar una remoción eficaz de contaminantes sin añadir nuevas cargas químicas al ambiente.

El tratamiento de agua a través de las técnicas de oxidación avanzada empleando plasmas no térmicos en (y en contacto con) líquidos constituye una de las áreas emergentes de la ciencia y tecnología a escala global. La gran cantidad de experimentos a pequeña escala publicados en los últimos años (Gururani et al., 2021; Topolovec et al., 2022) ilustran lo promisorio de esta tecnología. La purificación de agua basada en plasmas es una técnica “eco-friendly” ya que no deja residuos luego de su aplicación, utiliza tiempos cortos de tratamiento y posee alta eficiencia de remoción. Su eficiencia radica en que las descargas no térmicas en contacto con líquidos producen campos eléctricos de alta intensidad, radiación ultravioleta y grandes cantidades de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (RONS) en fase gaseosa que pueden entrar al agua por difusión, induciendo así la formación de especies reactivas secundarias en fase líquida; incluyendo aquellas especies de larga vida media como nitrito, nitrato y peróxido de hidrógeno. Dichas especies en medios ácidos son capaces de reaccionar directamente con microorganismos (bacterias y virus), causando su inactivación y degradación; o de reaccionar entre sí formando a su vez compuestos más reactivos como el ácido peroxinitroso, peroxinitritos y óxidos de nitrógeno relacionados, de conocidas propiedades microbicidas y descontaminantes (Carly E. Anderson et al., 2016; Machala et al., 2019). Sin embargo, uno de los principales desafíos sigue siendo la escalabilidad de los sistemas y el elevado consumo energético, lo que ha motivado la investigación en configuraciones más eficientes, como reactores de películas delgadas, burbujas o sistemas híbridos (Kuddushi et al., 2022; Wang et al., 2024).

En el Laboratorio del Grupo de Descargas Eléctricas (GDE) de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRVT), se han diseñado y construido varios reactores de plasma no térmico para el tratamiento de agua sobre la base de la descarga corona pulsada (Fridman et al., 2005), desde la escala de mesada de laboratorio (100 ml), pasando por un reactor mediano (1000 ml); hasta un prototipo piloto con una capacidad de 22.5 L de agua. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue la evaluación del reactor a escala piloto para la inactivación de microorganismos en agua, sin el agregado de agentes químicos. Este trabajo busca contribuir a la generación de soluciones innovadoras para el desafío global del agua, y plantea al plasma como una herramienta viable para la descontaminación de recursos hídricos en el corto y mediano plazo, inscribiéndose en el eje de medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable.

# 2. Materiales y métodos

*2.1. Condiciones de operación del reactor de plasma*

El reactor de plasma de escala piloto es del tipo de película delgada descendente (reactor inclinado) y opera en modo batch con recirculación mediante un depósito de 20 L. El plasma es generado con una descarga corona (positiva) pulsada en fase gaseosa en contacto con el líquido para tratar. El reactor es capaz de operar con un tren periódico de pulsos cortos de voltaje cortos (< 100 ns) con amplitudes de unos 20 kV y corrientes pico de casi 700 A. Los electrodos del reactor consisten en un arreglo de alambres en paralelo (AISI 304 con un diámetro de 0.2 mm) ubicados a una distancia de unos 10-20 mm de una bandeja rectangular (1500 × 3000 mm) construida también en AISI 304. El agua para tratar fluye por la bandeja en forma de una delgada película de aproximadamente 1 mm de profundidad. La bandeja se encuentra aterrizada e inclinada con un ángulo de 11º. La zona de generación de plasma (con un volumen de unos 400 L) se encuentra confinada del medio exterior para evitar la difusión de las partículas reactivas generadas por el plasma.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La potencia del reactor constituye un parámetro crítico para evaluar tanto la eficiencia del proceso como su viabilidad energética en aplicaciones a gran escala. En este estudio, el sistema operó con una energía promedio de aproximadamente 0,25 J por pulso, lo que correspondió a una potencia media de 0.033 kW y una eficiencia energética de 1.65 10-3 kWh/L bajo las condiciones de operación utilizadas para los ensayos de inactivación bacteriana. Estos valores reflejan un consumo energético bajo en comparación con otras tecnologías avanzadas de tratamiento de agua, y permiten establecer una referencia inicial para futuros cálculos de eficiencia y optimización del diseño del reactor.

### 2.2. *Cepas bacterianas utilizadas*

Las especies bacterianas utilizadas fueron donadas por la Cátedra de Bacteriología de la Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas de la Universidad Nacional de Rosario. En particular, se utilizaron las siguientes cepas: Escherichia coli (ATCC25922), Klebsiella pneumoniae (ATCC700603) y Pseudomonas aeruginosa (ATCC9027).

#### 2.2.1. Condiciones de crecimiento de *E. coli*, *P. aeruginosa* y *K. pneumoniae*

Las cepas fueron mantenidas como stocks en freezer a –20°C con 30% de glicerol. Previo a los tratamientos, se descongeló un tubo stock, el cual se plaqueó en medio sólido y se dejó crecer 24 horas en estufa con temperatura controlada. Luego, dos días previos al tratamiento, se realizó un replaqueo de dicha placa y el día anterior, se picó una colonia aislada inoculándola en medio líquido que se dejó durante 8 horas en una estufa de cultivo. Dichos cultivos son los que se utilizaron para los tratamientos. Las 3 cepas se incubaron a 35ºC y se sembraron en caldo tripteína–soja.

#### 2.2.2. *Preparación de las soluciones bacterianas para su tratamiento. Toma de muestras*

Se prepararon 600 mL de cultivo líquido de cada cepa previo al experimento. Los cultivos líquidos fueron lavados con agua destilada, centrifugados y el pellet obtenido se resuspendió en 20 L de agua destilada de manera de obtener una concentración final ~107 UFC/ml. Previo a la realización de los ensayos el reactor fue lavado con agua destilada hasta que la conductividad del agua circulante (sin descarga) resultara menor a 10–15 µS/cm. Las suspensiones generadas fueron tratadas con plasma por 120 min. Se sacaron muestras (3 tubos estériles de 20 mL) a los 0, 15, 30, 45, 60, 90 y 120 min; y se guardaron tapados y a temperatura ambiente hasta su medición.

#### 2.2.3. *Crecimiento bacteriano post–tratamiento*

Los tres tubos extraídos para cada tiempo se utilizaron para evaluar las UFC/mL al día 1, 4 y 7 después del tratamiento, de manera de evaluar el efecto residual del mismo.

#### 2.2.4. Medición de las unidades formadoras de colonias (UFC)

Para realizar las mediciones de UFC/ml a los efectos de determinar la eficacia de la inactivación a través del tratamiento con plasma, se realizaron diluciones seriadas 1/10 usando agua peptonada 0.1% estéril, y se sembraron mediante la técnica de microgota (20 ul) por duplicado. Para E. coli y K. pneumoniae se utilizaron placas de tripteina–soja agar (TSA) y el duplicado se realizó en placas con medio diferencial Agar Levine (para asegurar que fueran dichas cepas). Para el caso de P. aeruginosa se utilizaron placas de TSA y de Cetrimida agar. Las placas se incubaron a 30ºC y se contaron las unidades formadoras de colonias por mL (UFC/mL). El límite de detección de esta técnica es de 50 UFC/mL.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Resultados obtenidos en *E. coli*

Los resultados obtenidos con la cepa E. coli se muestran en la Figura 1. En este caso se observa que luego de 60 minutos de tratamiento con plasma, no se detectan UFC/mL de E. coli, en los 20 L de solución, condición que se mantiene hasta una semana después del tratamiento. También puede observarse que, a tiempos menores a 60 min de tratamiento, las UFC/mL que habían quedado viables fueron capaces de recuperarse hasta aproximadamente el valor inicial.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

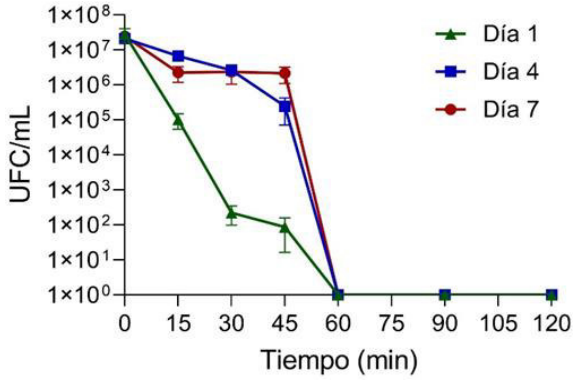



**Figura 1**. Viabilidad de *E. coli* a los días 1, 4 y 7, post–tratamiento con plasma

3.2. Resultados obtenidos en *P. aeruginosa*

Los resultados obtenidos con la cepa P. aeruginosa se muestran en la Figura 2. Solamente 15 min de tratamiento con plasma fueron suficientes para eliminar completamente la bacteria de las muestras de 20 L, condición mantenida hasta 7 días post tratamiento. Por esta razón, en las réplicas del experimento se extrajo un tubo más a los 7.5 minutos de tratamiento. En este caso, en dicho tiempo las bacterias que quedaron viables no fueron capaces de recuperarse, por el contrario, el daño generado produjo que las UFC/mL disminuyan luego de 4 y 7 días de tratamiento.

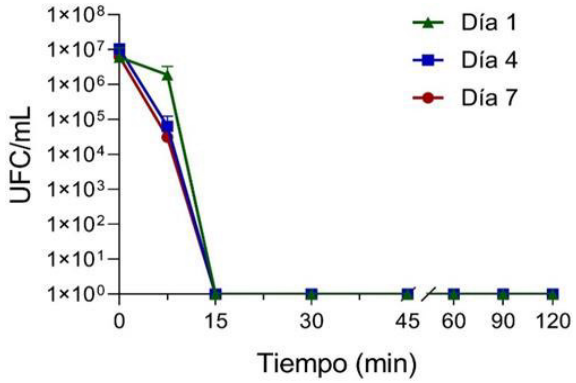



**Figura 2**. Viabilidad de *P. aeruginosa* a los días 1, 4 y 7, post–tratamiento con plasma

3.3. Resultados obtenidos en *K. pneumoniae*

Los resultados obtenidos con la cepa K. pneumoniae se muestran en la Figura 3. Se observa que al día 1 luego del tratamiento no se detectaron células viables luego de 30 minutos, sin embargo, se observó crecimiento posterior en los días 4 y 7. Esto quiere decir que aquellas pocas células (< 50 UFC/mL) que habían quedado viables fueron capaces de duplicarse y recuperarse casi completamente. La eliminación completa de dicha cepa en los 20 L de solución se logró a los 45 minutos de tratamiento.

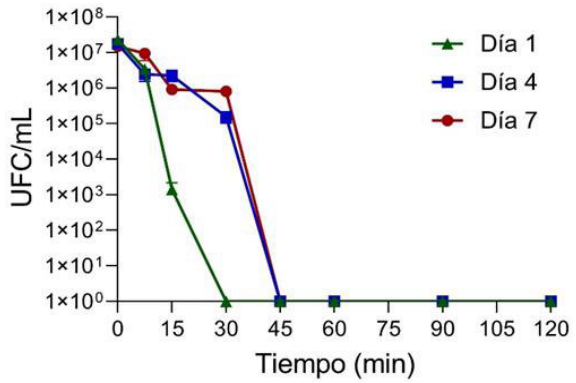



**Figura 3**. Viabilidad de *K. pneumoniae* a los días 1, 4 y 7, post–tratamiento con plasma

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Este trabajo con un reactor a escala piloto es uno de los pocos que tratan grandes volúmenes de agua, mientras que la mayoría de los trabajos con plasmas no térmicos reportan volúmenes pequeños de tratamiento. En un trabajo reciente se logró reducir hasta 5.5 log de E. coli en un reactor de plasma de 150 ml de solución (Yang 2020), y Zhang et al. (2022) mostraron que P. aeruginosa también puede ser inactivada con este método, aunque utilizando volúmenes mucho menores que los empleados en el presente trabajo. En conjunto, los resultados confirman que el reactor a escala piloto posee un rendimiento competitivo frente a P. aeruginosa y puede extender su eficacia a patógenos más resistentes como K. pneumoniae y E. coli.

Se han encontrado reducciones significativas de E. coli en volúmenes mayores (15 L) (Sun 2021), utilizando un reactor a escala piloto de cavitación hidrodinámica rotacional avanzada (ARHCR), cuya eficiencia energética es 30 veces menor (0.0499 kWh/L) que la reportada en este trabajo (1.65 10-3 kWh/L). Este valor de mayor eficiencia del reactor reportado en este trabajo, probablemente se deba a la utilización de una lámina delgada de líquido descendente, que mejora el intercambio de partículas reactivas en la interfaz gas-líquido. De manera similar, estudios con plasma frío asistido por microburbujas (Kuddushi et al., 2022) muestran que la intensificación de la interfaz gas-líquido maximiza la generación de especies reactivas y acelera la inactivación bacteriana. De este trabajo se desprende la importancia de optimizar el diseño del reactor asistido por plasma y su eficiencia energética, para lograr una aplicación sostenible en escenarios de tratamiento de aguas a mayor escala.

## 4. Conclusiones

El reactor de plasma no térmico a escala piloto demostró una alta eficacia en la inactivación bacteriana, alcanzando reducciones completas de P. aeruginosa en tiempos cortos de tratamiento, lo que confirma su potencial como tecnología alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas. Se evidenciaron diferencias en la susceptibilidad microbiana, ya que K. pneumoniae y E. coli mostraron mayor resistencia al proceso, requiriendo mayores tiempos de exposición. Esto concuerda con lo reportado en la literatura para bacterias Gram negativas con membranas celulares más complejas.

Los resultados obtenidos son comparables a los de otras tecnologías emergentes, como la cavitación hidrodinámica, el agua activada por plasma (PAW) y sistemas con microburbujas, lo que posiciona al reactor piloto desarrollado como una alternativa competitiva en eficiencia de desinfección. Asimismo, este estudio resalta que la configuración del reactor y la eficiencia energética son factores críticos que optimizar para avanzar hacia aplicaciones sostenibles a mayor escala. En conjunto, este trabajo contribuye al conocimiento sobre el uso de plasma no térmico en el área del tratamiento de aguas, y abre la puerta a futuras investigaciones orientadas a la mejora del diseño del reactor, la evaluación en matrices más complejas y la validación en condiciones reales de operación.

## Agradecimientos

Agradecemos la dirección de la Dra. Brenda Fina y a la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento en el marco del PID UTN 434.

## Referencias bibliográficas

ACUMAR & APRA. (2016). “Calidad de Agua – SON17”. Disponible en https://www.acumar.gob.ar/wp-content/uploads/2016/12/Apra_Calidad-de-Agua-SON17.pdf

Anderson, C. E., Cha, N. R., Lindsay, A. D., Clark, D. S., & Graves, D. B. (2016). The Role of Interfacial Reactions in Determining Plasma–Liquid Chemistry. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 36(6), 1393–1415. https://doi.org/10.1007/s11090-016-9742-1

Fridman, G., Chirokov, A., & Fridman, A. (2005). Non-thermal atmospheric pressure discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(2), R1–R24. https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/2/R01

Gururani, P., Bhatnagar, P., Bisht, B., Kumar, V., Joshi, N. C., Tomar, M. S., & Pathak, B. (2021). Cold plasma technology: advanced and sustainable approach for wastewater treatment. Environmental Science and Pollution Research, 28(46), 65062–65082. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16741-x

Kuddushi, M., Dal, P., Xiaoyun, C., Xincong, Q., Luo, J., Gan, H., Lu, D. y Zhu, D. Z. (2022). “Plasma frío mejorado con microburbujas (MB-CAP) para la desinfección de patógenos en agua: una alternativa

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

sostenible a los métodos tradicionales". *Science of the Total Environment, 806*, 150535. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150535

Machala, Z., Tarabová, B., Sersenová, D., Janda, M., Hensel, K. (2019b). Chemical and antibacterial effects of plasma activated water: Correlation with gaseous and aqueous reactive oxygen and nitrogen species, plasma sources and air flow conditions. Journal of Physics D: Applied Physics, 52(3). https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae807

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024, 17 de mayo). "WHO updates list of drug-resistant bacteria most threatening to human health". Disponible en https://www.who.int/es/news/item/17-05-2024-who-updates-list-of-drug-resistant-bacteria-most-threatening-to-human-health

Sari, A. H., & Fadaee, F. (2010). "Effect of corona discharge on decontamination of *Pseudomonas aeruginosa* and *E. coli*". *Surface and Coatings Technology*, 205(6), 385–390. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.024

Sun, J., Zhang, C., Li, X. y col. (2021). "Disinfection characteristics of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor in pilot scale". *Journal of Environmental Chemical Engineering, 9*(6), 106627. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106627

Topolovec, J., Pucer, M., & Kovačič, S. (2022). Plasma-activated water as an alternative to chemical disinfectants in food industry. *Food Control*, 132, 108518. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108518

Wang, L., Lee, J., Zhang, Z., & Zhang, L. (2024). *Design and optimization of a non-thermal plasma reactor for efficient inactivation of antibiotic-resistant bacteria in water*. *Science of the Total Environment, 952*, 175952. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100989

Yang, Y., Wan, K., Yang, Z., Li, D., Li, G., Zhang, S., Wang, L., & Yu, X. (2020). "Inactivation of antibiotic-resistant *Escherichia coli* and degradation of its resistance genes by glow discharge plasma in an aqueous solution". *Chemosphere*, 252, 126476. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126476

Zhang, L., Zhang, Y. y Zhang, Z. (2022). "Effectiveness of non-thermal plasma in the inactivation of Escherichia coli and Pseudomonas aeruginosa in water". *Scientific Reports, 12*, 11088. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11088-w

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

MENCIÓN ESPECIAL

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Estudiante de grado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Propuesta de tratamiento de lixiviados de relleno sanitario de la ciudad de Rafaela: filtros y humedales construidos

## Leachate treatment proposal for Rafaela's landfill: filters and constructed wetlands

Presentación: 30/10/2025

**Franco Hammerschlag**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
franco.hammerschlag@frra.utn.edu.ar

### Resumen

Los rellenos sanitarios son una forma de disposición final para residuos orgánicos. El lixiviado, efluente líquido generado por la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, contiene contaminantes que pueden afectar negativamente los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Resulta entonces esencial tratar estas aguas antes de su vertido al ambiente. Se evaluará la eficiencia de un sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Rafaela, compuesto por un filtro de materiales áridos y humedales construidos (HCs) de flujo subsuperficial vertical y horizontal (humedales híbridos). Los sustratos que se emplearán son: arena gruesa y hormigón celular curado en autoclave, un residuo de construcción. Tomando muestras en la entrada y salida de cada etapa, se analizarán parámetros fisicoquímicos para calcular eficiencias de remoción. Esta experiencia a escala laboratorio aportará información valiosa para el diseño de una planta piloto in situ, orientada a reducir el impacto ambiental de los lixiviados mediante soluciones sostenibles.

**Palabras clave:** Lixiviado, Relleno sanitario, Humedal híbrido, Residuos de hormigón celular.

### Abstract

Landfills are a final disposal method for organic waste. The leachate, a liquid effluent with high concentrations of contaminants, results from the anaerobic decomposition of waste and represents a risk for surface and groundwater resources. Therefore, it is important that wastewater is not discharged into the environment without adequate treatment, to minimize its impact. This study aims to evaluate the efficiency of a system for the treatment of Rafaela municipal landfill leachate. The system will consist of a granular materials filter and constructed wetlands with vertical and horizontal flow. The substrates that will be used are coarse sand and autoclaved aerated concrete, a construction waste. Sampling will be conducted both at the inlet and outlet of the entire system and at each individual stage. The results of this work will provide valuable data for the development of a pilot-scale treatment plant at the landfill.

**Keywords:** Leachate, Landfills, Wetlands, Aerated concrete waste.

## 1. Introducción

Ante la necesidad de gestionar el aumento sostenido de los residuos sólidos generados en centros urbanos, los rellenos sanitarios (RS) se posicionan como una de las alternativas con mayor viabilidad. Estos son aplicados mundialmente debido a su bajo costo y alto rendimiento de tratamiento (Wang et al., 2022).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Sin embargo, la eficiencia de los RS como agentes de tratamiento depende de cómo se administran los compuestos que resultan de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. Según Wdowczyk et al. (2022) este tipo de instalaciones representan un desafío principalmente por el tratamiento del efluente que producen. Los lixiviados, que constituyen uno de los compuestos mencionados, representan un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y subterráneas si no son tratados correctamente, debido a su composición. Contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos volátiles y sustancias perfluoroalquiladas están presentes en los mismos y afectan los recursos hídricos tanto sanitaria como ecológicamente. Por ello, el lixiviado almacenado debe ser correctamente tratado para cumplir con los estándares locales de descarga de los receptores en cuanto a toxicidad o efectos ambientales adversos (Parvin y Tareq, 2021).

Dentro de los tratamientos convencionales se pueden encontrar: fangos activados, ósmosis inversa, intercambio iónico, ultrafiltración y coagulación-floculación. Estas alternativas requieren de altos costos de construcción, mantenimiento y operación (Bakhshoodeh et al., 2020). Diversos métodos innovadores han sido desarrollados y estudiados para contrarrestar estas desventajas, entre ellos, las soluciones basadas en la naturaleza (SbN).

Una SbN son los humedales construidos (HCs) que, con requisitos mínimos de energía externa y bajos costos de construcción y mantenimiento, cobran relevancia como alternativa sustentable de tratamiento para diversos líquidos residuales. Estos sistemas permiten emular, de forma controlada, los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales, empleándolos para la depuración de aguas residuales (Wu et al., 2023). Las variables que gobiernan el funcionamiento y la eficiencia de estos sistemas son: el sustrato, las macrófitas y los microrganismos. El sustrato puede eliminar ciertos contaminantes del agua residual a través de procesos de intercambio, adsorción, precipitación y formación de compuestos (Wu et al., 2015b). El desarrollo rizosférico de las macrófitas permite y favorece el crecimiento y desarrollo de microorganismos que degradarán la materia orgánica presente (Vymazal y Kröpfelová, 2009). Las macrófitas, por su parte, también constituyen una fuente de carbono a través de los exudados de sus raíces y un microambiente aeróbico a través de la liberación de oxígeno en las raíces (Tanner, 2001).

Los HCs, según el flujo del efluente en su interior, pueden clasificarse en HC de flujo libre o de flujo subsuperficial. En estos últimos el agua residual a tratar fluye por debajo de la superficie, pudiendo seguir una trayectoria vertical en los HC de flujo subsuperficial vertical (HFSSV) u horizontal en los HC de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH). Cada uno posee propiedades características que favorecen la reducción de la concentración de compuestos contaminantes en el lixiviado.

Diferentes estudios han analizado la tecnología de HCs como aplicación para el tratamiento de lixiviados en diversas partes de Latinoamérica: Colombia (Madera-Parra et al., 2014), Brasil (Cano et al., 2019) y Argentina (Silvestrini et al., 2019). Es necesario entonces continuar desarrollando conocimiento sobre el uso de esta tecnología para el tratamiento de lixiviados, especialmente en las condiciones climáticas propias de nuestra región.

Nuestro grupo de trabajo desarrolla desde hace unos años actividades experimentales utilizando HCs de diversos tipos de flujo para el tratamiento de diversos efluentes (Schierano et al., 2018, 2020). Para el caso de los lixiviados se han obtenido resultados promisorios utilizando HCs híbridos, los cuales combinan HFSSV seguidos de HFSSH. Puntualmente para este tipo de efluente se han utilizado como sustratos de los humedales residuos de ladrillos de Hormigón Celular Curado en Autoclave (HCCA, Retak®) y arena fina (Gutierrez et al., 2025). Sin embargo, se prevé que la incorporación de una etapa de tratamiento primaria, previo al ingreso del líquido residual al sistema de tratamiento secundario a través de HCs, podría mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes. Un filtro de materiales áridos constituirá esta etapa primaria. El empleo de granza de ladrillos de HCCA tanto en el filtro como en el sistema de humedales apuesta a la circularidad del sistema de tratamiento, incorporando como sustrato un residuo de construcción en lugar de los sustratos convencionales.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficiencia de HCs con ambos flujos y filtros de materiales áridos para el tratamiento de lixiviados producidos en el relleno sanitario de la ciudad de Rafaela a escala laboratorio. A través de los resultados obtenidos, se proyectará una planta de tratamiento a escala piloto.

## 2. Materiales y métodos

El sistema de tratamiento propuesto contará de un HFSSV seguido de un HFSSH, ambos dispuestos en serie y precedidos por un filtro de áridos, el cual tendrá la función de filtrar, ser medio soporte a microorganismos, degradar contaminantes,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

atenuar la carga orgánica y estabilizar el efluente antes de las etapas posteriores del tratamiento. Los sustratos que se emplearán son: arena gruesa y residuos de HCCA. Por su parte, las macrófitas serán extraídas de humedales naturales ubicados en zonas aledañas a la ciudad de Rafaela y se utilizará la especie Typha domingensis (Totora). Esto se debe a su gran productividad y eficiencia de eliminación de contaminantes (Maine et al., 2009), y su capacidad de adaptarse rápidamente a nuevos ecosistemas.

2.1 *Experiencias en mesocosmos*

Para llevar a cabo el sistema experimental se dispondrán por duplicado mesocosmos cilíndricos (0,35 x 0,60 m; diámetro x altura) para simular tanto el filtro de áridos como HFSSV. Además, se emplearán mesocosmos en forma de prisma rectangular (0,30 × 0,34 × 0,57 m) para simular HFSSH. El esquema del sistema se detalla en la Figura 1.

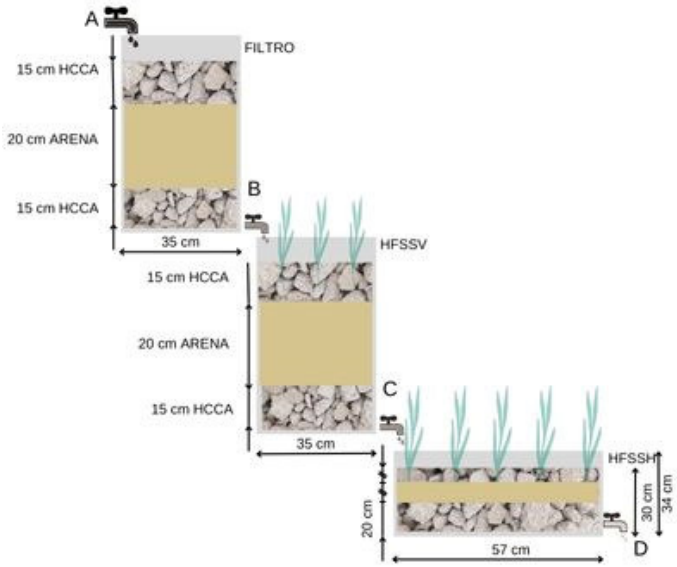



**Figura 1.** Esquema del sistema completo

El filtro de áridos y los mesocosmos de HFSSV tendrán una composición de sustrato análoga: un lecho de 10 cm de alto de HCCA retenido con Tamiz IRAM N° ½, 5 cm de HCCA tamizado con Tamiz IRAM N° ½, una capa de arena gruesa de 20 cm, previamente tamizada con Tamiz IRAM N°8, y finalmente una capa de 15 cm de HCCA. Los HFSSH serán llenados con 10 cm de HCCA retenido con Tamiz IRAM N° ½, 10 cm de HCCA tamizado con Tamiz IRAM N° ½, 5 cm de arena gruesa y 5 cm de HCCA tamizado con Tamiz IRAM N° ½.

El HCCA se caracteriza por su baja densidad y alta porosidad debido a la incorporación de agentes espumógenos durante su elaboración. Previamente, se comparó con otros sustratos y se seleccionó por su capacidad para remover contaminantes y promover la circularidad al ser un residuo de construcción. Cabe mencionar que, en experiencias anteriores (Gutiérrez et al., 2024), utilizó arena fina en lugar de arena gruesa. Según (UN-HABITAT, 2008), el uso de arena gruesa evita problemas de clogging y favorece la conductividad hidráulica dentro del medio árido.

En cuanto a las macrófitas, se seleccionarán ejemplares de tamaño y características morfológicas similares, plantando seis de ellas en cada mesocosmo. Las mismas serán podadas a una altura uniforme de 40 cm inmediatamente después de ser plantadas con lo que estarán listas para comenzar el proceso de aclimatado.

El aclimatado de las plantas es fundamental para el correcto funcionamiento del sistema de HCs (Gutiérrez et al., 2025) t garantizar la supervivencia de las macrófitas frente las características del lixiviado del relleno sanitario. Por ello, serán regadas con agua de red durante la primera quincena y con efluente diluido (33%) durante la segunda. El efluente que se empleará durante toda la experiencia será extraído de un pozo de monitoreo de lixiviado del RS de la ciudad de Rafaela.

2.2 *Experimentos Batch*

Una vez listo el medio de tratamiento comenzarán los experimentos Batch que tendrán una duración ininterrumpida de entre nueve y doce meses. La concentración de agentes contaminantes en el lixiviado será medida al inicio y al final de cada

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

una de las etapas registrando los resultados de las mediciones en una base de datos. La Figura 2 proporciona información acerca de cómo se alimentará el sistema periódicamente, los tiempos de retención hidráulica (TRH) para filtro, HFSSV y HFSSH, y la denominación de las muestras que se obtendrán al final de cada fase de tratamiento.

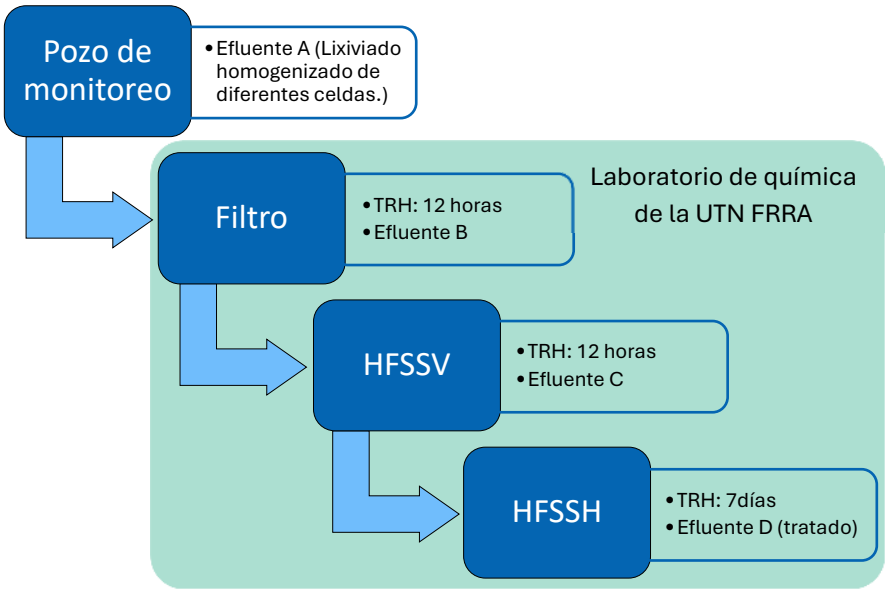



**Figura 2**. Alimentación del lixiviado en el sistema

Se realizarán análisis semanales sobre las cuatro corrientes de efluente (A, B, C y D), analizando los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, Potencial Redox (PR), Conductividad Eléctrica (CE), Alcalinidad Total (AT), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), amonio ($NH_4^+$), nitrato ($NO_3^-$), nitrito ($NO_2^-$), fósforo total (PT), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Para todos los análisis se utilizará la metodología propuesta por APHA (2017). Con las concentraciones halladas para cada contaminante a la entrada y a la salida de cada mesocosmo se calcularán eficiencias de remoción. Los metales pesados fueron analizados en caracterizaciones previas del lixiviado, no hallándose concentraciones significativas de los mismos que justifiquen su análisis.

2.3 *Diseño de planta piloto de tratamiento*

Se espera que los resultados y conclusiones del presente trabajo, en conjunto con los obtenidos en la experiencia precedente, en la cual no se evaluó un filtro de pretratamiento, ratifiquen al nuevo sistema evaluado como una alterativa más eficiente para el tratamiento de aguas residuales. El diseño preliminar de la planta piloto para el RS de la ciudad de Rafaela se sustenta en esta hipótesis, el mismo se esquematiza en la Figura 3.

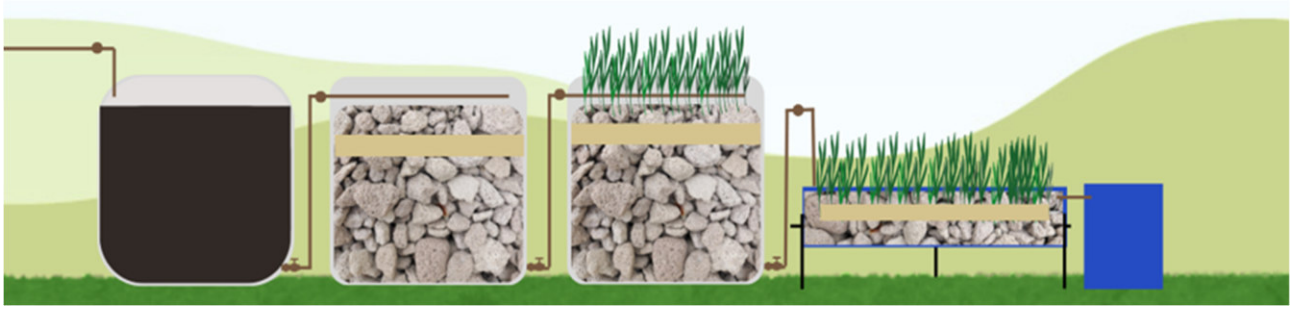


**Figura 3**. Esquema de etapas de planta piloto propuesta

La planta tiene como objetivo validar la escalabilidad del sistema no solo en cuanto a su eficiencia sino también términos de gestión y logística colaborativas.

## 3. Resultados y discusión

3.1 *Resultados obtenidos en experimentos previos*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Las experiencias en mesocosmos descriptas en el punto anterior se realizarán sobre la base de los resultados obtenidos en experiencias previas (2022-2023). Como se mencionó anteriormente, estas permitieron recabar información acerca de la efectividad del proceso e inferir qué mejoras eran necesarias para obtener mayores eficiencias de remoción de contaminantes.

La tabla 1 expone los valores promedio obtenidos a la entrada y salida de cada etapa del tratamiento de diversos parámetros: en la entrada se evaluó el lixiviado crudo, tal como se extrajo del pozo de monitoreo del RS, mientras que en los HFSSV y HFFSH la muestra se tomó tras un TRH de 12 horas y 7 días respectivamente.

**Tabla 1.** Resultados de la experiencia previa (Gutiérrez et. al 2024)

| | Entrada | HFSSV Salida | HFSSH Salida | %ER 1 | %ER 3 | %ER SISTEMA |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **pH** | 7,67±0,18 | 8,18±0,28 | 8,28±0,34 | | | |
| **CE (mS/cm)** | 6,32±1,00 | 5,36±0,73 | 5,04±0,66 | | | |
| **AT (mg $CaCO_3$/l)** | 1961,73±587,25 | 492,29±274,06 | 237,04±122,29 | 74.90% | 51.85% | **87.91%** |
| **DBO (mg $O_2$/l)** | 287,03±174,73 | 175,78±66,91 | 102,91±32,20 | 38.76% | 41.46% | **64.15%** |
| **DQO (mg $O_2$/l)** | 67,38±38,07 | 32,28±31,05 | 7,35±4,88 | 52.09% | 77.23% | **89.09%** |
| **PT (mg P/l)** | 1,71±1,56 | 0,25±0,15 | 0,11±0,09 | 85.38% | 56.00% | **93.57%** |
| **SST (mg/1)** | 24,13±12,12 | 13,43±8,32 | 13,26±9,88 | 44.34% | 1.27% | **45.05%** |
| **$NH_4^+$ (mg $NH_4^+$/l)** | 276,61±170,03 | 35,68±28,19 | 3,84±4,48 | 87.10% | 89.35% | **98.63%** |
| **NTK (mg N/l)** | 256,33±142.92 | 49,55±30,70 | 32,50±23,57 | 80.67% | 34.41% | **87.32%** |
| **$NO_2^-$(mg $NO_2^-$/1)** | 1,53±1,09 | 80,74±98,58 | 7,12±14,24 | -5177.12% | 91.18% | **-365.36%** |
| **$NO_3^-$(mg $NO_3^-$/l)** | 72,10±85,39 | 424,84±262,10 | 457,67±167,09 | -489.24% | -7.73% | **-534.77%** |

%ER: Porcentaje de eficiencia de Remoción

### 3.2 *Resultados esperados*

A partir de las mejoras introducidas en el diseño del sistema de tratamiento, se prevé un aumento en el valor del pH en el efluente de salida, en la misma línea que la experiencia previa e incluso mayor, como consecuencia de la inclusión del filtro de áridos. Esto se debe a la presencia de compuestos alcalinos presentes en el HCCA. En cuanto a la CE, se espera que la misma tienda a decrecer de igual manera que en el trabajo anterior (Gutierrez et. al 2025), debido a la filtración de sólidos y absorción de iones por el medio. A diferencia del estudio anterior, en esta nueva experiencia se realizarán mediciones de PR en las diferentes etapas con el fin de determinar si las condiciones de aerobiosis y anaerobiosis están dadas para que los procesos de depuración del efluente ocurran.

En cuanto a DBO y DQO, debido a la filtración de materia orgánica, generación de biofilm y degradación de la materia orgánica se espera obtener mejoras en las eficiencias de remoción. El mismo comportamiento se espera con PT, aunque ya los valores obtenidos anteriormente son reducidos.

Respecto a SST, el reemplazo de arena fina por arena gruesa y su incorporación (provee un sustento de crecimiento mejor que HCCA) en la instancia de HFSSH, probablemente no permita obtener menores resultados que en el trabajo anterior.

En cuanto a los compuestos nitrogenados, con una mayor altura en el HFSSH y con la incorporación de otra instancia de tratamiento, se espera obtener mejores eficiencias de remoción en NTK, mejorar o conservar la eliminación de amonio y disminuir la presencia de nitrato y nitrito en el efluente final. Esto se debe a que una mayor altura del HFSSH permitirá que se generen zonas anóxicas en la parte inferior del mesocosmo que favorezcan el proceso de desnitrificación.

## 4. Conclusiones

Si bien las experiencias de laboratorio como la que se expone en el presente trabajo continuarán aportando al desarrollo de conocimiento en sistemas de humedales construidos, resulta fundamental la puesta en marcha de la planta piloto para alcanzar mayor verosimilitud en los resultados del estudio. Esta diferencia se debe a que las condiciones del laboratorio no emulan en su totalidad las condiciones reales que se dan en un sistema de tratamiento a gran escala puesto que son más favorables. La planta permitirá evaluar el desempeño del tratamiento bajo diferentes condiciones climáticas y de carga contaminante. Asimismo, el trabajo posee un carácter epistemológico; en ese sentido, los datos empíricos obtenidos

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

contribuirán al desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de lixiviados y aguas residuales con humedales construidos en general a nivel nacional.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rafaela (UTN-FRRA) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## Referencias bibliográficas

Bakhshoodeh, R., N. Alavi, C. Oldham, R. M. Santos, A. A. Babaei, J. Vymazal, and P. Paydary. 2020. “Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review.” Ecol. Eng. 146 (Mar): 105725. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725.

Gutiérrez, G., Panigatti, C., & Schierano, C. (2024). Aplicación de humedal construido híbrido para tratamiento de lixiviados de relleno sanitario de la ciudad de Rafaela. AJEA (Actas De Jornadas Y Eventos Académicos De UTN), (AJEA 37). https://doi.org/10.33414/ajea.1699.2024

Gutierrez, G., Schierano, M. C., Griffa, C., & Boglione, R. (2025). Horizontal Subsurface Constructed Wetlands for Landfill Leachate Treatment: Substrate Selection and Macrophyte Adaptation Study. Journal of Environmental Engineering, 151(5), 04025017. https://doi.org/10.1061/JOEEDU.EEENG-7967

Gutiérrez, G.; Schierano, M. C.; Panigatti, M. C.; Boglione, R. y Pagaburu, A. (2022) “Aplicación de humedales de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario.” Libro del VIII Congreso Bianual PROIMCA y VI Congreso Bianual PRODECA (Villa María, Córdoba-Argentina)” Pág. 387-398.

Maine, M.A., Suñé, N., Hadad, H.R., Sanchez, G.C., Bonetto, C. (2009). Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland. J. Environ. Manag. 90, 355–363.

Parvin, F., Tareq, S.M. (2021) Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: a systematic review and possible public health risks assessment. Appl Water Sci 11, 100. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01431-3

Rafaela UTN, F. R. (2024). JIT 2023 - Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos. AJEA (Actas De Jornadas Y Eventos Académicos De UTN), (AJEA 38). https://doi.org/10.33414/ajea.1640.2024

Schierano, M. C., Panigatti, M. C., & Maine, M. A. (2018). Horizontal subsurface flow constructed wetlands for tertiary treatment of dairy wastewater. International Journal of Phytoremediation, 20(9), 895-900.

Schierano, M. C., Panigatti, M. C., Maine, M. A., Griffa, C. A., & Boglione, R. (2020). Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: removal efficiencies and plant uptake. Journal of Environmental Management, 272, 111094.

Silvestrini, N. C., Maine, M. A., Hadad, H. R., Nocetti, E., Campagnoli, M. A. (2019). Effect of feeding strategy on the performance of a pilot scale vertical flow wetland for the treatment of landfill leachate. Science of the Total Environment, 648, 542-549.

Tanner, C. C. (2001). Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. Water Science and Technology, 44(11-12), 9-17.

UN-HABITAT. (2008). Constructed Wetlands Manual. United Nations Human Settlements Programme.

Vymazal, J., Kröpfelová, L. (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal Sub-surface flow: A review of the field experience. Sci. Total Enviro.407: 3911-3922.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Wang, H., C. Yang, B. Wang, Z. He, and T. Fu. 2022. “Nitrogen removal performance and microbiological characteristics for the landfill leachate treatment in a three-stage vertical flow constructed wetlands system.” Environ. Technol. Innovation 28 (Nov): 102728. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102728.

Wdowczyk, A., A. Szymańska-Pulikowska, and M. Domańska. 2022. “Analysis of the bacterial biocenosis of activated sludge treated with leachate from municipal landfills.” Int. J. Environ. Res. Public Health 19 (3): 1801. https://doi.org/10.3390/ijerph19031801.

Wu, H., Wang, R., Yan, P., Wu, S., Chen, Z., Zhao, Y., ... & Zhang, J. (2023). Constructed wetlands for pollution control. Nature reviews earth & environment, 4(4), 218-234.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Estimación de distancias seguras mediante modelos subrogados para la optimización del layout de una planta de almacenamiento de sustancias peligrosas

## Safety Distances Estimation Applying Subrogate Models for the Layout Optimization of a Hazardous Substances Storage Plant

Presentación: 30/10/2025

**Selena Herrmann**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Rosario, Santa Fe, Argentina
seleluz17@gmail.com

**Ornella Sdrigotti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Rosario, Santa Fe, Argentina
osdrigotti@gmail.com

### Resumen

El diseño óptimo del layout en playas de almacenamiento de sustancias peligrosas constituye un problema complejo, donde el cálculo de las distancias seguras (DS) bajo criterios de riesgo aceptable; debe integrarse con la reducción de costos. Tradicionalmente, su resolución demanda modelos complejos que integran seguridad, confiabilidad y costos. Aquí se propone una estrategia innovadora que simplifica enormemente el problema mediante el empleo de modelos subrogados (MS) muy simples para estimar DS. Justamente, a los efectos de comprobar la bondad de esta estrategia, se resuelve un caso de mediana complejidad, desarrollado en planillas de Ms. Excel, orientado a optimizar la disposición de 1500 m³ de GLP y 5000 m³ de nafta virgen. El análisis contempla restricciones de terreno y un enfoque económico integral -tanques, conectividad y superficie-, considerando simultáneamente variables de diseño para la división del inventario (número de tanques y diseño preliminar según normas-, problema no abordado sistémicamente en la literatura).

**Palabras clave:** sustancias peligrosas, distancias seguras, diseño de layout, minimización de costos.

### Abstract

The optimal layout design of hazardous substance storage tank farms is a complex problem, requiring the calculation of safety distances (SD) under acceptable risk criteria to be integrated with cost reduction. Traditionally, its solution requires complex models that integrate safety, reliability, and costs. An innovative strategy is proposed here that greatly simplifies the problem by employing very simple surrogate models (SM) to estimate SDs. Specifically, to verify the suitability of this strategy, a medium-complexity case is solved, developed in Ms. Excel spreadsheets, aimed at optimizing the disposal of 1,500 m³ of LPG and 5,000 m³ of virgin naphtha. The analysis considers terrain restrictions and a comprehensive economic approach—tanks, connectivity, and surface area—while simultaneously considering design variables such as inventory division (number of tanks—a problem not systematically addressed in the literature) and the geometry of each unit.

**Keywords:** hazardous substances, safety distances, layout design, cost minimization.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El almacenamiento de grandes volúmenes de sustancias peligrosas, como gas licuado de petróleo (GLP) y nafta virgen, es una actividad de alto riesgo debido a su naturaleza explosiva e inflamable. Es conocido que los tanques de almacenamiento pueden originar accidentes mayores involucrando efecto dominó, en los que una falla inicial se propaga hacia equipos vecinos provocando la destrucción de la planta y de sus alrededores, con consecuencias severas sobre la seguridad de los trabajadores, la comunidad y el ambiente (Alileche *et al.*, 2017).

El diseño óptimo de estos sistemas debe, por lo tanto, equilibrar dos aspectos críticos: la determinación precisa de las distancias de seguridad (DS) entre equipos y estructuras, y la evaluación detallada de los costos de terreno, conectividad y tanques. Este problema se considera altamente complejo, ya que involucra modelos físico-matemáticos avanzados para la estimación de DS y, al mismo tiempo, requiere resolver un espacio combinatorio de alternativas de ubicación que crece con el número de unidades a instalar (Orellano, 2024). La complejidad se incrementa, además, si consideramos el número de tanques como variable a optimizar.

En este trabajo se analiza ubicar un sistema de almacenamiento adicional, en un sector de una planta industrial, para el cual se conoce el inventario total a almacenar de dos sustancias peligrosas con características distintas (GLP y nafta virgen) y la geometría de los tanques, pero no sus dimensiones. Se busca determinar simultáneamente la ubicación de oficinas y salas de máquinas, el área total del terreno a utilizar -función del número de tanques y del espaciado entre ellos (las DS)-. Se desarrolla aquí una estrategia que simplifica el proceso de optimización hasta el punto de resolverlo mediante una planilla de cálculo de Ms. Excel.

# 2. Materiales y métodos

2.1 *Descripción del ejemplo y elaboración de la planilla.*

Se desea optimizar el layout de un parque de almacenamiento que albergue dos tipos de materiales: sustancia presurizada extremadamente volátil e inflamable (GLP) denotada con la letra A y sustancia inflamable (nafta virgen) representada con la letra B, considerando un inventario de VA 1500 m3 y VB 5000 m3. La geometría de los tanques se asume esférica para almacenamiento presurizado (A) y cilíndrica para almacenamiento atmosférico (B) y de esta forma determinar el número de tanques óptimo ($n_A$ , $n_B$) como se presenta en las Ecs. (1)-(2). Con respecto al almacenamiento de B, se adoptan como pautas de diseño las normas API Standard 650 (2007) que sugieren, entre otros criterios, un número de anillos de montaje y diámetro máximo correlativo.

$$n_A = \frac{V_A}{\frac{4}{3}\pi\frac{d_A^3}{8}} \tag{1}$$

$$n_B = \frac{V_B}{\pi\frac{d_B^2}{4}h_B} \tag{2}$$

La función objetivo (FO) se presenta en la Ecuación 3 y se define como el costo total del asentamiento, el cual considera el costo de los recipientes ($C_{TK\,A}, C_{TK\,B}$), los costos de conectividad (CI) y el valor de la superficie ocupada ($C_{terreno}$).

$$FO = C_{TK\,A} + C_{TK\,B} + C_I + C_{terreno} \tag{3}$$

El costo total del terreno está fuertemente vinculado a la disposición del terreno. Para ello, se define la disposición horizontal ($d_{horizontal}$) del mismo de acuerdo con la Ec. (4), adoptando la ubicación de un solo tanque A (es decir diámetro del tanque A, $d_A$ ) y dos tanques B (correspondiente a 2 diámetros de B $d_B$), las DS entre tanques A-B y B-B y las DS con respecto al borde izquierdo $DS_{B_bordeizquierdo}$. La disposición vertical del terreno ($d_{vertical}$) se establece de acuerdo a la DS al borde inferior $DS_{borde\,infinf\,erior}$ y al número de tanques resultantes de la división de inventario dividido dos para el caso de la sustancia B (empleando la función REDONDEAR.MAS) dado que se consideran dos columnas de tanques B como se presenta en las Ecs. (5)-(6). De estas últimas, se elige la mayor.

$$d_{horizontal} = DS_{B-borde\,izquierdo} + DS_{BB} + DS_{AB} + d_A + 2d_B + DS_{oficinas}v_{binaria} + DS_{salamaquinas}v_2 \tag{4}$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$d_{vertical_A} = DS_{A-borde\,infinf\,e\,rior} + d_A \cdot n_A + DS_{AA} \cdot (n_A - 1) + DS_{oficinas}(1 - v_{binaria}) + DS_{salamaquinas}(1 - v_2) \quad (5)$$

$$d_{vertical_B} = DS_{B-borde\,infinf\,e\,rior} + d_B \cdot round(0.5 \cdot n_B) + DS_{BB} \cdot (round(0.5 \cdot n_B) - 1) + DS_{oficinas}(1 - v_{binaria}) + DS_{salamaquinas}(1 - v_2) \quad (6)$$

Se considera, además, ubicar una sala de máquinas y un edificio de oficinas a la derecha del plano o en la parte superior del diseño, dependiendo de que la disposición no exceda las restricciones del terreno. Se toma el criterio para definir las distancias según norma API 2510 (2001) con respecto a los tanques previamente mencionados para ambas construcciones ($DS_{oficinas}$, $DS_{salamaquinas}$); a los efectos que el modelo ubique cada recinto, incorporando dos variables binarias: $v_{binaria}$ y otra que permita ubicar el edificio restante, $v_2 = 1 - v_{binaria}$.

Se presenta a continuación en la Fig. 1 un esquema resumido del procedimiento de resolución abordado en el trabajo.

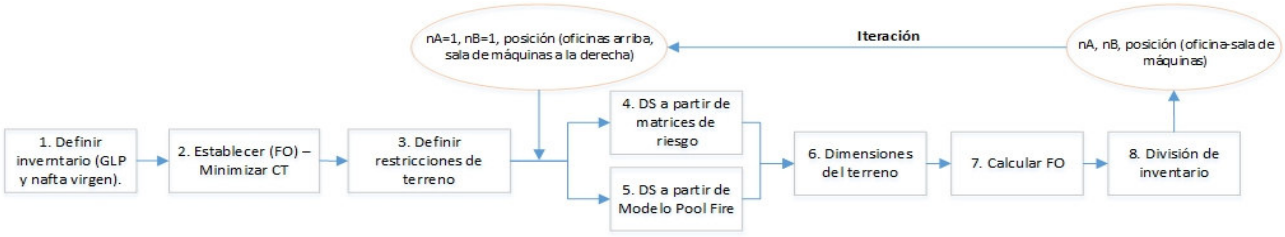



**Figura 1.** Algoritmo de resolución del problema de optimización.

2.2 Cálculo de distancias seguras a partir de matrices de riesgo.

Para el caso de la sustancia A, se utiliza el método propuesto por Orellano (2024) de estimación de DSs basadas en riesgo, considerando la variabilidad estocástica. Se parte especificando un nivel de riesgo tolerable ante una fuga de la sustancia peligrosa. El riesgo es la sumatoria del producto entre la frecuencia de ocurrencia de todos los escenarios posibles y sus consecuencias.

Para una fuga de GLP, son posibles distintos eventos finales (explosiones BLEVE, explosiones de nube de vapor, dardos de fuego, bola de fuego y fogonazo), según las condiciones del entorno (ignición inmediata, ignición retardada, aceleración del frente de llama) (Vílchez, Espejo y Casal, 2011) y según la dimensión de la fuga (LOC 1, LOC 2, LOC 3) (Alileche et al., 2017). Las distintas condiciones ambientales se consideran mediante simulación Monte Carlo.

Las consecuencias asociadas a cada uno de los eventos accidentales se evalúan según el tipo de receptor considerado (persona, tanque atmosférico o presurizado). Finalmente, se calcula el riesgo total particionando el plano cartesiano en cuatro cuadrantes (N, S, E y O) e incrementando la distancia hasta alcanzar el valor de riesgo tolerable. Para la ubicación de los equipos, se elige la distancia mayor, confiriéndole una visión conservativa al diseño. Los valores umbrales de riesgo tolerable para personas y para recipientes utilizados (tanto presurizados como atmosféricos) se fijan en $2.5 \times 10^{-7}$ muertes por año y $3 \times 10^{-7}$ destrucción por año, respectivamente. Se consideraron tres volúmenes de tanques de GLP 500 $m^3$, 1500 $m^3$ y 2500 $m^3$, obteniéndose para todos los receptores considerados tendencias lineales de las DSs en función del diámetro del tanque (ver Fig. 2). Estas relaciones son ingresadas como distancias DSAB (receptor tanque atmosférico B - recta verde), DSAA (receptor tanque presurizado A - recta naranja), DSA_bordeinferior y DSA_bordeizquierdo (receptor persona - recta azul).

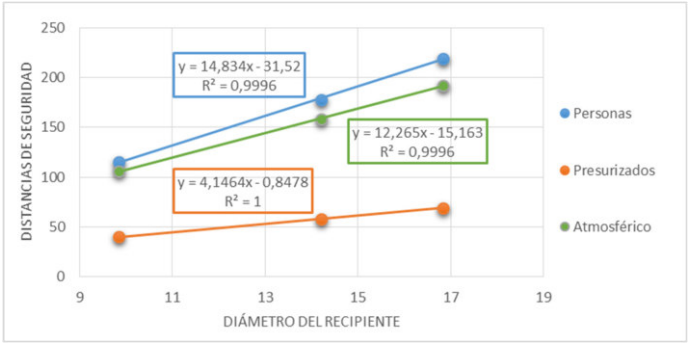



**Figura 2.** Linealización de distancias de seguridad a partir de matrices de riesgo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

2.3 *Cálculo de distancias considerando incendio de charco según modelo reducido/subrogado.*

Para determinar el espaciamiento entre depósitos de nafta virgen (sustancia B) solo es necesario considerar el evento incendio de charco, el cual es preponderante para este sistema (Vílchez et al., 2011). Las DSs para este evento se obtiene mediante el MS propuesto por (Orellano et al., 2024), presentando en la Ec. (7):

$$L = 0.3179(I^{-0.7913} - 0.0395)^{0.6889}(HRR^{0.5798} - 0.3698)D^{0.4175} \quad (7)$$

Siendo HRR la tasa de desprendimiento de calor (kW/m$^2$) e I en (kW/m$^2$) la intensidad de radiación soportada por el receptor. Morbidoni (2023) utiliza un HRR de 2400 kW/m$^2$ estimado para nafta virgen. Los límites de radiación según el tipo de receptor son: tanques presurizados (40 kW/m$^2$), atmosféricos (15 kW/m$^2$) y personas (1.5 kW/m$^2$). L representa según el caso a las distancias $DS_{AB}$, $DS_{BB}$ y $DS_{B_bordeizquierdo}$ - $DS_{B_bordeinferior}$, respectivamente.

*2.4 Conformación de la función objetivo - Cálculo de costos de tanques, conectividad y terreno.*

Dadas las funcionalidades asociadas a la división de inventario y las dimensiones del área ocupada, la FO (Ec. 3) queda determinada como la suma de todos los costos que se detallan a continuación.

2.4.1. Costos de conexiones.

Los costos de tuberías se computan a través de la Ec. (8).

$$C_I = \frac{(1+F)C_T L}{T}\frac{CEPCI_{actual}}{CEPCI_{2002}} \quad (8)$$

Siendo F la relación entre el costo de instalación y el de adquisición, con un valor de 0.4, $C_T$ el costo por unidad de longitud de tubería, L distancia entre tanques que almacenan B. El costo de los tanques se afecta por la vida útil; asumiendo T = 10 años. La actualización se realiza según el índice CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index) -$CEPCI_{2002}$ = 390.4 y $CEPCI_{actual}$ = 607.5.

Para obtener $C_T$ se recurre a las expresiones matemáticas (9)-(11) desarrolladas por Wang *et al.* (2020) considerando ductos Schedule 40, ya que la nafta es un fluido que se transporta a baja presión.

$$C_T = E_1 wt^{pipe} + E_2(D^{out})^{0.48} + E_3 + E_4 D^{out} \quad (9)$$

$$wt^{pipe} = 644.3\frac{4q}{\pi\rho v} + 72.5\sqrt{\frac{4q}{\pi\rho v}} + 0.4611 \quad (10)$$

$$D^{out} = 1.052\sqrt{\frac{4q}{\pi\rho v}} + 0.005251 \quad (11)$$

Donde E1-E4 son parámetros constantes, $E_1$= 0.82, $E_2$ = 185, $E_3$ = 6.8, $E_4$ = 295, $wt^{pipe}$ es la masa por unidad de distancia (kg/m) y $D^{out}$ el diámetro externo (m). Los datos para caudal, densidad y velocidad dentro de la cañería son tomados de ejemplos similares del trabajo de Wang *et al.* (2020).

2.4.2. Costos de tanques.

Se tienen en cuenta múltiples factores a la hora de cuantificar el valor de una unidad y se recopilan en la Ec. (12). El costo total de los tanques (CTK) se obtiene del producto entre el costo individual (Cact) y el número de tanques (n).

$$C_{TK} = n(1+F)C_{IT}\frac{CEPCI_{actual}}{CEPCI_{1998}} \quad (12)$$

Siendo F la relación costo de instalación/costo de compra, e igual a 0.4, CIT es el costo de un único tanque (en USD) de volumen v (m3) y CEPCI1998=389.5, CEPCIactual=607.5.

2.4.2.1 Obtención de CIT.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Para los tanques de GLP se recurrió al procedimiento propuesto por Loh, Loyns y White (2002) utilizando los valores reportados para tanques presurizados, obteniéndose una correlación cuadrática (Ec. (13)).

$$C_{IT}A = 773.52D_e^2 + 6310D_e + 184.01 \quad (13)$$

Con respecto a la sustancia B, se obtiene la correlación cuadrática (Ec. (14)) por medio del ajuste de los valores reportados para tanques atmosféricos con techo flotante.

$$C_{IT}B = 0.0003V_B^2 + 44.32V_B + 155730 \quad (14)$$

2.4.3 Costos del terreno.

Se recurre a la cuantificación básica del costo del terreno multiplicando su área por el costo por unidad de área y se obtiene Cterreno, utilizando Cland= 5 USD/m$^2$, que transformado a pesos argentinos resulta, Cland = 6627.22 pesos/m$^2$.

## 3. Resultados y discusión

El problema de optimización planteado aquí se conforma por una FO descrita en las Ecs. (3), (8)-(14). Las principales variables de optimización son el número de tanques a utilizar y su ubicación en el terreno, tomando en cuenta las restricciones que imponen las DSs -separación entre las distintas unidades de proceso-. Otra variable optimizable es la posición de la sala de máquinas y las oficinas, considerando los límites impuestos por el espacio del parque de almacenamiento.

Es posible identificar a priori múltiples trade-off; por ejemplo, mayor número de divisiones (tanques) implica menor masa de sustancia peligrosa involucrada en la falla de un tanque y por lo tanto menores DSs. Esto impacta en el área del terreno (menor valor), aunque el costo de tanques se incrementa (factor de escala, fundaciones, entre otros factores); y, por último, en menor medida, aumentando el costo de conexión entre unidades de proceso, impactando todo ello en la FO. Es de notar, además, que la dimensión del terreno total disponible es otra variable de relevancia.

Cabe destacar que la obtención de las DSs entre unidades mediante modelos subrogados reduce sustancialmente la complejidad del problema, ya que los modelos rigurosos existentes según el estado del arte son muy complejos. Además, por su orientación estiman riesgo en función de la distancia, por lo que, en este caso, debiera utilizarse un procedimiento iterativo.

Dentro de este contexto, ha sido posible la resolución de este problema utilizando una planilla Excel, empleando GRG Nonlinear de Solver. El terreno de área mínima resultante, cumpliendo las restricciones requeridas (números enteros, en el espacio factible, etc.) se presenta en la Tabla 1. En este caso, se ubican en la solución óptima, el máximo número de tanques posibles.

**Tabla 1.** Resultados para el área mínima del ejemplo de aplicación.

| Dimensiones | Resultados (m) | Numero de tanques | Resultados |
|---|---|---|---|
| Ancho | 227.33 | $n_A$ | 3 |
| Largo | 239.31 | $n_B$ | 16 |

Por otra parte, es interesante analizar también, el caso en el cual no existen restricciones de extensión territorial. Aquí, la solución óptima involucra un tanque para cada sustancia, siendo las dimensiones del terreno las presentadas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Resultados sin restricciones de terreno para una función costo mínima.

| Dimensiones | Valor (m) |
|---|---|
| Ancho | 391.60 |
| Largo | 208.60 |

Finalmente, para un terreno de dimensiones cuadradas, siendo su amplitud en ambas direcciones 250 metros, el número de tanques de sustancia A (GLP) resulta en un valor de 3 mientras que el número de tanques de sustancia B toma un valor de 8. Además, la posición óptima de la sala de máquinas resulta en la parte superior del layout mientras que las oficinas deben ubicarse a la derecha de éste. La disposición de esta solución óptima se presenta en la Figura 3.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

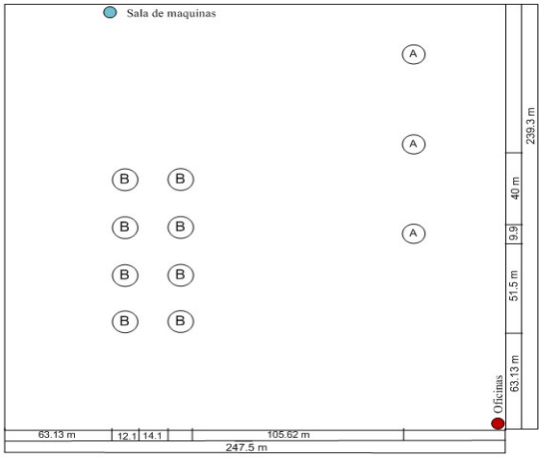



**Figura 3.** Layout de restricciones cuadradas.

## 4. Conclusiones

En el presente trabajo se propone la optimización del layout para una playa de almacenamiento de sustancias inflamables y explosivas utilizando una herramienta informática básica como Ms. Excel. Dadas la naturaleza de las sustancias y las características del almacenamiento, se estiman las DSs mediante modelos subrogados. Según los resultados obtenidos se concluye que es posible con esta estrategia, obtener soluciones a un problema muy complejo, aún con herramientas de optimización básicas.

Imponiendo una restricción al terreno, se alcanza una solución óptima dividiendo el inventario. Sin embargo, sin esta restricción, es más conveniente almacenar cada inventario total en un único tanque; debido a que se reduce el costo de los mismos significativamente, al emplearse menos material para su construcción, compensando el aumento del costo del terreno. Se obtiene asimismo un costo total significativamente menor, dadas las dimensiones máximas admisibles del terreno. La planilla desarrollada establece un área mínima de terreno requerida para la cual es posible encontrar una solución entera. De considerar superficies menores a dicho umbral, el modelo resulta inviable, ya que no es posible satisfacer simultáneamente todas las restricciones planteadas.

Por último, es de notar que las distintas soluciones (configuraciones óptimas obtenidas) varían en función de la relación entre el costo del terreno y el de los tanques, siendo estos valores contingentes. En futuros trabajos se evaluará la naturaleza de tales variaciones, en un rango de validez práctica.

## Referencias bibliográficas

Alileche, N. et al. (2017) «Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method», Safety Science, 97, pp. 10-19. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.028.

Loh, H.P., Loyns, J. y White, C.W. (2002) «Process Equipment Cost Estimation, Final Report».

Orellano, S. et al. (2024) «Large Pool Fires in the Process Industry. A Simple Model for Safety Distances Estimation», Latin American Applied Research - An international journal, 54(3), pp. 395-406. Disponible en: https://doi.org/10.52292/j.laar.2024.3239.

Vílchez, J.A., Espejo, V. y Casal, J. (2011) «Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials», Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24(3), pp. 281-287. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.01.005.

Wang, R. et al. (2020) «A layout design method for an industrial park based on a novel arrangement algorithm – Consideration of pipe network and multiple hazard sources», Chemical Engineering Science, 227, p. 115929. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115929.

Orellano, S. (2024) “Metodología para la optimización de layout y síntesis de procesos considerando el riesgo tecnológico”, Thesis (Doctor en Ingeniería), Universidad Tecnológica Nacional, Rosario.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Estudio comparativo de los agentes atmosféricos corrosivos sobre cupones de acero al carbono en distintos sitios del área metropolitana de la ciudad de Rosario

## Comparative study of atmospheric corrosive agents on carbon steel coupons in different sites of the metropolitan area of Rosario city

Presentación: 30/10/2025

**Valentina Aletti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Rosario, Santa Fe, Argentina
valealetti@gmail.com

**Brandina Capriotti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Rosario, Santa Fe, Argentina
bcapriotti@frro.utn.edu.ar

### Resumen

Este trabajo presenta un estudio comparativo de la corrosión atmosférica en distintos puntos de la ciudad de Rosario, utilizando cupones de acero al carbono expuestos a la intemperie durante dos años y medio en diez estaciones de monitoreo. Los resultados mostraron una marcada variabilidad espacial de la corrosión: las zonas con mayor actividad industrial y tránsito pesado alcanzaron valores superiores a 80 g/m²·año, mientras que áreas residenciales y parques no superaron los 30 g/m²·año. Asimismo, las cercanías al río evidenciaron niveles de corrosividad más altos debido a la humedad y a la presencia de contaminantes asociados a la navegación. En general, las atmósferas estudiadas pudieron clasificarse entre las categorías C2 (baja) y C4 (alta) de la norma ISO 9223. Estas conclusiones aportan información clave para el mantenimiento de infraestructuras y la selección de materiales adecuados en función de la agresividad ambiental de cada zona.

**Palabras clave:** Corrosión Atmosférica, Estudio comparativo, Ciudad de Rosario

### Abstract

This study presents a comparative analysis of atmospheric corrosion in different areas of the city of Rosario, using carbon steel coupons exposed outdoors for two and a half years at ten monitoring stations. The results revealed a marked spatial variability of corrosion: industrial and high-traffic zones reached values above 80 g/m²·year, while residential areas and parks did not exceed 30 g/m²·year. In addition, sites near the river showed higher corrosivity levels due to humidity and pollutants associated with navigation. Overall, the tested atmospheres were classified between categories C2 (low) and C4 (high) according to ISO 9223. These findings provide key information for infrastructure maintenance and for selecting appropriate materials based on the environmental aggressiveness of each area.

**Keywords:** Atmospheric corrosion, Comparative study, City of Rosario

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

La corrosión es un proceso de deterioro de los materiales metálicos causado por reacciones electroquímicas con el entorno, que puede comprometer su integridad estructural. A nivel mundial, cerca del 50 % de las pérdidas económicas por corrosión se atribuyen a la corrosión atmosférica, lo que resalta su importancia.

El presente trabajo se centra en el estudio de la corrosión atmosférica en la ciudad de Rosario mediante la exposición de cupones de acero al carbono. El proyecto, desarrollado por el Grupo de Estudios sobre Energía y Medio Ambiente (GESE) de la UTN-FRRo en colaboración con la Municipalidad, sigue los lineamientos de la norma ASTM G50-10. Para ello, se instalaron diez estaciones de monitoreo en zonas con diferentes niveles de contaminación, desde áreas de intenso tránsito hasta sectores industriales. Los cupones se retiraron de manera semestral para su análisis en laboratorio, con el fin de evaluar la pérdida de masa y caracterizar los productos de corrosión. Este estudio busca aportar información útil para la preservación de infraestructuras urbanas frente a la acción corrosiva del ambiente.

# 2. Materiales y métodos

El trabajo tiene como objetivo determinar la categoría de corrosividad de distintas zonas según la Norma ISO 9223 (2012), instalando diez estaciones de monitoreo en áreas con condiciones climáticas y geográficas similares. La corrosión se evalúa como función de variables ambientales (temperatura, humedad, tiempo de humectación, precipitación, viento, radiación solar y contaminantes atmosféricos como cloruros y óxidos de azufre, nitrógeno y carbono).

Las tareas de campo incluyen el montaje de soportes y cupones metálicos de prueba, cuya exposición permitirá calcular la tasa de corrosión (rcorr) y clasificar cada zona en una de las categorías de agresividad de la ISO 9223 (C1 a CX).

Los resultados contribuirán al Mapa de Corrosión Atmosférica del país y servirán como referencia para constructores y usuarios de materiales.

## 2.1 *Armado de Soportes*

Los soportes fueron ensamblados siguiendo las especificaciones de la Figura 1. Los componentes, ya pintados, fueron recibidos y preparados en el laboratorio para su montaje. El croquis aproximado de los soportes se muestra en la siguiente figura:

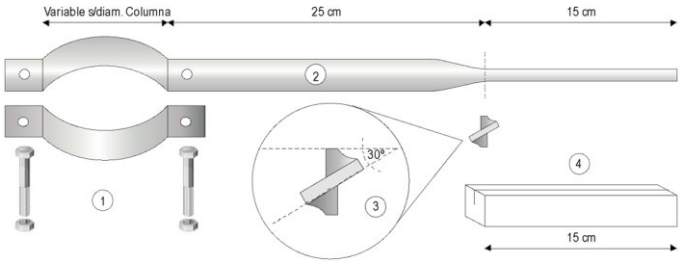



**Figura 1**. Croquis del soporte porta cupones de hierro al carbono

Para el montaje de los soportes, se colocó una brida de anclaje a la planchuela, de manera que el soporte del cupón quede formando un ángulo de 33º con la horizontal. Este ángulo se seleccionó para coincidir aproximadamente con la latitud geográfica de los sitios de ensayo, un requisito establecido por las normas de referencia.

## 2.2 *Preparación de cupones de corrosión*

Los cupones de acero al carbono (10 × 15 cm, 1 mm de espesor) se montaron en soportes con inclinación de 33° respecto a la horizontal y orientados al norte, aislados con material dieléctrico para evitar corrientes galvánicas. El diseño siguió las recomendaciones de la Norma ISO 9223-2012. Para su adaptación, se realizaron perforaciones no simétricas que permiten distinguir la cara superior e inferior.

El procedimiento de limpieza incluyó desengrasado con detergente y agua, secado con papel absorbente y luego en estufa a 107 °C durante 24 h, seguido de 24 h en desecador. Posteriormente se pesaron con precisión de 0,01 g.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Cada cupón fue identificado con un código de 5 dígitos. Para cada período se prepararon 10 cupones de ensayo y un cupón adicional protegido, usado como testigo.

Finalmente, los cupones se empaquetaron en papel film con el fin de protegerlos de la humedad ambiental hasta su instalación en los soportes. La colocación de los cupones de acero al carbono se realiza de como muestra la siguiente figura.

**Figura 2**. Instalación del cupón en la esquina de Corrientes y San Lorenzo

Las probetas se dispusieron de esta manera en los soportes de manera que se asegure que cada uno esté sometido a condiciones lo más equivalentes posibles, lo que permite la comparación de resultados sin que la disposición introduzca diferencias significativas.

Se debe procurar dejar un espacio entre la probeta y la columna de manera que el aire circule libremente y no haya zonas "muertas" de ventilación. Además, se debe tener especial cuidado en que todas reciban luz solar y el agua escurra sobre ellas, evitando que algunas reciban sombra y otras no reciban agua.

2.3 *Instalación de las estaciones de monitoreo*

Una vez preparada toda la logística de montaje, se procede a instalar las estaciones de monitoreo de corrosión atmosférica en las siguientes zonas de la ciudad de Rosario:

(1) Sobre el Metrobús, altura Juan José Paso, (2) Cementerio El Salvador, sobre Av. Godoy, siguiendo la dirección de los vientos, (3) Cementerio La Piedad, sobre calle Amenábar, siguiendo la dirección de los vientos, (4) Intersección Santa Fe y Vera Mujica, (5): Intersección Av. Corrientes y San Lorenzo, (6) Calle 9 de Julio, zona con abundante arbolado, (7)Unite en Intersección Av. Pellegrini y Circunvalación, (8) Cercanías del frigorífico Swift, zona de Grandoli y Lamadrid, (9) Av. Ovidio Lagos, pasando Circunvalación, en área industrial, (10) Ruta 21 (ex ruta 9).

2.4 *Tratamiento de las muestras*

Una vez establecidas las estaciones y finalizado el periodo de exposición, se procedió a retirar los cupones para analizar los efectos de la corrosión a medida que pasa el tiempo. Una vez que se recogieron los primeros cupones se llevó a cabo la limpieza de los mismos siguiendo la metodología que establece la Norma ASTM G1-03:

*Registro y observación inicial*: Se realizó un registro fotográfico de los cupones tal como se retiraron de los Soportes y se examinaron al microscopio. Durante la exposición, el acero al carbono (compuesto principalmente por hierro) sufre una oxidación en contacto con oxígeno y agua (humedad del ambiente). En presencia de contaminantes como $SO_2$ o cloruros, el proceso se acelera. Las reacciones que se llevan a cabo son:

Oxidación del hierro (ánodo):

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + e^- + e^- \quad (1)$$

Reducción del oxígeno (cátodo):

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$O_2 + 2\ H_2O + 4\ e^- \rightarrow 4\ OH^- \quad (2)$$

Formación de hidróxidos de hierro:

$$Fe^{2-} + 2\ OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (3)$$

*Pesada inicial*: Se pesaron hasta obtener un valor constante.

*Lavado químico*: Se sumergieron en una solución de hidróxido de sodio y zinc metálico durante aproximadamente 40 minutos, a una temperatura de 80–90 °C. Con este lavado, se busca remover los productos de corrosión sin afectar significativamente el metal base. El zinc, en nuestro caso, actúa como catalizador promoviendo la liberación de hidrógeno molecular a partir del hierro en contacto con hidróxido de sodio.

La reacción que ocurre en esta solución se basa en la reducción de los óxidos de hierro mediante zinc como agente reductor en medio básico, la reacción general esperada es:

$$Fe_2O_3 + 3\ Zn + 6\ NaOH \rightarrow 2\ Fe + 3\ Na_2ZnO_2 + 3\ H_2O \quad (4)$$

Reacción de reducción del óxido de hierro ($Fe_2O_3$):

$$Fe_2O_3 + 6\ e^- + 6\ H_2O \rightarrow 2\ Fe + 6\ OH^- \quad (5)$$

Reacción de oxidación del zinc metálico:

$$Zn \rightarrow Zn_2 + e^- + e^- \quad (6)$$

*Lavado mecánico*: Tras un lavado previo con agua y detergente, se cepillaron para eliminar residuos adheridos.

*Secado y pesada final*: Los cupones se dejaron secar en un desecador y se pesaron nuevamente. Este procedimiento se repitió hasta que la pesada mostró un valor constante, asegurando la correcta eliminación de productos de corrosión.

2.5 *Cálculo de la pérdida de masa por unidad de área y velocidad de corrosión de los cupones*

La pérdida de masa de cada cupón es:

$$M_1 = M_0 - M_f \quad (6)$$

Donde $M_1$es la masa perdida del cupón [g], $M_0$ la masa inicial antes de colocarlo en el bastidor [g] y $M_f$ la masa final, después del tratamiento [g].

La pérdida de masa por unidad de área que sufrió cada cupón, como consecuencia de la corrosión, se calculó a partir de la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{M_a = \frac{M_1}{A}} \quad (6)$$

Siendo $M_a$ la pérdida de masa por unidad de área [g/m$^2$] y $A$ la superficie expuesta [m$^2$]

La velocidad de corrosión se determinó empleando las ecuaciones anteriores, donde la velocidad de corrosión $C_1$ se estimó según

$$\boldsymbol{C_1 = \frac{(8,76 \times 10^7)\ M_1}{a\ t\ d}} \quad (6)$$

Donde $C_1$ es la velocidad de corrosión [µm/año], $a$ el área [cm$^2$], $t$ el tiempo [h], $d$ la densidad [g/cm$^3$] (en el caso del acero al carbono es 7,86 g/cm$^3$). Por otro lado, la velocidad de corrosión $C_2$ (g/m$^2$ año) fue estimada mediante,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$C_2 = \frac{(1 \times 10^4\, d)\, M_1}{a\, t\, d} \tag{6}$$

## 3. Resultados y discusión

Para realizar el análisis, se compararon los valores de masa inicial y final de los cupones tras su exposición a la atmósfera. Con estos datos se determinaron la pérdida de masa por unidad de área y la velocidad de corrosión, expresada en µm/año y g/m²·año. A partir de dichos valores se elaboraron, con el programa Surfer, isolíneas que representan la distribución espacial de la corrosión para el periodo 1 (del 25/08/21 al 23/03/22) y para el periodo 2 (del 25/09/22 al 25/03/23) lo que permite identificar las diferencias de agresividad entre los distintos sectores de la ciudad. En los mapas obtenidos, los colores fríos como azul y violeta indican zonas con baja corrosión, mientras que los tonos cálidos como rojo y naranja reflejan áreas con mayor degradación. Las curvas negras corresponden a isocorrosión, es decir, unen puntos con la misma tasa de ataque. A continuación, se muestran las isolíneas correspondientes a los diferentes períodos de exposición analizados.

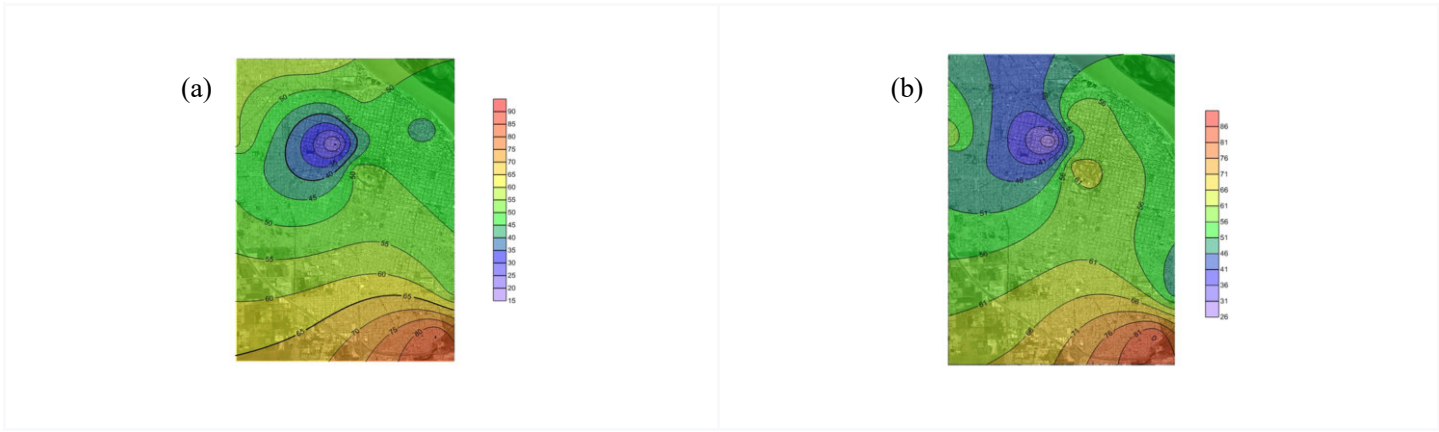



**Figura 3.** Isolíneas correspondientes al (a) periodo 1 y (b) al periodo 2.

## 4. Conclusiones

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir que la corrosión atmosférica en la ciudad de Rosario presenta una marcada variabilidad espacial, fuertemente influenciada por la actividad que esta posee, es decir, industrial, la densidad vehicular y la proximidad al río.

Se observó que la zona sur, caracterizada por una mayor concentración de industrias y transporte pesado, presentó las velocidades de corrosión más elevadas, alcanzando valores superiores a 80–85 g/m²·año. En contraste, áreas de menor actividad antrópica, como los parques o zonas residenciales con abundante arbolado (Parque Independencia), mostraron valores sensiblemente inferiores, cercanos a 20–30 g/m²·año.

Asimismo, se determinó que las zonas cercanas al río exhibieron niveles de corrosividad superiores a la zona céntrica, esto se puede deber no solo por la mayor humedad y la acción del viento, sino también por el intenso tránsito de barcos de gran porte, cuyas emisiones y maniobras contribuyen a incrementar la presencia de contaminantes y aerosoles salinos en el ambiente. No obstante, dentro del área céntrica también se registraron sectores puntuales con alta corrosividad, vinculados principalmente al tránsito vehicular intenso.

En términos generales, los resultados permiten clasificar las atmósferas ensayadas entre categorías C2 (baja) y C4 (alta) según la norma ISO 9223, lo que confirma la existencia de ambientes con diferentes grados de agresividad dentro de una misma región metropolitana.

Este estudio no solo aporta datos relevantes al Mapa de Corrosión Atmosférica de la Argentina, sino que también constituye una herramienta útil para planificar estrategias de mantenimiento de infraestructuras públicas y privadas, optimizando la selección de materiales y tratamientos de protección en función de la agresividad ambiental de cada zona.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario (UTN-FRRo) y a la Municipalidad de Rosario por el apoyo para la instalación y el recambio de los cupones.

## Referencias bibliográficas

ASTM G50 - 10 Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals.

ASTM G33 – 99 Standard Practice for Recording Data from Atmospheric Corrosion Tests of Metallic-Coated Steel Specimens.

Norma ISO 9223 - "Corrosión de metales y aleaciones - Corrosividad de atmósferas - Clasificación, determinación y estimación"

J. R. Vilche, F. E. Varela, G. Acuña, E. N. Codaro, B. M. Rosales, A. Fernández and G. Moriena, “A survey of Argentinean Atmospheric Corrosion: I - Aluminium and Zinc Samples” Corrosion Science, Vol. 37, Nº 6, 941 - 961 (1995) Elsevier Science Ltd.

J. R. Vilche, F. E. Varela, E. N. Codaro, B. M. Rosales, G. Moriena and A. Fernández, “A Survey of Argentinean Atmospheric Corrosion: II - Copper Samples”, Corrosion Science, Vol. 39, Nº 4, 655 – 679 (1997) Elsevier Science Ltd.

Branko N. Popov, Corrosion Engineering - Principles and Solved Problems, ISBN: 978-0-444-62722-3, Elsevier, 2015.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Determinación del Índice de Calidad del Agua en drenajes urbanos

## Determination of the Water Quality Index in urban drainage systems

Presentación 30/10/2025

**Daniel Andereggen**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Estudios de Medio Ambiente (GEM), Rafaela, Argentina
mmodanielandereggen@gmail.com

**Valentín Piovano**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Estudios de Medio Ambiente (GEM), Rafaela, Argentina
valepiovano2004@gmail.com

### Resumen

El presente trabajo evaluó la calidad del agua en tres puntos del Canal Norte de la ciudad de Rafaela, Santa Fe, para determinar sus características teniendo en cuenta una posible disposición final en cauces con uso recreativo. Se analizaron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, con un enfoque en las bacterias coliformes fecales como indicador de contaminación. Los análisis mostraron varios parámetros que superan los límites normativos, particularmente los sólidos suspendidos, el nitrógeno total y las bacterias coliformes fecales. Para expresar los resultados se empleó el Índice Canadiense de Calidad de Agua (CCME-WQI), que clasificó la calidad del agua como "Marginal" en el Punto 1 y "Pobre" en los puntos 2 y 3. El estudio concluye que las condiciones actuales no son las adecuadas para un drenaje urbano cuya disposición final podría ser utilizada para uso recreativo, y que la contaminación bacteriológica es la principal limitación.

**Palabras clave**: Índice de Calidad del Agua; Rafaela; Drenajes urbanos.

### Abstract

This study evaluated the water quality at three points along the Canal Norte (North Canal) in the city of Rafaela, Santa Fe, to determine its characteristics considering a possible final disposal in water bodies used for recreational purposes. Physicochemical and bacteriological parameters were analyzed, with a focus on fecal coliform bacteria as an indicator of contamination. The analyses showed several parameters exceeding regulatory limits, particularly suspended solids, total nitrogen, and fecal coliform bacteria. The Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME-WQI) was used to express the results, classifying the water quality as "Marginal" at Point 1 and "Poor" at points 2 and 3. The study concludes that the current conditions are not adequate for urban drainage whose final disposal could be used for recreational use, and that bacteriological contamination is the main limitation.

**Keywords**: Water Quality Index; Rafaela; Urban Drainage.

## 1. Introducción

El agua es un recurso natural indispensable para la vida y el desarrollo humano, cuya calidad se ve directamente afectada por las actividades antrópicas. En áreas urbanas, los cuerpos de agua superficiales suelen recibir descargas de origen doméstico, industrial y pluvial, lo que puede comprometer su aptitud para distintos usos, en especial el recreativo. Es por esto, que la evaluación de la calidad del agua resulta fundamental para orientar medidas de gestión y protección ambiental (Griffa et al., 2025).

En el centro de la provincia de Santa Fe, se desarrolla una intensa actividad agropecuaria e industrial, concentrándose especialmente la producción lechera y agrícola, la cual constituye un sector estratégico para la economía provincial (Pero et

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

al., 2025). Sin embargo, en ausencia de un manejo adecuado, estas actividades pueden impactar significativamente sobre los ecosistemas acuáticos, modificando sus condiciones naturales y generando procesos de contaminación difusa.

En particular, la ciudad de Rafaela y su área de influencia carecen de estudios sistemáticos sobre la dinámica ecológica de sus cauces fluviales, teniendo en cuenta que dichos canales son de drenaje urbano, lo que resalta la necesidad de investigaciones que permitan evaluar su calidad de agua y el riesgo potencial para los usos recreativos en su disposición final. El estudio se fundamentó en la evaluación de la calidad de los canales de descarga, a través de la determinación de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, con el propósito de establecer su aptitud antes de su disposición en el cuerpo receptor, el arroyo Cululú. Resulta esencial garantizar que los vertidos no generen riesgos para la salud pública ni comprometan la integridad ambiental del sistema acuático.

Los Índices de Calidad del Agua (ICA) constituyen herramientas de síntesis que permiten transformar la información compleja de múltiples parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en un único valor representativo. Esto facilita la comunicación de resultados tanto a tomadores de decisiones como al público en general (Puente Miranda et al., 2023). Existen diferentes metodologías de cálculo de ICA, entre las que se destaca el Índice Canadiense de Calidad de Agua (CCME-WQI) desarrollado por el Canadian Council of Ministers of the Environment. Su aplicación ha demostrado ser útil en diversos contextos, desde la evaluación de lagos y ríos hasta cursos de agua urbanos (Lumb et al., 2011).

Los canales Norte y Sur de Rafaela forman parte de la cuenca del arroyo Las Prusianas, que a su vez desemboca en el arroyo Cululú. El Canal Norte descarga por la Cañada de Flesia antes de que sus aguas confluyan en el arroyo Las Prusianas. Por su parte, el Canal Sur desemboca directamente en dicho arroyo. Finalmente, las aguas del arroyo Las Prusianas confluyen en el arroyo Cululú, que a su vez es afluente del río Salado en la provincia de Santa Fe.

En el presente trabajo se plantea como objetivo evaluar la calidad del agua del Canal Norte de la ciudad de Rafaela (Santa Fe, Argentina), utilizado como drenaje urbano. Para ello, se realizaron muestreos en tres periodos de tiempo (2021, 2022 y 2025) en tres puntos estratégicos del canal, denominados Punto 1, Punto 2 y Punto 3, y se realizaron análisis fisicoquímicos y bacteriológicos en cada una de las muestras extraídas. Los resultados obtenidos se procesaron mediante el cálculo del CCME-WQI, permitiendo una visión integrada del estado del recurso.

## 2. Metodología

2.1. *Toma de muestras*

Este estudio se llevó a cabo en la ciudad de Rafaela, ubicada en la zona centro oeste de la provincia de Santa Fe (Figura 1), formando parte de la cuenca lechera más importante del país. Además, tiene una amplia variedad de industrias relacionadas al rubro metalmecánico, alimenticio, papelero, entre otros.

**Figura 1.** Ubicación geográfica de la Ciudad de Rafaela

Cabe destacar que la ciudad cuenta con un único sistema de descarga superficial, que son los canales Norte y Sur, denominados canales de drenaje urbano, donde se realiza la disposición final de los efluentes urbanos e industriales. Con el fin de caracterizar su calidad, se seleccionaron distintos puntos estratégicos de muestreo a lo largo del recorrido del Canal Norte (Figura 2 y 3).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La extracción de las muestras de agua en distintos puntos del Canal Norte se realizó en tres períodos: 2021, 2022 y 2025, siguiendo los procedimientos establecidos por la American Public Health Association (APHA, 2017).

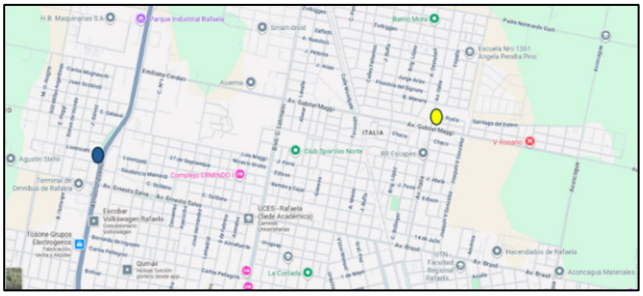


**Figura 2.** Ubicación Puntos 1 y 2

**Figura 3.** Ubicación Punto 3

2.2. *Análisis fisicoquímicos y bacteriológicos*

El trabajo se basó en tres muestreos realizadas en los años 2021, 2022 y 2025, lo que permitió evaluar la evolución temporal de la calidad del agua en el Canal Norte de Rafaela. Se incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos establecidos en normativas nacionales y directrices internacionales.

Las muestras fueron transportadas y analizadas en el laboratorio de química de la UTN Regional Rafaela mediante técnicas normalizadas. Se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO5), fósforo total (P total), nitrógeno total (NTK), cianuros, fenoles, detergentes aniónicos, arsénico, cadmio, mercurio, plomo, cromo total, sustancias solubles en éter etílico y sulfuros; y el parámetro bacteriológico corresponde a coliformes fecales (CF), considerado indicador clave de contaminación fecal. Para los parámetros químicos se emplearon métodos espectrofotométricos, volumétricos y gravimétricos, mientras que la cuantificación de coliformes se realizó mediante el método de número más probable (NMP) (APHA, 2017).

2.3. *Determinación del Índice de Calidad del Agua (ICA)*

Los resultados obtenidos de las determinaciones fisicoquímicas y bacteriológicas fueron integrados mediante el cálculo del Índice Canadiense de Calidad de Agua (CCME-WQI). Este índice combina tres factores: F1 (alcance): proporción de variables que superan los valores guía establecidos; F2 (frecuencia): porcentaje de test individuales que incumplen los límites; y F3 (amplitud): magnitud de los incumplimientos, calculada a partir de la suma de excursiones (desviaciones) normalizada (NSE).

La integración de estos factores se realiza mediante la ecuación (1):

$$CCME - WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1{,}732}\right) \quad (1)$$

Donde 100 representa la calidad perfecta del agua (sin incumplimientos), y el denominador 1,732 es la raíz cuadrada de 3, usada para normalizar la escala.

Los valores obtenidos de la formula del ICA, se comparan según la Tabla de Clasificación (Tabla 1) que considera la calidad desde excelente a pobre.

**Tabla 1**. Clasificación ICA

| Rango | Clasificación |
|---|---|
| 95-100 | Excelente |
| 80-94 | Buena |
| 65-79 | Aceptable |
| 45-64 | Marginal |
| 0-44 | Pobre |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Además del cálculo del CCME-WQI como referencia metodológica internacional, los resultados fueron contrastados con los valores guía y normativas aplicables en la Provincia de Santa Fe y en Argentina, especialmente la Resolución N°1089/82 que regula la calidad de los vuelcos de efluentes líquidos en cuerpos receptores. A su vez, se incorporaron guías internacionales complementarias, entre ellas las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2003; 2005) y del Canadian Council of Ministers of the Environment (2017), que respaldan la metodología empleada.

De esta manera, el análisis integra un enfoque comparativo entre estándares internacionales y normativas locales, lo que permite interpretar el estado del Canal Norte tanto en términos globales como en el marco regulatorio vigente.

## 3. Resultados y discusión

El análisis de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos determinados en las muestras de los puntos 1, 2 y 3 del canal Norte de Rafaela revela que los más críticos corresponden a los sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, sulfuros y coliformes fecales, que presentaron incumplimientos frecuentes en el período estudiado. Respecto del pH, se mantuvo estable en rangos moderadamente básicos (aprox. 7.9–8.4), siempre dentro del intervalo normativo de 5.5–10.0.

Otros parámetros mostraron variabilidad y, en varios casos, superaron los límites de vertimiento permitidos: en el Punto 3, los sólidos suspendidos totales (623 mg/L) y la DQO (74.5 $mgO_2/L$) alcanzaron valores muy altos en 2022, superando los límites de 30 mg/L y acercándose al valor máximo de 75 $mgO_2/L$, respectivamente.

Asimismo, los coliformes fecales fueron elevados en las muestras de 2021 y 2025 (hasta $2 \cdot 10^4$ NMP/100mL en P1 y $>1.4 \cdot 10^6$ en P2), indicando contaminación fecal significativa.

**Tabla 2.** Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en Punto 1,2 y 3

| ANALISIS FISICO QUIMICOS y BACTEREOLOGICOS | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PARAMETROS | PUNTO 1 | | | PUNTO 2 | | | PUNTO 3 | | |
| | 2021 | 2022 | 2025 | 2021 | 2022 | 2025 | 2021 | 2022 | 2025 |
| pH | 8,3 | 8,3 | 8,4 | 8 | 7,9 | 8 | 8,1 | 7,9 | 8 |
| Sólidos suspendidos totales (mg/l) | 3 | 38 | 14 | 14 | 2 | 217 | 16 | 623 | 7 |
| DQO (mg O2/l) | 4 | 7,5 | 19,4 | 6,9 | 13,8 | 37 | 18,8 | 74,5 | 20 |
| DBO (mg O2/l) | 3,5 | 2,5 | 2 | 3,1 | 5,3 | 16,4 | 3,4 | 45,1 | 4,7 |
| Fósforo (mg P/l) | 0,47 | 0,21 | 0,31 | 0,7 | 0,89 | 1,34 | 0,51 | 1,46 | 1,03 |
| Nitrógeno total (mg N/l) | 30,1 | 27,8 | 9,8 | 50 | 29,4 | 26,6 | 51,5 | 64,4 | 29,4 |
| Cianuros (mg CN/l) | 0,005 | 0,002 | 0,005 | 0,005 | 0,002 | 0,005 | 0,005 | 0,002 | 0,005 |
| Fenoles (mg/l) | 0,05 | 0,002 | 0,05 | 0,05 | 0,002 | 0,05 | 0,05 | 0,002 | 0,05 |
| Detergentes aniónicos (Sust. Activas al azul de metileno) (mg/l) | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,2 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,67 |
| Arsénico (mg As/l) | 0,021 | 0,032 | 0,021 | 0,05 | 0,06 | 0,055 | 0,033 | 0,025 | 0,044 |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,02 | 0,002 | 0,02 | 0,02 | 0,002 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Mercurio (mg Hg/l) | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 |
| Plomo (mg Pb/l) | 0,02 | 0,005 | 0,02 | 0,02 | 0,005 | 0,02 | 0,02 | 0,005 | 0,02 |
| Cromo total (mg Cr/l) | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,01 | 0,02 |
| Sustancias solubles en éter etílico (mg/l) | 3,2 | 12,2 | 9,6 | 1 | 24,8 | 14,4 | 4,4 | 5,8 | 15,6 |
| Bacterias coliformes fecales (UFC (colonia)/100 ml) | 20000 | 1 | 10000 | 1100000 | 40000 | 10000 | 93000 | 14000000 | 1400000 |
| Sulfuros (mg S-2/l) | 1,75 | 0,5 | 2,4 | 0,5 | 0,5 | 1,2 | 0,5 | 0,5 | 0,05 |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 3.** Valores límite de volcamiento

| Parámetro | Límite de volcamiento | |
|---|---|---|
| pH | 5,5 | 10 |
| Sustancias solubles en éter etílico (mg/l) | 100,0mg/l | |
| Sulfuros (mg S-2/l) | 1,0mg/l | |
| Fósforo (mg P/l) | 2,0mg/l | |
| Arsénico (mg As/l) | 0,2mg/l | |
| Cianuros (mg CN/l) | 0,2mg/l | |
| Cromo total (mg Cr/l) | 0,1mg/l | |
| Plomo (mg Pb/l) | 0,1mg/l | |
| Nitrógeno total (mg N/l) | 15,0mg/l | |
| Cadmio (mg Cd/L) | 0,1mg/l | |
| Mercurio (mg Hg/l) | 0,005mg/l | |
| Fenoles (mg/l) | 0,05mg/l | |
| Detergentes aniónicos (Sust. Activas al azul de metileno) (mg/l) | 1,0mg/l | |
| Bacterias coliformes fecales (UFC (colonia)/100 ml) | 126,0UFC/100ml | |
| Sólidos suspendidos totales (mg/l) | 30,0mg/l | |
| DQO (mg O2/l) | 75mgO2/l | |
| DBO (mg O2/l) | 50mgO2/l | |

Como muestra la Tabla 2, en Punto 1 hubo cuatro parámetros que presentaron valores fuera del límite permitido por la legislación vigente (Tabla 3): sólidos suspendidos, nitrógeno total, sulfuros y coliformes fecales, de un total de 17 determinaciones realizadas.

De igual modo, en los otros puntos de muestreo la incidencia de valores fuera de la ley fue alta, especialmente en 2022 y 2025.

La Tabla 4 muestra los valores de los factores F1 y F2 calculados a partir de las comparaciones con los valores límites de la legislación vigente. El alcance (F1) indicó que los parámetros evaluados incumplieron al menos una vez durante los muestreos realizados, mientras que la frecuencia (F2) evidenció que más de la mitad de los test realizados resultaron fuera de norma en algunos puntos de muestreo. Estos hallazgos destacan la relevancia de parámetros bacteriológicos y de nutrientes, como fósforo y coliformes fecales, que fueron los principales responsables de los incumplimientos (Ministerio de Salud, 2016).

**Tabla 4.** Valores de F1 y F2 por punto (P1, P2, P3).

| PUNTO | F1 | F2 |
|---|---|---|
| 1 | 23,53 | 13,73 |
| 2 | 23,53 | 15,69 |
| 3 | 17,65 | 13,73 |

La amplitud (F3) se determinó a partir de las excursiones, medida que se utiliza en el cálculo del Índice de Calidad del Agua para cuantificar qué tan lejos está un resultado respecto al valor guía o límite establecido (Tabla 5). Estas desviaciones fueron calculadas para cada parámetro que excedió los límites de referencia. Las bacterias coliformes fecales presentaron las excursiones más elevadas en todos los puntos, alcanzando valores hasta 100 veces superiores al valor guía en 2022 y 2025. En contraste, parámetros como pH y metales pesados no presentaron desviaciones.

**Tabla 5.** Valores de F3 en cada punto

| PUNTO | F3 |
|---|---|
| 1 | 82,5 |
| 2 | 99,44 |
| 3 | 99,96 |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los resultados concuerdan con lo reportado en estudios similares, que identifican a la contaminación bacteriológica como la principal limitante de un posible uso recreativo en la disposición final de cursos urbanos (Lumb et al., 2011).

La integración de los tres factores (F1, F2, F3) permitió calcular el índice CCME-WQI para cada punto de muestreo. La medición se contrastó con la clasificación de ICA mencionada anteriormente (Tabla 1), a fin de establecer su categoría. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Resultados de ICA obtenidos y clasificación del agua en cada punto.

| PUNTO | CCME-WQI | CLASIFICACIÓN |
|---|---|---|
| 1 | 49,84 | Marginal |
| 2 | 40,31 | Pobre |
| 3 | 40,86 | Pobre |

En el Punto 1, el índice clasificó la calidad del agua como “Marginal”, es decir, presenta calidad deficiente, con posibles contaminantes que limitan su uso seguro en su disposición final, implican riesgos para la salud y reflejan un ecosistema alterado en proceso de degradación.

En los puntos 2 y 3, la clasificación descendió a la categoría “Pobre” debido a los elevados niveles de coliformes fecales y sólidos suspendidos. El agua clasificada como Pobre no cumple con los estándares mínimos de seguridad, presenta altos niveles de contaminantes, implica un riesgo elevado para la salud y refleja un ecosistema acuático degradado que demanda medidas de saneamiento urgentes.

## 4. Conclusiones

El presente trabajo de investigación ha permitido evaluar la calidad del agua del Canal Norte, demostrando que este recurso hídrico presenta un elevado contenido de contaminantes. La aplicación del Índice Canadiense de Calidad del Agua arrojó una clasificación como "Marginal" y "Pobre", siendo los altos niveles de coliformes fecales la principal causa de la contaminación.

La comparación interanual revela que 2022 fue el año con mayor contaminación detectada en los muestreos, mientras que 2021 y 2025 mostraron incumplimientos puntuales en otros parámetros. En conjunto, los resultados sugieren que el agua del canal no cuenta con los niveles de calidad que debería tener un drenaje urbano según los estándares vigentes.

Este estudio ha servido para aplicar los conocimientos adquiridos en la evaluación de un recurso hídrico local, proporcionando datos concretos para la toma de decisiones adecuadas. Se espera que los resultados de este trabajo contribuyan a futuras investigaciones y a la mejora de la calidad del agua en la región.

## Referencias Bibliográficas

Almeida, C. A. (2012). *Evaluación de la calidad de agua con fines recreacionales: desarrollo de un Índice de Calidad Recreacional*; Editorial Académica Española; 177. http://hdl.handle.net/11336/105391

APHA (American Public Health Association) (2017). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition American Public Health Association.

Canadian Council of Ministers of the Environment (2017). Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index. Winnipeg, Canadá.

Dirección Provincial de Obras Sanitarias (DiPOS). (1982). Reglamento para el Control del Vertimiento de Líquidos Residuales. Santa Fe, Argentina.

Griffa, C., Boglione, R., Schierano, M.C., Asforno, M., Gutiérrez, G., Farías, M., y Jennerich L. (2025). *Índice de Calidad de Aguas para riego en la zona oeste de la provincia de Santa Fe*. Actas del XXVIII Congreso Nacional del Agua (CONAGUA), Buenos Aires, 2025.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Lumb, A., Sharma, T. C., Bibeault, J. F. (2011). *A review of genesis and evolution of Water Quality Index (WQI) and some future directions*. Water Quality, Exposure and Health, 3(1), 11–24

Ministerio de Salud de la Nación (2016). Directrices sanitarias para uso seguro de aguas recreativas.

Pero, E., Schierano, M. C., Griffa, C., Boglione, R., Asforno, M., Gutiérrez, G. y Farías, M. (2025). *Evaluación de la calidad fisicoquímica del agua en arroyos de matrices productivas del espinal santafesino*. Actas del XXVIII Congreso Nacional del Agua (CONAGUA), Buenos Aires, 2025.

Puente Miranda, D., Valenzuela García, L., Alarcón Herrera, M. T. (2023). *Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México*. Revista internacional de contaminación ambiental, 39, 54697.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Evaluación preliminar de sistemas integrados de cultivos y ganadería lechera en Argentina: hacia la circularidad energética, de carbono y nutrientes

## Preliminary assessment of integrated crop-dairy systems in Argentina: towards energy, carbon and nutrient circularity

Presentación: 30/10/2025

**Maximiliano Woloschin**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.
maxiwolo1@gmail.com

**Antonella Maletto**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.
antomaletto@gmail.com

### Resumen

La producción lechera argentina enfrenta crecientes desafíos ambientales y productivos, lo que exige sistemas más resilientes y eficientes en el uso de recursos. Este trabajo evaluó la circularidad de energía, carbono y nutrientes, y la huella de carbono de la leche en un tambo representativo del departamento Castellanos (Santa Fe), comparando un sistema convencional con cuatro escenarios progresivos de integración agrícola-ganadera. El sistema base combina pasturas de alfalfa con cultivos anuales y un 23% de alimentos comprados. A partir de esta base se modelaron transiciones orientadas a mejorar la eficiencia productiva, aumentar la autosuficiencia, optimizar el manejo de efluentes y avanzar hacia prácticas agroecológicas y orgánicas. Se utilizaron indicadores como EROI, eficiencia en uso de nitrógeno, balance de nutrientes y huella de carbono mediante análisis de ciclo de vida. Los resultados preliminares muestran que una mayor integración mejora la eficiencia energética, reduce emisiones y dependencia externa, y fortalece la resiliencia del sistema, aunque implica desafíos técnicos y de inversión.

**Palabras clave:** Lechería, integración agrícola-ganadera, circularidad, huella de carbono, sostenibilidad

### Abstract

Argentine dairy production faces increasing environmental and productive challenges, requiring more resilient systems that use resources more efficiently. This study evaluated the circularity of energy, carbon, and nutrients, as well as the carbon footprint of milk, in a representative dairy farm in Castellanos Department (Santa Fe), comparing a conventional system with four progressive crop–livestock integration scenarios. The baseline system combines alfalfa pastures with annual crops and includes 23% purchased feed. From this baseline, transition scenarios were modeled to improve productive efficiency, increase self-sufficiency, optimize effluent management, and move toward agroecological and organic practices. Indicators used included EROI, nitrogen use efficiency, nutrient balance, and carbon footprint estimated through a Life Cycle Assessment approach. Preliminary results show that greater integration improves energy efficiency, reduces emissions and external input dependence, and strengthens system resilience, although it involves technical and investment challenges.

**Keywords:** Dairy farming, crop-livestock integration, circularity, carbon footprint, sustainability

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

La producción lechera, si bien es clave para la nutrición y la economía de regiones rurales, enfrenta críticas crecientes por su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la dependencia de insumos externos y la ineficiencia en el uso de nutrientes como el nitrógeno (De Klein & Ledgard, 2005; Herrero et al., 2006; IDF, 2022). A nivel global, el sector agrícola debe responder al desafío de sostener la seguridad alimentaria en un contexto de cambio climático, escasez de recursos y mercados cada vez más variables (Willett et al., 2019).

Diversos autores destacan que la integración de cultivos y ganadería representa una estrategia prometedora para avanzar hacia sistemas más circulares, en los cuales los flujos de energía, carbono y nutrientes se gestionen de manera más eficiente (Duru et al., 2015; Martin et al., 2016; Patrizi et al., 2018). Estudios recientes remarcan que estos modelos mejoran la resiliencia, aumentan la autosuficiencia y reducen el impacto ambiental, aunque también plantean desafíos en términos de inversión y adopción práctica (Leite et al., 2024; Monteiro et al., 2024).

En Argentina, la cuenca lechera central —particularmente en el departamento Castellanos, provincia de Santa Fe— constituye una de las regiones más representativas del sector. Estos sistemas combinan pasturas permanentes, cultivos anuales para silaje y suplementación con granos y subproductos (Lazzarini et al., 2019; Engler et al., 2024). Sin embargo, muestran limitaciones en circularidad energética y de nutrientes, lo que los hace dependientes de insumos externos y vulnerables a la volatilidad de precios (OCLA, 2024).

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la circularidad de los flujos de energía, carbono y nutrientes, así como la huella de carbono de la leche, en un tambo representativo de Castellanos bajo un sistema base convencional y cuatro escenarios progresivos de integración agrícola-ganadera. Estos escenarios incluyeron mejoras en la eficiencia productiva, mayor autosuficiencia a través de rotaciones y manejo de efluentes, incorporación de prácticas agroecológicas y la simulación de un sistema orgánico. Los resultados aquí presentados son preliminares y forman parte de un proyecto en desarrollo que busca generar evidencia para orientar la transición hacia sistemas lecheros más sostenibles en Argentina.

# 2. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en un establecimiento lechero representativo del departamento Castellanos, en la cuenca central de Santa Fe, Argentina. Se utilizó como línea base un sistema productivo convencional compuesto por pasturas de alfalfa en rotación con cultivos anuales (avena y maíz para silo), suplementado con granos y subproductos comprados, que representan alrededor del 23% de la dieta total. A partir de este sistema se modelaron cuatro escenarios progresivos de transición hacia mayores niveles de integración agrícola-ganadera, enfocados en mejorar la eficiencia reproductiva y productiva, incrementar la autosuficiencia mediante rotaciones y manejo de efluentes, diversificar con prácticas agroecológicas y avanzar hacia un esquema de producción orgánica.

Los indicadores seleccionados para evaluar la sostenibilidad fueron: Retorno Energético de la Inversión (EROI); Eficiencia en el Uso del Nitrógeno (NUE) y balance de nutrientes; Huella de Carbono (CF) estimada mediante un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (LCA), y circularidad de insumos y productos como medida de resiliencia y autonomía.

El análisis consideró los flujos anuales del sistema en términos de insumos y productos (energía, nutrientes, emisiones) bajo los cinco escenarios (línea base + cuatro transiciones). Los cálculos se apoyaron en métodos estandarizados propuestos por la International Dairy Federation (IDF, 2022) y las guías del IPCCpara emisiones agrícolas, junto con ecuaciones y factores de emisión ajustados a las condiciones regionales mediante el PACN Dairy Calculator.

## 2.1. *Análisis energético (EROI)*

El EROI se calculó como la relación entre la energía contenida en los productos del sistema (leche, carne y cultivos comercializados) y la energía invertida en forma de insumos (fertilizantes, combustibles, alimentos comprados, electricidad, entre otros). Los valores energéticos de los productos y subproductos se obtuvieron a partir de tablas internacionales como Feedipedia y referencias específicas de la región (Guzmán et al., 2014). En el caso de Argentina, los sistemas base mostraron valores bajos de EROI (aprox. 0,45), reflejando la alta dependencia de insumos externos. En escenarios más autosuficientes, como el orgánico, el EROI alcanzó hasta 6,07, evidenciando una mejora notable en la eficiencia energética del sistema.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

2.2. *Balance de nitrógeno y NUE*

El balance de nitrógeno consideró todas las entradas y salidas del sistema. Las entradas consideradas fueron: fertilizantes sintéticos, alimentos concentrados comprados, fijación biológica de leguminosas y deposición atmosférica. Para el caso argentino, la fijación biológica se estimó multiplicando la concentración de nitrógeno de la biomasa total por un factor de 0,6, de acuerdo con estimaciones regionales (Carbó, 2011; Herrero et al., 2006). La deposición atmosférica se consideró en torno a 8 kg N/ha año, en línea con valores reportados para la región pampeana (Carnelos et al., 2019). Por otro lado, las salidas estuvieron relacionadas con: leche (a partir de proteína bruta en leche/6.25), animales de descarte y venta (concentración promedio de 0,027% N en peso vivo para Argentina), y productos vegetales.

La eficiencia de uso de nitrógeno (NUE) se calculó como el cociente entre las salidas y entradas de N, expresando qué proporción del nitrógeno que ingresa al sistema es efectivamente exportado en productos útiles. Los valores de NUE oscilaron entre 30% en el sistema base y hasta 61% en escenarios con mayor autosuficiencia y rotaciones mejoradas.

2.3. *Huella de carbono*

La huella de carbono se estimó siguiendo un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida atribucional (cradle-to-farm gate) conforme a las normas ISO 14040-44 e ISO 14067, junto con las directrices del IDF (2022) para sistemas lecheros. Se aplicó la metodología Tier 2 del IPCC (2006; Gavrilova et al., 2019) para calcular las emisiones de metano entérico, óxido nitroso de suelos agrícolas y $CO_2$ de insumos energéticos. Para Argentina, se utilizó el PACN Dairy Calculator (2024) que incorpora factores de emisión y ecuaciones ajustadas a la región, mientras que los potenciales de calentamiento global (GWP100) se tomaron del AR6 del IPCC (2023). Las emisiones se expresaron en valores absolutos (kg $CO_2$-eq) y en intensidades por hectárea, por unidad de energía comestible (megacalorías) y por proteína producida. En algunos escenarios, se incorporó además el uso del inhibidor de metano 3-NOP a dosis de 30 mg/kg de materia seca ingerida, lo que permitió reducir en un 15% las emisiones entéricas, valor de referencia recomendado para sistemas pastoriles (Arndt et al., 2022; Hegarty et al., 2021).

2.4. *Circularidad de insumos y productos*

Se aplicaron dos indicadores complementarios:

- Circularidad de entradas: proporción de insumos que provienen de flujos internos del propio sistema (pasturas, estiércol reciclado, granos propios) en relación con el total de insumos.
- Circularidad de salidas: proporción de los productos que retornan como recursos dentro del sistema frente al total de productos generados.

Estos indicadores reflejan el grado de autonomía del tambo y su resiliencia frente a variaciones externas. En el sistema base, la circularidad de entradas se ubicó en torno al 45%, mientras que en escenarios más integrados y con mayor autosuficiencia alcanzó valores superiores al 90%.

## 3. Resultados y discusión

El sistema base del tambo analizado mostró un Retorno Energético sobre la Inversión (EROI) de 0,45, lo que refleja una marcada dependencia de insumos externos, principalmente alimentos concentrados y fertilizantes nitrogenados. En términos de circularidad, se observó que apenas un 45% de las entradas eran de origen interno (forrajes y subproductos propios), lo que evidencia un sistema parcialmente dependiente del mercado externo y vulnerable a variaciones de precios.

En relación con el balance de nitrógeno (N), el excedente inicial fue de 171 kg N/ha, con una eficiencia de uso del nitrógeno (NUE) cercana al 28%. Este valor es típico de sistemas lecheros intensivos en la región pampeana, pero implica riesgos de pérdidas de N hacia el ambiente en forma de lixiviación de nitratos y emisiones de óxido nitroso ($N_2O$).

3.1. *Escenario 1 – Mayor eficiencia productiva*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Las mejoras en los índices reproductivos (menor tasa de reemplazo, mayor vida útil de las vacas) permitieron un aumento en la producción de leche por vaca sin incrementar la carga animal ni la superficie utilizada. En este escenario, el EROI subió levemente a 0,47, lo que indica que la eficiencia productiva animal, por sí sola, tiene un impacto limitado en la circularidad global del sistema. Sin embargo, la mayor persistencia de los animales redujo indirectamente la huella de carbono por litro de leche al disminuir la proporción de vaquillonas de reemplazo y, con ello, los requerimientos energéticos y de proteína asociados a la recría.

### 3.2. *Escenario 2 – Mayor autosuficiencia mediante rotaciones y efluentes*

Este escenario introdujo rotaciones con soja, lo que mejoró la diversificación de cultivos y la producción de granos internos para balancear la dieta. Además, se implementó la recolección del 20% de las excretas en corrales, que se utilizaron como fertilizante orgánico en reemplazo de urea. Con ello, el EROI alcanzó 1,4, triplicando al sistema base. La circularidad de entradas se elevó hasta un 70%, reduciendo drásticamente la dependencia de insumos externos.

El balance de nitrógeno mostró mejoras notorias: el excedente descendió de 171 a 69 kg N/ha, y la eficiencia de uso (NUE) se elevó a un 52%. Esto indica una mayor correspondencia entre las entradas de N (fertilizantes, fijación biológica y suplementos) y las salidas útiles (leche, carne y granos). La reducción del excedente implica una menor presión ambiental, especialmente en términos de lixiviación y emisiones de $N_2O$.

En cuanto a la huella de carbono, este escenario permitió reducciones absolutas gracias a la menor necesidad de fertilizantes nitrogenados y al mayor aporte de proteína propia vía soja. El uso del aditivo 3-NOP también contribuyó a mitigar las emisiones de metano entérico, aunque el impacto final fue moderado en relación con la reducción estructural del uso de insumos externos.

### 3.3. *Escenario 3 – Agroforestería con nogales pecán.*

La incorporación de pecanes en un 17% de la superficie diversificó los productos y servicios del sistema, incluyendo la captura adicional de carbono en biomasa y suelos. La menor carga animal redujo las emisiones directas de metano y el riesgo de excedentes de nitrógeno. El EROI se elevó a 1,9, el más alto entre los escenarios convencionales.

El excedente de nitrógeno descendió a 47 kg N/ha, con un NUE del 61%, el valor más eficiente del análisis. Esta reducción se explica por la combinación de menor carga animal, mayor eficiencia en el uso de forrajes y la incorporación de un cultivo perenne de alta longevidad como el pecán, que reduce la necesidad de laboreo y fertilización anual.

En términos de huella de carbono, la integración agroforestal mostró un efecto positivo en el balance neto. Aunque las emisiones relativas por litro de leche no se redujeron drásticamente respecto al Escenario 2, la captura de carbono en los pecanes contribuyó a un balance global más favorable. Este escenario representa una alternativa viable de intensificación ecológica con beneficios productivos y ambientales simultáneos.

### 3.4. *Escenario 4 – Producción orgánica*

La transición a un sistema orgánico implicó la eliminación total de fertilizantes sintéticos y agroquímicos, así como del aditivo 3-NOP. Los rendimientos de los cultivos se redujeron un 18% en promedio, y la carga animal también debió ajustarse para mantener la autosuficiencia.

En este contexto, el EROI alcanzó un valor máximo de 6,07, el más alto del estudio, debido a la eliminación de insumos externos. Sin embargo, este resultado debe interpretarse con cautela: el menor volumen de producción de leche implicó que las emisiones relativas (kg $CO_2e$/kg de proteína) fueran más altas que en otros escenarios, pese a la reducción de emisiones absolutas por hectárea. El excedente de nitrógeno descendió a 40 kg N/ha, con un NUE similar al Escenario 3 (alrededor del 60%). No obstante, la menor productividad limita la viabilidad económica del sistema y plantea interrogantes sobre su adopción a gran escala.

### 3.5. *Comparación general*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En términos de eficiencia energética y de nutrientes, los escenarios con mayor integración (2 y 3) lograron el mejor equilibrio entre sostenibilidad ambiental y viabilidad productiva. El escenario orgánico mostró la mayor circularidad, pero a costa de menor eficiencia productiva y competitividad.

Los resultados del estudio demuestran que la integración agrícola-ganadera, complementada con prácticas agroecológicas y agroforestales, es una estrategia prometedora para mejorar la resiliencia de la lechería argentina. Sin embargo, su adopción dependerá del acompañamiento técnico, el acceso a mercados diferenciados y el diseño de políticas públicas que reconozcan los beneficios ambientales asociados.

**Tabla 1.** Indicadores productivos y ambientales en los escenarios de integración agrícola-ganadera en un tambo de Castellanos, Santa Fe.

| Escenario | Descripción | EROI | Excedente N (kg/ha) | NUE (%) | Observaciones sobre huella de carbono |
|---|---|---|---|---|---|
| **Base** | Sistema convencional (alfalfa + cultivos, 23% de insumos externos) | 0,45 | 171 | 28 | Menos de 1 kg $CO_2e$/kg leche; dependencia de insumos externos |
| **1** | Mayor eficiencia reproductiva y productiva | 0,47 | 160* | 30* | Reducción relativa de emisiones por menor reemplazo de vacas |
| **2** | Autosuficiencia con rotaciones + efluentes + 3-NOP | 1,4 | 69 | 52 | Disminución de emisiones absolutas por menor uso de fertilizantes y mayor captura |
| **3** | Agroforestería con pecanes (17% del área) | 1,9 | 47 | 61 | Mejor balance neto por captura de C; menor carga animal |
| **4** | Producción orgánica (sin insumos externos, menor rendimiento) | 6,07 | 40 | ~60 | Menores emisiones absolutas, pero mayor huella por litro de leche |

## 4. Conclusiones

El análisis del sistema lechero representativo de Castellanos, Santa Fe, muestra que los modelos convencionales presentan importantes limitaciones en términos de circularidad energética y de nutrientes. Con un EROI bajo (0,45) y un excedente de nitrógeno de 171 kg/ha, la dependencia de insumos externos y la ineficiencia en el uso del nitrógeno generan riesgos ambientales y económicos que comprometen la sostenibilidad de estos sistemas en el mediano plazo.

Los escenarios progresivos de integración evidencian un potencial significativo para mejorar simultáneamente la eficiencia productiva y reducir el impacto ambiental. El Escenario 2 (rotaciones con soja, recolección de efluentes y uso de 3-NOP) y el Escenario 3 (agroforestería con pecanes) alcanzaron los resultados más equilibrados: un EROI entre 1,4 y 1,9, un NUE superior al 50% y reducciones sustanciales en las pérdidas de nitrógeno. Además, en el caso de la agroforestería, la diversificación productiva y la captura de carbono ofrecen ventajas adicionales de resiliencia frente a la variabilidad climática y del mercado.

Si bien la transición hacia un sistema orgánico (Escenario 4) mostró la mayor circularidad (EROI de 6,07 y un excedente de N de apenas 40 kg/ha), las reducciones de rendimiento y la mayor huella de carbono relativa por litro de leche ponen en duda su viabilidad económica en ausencia de incentivos de mercado o políticas diferenciadas. Esto demuestra que no siempre los sistemas de máxima circularidad son los más adecuados desde una perspectiva integral de sostenibilidad.

En conjunto, los resultados destacan que la integración agrícola-ganadera, acompañada de rotaciones diversificadas, manejo eficiente de efluentes y estrategias agroforestales, constituye un camino viable para reducir emisiones, mejorar la eficiencia en el uso de recursos y aumentar la resiliencia de los tambos argentinos. No obstante, su implementación dependerá

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

de la disponibilidad de asistencia técnica, la existencia de mercados que reconozcan los beneficios ambientales y de políticas públicas que promuevan activamente la transición hacia modelos más sustentables de producción láctea.

En este sentido, el proyecto abre nuevas líneas de investigación orientadas a: (i) profundizar el análisis de los impactos económicos de la transición hacia sistemas más circulares; (ii) estudiar la adopción gradual de tecnologías y prácticas agroecológicas; y (iii) diseñar políticas públicas y mecanismos de incentivo que acompañen a los productores en este proceso. Estos pasos serán claves para consolidar la sustentabilidad y competitividad de la lechería argentina en el mediano y largo plazo.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rafaela (UTN-FRRa) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Se agradece el apoyo de los proyectos Integrity (ERANETs SusCrop, FACCE ERA-GAS, ICT-AGRI-FOOD, SusAn) y al productor del tambo de Castellanos.

## Referencias

Arndt, C., Hegarty, R., & Beauchemin, K. (2022). Mitigation of methane emissions in ruminant livestock: Effectiveness of inhibitors. Animal Feed Science and Technology, 291, 115377.

Carnelos, D., et al. (2019). Nitrogen deposition in agricultural regions of Uruguay. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 114, 55–70.

Chapman, D. F., Bryant, J. R., & McCarthy, S. (2024). Pasture-based dairy systems in New Zealand: Current challenges and opportunities. New Zealand Journal of Agricultural Research, 67(1), 1–18.

Clark, D. A., Macdonald, K. A., & Glassey, C. B. (2020). Future dairy systems: Options for productivity and sustainability in New Zealand. Grass and Forage Science, 75(3), 345–356.

Comeron, E., et al. (2018). Rotaciones forrajeras en sistemas lecheros pampeanos. Revista Argentina de Producción Animal, 38(1), 45–58.

De Klein, C. A. M., & Ledgard, S. F. (2005). Nitrous oxide emissions from New Zealand agriculture: Key sources and mitigation strategies. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 72, 77–85.

De Klein, C. A. M., et al. (2016). Nitrogen performance indicators for dairy production systems. Soil Research, 54(4), 449–462.

DIEA. (2019). Anuario Estadístico Agropecuario. Montevideo: Dirección de Estadísticas Agropecuarias – MGAP.

Duru, M., Therond, O., & Fares, M. (2015). Designing agroecological transitions: A review. Agronomy for Sustainable Development, 35(4), 1237–1257.

Engler, A., et al. (2024). Caracterización de tambos argentinos bajo sistemas mixtos. Revista de Producción Animal, 41(2), 55–70.

Gavrilova, O., et al. (2019). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Guzmán, G., et al. (2014). Calorific value of crops and by-products. Spanish Journal of Agricultural Research, 12(3), 645–654.

Heichel, G. H., et al. (1984). N2 fixation of forage legumes in the field. Agronomy Journal, 76(4), 759–764.

Herrero, M., et al. (2006). Estimation of legume nitrogen fixation in temperate pastures. Field Crops Research, 99(2–3), 205–218.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Hegarty, R. S., et al. (2021). Enteric methane mitigation strategies in grazing systems. Animal Production Science, 61(1), 1–12.

IDF. (2022). A common carbon footprint approach for dairy: The IDF guide to standard life cycle assessment methodology. International Dairy Federation.

IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (2023). Climate Change 2023: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.

Jensen, E. S., et al. (2010). Legume cover crops for sustainable agriculture. Agronomy for Sustainable Development, 30, 57–74.

Lazzarini, B., et al. (2019). Caracterización de sistemas lecheros de la cuenca central argentina. Revista de Producción Animal, 36(1), 33–49.

Ledgard, S. F., et al. (1999). Nitrogen fixation in legume-based pastures. New Zealand Journal of Agricultural Research, 42, 241–253.

Leite, L. F. C., et al. (2024). Ecosystem-based strategies for dairy system resilience. Agricultural Systems, 217, 103569

Martin, G., et al. (2016). Crop-livestock integration beyond the farm level: A review. Agronomy for Sustainable Development, 36, 53.

McDonald, P., et al. (1995). Animal Nutrition. 5th edition. Longman Scientific & Technical

OCLA. (2024). Informe de la Producción Láctea en Argentina. Observatorio de la Cadena Láctea Argentina.

Patrizi, N., et al. (2018). Agroecological strategies for integrating livestock and crops. Ecological Indicators, 95, 632–644.

Research Council. (1994). Nutrient requirements of dairy cattle. National Academy Press.

Rolo, V., et al. (2023). Carbon sequestration in agroforestry systems. Agroforestry Systems, 97(3), 355–369.

Sekaran, U., et al. (2021). Sustainable intensification through crop-livestock integration. Sustainability, 13(4), 2005.

Smith, P., et al. (2015). Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. Nature Climate Change, 6, 42–50

Solagro. (2016). Afterres2050: Scenarios for sustainable agriculture and diets in France. Toulouse: Solagro.

Willett, W., et al. (2019). Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet, 393(10170), 447–492.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Regresión del modelo eNRTL aplicado al equilibrio sólido-líquido-vapor de la mezcla $CO_2$-$NH_3$-$H_2O$ con precipitación de $NH_4HCO_3$.

## Regression of the eNRTL model applied to the solid–liquid–vapor equilibrium of the $CO_2$–$NH_3$–$H_2O$ mixture with $NH_4HCO_3$ precipitation

Presentación: 30/10/2025

**Gaspar Ariel Tosello**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina
tosellogaspar@gmail.com

### Resumen

El modelado del sistema $CO_2$-$NH_3$-$H_2O$ utilizando el modelo de actividad eNRTL (Electrolyte Non-Random Two-Liquid) resulta relevante al momento de estudiar diferentes alternativas para la captación de $CO_2$ proveniente de plantas de energía eléctrica basadas en combustibles fósiles. A partir de datos experimentales, se avanzó en el modelado matemático de dicho proceso teniendo en cuenta además las posibles precipitaciones de $NH_4HCO_3$ en el rango de temperaturas y composiciones bajo análisis. El modelo se implementó en el software de modelado algebraico GAMS y se realizó la regresión de los parámetros de ajuste del modelo eNRTL en base a los datos experimentales disponibles. Los parámetros encontrados resultaron satisfactorios al compararlos con otros disponibles en bibliografía.

**Palabras clave:** Equilibrio líquido-vapor; Modelado matemático; eNRTL; Dióxido de carbono; Precipitación.

### Abstract

The modeling of the $CO_2$-$NH_3$-$H_2O$ system using the eNRTL (Electrolyte Non-Random Two-Liquid) activity model is relevant when studying different alternatives for $CO_2$ capture from fossil fuel-based power plants. Based on experimental data, progress was made in the mathematical modeling of this process, also considering the possible precipitation of $NH_4HCO_3$ within the range of temperatures and compositions under analysis. The model was implemented in the algebraic modeling software GAMS, and the regression of the eNRTL model fitting parameters was carried out using the available experimental data. The parameters obtained proved to be satisfactory when compared with others reported in the literature.

**Keywords:** Vapor-liquid equilibrium; Mathematical modeling; eNRTL; Carbon dioxide; Precipitation

## 1. Introducción

Con el propósito de reducir las emisiones de $CO_2$ provenientes de las plantas generadoras de energía que utilizan combustibles fósiles, se han planteado distintas tecnologías de captura de carbono. Entre ellas se encuentran la captura post-combustión (PCC), la captura pre-combustión y la combustión con oxígeno puro, entre otras alternativas. De todas, la PCC se considera actualmente una de las opciones más factibles en el corto plazo, ya que puede incorporarse con relativa facilidad en las plantas existentes. Este proceso, en general, utiliza soluciones acuosas de monoetanolamina (MEA) o mezclas de aminas para absorber el $CO_2$, aunque presenta como desventaja un elevado consumo energético (Xu et al., 2014).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Como alternativa prometedora, se han investigado procesos basados en el uso de amoníaco, debido a su alta eficiencia de captura de $CO_2$, su estabilidad frente a la degradación, su bajo riesgo de corrosión, sus menores requerimientos de energía para la regeneración y su capacidad de remover simultáneamente $CO_2$, $SO_2$ y NOx. Estas ventajas, vinculadas a un menor costo energético, convierten al amoníaco en una opción atractiva frente a las aminas tradicionales en la captura post-combustión (Xu et al., 2014).

Para poder analizar de manera cuantitativa estos procesos, resulta esencial contar con modelos termodinámicos confiables que describan con precisión el equilibrio del sistema $NH_3$–$CO_2$–$H_2O$. En este contexto, el objetivo principal de este trabajo es implementar un modelo matemático capaz de representar el equilibrio sólido-líquido-vapor de la mezcla $CO_2$–$H_2O$–$NH_3$, utilizando para ello el modelo de actividad eNRTL (Non-Random Two-Liquid para electrolitos).

El desarrollo del trabajo se estructura en tres etapas. En primer lugar, se presenta el modelo termodinámico utilizado, detallando sus ecuaciones fundamentales, los componentes involucrados y las fases consideradas en equilibrio, lo que permite establecer el marco teórico del análisis. A continuación, se lleva a cabo una regresión no lineal basada en datos experimentales, con el objetivo de estimar los parámetros del modelo y ajustar su comportamiento a las condiciones reales del sistema. Finalmente, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos, los datos experimentales y las simulaciones generadas por el software ASPEN PLUS, lo que permite evaluar la precisión y aplicabilidad del modelo propuesto.

## 2. Materiales y métodos

*2.1 Descripción del modelo de equilibrio*

En el modelo se consideran los equilibrios correspondientes a las reacciones químicas que ocurren en simultáneo con el equilibrio entre las fases sólida, líquida y vapor. Las sustancias involucradas se agrupan en compuestos moleculares y compuestos iónicos: los primeros incluyen al solvente (agua) y a los gases disueltos ($NH_3$, $CO_2$), mientras que los segundos comprenden los cationes y aniones presentes en solución. El sólido corresponde al compuesto $NH_4HCO_3$. La Figura 1 ilustra la distribución de estas sustancias en las distintas fases del sistema. Los compuestos moleculares se encuentran tanto en la fase líquida (L) como en la fase vapor (V), los compuestos iónicos se restringen a la fase líquida, y la sal precipitada se localiza en la fase sólida (S).

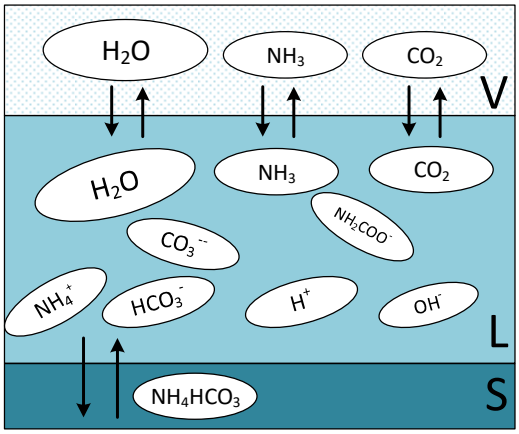



**Figura 1**. Especies involucradas en el equilibrio

En la fase líquida se consideran seis reacciones de equilibrio, identificadas como R1 a R6, siendo la última (R6) la reacción de precipitación. Cada una de estas reacciones se representa matemáticamente mediante su respectiva constante de equilibrio ($Kj$), utilizando como base de cálculo la actividad de los compuestos involucrados ($\gamma x$).

$$2H_2O \overset{K_1}{\rightleftharpoons} H_3O^+ + OH^- \qquad K_1 = \frac{(\gamma x)_{H_3O^+}(\gamma x)_{OH^-}}{(\gamma x)^2_{H_2O}} \tag{R1}$$

$$NH_3 + H_2O \overset{K_2}{\rightleftharpoons} NH_4^+ + OH^- \qquad K_2 = \frac{(\gamma x)_{NH_4^+}(\gamma x)_{OH^-}}{(\gamma x)_{H_2O}(\gamma x)_{NH_3}} \tag{R2}$$

$$CO_2 + 2H_2O \overset{K_3}{\rightleftharpoons} HCO_3^- + H_3O^+ \qquad K_3 = \frac{(\gamma x)_{HCO_3^-}(\gamma x)_{H_3O^+}}{(\gamma x)^2_{H_2O}(\gamma x)_{CO_2}} \tag{R3}$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$HCO_3^- + H_2O \underset{}{\overset{K_4}{\rightleftharpoons}} CO_3^{2-} + H_3O^+ \qquad K_4 = \frac{(\gamma x)_{CO_3^{2-}}(\gamma x)_{H_3O^+}}{(\gamma x)_{H_2O}(\gamma x)_{HCO_3^-}} \tag{R4}$$

$$NH_3 + HCO_3^- \underset{}{\overset{K_5}{\rightleftharpoons}} NH_2COO^- + H_2O \qquad K_5 = \frac{(\gamma x)_{NH_2COO^-}(\gamma x)_{H_2O}}{(\gamma x)_{NH_3}(\gamma x)_{HCO_3^-}} \tag{R5}$$

$$NH_4HCO_{3(s)} \underset{}{\overset{K_6}{\rightleftharpoons}} NH_4^+ + HCO_3^- \qquad K_6 = (\gamma x)_{NH_4^+}(\gamma x)_{HCO_3^-} \tag{R6}$$

En simultáneo, se considera que las constantes de equilibrio solo dependen de la temperatura según la ecuación (1).

$$\ln\left(K_j\right) = A_j + \frac{B_j}{T} + C_j \ln\left(T\right) + D_j T \qquad j = 1\ a\ 6 \tag{1}$$

Por otro lado, el equilibrio líquido vapor se establece a partir de la igualdad de fugacidad de los compuestos presentes en ambas fases. Para el agua se calcula mediante la Ecuación (2) mientras que para los gases disueltos se calcula a partir de la ley de Henry (Ecuación 3).

$$\phi_w^v y_w P = x_w \gamma_w \phi_w^0 P_w^0 \exp\left[\frac{v_w^0\left(P - P_w^0\right)}{RT}\right] \tag{2}$$

$$\phi_i^v y_i P = x_i \gamma_i H_i^{P_w^0} \exp\left(\frac{\overline{v}_{iw}^{\infty}\left(P - P_w^0\right)}{RT}\right) \qquad i = NH_3; CO_2 \tag{3}$$

Los coeficientes de actividad de los compuestos en la fase líquida (γ), se obtienen a partir del modelo eNRTL propuesto por Chen y Evans (1986):

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^{PDH} + \ln \gamma_i^{lc} \tag{4}$$

El primer sumando de la ecuación (4) emplea el modelo Pitzer-Debye-Hückel (PDH) y representa la contribución de las interacciones de iones de largo alcance mientras que el segundo representa las interacciones locales o de corto alcance. Este último se calcula mediante el modelo denominado Non-Random Two Liquid para electrolitos (eNRTL). Por otro lado, respecto a la fase vapor, todas sus propiedades se calculan a partir de la ecuación cúbica de estado de Redlich-Kwong. Finalmente, el modelo matemático se completa con sus correspondientes balances de materia y de cargas iónicas.

2.2 *Regresión a partir de datos experimentales*

El modelo eNRTL cuenta con numerosos parámetros de interacción para realizar un ajuste experimental y se los considera solo función de la temperatura según la ecuación (5).

$$\tau_{ij} = A_{ij} + \frac{B_{ij}}{T} \tag{5}$$

Los parámetros de la ecuación (5) pueden relacionar dos compuestos moleculares o un compuesto molecular con un par cation-anion (y viceversa). En este trabajo se utilizó el criterio sugerido por Que et al. (2011) para la selección de los parámetros a ajustar. Respecto a la interacción molecular-molecular, se desprecia la interacción $H_2O$-$CO_2$ y se realiza un ajuste experimental para la mezcla binaria $NH_3$-$H_2O$. Luego, para la interacción molecular-(cation-anion) y (cation-anion)-molecular se regresionaron las combinaciones que se muestran en la tabla 1 a partir de los datos disponibles para la mezcla ternaria $CO_2$-$NH_3$-$H_2O$ (Kurz et al., 1996).

Los parámetros que no figuran en la tabla, correspondientes a la combinación $H_2O$-(catión-anión) y (catión-anión)-$H_2O$ se fijaron en 8 y -4 respectivamente. De manera similar la combinación de $CO_2$-(catión-anión) y $NH_3$-( catión-anión) se fijó en el valor de 10 y -2 para el inverso. Estos valores son los sugeridos por el simulador comercial ASPEN PLUS.

Como función objetivo para la regresión del modelo desarrollado, se utilizó la diferencia cuadrática entre la presión parcial calculada por el modelo matemático ($P_{calc}$) respecto del valor experimental disponible ($P_{exp}$) según la ecuación (6).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$FO = \sum_{k} \left( \frac{P_{\exp}^{k} - P_{calc}^{k}}{P_{\exp}^{k}} \right)^{2} \quad (6)$$

| Componente i | Componente j | $A_{ij}$ | $B_{ij}$ | Fuente de datos experimentales |
|---|---|---|---|---|
| H2O | NH3 | 5.6072 | -196.7319 | (Sherwood, 1925; Kurtz et al., 1955; Rizvi y Heidemann, 1987) |
| NH3 | H2O | -3.2412 | -65.4595 | |
| H2O | CO2 | 0 | 0 | (Que et al., 2011) |
| CO2 | H2O | 0 | 0 | |
| (NH4+,CO3--) | H2O | -4.1359 | 0 | (Kurz et al., 1996) |
| H2O | (NH4+,CO3--) | 8.7427 | 0 | |
| (NH4+,HCO3-) | H2O | -1.0558 | -127.2246 | |
| H2O | (NH4+,HCO3-) | 2.7163 | -52.4016 | |
| (NH4+,NH2COO-) | H2O | -3.7042 | 0 | |
| H2O | (NH4+,NH2COO-) | 6.9038 | 0 | |
| (NH4+,NH2COO-) | NH3 | -2.0550 | 0 | |
| NH3 | (NH4+,NH2COO-) | 10 | 0 | |

**Tabla 1**. Parámetros regresionados

## 3. Resultados y discusión

Para comprobar los resultados obtenidos, se presenta la función objetivo propuesta aplicada al modelo desarrollado en comparación con su valor utilizando los parámetros disponibles (fijos) de ASPEN PLUS.

| | Mezcla NH3-H2O | Mezcla $CO_2$-$NH_3$-$H_2O$ |
|---|---|---|
| ASPEN PLUS | 5.3318 | 25.5791 |
| Este trabajo | 1.1573 | 3.0327 |

**Tabla 2**. Función objetivo con parámetros fijos (ASPEN PLUS) y con parámetros propios (este trabajo)

La función objetivo calculada anteriormente demuestra cualitativamente una notable mejoría en la precisión de cálculo en diferentes puntos, dentro del rango de condiciones evaluado. Esto destaca la importancia de realizar una regresión a partir de un rango determinado de datos, aumentando la exactitud y capacidad de predecir diferentes estados a partir del modelo.

En la figura 2 se ilustra una comparación entre datos experimentales y calculados con el modelo de presiones parciales y presión total. La distribución de puntos se ubica en mayor parte trazando la recta X=Y, demostrando un buen grado de precisión del modelo.

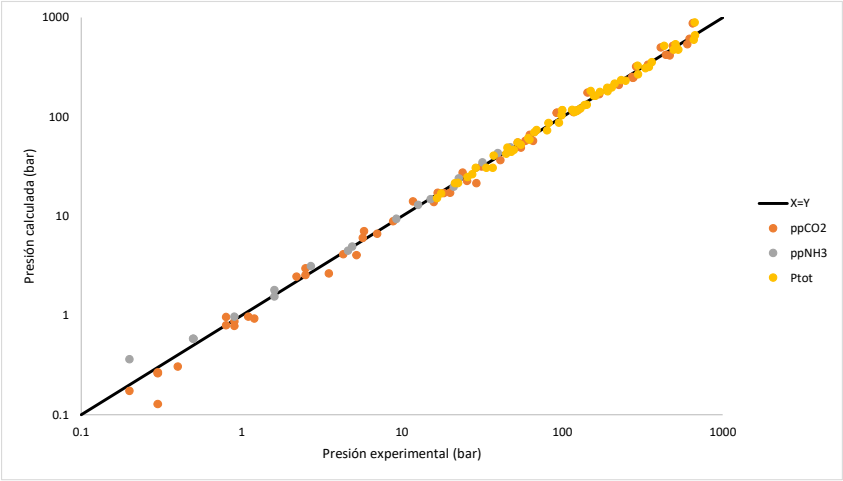



**Figura 2**. Comparación de datos experimentales y calculados.

A continuación, se compara el desempeño del modelo desarrollado con los datos experimentales de Kurz et al. (1996).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

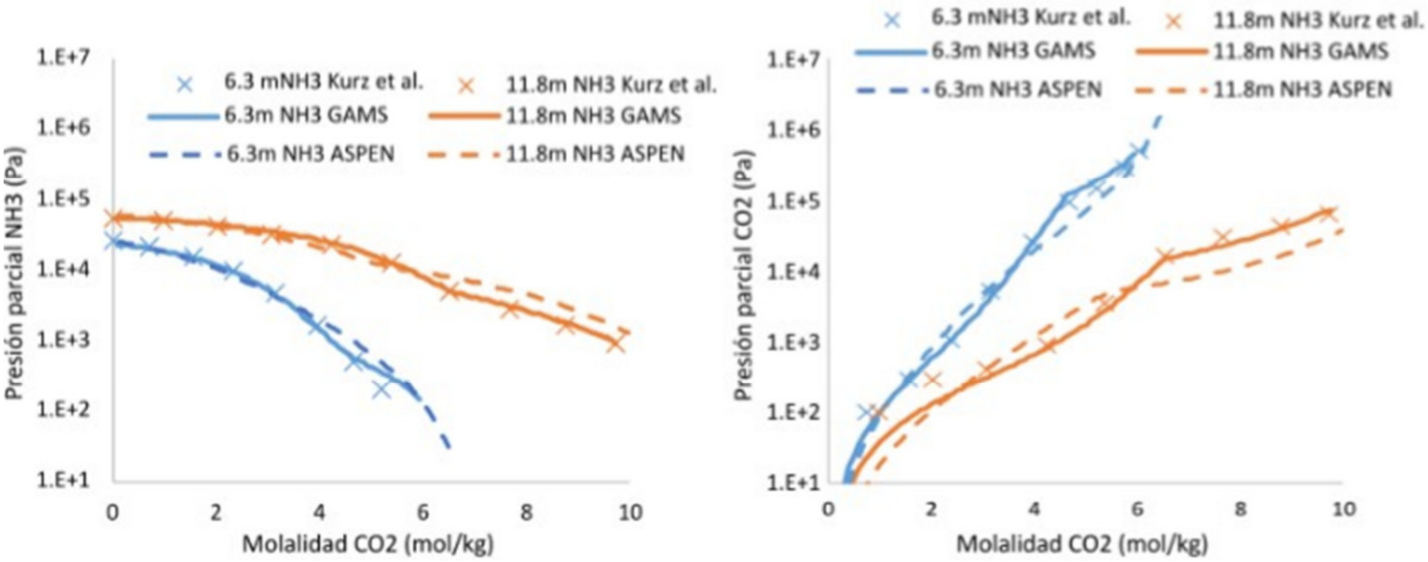



**Figura 3.** Comparación de presiones parciales y molalidad $CO_2$ a 313K y diferentes molalidades de $NH_3$.

## 4. Conclusiones

Los resultados se observan con mayor claridad en la figura 3, mostrando una amplia diferencia en los valores obtenidos con cada conjunto de parámetros, marcándose más esta diferencia en la zona de altas concentraciones de CO2, donde es más probable que se de precipitación. Las curvas obtenidas a partir del modelo desarrollado en GAMS concuerdan considerablemente mejor con los datos experimentales, en comparación de los parámetros de ASPEN.

Como conclusión se denota la importancia de la regresión de parámetros de interacción binaria para el modelado de procesos a partir de datos experimentales de la mezcla a representar. Este trabajo de optimización mejora la precisión general del modelo en la mezcla y el proceso que se desea simular.

Este trabajo y sus resultados dan lugar a un análisis más exacto de la viabilidad del proceso de doble propósito descripto en la introducción, teniendo en cuenta sus variables específicas y pudiendo desarrollarse diferentes situaciones, por lo menos en el rango de datos que fueron utilizados para la creación de este modelo.

Como objetivo a futuro para evaluar correctamente el proceso deseado, se deberá incluir en el modelado de la mezcla, el NaCl y las posibles precipitaciones de otros compuestos. Con este agregado se podría simular correctamente la mezcla completa, con objetivo de ser aplicada en una industria de doble propósito: la utilización de salmuera (deshecho de plantas de desalinización) con agregado de amoniaco para la captación de dióxido de carbono proveniente de plantas de generación de energía a partir de combustibles fósiles.

## Agradecimientos

Se agradece la oportunidad proporcionada por la Facultad Regional Rosario de la Universidad Tecnológica Nacional, así como a los docentes investigadores Dra. Patricia Mores y Dr. Juan Ignacio Manassaldi por el acompañamiento, el apoyo y la capacitación durante el desarrollo de este proyecto.

## Referencias bibliográficas

Kurz, F., Rumpf, B., Maurer, G., (1994). “Vapor-liquid-solid equilibria in the system $NH_3$-$CO_2$-$H_2O$ from around 310 to 470 K: New experimental data and modeling*”. Fluid Phase Equilibria 104* (1995) 261-275.

Kurz Friedhelm, Bernd Rumpf, Rudolf Sing, and Gerd Maurer (1996). “Vapor-liquid and vapor-liquid- solid equilibria in the system ammonia-carbon dioxide-sodium chloride-water at temperatures from 313 to 393K and pressures up to 3 MPa”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35(10), 3795-3802.

Que, H., Chen, C., (2011). “Th1ermodynamic modeling of the NH3–CO2–H2O system with electrolyte NRTL model”. *Ind. Eng. Chem*. Res. 50, 11406–11421.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Rizvi, S. S. H.; Heidemann, R. A. “Vapor-liquid equilibria in the ammonia-water system.” *J. Chem. Eng. Data* 1987, 32, 183–191.

Sherwood, T.K., (1925). “Solubilities of sulfur dioxide and ammonia in water.” *Ind. Eng.Chem*. 17, 745–747.

Tosello, G., (2024). “Análisis comparativo del modelo eNRTL aplicado al equilibrio líquido-vapor de la mezcla $CO_2$-$NH_3$-$H_2O$.” Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos, JIT, Rosario, Argentina, 18 de octubre.

Xu, Y., Wang, Z., Liu, X., Jin, B. (2014). “Modeling of the $NH_3$–$CO_2$–$H_2O$ vapor–liquid equilibria behavior withspecies-group Pitzer activity coefficient model”. International Journal of Greenhouse Gas Control 31 (2014) 113–120.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Modelado de fugacidad y caída de presión en membranas para la purificación de biogás

## Modeling Fugacity and Pressure Drop in Membranes for Biogas Purification

Presentación: 30/10/2025

**Rocío Victoria Asad**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI, Rosario, Santa Fe, Argentina
rocioasad@gmail.com

### Resumen

En este trabajo se desarrolla un modelo matemático de una membrana en contracorriente para la purificación de biogás multicomponente, implementado en GAMS (General Algebraic Modeling System). A diferencia de los enfoques clásicos, incorpora efectos de no idealidad mediante la ecuación de estado de Peng-Robinson y considera la caída de presión con la ecuación de Hagen-Poiseuille. Los resultados, validados con datos de una planta piloto, reproducen adecuadamente el desempeño de un módulo de membrana. Además, se comparan perfiles de fuerza impulsora frente a hipótesis ideales y se subraya la necesidad de incluir correlaciones de propiedades como viscosidad, difusividad y solubilidad para una representación más realista. También se analiza la influencia de la longitud de fibra: fibras más cortas aumentan la pureza, aunque incrementan el área requerida y la caída de presión. Por ello, las decisiones de diseño deben acompañarse de un análisis tecno-económico integral.

**Palabras clave:** Caída de Presión; Comportamiento No Ideal; Mejora de Biogás; Membrana; Modelo Matemático.

### Abstract

In this work, a mathematical model of a countercurrent membrane for multicomponent biogas purification is developed and implemented in GAMS (General Algebraic Modeling System). Unlike classical approaches, it incorporates non-ideal effects through the Peng–Robinson equation of state and accounts for pressure drop using the Hagen–Poiseuille equation. The results, validated with pilot plant data, adequately reproduce the performance of a membrane module. Furthermore, driving force profiles are compared against ideal assumptions, highlighting the need to include property correlations such as viscosity, diffusivity, and solubility for a more realistic representation. The influence of fiber length is also analyzed: shorter fibers increase purity but require a larger area and lead to higher pressure drop. Therefore, design decisions should be supported by comprehensive techno-economic analysis.

**Keywords:** Pressure Drop; Non-Ideal Behavior; Biogas Upgrading; Membrane; Mathematical Modeling.

## 1. Introducción

El biogás es un subproducto metabólico de la fermentación generada en la digestión anaeróbica de residuos orgánicos. Este recurso energético renovable es una alternativa para las fuentes finitas de energía, y le da un nuevo valor agregado a lo que, de otra manera, sería gestionado como desecho (Rodero et al., 2024). Su composición depende la materia orgánica de origen; contiene entre 55–60 % (vol) de $CH_4$, 35–40 % de $CO_2$, 1–5 % de vapor de agua, <1 % de $O_2$, y otros componentes minoritarios como $H_2S$, y compuestos orgánicos volátiles, entre otros. Para cumplir con los requisitos establecidos para su

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

inyección a la red (>95% $CH_4$, <2% $CO_2$, <1 pmv $H_2S$, <10mg/$Nm^3$ $H_2O$, etc.) se requiere la purificación de la mezcla cruda (Werkneh, 2022). El proceso de mejora de biogás puede realizarse a través de diversos métodos (separación criogénica, por membranas, absorción, adsorción, o destilación). Entre ellos, las membranas destacan por su fácil operación, bajo costo de instalación y de mantenimiento, y ausencia de compuestos químicos (Tomczak et al., 2024).

En el marco de la modelación de procesos, objeto de este estudio, el mecanismo de transporte se representa mediante el modelo de solución-difusión: el gas se disuelve o sorbe en la membrana, luego difunde a través de la misma debido al gradiente de concentraciones, y por último se desorbe (Rodero et al., 2024). Asadi y Kazempoor (2021) indican que el módulo de fibra hueca es ventajoso en el modelado de separación con membranas porque se explica con principios básicos. Si bien muchos trabajos asumen hipótesis simplificadoras, diversos autores resaltan la importancia de considerar efectos más realistas en la separación con membranas. Da Conceicao et al. (2023) mencionan que cuando se opera a presiones superiores a los 10 bar, se debe tener en cuenta el comportamiento de gas real, por lo que habría que reemplazar la fuerza impulsora expresada mediante presiones parciales, por fugacidades. Por otra parte, es necesario considerar la caída de presión en las membranas, la cual puede describirse matemáticamente con diversas ecuaciones en función de la configuración del módulo y el tipo de material.

En este trabajo se incorporan estas restricciones al modelo de base (MB, Asad 2024) y se analiza su influencia sobre el desempeño de una membrana de fibra hueca con flujo en contracorriente para el proceso de purificación de biogás. Primeramente, se comparan los resultados con datos de una planta piloto (Žák et al. 2018) y con el modelo base para evaluar el comportamiento del modelo y luego se analiza la influencia de la longitud de la fibra en las variables principales.

## 2. Materiales y métodos

Para el desarrollo de este trabajo, es utilizado como base un modelo de transporte aplicado a una membrana de polisulfona de tipo fibra hueca y diseño de tubo y carcasa, con distribución de flujo pistón, orientado a la separación de una mezcla multicomponente de $CO_2$, $CH_4$, $O_2$, $H_2S$ y $H_2O$. En este, el retenido circula por los tubos y el permeado circula por la carcasa. El modelo, implementado en GAMS (General Algebraic Modelling System) por Asad (2024), se basa en hipótesis simplificadoras clásicas: transporte mediante el mecanismo de solución-difusión representado por la Primera Ley de Fick, comportamiento ideal de los gases, caída de presión despreciable, temperatura constante, entre otras. En el modelo actual (MA), se incorporan restricciones que permiten representar el comportamiento real de la mezcla gaseosa y la caída de presión del lado del retenido. El primer aspecto es abordado mediante la ecuación de estado de Peng Robinson (EoS PR) para la estimación de la fugacidad y la densidad de la mezcla gaseosa y el segundo mediante la ecuación de Hagen-Poiseuille. En la Figura 1 se presenta un esquema del proceso de separación en una membrana por el modelo de solución difusión, donde Q representa el flujo, Ph es la presión alta y Pl la presión baja (1 bar), X es la fracción molar de cada componente i en la mezcla, y j los puntos discretos. Los superíndices F, R y P corresponden a la alimentación, el retenido y el permeado, respectivamente.

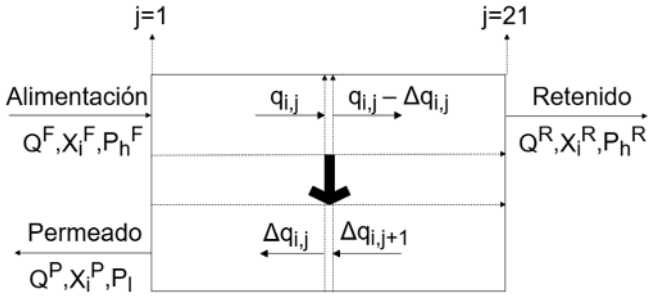



**Figura 1.** Diagrama de una membrana operando en contracorriente.

El modelo consiste en ecuaciones de balance de masa global y por componente para cada punto discreto. Además, se incluye el mecanismo de transporte a través de la membrana mediante las Ecuaciones (1) y (2).

$$q_{i,j} = q_{i,j+2} + \delta_i \times 2 \times \frac{A}{j-1} \times FI_{i,j+2} \quad \forall i, j = 1 \tag{1}$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$q_{i,j+1} = \frac{q_{i,j} + 3 \times q_{i,j+2} + \delta_i \times 2 \times \frac{A}{j-1} \times FI_{i,j+2}}{4} \quad \forall i, 1 \le j \le 19 \tag{2}$$

$q_{i,j}$ es el flujo molar de cada componente i en el punto j. La fuerza impulsora en cada punto discreto ($FI_i = f_{i,j}^R - f_{i,j}^P$) se estima en función de las fugacidades ($f_{i,j}$), incorporadas mediante una función externa que tiene la presión, la temperatura y la composición como parámetros. $\delta$ es la permeanza de cada componente y A es el área de la membrana, el cual se calcula mediante la Ecuación 3, donde L, $N_f$ y OD son el largo, el número y el diámetro externo de las fibras, respectivamente.

$$A = \pi \times OD \times N_f \times L \tag{3}$$

Luego, las restricciones de la caída de presión para una membrana de tipo fibra hueca, se basan en la ecuación de Hagen-Poiseuille, y se representan con las Ecuaciones (4) y (5), donde $\Delta P_{lumen}$ es la caída de presión del retenido, $\mu^R$ y $\rho^R$ son la viscosidad, y la densidad del retenido. Como una primera aproximación, la viscosidad se asume constante respecto a la composición de alimentación mientras que la densidad se estima con la EoS PR.

$$\Delta P_{lumen_j} = \frac{128 \times \mu_j^R \times Q_j^R}{\pi \times N_f \times ID^4 \times \rho_j^R} \times \frac{L}{N} \quad \forall\, 1 \le j \le 20 \tag{4}$$

$$Ph_{j+1} + \Delta P_{lumen_j} = Ph_j \quad \forall\, 1 \le j \le 20 \tag{5}$$

Además, se definen los siguientes indicadores de desempeño: recuperación $\left(Rec. = x_{CH_4}^R \cdot Q^R / x_{CH_4}^F \cdot Q^F\right)$, pureza de $CH_4$ en el retenido $\left(\text{Pur.} = 100 \cdot x_{CH_4}^R\right)$, y el stage–cut o fracción de permeado ($\theta = Q^P/Q^F$), es decir, la fracción de alimentación que permea a través de la membrana.

El modelo matemático (NLP) contemplando las nuevas restricciones es resuelto con CONOPT; posee 1403 variables y 2505 ecuaciones de igualdad y desigualdad.

## 3. Resultados y discusión

*3.1. Comparación con los resultados presentados en Žák et al. (2018) y con el modelo base (Asad, 2024)*

En el trabajo de Žák et al. (2018) se presentan datos de una planta piloto que consta de dos módulos de membrana de poliéster de carbonato (PEC) modificado conectadas en paralelo para la purificación de biogás. Este tipo de membrana presenta la ventaja de poder operar directamente con biogás crudo, tolerando la presencia de humedad y especies sulfuradas, lo que elimina la necesidad de pretratamientos. Además, permite alcanzar elevados niveles de pureza a bajas presiones, contribuyendo a reducir el consumo energético global. Sin embargo, su disponibilidad actual se limita principalmente a aplicaciones experimentales, ya que todavía no se encuentra ampliamente comercializada para este uso en particular.

Si bien en el trabajo se describen las características de cada módulo y generalidades del tipo de membrana (A:110 $m^2$, Nf: 400000, OD: 150µ, ID: 100µ), no se detallan los valores de permeanza y selectividad que se necesitan como entrada al modelo propuesto en este trabajo. Para realizar una comparación con los resultados reportados por estos autores, se adoptaron de la bibliografía rangos representativos considerando materiales de características similares (Alqaheem et al., 2017; Lim et al., 2022; Liu et al., 2022; Rodero et al., 2024; Tomczak et al., 2024) y se definieron como cotas del modelo: $1{,}5 \le \delta_{CH_4}(\text{GPU}) \le 4$; $13 \le \frac{\delta_{CO_2}}{\delta_{CH_4}} \le 18$; $2 \le \frac{\delta_{O_2}}{\delta_{CH_4}} \le 3{,}5$; $30 \le \frac{\delta_{H_2O}}{\delta_{CH_4}} \le 70$; $14 \le \frac{\delta_{H_2S}}{\delta_{CH_4}} \le 17$. Por otra parte, las fracciones molares reportadas en Žák et al. (2018) presentan ligeras desviaciones respecto a la unidad por lo que se modificó la composición porcentual de la alimentación: 51% de $CH_4$, 47,1% de $CO_2$, 1% de $O_2$, 0,0095% de $H_2S$ y 0,84% de $H_2O$. Además, se adoptó el caudal de alimentación asociado a un solo módulo de membrana (1,2047 kmol/h), una presión de alimentación de 0,7 MPa y un área de membrana de 110 $m^2$.

En la Tabla 2 se presentan los resultados óptimos al maximizar la pureza y se comparan con los datos experimentales. Los mismos son aceptables considerando que las características de separación de las membranas se toman de otras fuentes y que la permeabilidad se asume constante. De la bibliografía se ha observado que la mayoría de los modelos que consideran la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

permeabilidad variable requieren datos experimentales para ajustar los parámetros de la ecuación, y solo son aplicables para cada material de membrana, mecanismo de transporte y rango de condiciones de operación. Otra alternativa a la estimación de la permeanza sería modelar la difusividad y la solubilidad de cada componente ($Per_i=S_i \cdot D_i$). Por otra parte, comparando con el modelo base (MB) se obtiene una pequeña diferencia en la recuperación (+0,6%) y en la pureza del retenido (-1,5%). Aunque estas variaciones no resultan significativas al considerar un módulo de membrana de forma individual, podrían influir en el desempeño global al analizar el sistema completo de separación, con un mayor número de módulos, interconexiones (en serie, paralelo o recirculaciones) y el resto de los equipos del proceso (compresores, separadores, etc.).

**Tabla 2.** Comparación entre el modelo propuesto en este trabajo y los resultados de Žák et al. (2018).

| Modelo | ΔP [kPa] | Rec. $CH_4$ [%] | Pur. $CH_4$ [%] | θ [%] | $X^P_{CH_4}$[%] | $X^P_{CO_2}$[%] | $X^P_{O_2}$[%] | $X^P_{H_2S}$[%] | $X^P_{H_2O}$[%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Žák et al. (2018) | 200 | 69,4 | 96,00 | 62,96 | 24,00 | 74,00 | 1,2 | 0,12 | 1,20 |
| Modelo actual (MA) | 177,1 | 66,6 | 96,02 | 64,60 | 26,34 | 71,75 | 0,56 | 0,14 | 1,30 |
| Modelo base (MB) | 0 | 66,3 | 97,45 | 65,32 | 26,21 | 71,82 | 0,54 | 0,14 | 1,29 |

En la Figura 2 se presentan los perfiles de fuerza impulsora (FI) a lo largo de la membrana para el modelo actual, con caída de presión en el retenido y fugacidades, y para el modelo de base (sin caída de presión y con comportamiento ideal de los gases). Para el $CH_4$ y el $O_2$ hay mayores diferencias hacia la salida del retenido mientras que para el $CO_2$ y el $H_2S$ hay un cruce de los perfiles entre el punto 7 y el 8. Para el $H_2O$, la FI se hace prácticamente nula a partir del punto 15. En particular, en el trabajo de Žák et al. (2018) se trabaja a una presión relativamente baja, por lo que se espera que en el caso de membranas que operen a mayores presiones (válido para la mayoría de los modelos comerciales) los desvíos del comportamiento ideal sean más representativos. Otro parámetro que podría aumentar la incertidumbre en los resultados es la hipótesis de viscosidad constante (cuanto mayor es la fracción de $CH_4$ en la mezcla menor es μ, ya que es más liviano que el $CO_2$, y menor el ΔP en el retenido). Es necesario analizar la sensibilidad de este parámetro e incorporar correlaciones (como la de Wilke, por ejemplo) al modelo termodinámico.

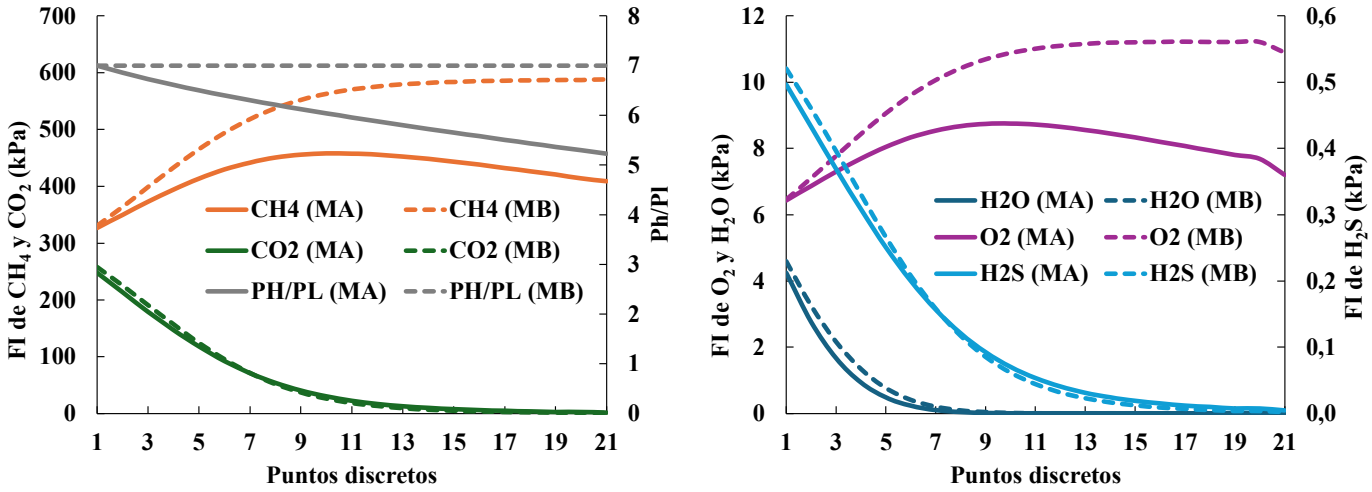



**Figura 2.** Distribución de la fuerza impulsora de cada componente a lo largo de la membrana.

*3.2. Influencia de la longitud de la fibra en variables de diseño y de desempeño*

En el diseño de módulos de membrana, un aspecto a considerar es la longitud y la cantidad de fibras. En particular, se debe evaluar la conveniencia de (a) un menor número de fibras con mayor longitud de membrana o (b) un mayor número de fibras con menor longitud. La Figura 3 muestra los resultados de este análisis al maximizar la pureza, considerando que se fijaron las permeanzas de cada componente según los resultados de la etapa de validación mientras que la cantidad de fibras y el área de la membrana se consideran ahora variables de optimización.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

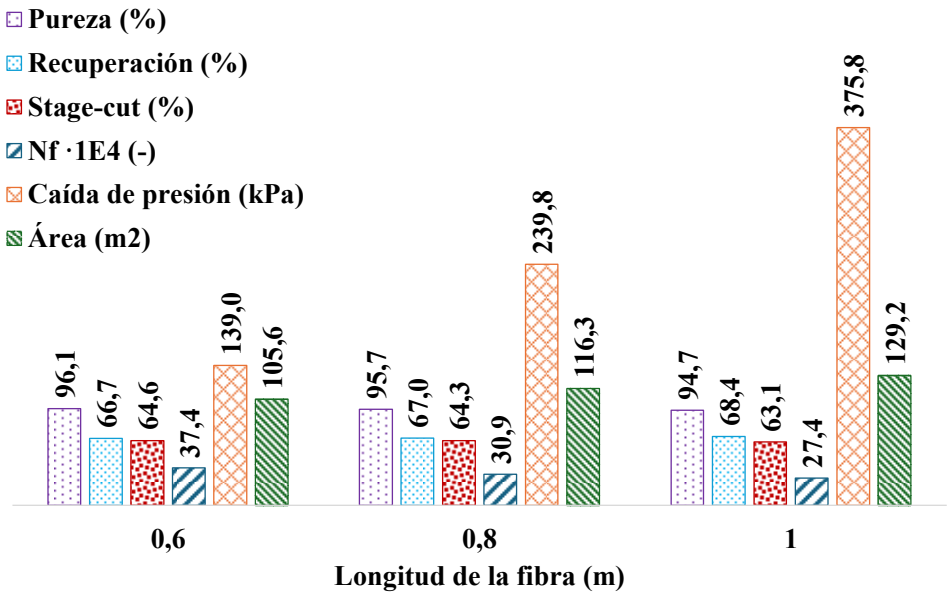



**Figura 3.** Influencia de la longitud de la fibra en variables de diseño y de desempeño.

En términos de separación, se observa un compromiso entre pureza y recuperación: la pureza del metano disminuye levemente con fibras más largas (de 96,1% a 94,7%), mientras que la recuperación aumenta (de 66,7 % a 68,4 %). La fracción de permeado también disminuye levemente (2,3%). Por otra parte, a medida que la longitud aumenta la cantidad de fibras disminuye, pasando de 374000 (0,6 m) a 274000 (1 m). Sin embargo, esta disminución se acompaña de un incremento en el área total de membrana (22%) y de la caída de presión (170%). Este aspecto constituye una limitación práctica relevante, ya que se traduce en mayores requerimientos energéticos para la operación del sistema. En consecuencia, la selección de la longitud óptima de las fibras debe basarse en una evaluación integral del proceso desde una perspectiva tecno económica.

## 4. Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo matemático de membrana en contracorriente destinado a la purificación de biogás multicomponente, implementado en GAMS, que incorpora la no idealidad del comportamiento de los gases mediante la ecuación de estado de Peng–Robinson y considera la caída de presión del retenido a través de la ecuación de Hagen–Poiseuille. El modelo ha presentado una adecuada capacidad para reproducir el rendimiento de un módulo de membrana validado con datos experimentales, permitiendo evaluar los perfiles de fuerza impulsora frente a hipótesis ideales, revelando diferencias significativas en ciertos componentes, y previendo mayores desvíos a presiones de operación más elevadas.

Los resultados evidencian la necesidad de incluir correlaciones de propiedades como viscosidad, difusividad y solubilidad, para una descripción más precisa del proceso de separación, particularmente al considerar sistemas con múltiples módulos y distintas configuraciones de interconexión. El análisis de la longitud de fibra muestra que fibras más largas requieren mayor área de membrana y generan mayores caídas de presión, aumentando el consumo energético del sistema. Sin embargo, desde el punto de vista de la separación, se logra una mayor recuperación, a expensas de una menor pureza del $CH_4$. Por tanto, las decisiones de diseño deberían apoyarse en un enfoque tecnoeconómico integral que contemple tanto el desempeño de separación como los requerimientos energéticos, asegurando un balance entre eficiencia y viabilidad económica.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo institucional de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) y el Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI) y la guía de los Dres. P. Mores y J. I. Manassaldi en el desarrollo del trabajo.

## Referencias bibliográficas

Alqaheem, Y., Alomair, A., Vinoba, M., & Pérez, A. (2017). Polymeric Gas-Separation Membranes for Petroleum Refining. International Journal of Polymer Science, 2017, 1-19.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Asad, R. V. (2024, octubre 18). Modelo matemático de una membrana para la purificación de una mezcla multicomponente de biogás. Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos JIT 2024, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Asadi, J., & Kazempoor, P. (2021). Techno-economic analysis of membrane-based processes for flexible CO2 capturing from power plants. Energy Conversion and Management, 246, 114633.

Da Conceicao, M., Nemetz, L., Rivero, J., Hornbostel, K., & Lipscomb, G. (2023). Gas Separation Membrane Module Modeling: A Comprehensive Review. Membranes, 13(7), 639.

Lim, Y.-G., Bak, C., & Kim, Y.-D. (2022). Comprehensive experimental and theoretical insights into the performance of polysulfone hollow-fiber membrane modules in biogas purification process. Chemical Engineering Journal, 433, 134616.

Liu, Y., Sim, J., Hailemariam, R. H., Lee, J., Rho, H., Park, K.-D., Kim, D. W., & Woo, Y. C. (2022). Status and future trends of hollow fiber biogas separation membrane fabrication and modification techniques. Chemosphere, 303, 134959.

Rodero, M. D. R., Muñoz, R., González-Sánchez, A., Ruiz, H. A., & Quijano, G. (2024). Membrane materials for biogas purification and upgrading: Fundamentals, recent advances and challenges. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(5), 114106.

Tomczak, W., Gryta, M., Daniluk, M., & Żak, S. (2024). Biogas Upgrading Using a Single-Membrane System: A Review. Membranes, 14(4), 80.

Werkneh, A. A. (2022). Biogas impurities: Environmental and health implications, removal technologies and future perspectives. Heliyon, 8(10), e10929.

Žák, M., Bendová, H., Friess, K., Bara, J. E., & Izák, P. (2018). Single-step purification of raw biogas to biomethane quality by hollow fiber membranes without any pretreatment – An innovation in biogas upgrading. Separation and Purification Technology, 203, 36-40.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Flujo diario de las emisiones de $CH_4$ y $CO_2$ de purines en un sistema de producción lechera

## Daily flow of $CH_4$ and $CO_2$ emissions in slurry from a dairy production system

Presentación: 30/10/2025

**Matías Delbon**
Universidad Tecnológica Nacional, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Facultad Regional de Rafaela, Refaela, Santa Fe, Argentina.
matiasdelbon4@gmail.com

**Mateo Caussi**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
mateocaussi3@gmail.com

### Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar el flujo diario de dióxido de carbono ($CO_2$) y metano ($CH_4$) en un sistema de tratamiento de efluentes perteneciente a INTA, Estación Experimental Agropecuaria de Rafaela. Se realizaron mediciones en tres puntos de una laguna (descarga, centro y salida) durante 24 h, utilizando la técnica de cámaras estáticas flotantes, complementadas con análisis fisicoquímicos del purín. Los resultados mostraron una alta variabilidad temporal y espacial en las emisiones, con valores promedio de 0,47 ± 0,38 g $CH_4$ $m^{-2}$ $h^{-1}$ y 1,28 ± 1,48 g $CO_2$ $m^{-2}$ $h^{-1}$. El punto de descarga presentó los valores más altos, alcanzando 1,45 g $CH_4$ $m^{-2}$ $h^{-1}$ y 5,93 g $CO_2$ $m^{-2}$ $h^{-1}$. Se observó una correlación positiva entre la temperatura del efluente y las emisiones de $CH_4$, mientras que el $CO_2$ mostró un comportamiento distinto entre sectores. Estos resultados indican que las emisiones dependen tanto de las condiciones ambientales como de la ubicación dentro del sistema.

**Palabras clave:** Cambio climático, emisiones, tratamiento de efluentes

### Abstract

The aim of this study was to evaluate the daily flow of carbon dioxide ($CO_2$) and methane ($CH_4$) in a wastewater treatment system at INTA, Estación Experimental Agropecuaria de Rafaela. Measurements were taken at three points in a lagoon (inlet, center, and outlet) over a 24-hour period, using the static floating chamber technique, complemented with physicochemical analyses of the slurry. Results showed high temporal and spatial variability in emissions, with average values of 0.47 ± 0.38 g $CH_4$ $m^{-2}$ $h^{-1}$ and 1.28 ± 1.48 g $CO_2$ $m^{-2}$ $h^{-1}$. The inlet point showed the highest values, reaching maxima of 1.45 g $CH_4$ $m^{-2}$ $h^{-1}$ and 5.93 g $CO_2$ $m^{-2}$ $h^{-1}$. A positive correlation was observed between effluent temperature and $CH_4$ emissions, while $CO_2$ exhibited a different behavior across sampling sites. These results indicate that emissions depend both on environmental conditions and on the location within the system.

**Keywords:** methane, wastewater treatment, climate change

## 1. Introducción

El cambio climático es un desafío complejo a nivel global que influye en varios componentes ecológicos, ambientales, sociopolíticos y socioeconómicos (Abbass et al., 2022). Según Rehman et al (2021), esta problemática ambiental está ganando cada vez más importancia con el pasar de los años y la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) es

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

considerada la causa central de la variación climática (Rehman et al., 2021). Estos gases cumplen un rol importante en la temperatura del planeta, pero por consecuencia de la actividad humana han experimentado una potenciación en sus efectos provocando graves problemas ambientales.

En este sentido el sector ganadero representa una fuente significativa de emisión GEI, a través de la generación de $CO_2$, $CH_4$, y $N_2O$ (Hristov et al., 2013ª; Hassouna et al., 2023). A nivel mundial, la emisión conjunta de estos tres GEI por parte del sector ronda el 14,5% de las emisiones antropogénicas totales, con un rango de 7 a 18% dependiendo de las fuentes y modo de cálculo (Hristov et al., 2013b), incluso se afirma que en la actualidad el valor se ha incrementado a un 16,5% (Twine et al., 2021). El 35-41% de estas emisiones corresponde al subsector ganadería de carne bovina y el 27-30% al subsector de producción lechera (FAO, 2011 y 2013; Goss et al., 2022) aunque desde el punto de vista de Bačėninaitė (2022) este valor alcanza el 70% en la lechería.

El manejo de purines y excretas es una de las fuentes de emisión de $CH_4$ y $N_2O$ más graves de la ganadería. Como estos gases se producen anaeróbicamente durante la descomposición de los residuos por parte del accionar de diversos microorganismos, el contenido de materia seca y la temperatura de los compuestos influyen en la perdida de GEI al ambiente. La cantidad de gases emitidos es variable en cada etapa del manejo y existe cierto grado de incertidumbre para consensuar valores universales debido a la cantidad de factores ambientales que intervienen en el proceso (Chadwick et al., 2011; Grossi et al., 2019; Cárdenas et al., 2021).

Este tipo de tratamiento de residuos, en particular de los purines, es una práctica habitual en los sistemas de producción lechera y constituye una herramienta fundamental para mitigar la emisión de GEI. Sin embargo, estos sistemas deben ser gestionados de manera adecuada para que sean eficientes, ya que de lo contrario los resultados finales serian contraproducentes.

Con el propósito de comprender en mayor profundidad el funcionamiento de estos sistemas, el objetivo del trabajo fue evaluar el flujo diario de emisiones de dióxido de carbono ($CO_2$) y metano ($CH_4$) en un sistema de tratamiento de purines de tambo.

## 2. Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en el tambo robot perteneciente al INTA, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela, ubicada en la provincia de Santa Fe, Argentina. El establecimiento cuenta con un sistema de separación de sólidos mediante un tamiz y dos lagunas: una anaeróbica y otra facultativa.

Se realizaron monitoreos de los flujos de $CH_4$ y $CO_2$ en diferentes horarios (16:00, 20:00, 00:00, 04:00, 08:00 y 12:00 h), desde el 19 hasta el 20 de diciembre de 2022, en tres puntos de la laguna: en la descarga (A), en el centro (B) y en la salida (C). Las emisiones fueron medidas utilizando la técnica de cámaras estáticas flotantes, colocando 2 por punto de muestreo (Fusé et al., 2016).

Además, en cada punto se tomaron muestras de purines para su caracterización fisicoquímica: pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE), demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo, nitrato, amonio, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sulfuros, sólidos suspendidos totales (SST) y nitrógeno total Kjendahl (NTK).

## 3. Resultados y discusión

Los valores promedio de $CH_4$ y $CO_2$ fueron de $0{,}47 \pm 0{,}38$ g $m^{-2}$ $h^{-1}$ y $1{,}28 \pm 1{,}48$ g $m^{-2}$ $h^{-1}$, respectivamente. La alta variabilidad observada es esperable debido a las fluctuaciones espaciales y temporales evidenciadas en la Figura 1.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

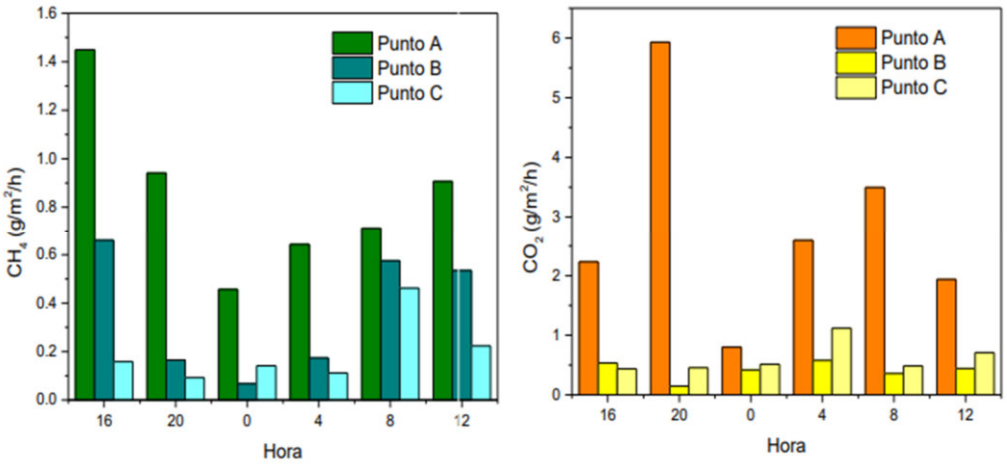



**Figura 1.** Flujos de $CH_4$ y $CO_2$ en cada uno de los puntos de medición según el horario registrado.

El punto A presentó las mayores emisiones de $CH_4$ y $CO_2$ en todos los horarios de muestreo: el CH4 alcanzó un valor máximo de 1,45 g $m^{-2}$ $h^{-1}$ a las 16:00 h, mientras que el $CO_2$ llegó a 5,93 g $m^{-2}$ $h^{-1}$ a las 20:00 h. En el punto B, se registró un valor máximo de 0,66 g $m^{-2}$ $h^{-1}$ para $CH_4$ a las 16:00 h y de 0,57 g $m^{-2}$ $h^{-1}$ para $CO_2$ a las 04:00 h. Por su parte, el punto C mostró las emisiones más bajas de $CH_4$, con un máximo de 0,46 g $m^{-2}$ $h^{-1}$ a las 08:00 h; sin embargo, para el $CO_2$, el valor más alto fue de 1,11 g $m^{-2}$ $h^{-1}$ a las 04:00 h.

La temperatura del efluente osciló entre los 37 °C a las 16:00 h y los 24 °C a las 00:00 h (Figura 2). La mayor emisión de $CH_4$ se registró a 37 °C, mientras que la más baja se observó a 20,9 °C, lo que sugiere una correlación directa entre temperatura y tasa de emisión. En general, se observó que las emisiones de $CH_4$ fueron mayores en el punto más próximo a la descarga (A) y decrecieron a lo largo del sistema. Esto podría atribuirse a la mayor concentración de materia orgánica en ese punto, asociada a los sólidos suspendidos totales (SST).

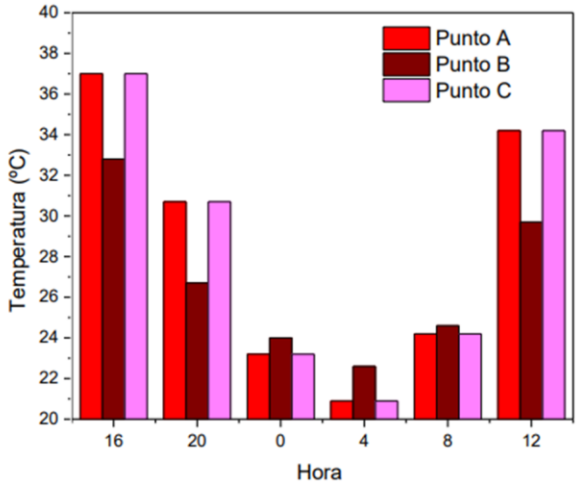



**Figura 2.** Variación de la temperatura del efluente según los distintos horarios de muestreo.

En cuanto al $CO_2$, el comportamiento fue diferente: las emisiones en el punto A fueron significativamente superiores a las de los puntos B y C, los cuales mostraron flujos de magnitudes similares. Asimismo, el punto A presentó dos valores máximos de emisión, a las 20:00 y a las 08:00 h, siendo el primero el de mayor magnitud.

La caracterización fisicoquímica, realizada en tres sectores en distintas momentos, dio como resultado los siguientes valores promedios: pH 8, CE 7,45 ± 0,03 $mS.m^{-1}$, DQO 2561,67 ± 101,04 $mg.O_2.l$, fósforo 9,34 ± 3,88 mg.P.l, nitrato 274,1 ± 33,1 $mg.NO_3^-.l$, amonio 215,84 ± 10,55 $mg.NH_4^+.l$, ST 7042,67 ± 281,57 mg.l, SV 2471,33 ± 141,55 mg.l, sulfuros 9,4 ± 1,35 mg $S^{-2}.l$, SST 760 mg.l ± 72,11 y NTK 313,97 ± 10,66 mg.N.l. Son destacables las concentraciones de SST de cada lugar de muestreo: para el punto A fue de 820 SST mg.l, el punto B 780 SST mg.l y 680 SST mg.l para el punto C.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que las emisiones de $CH_4$ y $CO_2$ en sistemas de tratamiento de purines están fuertemente influenciadas por la temperatura del mismo y la ubicación dentro del sistema. En particular, se observó que el punto de descarga (A) concentra las mayores emisiones, lo que podría estar relacionado con la mayor concentración de materia orgánica presente en esta etapa del proceso.

## Referencias bibliográficas

Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). “A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures”. Environmental Science and Pollution Research, 29(28), 42539-42559.

Bačėninaitė, D., Džermeikaitė, K., & Antanaitis, R. (2022). “Global warming and dairy cattle: How to control and reduce methane emisión”. Animals, 12(19), 2687.

Cárdenas, A., Ammon, C., Schumacher, B., Stinner, W., Herrmann, C., Schneider, M., & Amon, B. (2021). “Methane emissions from the storage of liquid dairy manure: Influences of season, temperature and storage duration”. Waste Management, 121, 393-402.

Chadwick, D., Sommer, S., Thorman, R., Fangueiro, D., Cardenas, L., Amon, B., & Misselbrook, T. (2011). “Manure management: Implications for greenhouse gas emissions”. Animal Feed Science and Technology, 166-167, 514-531. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.036

FAO. (2011). “Evaluation of certain food additives and contaminants: seventy-third [73rd] report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives”. World Health Organization.

Fusé, V. S., Priano, M. E., Williams, K. E., Gere, J. I., Guzmán, S. A., Gratton, R., & Juliarena, M. P. (2016). “Temporal variation in methane emissions in a shallow lake at a southern mid latitude during high and low rainfall periods”. Environmental monitoring and assessment, 188(10), 590.

Gross, A., Bromm, T., Polifka, S., & Schierhorn, F. (2022). “The carbon footprint of milk during the conversion from conventional to organic production on a dairy farm in central Germany”. Agronomy for Sustainable Development, 42(3), 37.

Grossi, G., Goglio, P., Vitali, A., & Williams, A. G. (2019). “Livestock and climate change: impact of livestock on climate and mitigation strategies”. Animal Frontiers, 9(1), 69-76.

Hassouna, M., van der Weerden, T. J., Beltran, I., Amon, B., Alfaro, M. A., Anestis, V., & Simon, P. (2023). “DATAMAN: A global database of methane, nitrous oxide, and ammonia emission factors for livestock housing and outdoor storage of manure”. Journal of Environmental Quality, 52(1), 207-223.

Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H.S.P., & Tricarico, J. M. (2013a). “Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations I”. J. of animal science, 91(11), 5045-5069.

Hristov, A. N., Ott, T., Tricarico, J., Rotz, A., Waghorn, G., & Firkins, J. L. (2013b). “Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: III. A review of animal management mitigation options”. Journal of Animal Science, 91(11), 5095-5113.

Rehman, A., Ma, H., Ahmad, M., Ozturk, I., & Chishti, M. Z. (2021). “How do climatic change, cereal crops and livestock production interact with carbon emissions? Updated evidence from China”. Environmental Science and Pollution Research, 28, 30702-30713.

Twine, R. (2021).” Emissions from animal agriculture—16.5% is the new minimum figure”. Sustainability, 13(11), 6276.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Método simplificado para la obtención de distancias seguras basadas en riesgo

## Simplified Method for Obtaining Risk-Based Safety Distances

Presentación: 30/10/2025

**Agustina Zacchino**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.
zacchinoagus@gmail.com

**Ornella Sdrigotti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.
osdrigotti@gmail.com

**Selena Herrmann**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.
seleluz17@gmail.com

### Resumen

Las instalaciones químicas están expuestas a accidentes capaces de generar consecuencias severas. Una medida clave para mitigar estos riesgos es el establecimiento de distancias seguras (DS). Los métodos tradicionales, basados solo en consecuencias, suelen sobreestimar afectando la viabilidad del diseño de planta. Como alternativa, la estimación de DS basadas en riesgo incorpora la frecuencia de ocurrencia de los eventos y permite reducir sustancialmente dichas distancias; sin embargo, su aplicación práctica se ve limitada por el elevado costo computacional asociado. En este trabajo se propone y evalúa un método simplificado para la determinación de DS basadas en riesgo y se lo compara con un método riguroso. El análisis considera fallas en tanques de diferentes capacidades que contienen GLP y tres conjuntos de condiciones ambientales. Los resultados muestran que el método simplificado constituye una alternativa eficiente y robusta para la estimación de DS, reduciendo esfuerzo computacional sin perder representatividad.

**Palabras clave:** distancias seguras, riesgo, impacto, modelo simplificado.

### Abstract

Chemical plants face accidental events that may cause severe impacts. Safety distances (SD) are a key passive measure to reduce these risks. Conventional consequence-based approaches often overestimate, while risk-based methods provide more realistic values but require high computational effort. This study proposes a simplified method for risk-based SD estimation and compares it with a detailed method. The analysis considers failures in LPG storage tanks of different capacities under three environmental conditions. The simplified method estimates SD through a weighted summation of scenario distances according to their frequency of occurrence. Results demonstrate that the proposed approach offers an efficient and reliable alternative, reducing computational demands while preserving representativeness in risk-based distance estimation.

**Keywords:** safety distances, risk, impact, simple model.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

Las plantas químicas presentan numerosos peligros que pueden derivar en accidentes con consecuencias graves a nivel humano, ambiental y económico. Frente a ello, el diseño de plantas puede abordarse desde dos enfoques: el diseño inherentemente más seguro (ISD), orientado a eliminar o reducir peligros desde el origen, y el diseño basado en riesgos (RBD), que asume la existencia de ciertos riesgos inevitables y busca gestionarlos cuantitativamente en función de su probabilidad y severidad.

En la búsqueda de la minimización del riesgo, el establecimiento de distancias de seguridad (DS) constituye una medida pasiva fundamental. Si bien mayores separaciones reducen la probabilidad de daño, también incrementan los costos de diseño de layout asociados al área ocupada y las conexiones, lo que exige un equilibrio entre seguridad y viabilidad económica.

La definición de DS depende no solo de las características de la fuente de peligro (origen de potenciales eventos accidentales) sino también del tipo de receptor (nivel de vulnerabilidad) que se desea resguardar. Para ello, se deben establecer valores tolerables de riesgo o de impacto (en función de la metodología para la obtención de distancias).

El método más extendido para la estimación de las DS se basa principalmente *solo en la evaluación de las consecuencias* de los potenciales eventos accidentales, es decir, la DS se estima considerando un valor límite del impacto (vector de afectación físico: sobrepresión, intensidad de radiación, concentración) sobre las personas; o sobre las unidades atmosféricas y/o presurizadas. Sin embargo, las DS de algunos eventos (BLEVE, por ejemplo) son muy elevadas, aunque dichos eventos son menos frecuentes, resultando inapropiado el empleo de estos valores por el exagerado terreno resultante (layout). Por otro lado, la propuesta de un método de estimación de DS basado en riesgos incorpora la frecuencia de ocurrencia de los eventos, reduciendo sustancialmente dichas DS, sin embargo, el costo computacional de este método es elevado cuando se consideran fuente de peligros con gran número de eventos accidentales finales.

En este trabajo, se propone un método simplificado para la determinación de DS basadas en riesgo, mediante la combinación de frecuencia relativa de ocurrencia de cada evento y su DS asociada a un nivel de impacto. Para ello, se aborda como fuente de peligro el almacenamiento de GLP, siendo los eventos accidentales derivados de pérdidas de contención de dicho material: *jet fire*, resultado de la ignición de gases inflamables presurizados liberados con impulso; *BLEVE*, causado por la falla catastrófica de recipientes presurizados; *fireball*, que corresponde a la combustión súbita de una nube inflamable; y *VCE*, que surge de la dispersión e ignición de gas inflamable bajo condiciones de confinamiento o congestión, altamente dependiente de las condiciones ambientales.

# 2. Materiales y métodos

Para el desarrollo de esta metodología simplificada se analizan como fuente de peligro tanques de almacenamiento de gas licuado de petróleo, GLP, de tres capacidades diferentes: 500, 1500 y 2500 m³ (denotados como unidad i), con un nivel de llenado del 80% y como receptores tanques atmosféricos y tanques presurizados (denotados como unidad j).

## 2.1. *Estimación de DS basada en riesgo*

El riesgo de ocurrencia de daño sobre la unidad j dada una falla en la unidad i separadas una distancia $d_{ij}$, se puede estimar por la Ec. (1).

$$RD_{i,j} = \sum_{l \epsilon LOC_i} \sum_{k \epsilon K_i} \sum_{u \epsilon U_i} F_{l,k,u} C_{l,k,u} \quad (1)$$

Siendo $LOC_l$ la caracterización de las pérdidas de contención en la unidad *i,* analizando falla catastrófica $LOC_1$, fuga grande $LOC_2$ y fuga pequeña $LOC_3$; $K_i$ el conjunto de eventos accidentales finales determinados por los árboles de eventos asociados a la unidad *i {jet fire, fireball, BLEVE, VCE}*; *U* el conjunto de condiciones ambientales. Luego, $F_{l,k,u}$ representa la frecuencia de ocurrencia del evento accidental (*k*) $f_{evento}$, ante un LOC (*l*) $f_{LOC}$, dadas las condiciones ambientales (*u*) $f_{cond.amb}$, calculado a partir de la Ec. (2). Así como, $C_{l,k,u}$ representa la consecuencia sufrida por el receptor *j* ubicado a una distancia $d_{ij}$, una vez que el evento accidental (*k*) ha ocurrido dado un LOC (*l*) y dadas las condiciones atmosféricas (*u*). Ésta se estima mediante Método Probit (TNO, 2005).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$F_{l,k,u} = f_{LOC_l} f_{evento_k} f_{cond.amb_u} \quad (2)$$

Basándose en esta definición y haciendo uso de las Ecs. (1)-(2), Kraft et al. (2023) proponen un procedimiento para la estimación de DS basadas en riesgo partiendo de la base de establecer un valor umbral (RDtol - riesgo de daño tolerable, asumiendo este como $3x10^{-7}$) como se presenta en la Figura 1.

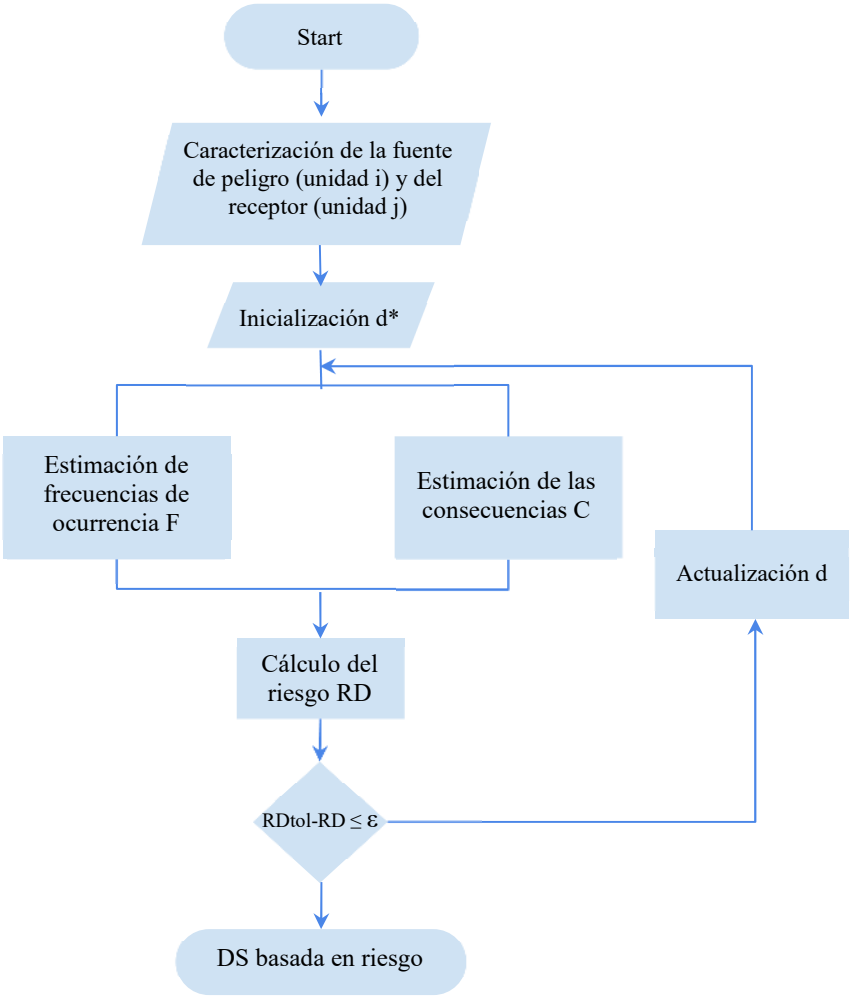



**Figura 1.** Algoritmo para la estimación de DS basada en riesgo.

2.2. *Propuesta de metodología simplificada para estimar DS*

Partiendo del hecho de que una fuente de peligro puede dar lugar a distintos eventos accidentales y contando con la ventaja de disponer mayoritariamente de modelos simplificados (MS) para estimar distancias de seguridad (DS) a partir de un nivel de impacto, una estrategia posible sería tomar como DS la mayor distancia calculada entre todos los escenarios, adoptando así el "peor escenario". Sin embargo, este criterio suele resultar excesivamente conservador, con implicaciones significativas en el diseño del layout y en la planificación de la planta.

Observando la lógica de las DS basadas en riesgo, surge la propuesta de combinar lo mejor de ambos enfoques: ponderar las DS estimadas para cada evento según su nivel de impacto mediante la frecuencia relativa de ocurrencia de los mismos; considerando además para aquellos eventos accidentales que son influenciables por las condiciones ambientales, la frecuencia de estos escenarios de acuerdo a la meteorología de la zona.

Esta metodología permite obtener distancias representativas, evitando por un lado sobreestimaciones desmedidas (enfoque basado en consecuencia) y por el otro ahorrando tiempo de cómputo (enfoque basado en riesgo). Tal propuesta se formaliza en la Ec. (3), denominando a la DS así obtenida como distancia ponderada $D_{ponderada}$:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$D_{ponderada} = \frac{\sum_{l \epsilon LOC_i} \sum_{k \epsilon K_i} \sum_{u \epsilon U_i} f_{evento_{k,l}} f_{cond.amb_u} . DS_{l,k,u}}{\sum_{l \epsilon LOC_i} \sum_{k \epsilon K_i} \sum_{u \epsilon U_i} f_{evento_{k,l}} f_{cond.amb_u}} \quad (3)$$

De acuerdo con Vílchez et al. (2011), en el caso de sustancias extremadamente inflamables y volátiles almacenadas como gases licuados (sustancia analizada aquí GLP), se deben seleccionar dos árboles de eventos: uno para liberación instantánea del inventario y otro correspondiente a una liberación continua, variando la frecuencia de ocurrencia de los eventos accidentales $f_{evento_{k,l}}$. Es por ello, que aquí se consideran los tres potenciales LOCs adoptados por el método riguroso: liberación instantánea de todo el inventario $LOC_1$, liberación continua de todo el inventario en 10 minutos a caudal constante $LOC_2$ y liberación continua desde un orificio de 10 mm de diámetro $LOC_3$.

Luego, los eventos accidentales involucrados son: explosiones BLEVE (asociadas a $LOC_1$), explosiones de nube de vapor (VCE) relacionadas a todas las pérdidas de contención ($LOC_1$, $LOC_2$ y $LOC_3$), incendio de chorro (solo acontece para fugas continuas $LOC_2$ y $LOC_3$) y bola de fuego (ruptura catastrófica $LOC_1$). Los cuales son afectados, en menor o mayor medida, por las condiciones meteorológicas como se verá luego en el requerimiento de variables de entrada de los MS empleados. Para aquellos que lo requieran se utilizan 3 conjuntos de condiciones ambientales (Set 1, Set 2 y Set 3), correspondientes a velocidades de viento 2, 5 y 8 m/s, asociadas a condiciones de estabilidad atmosférica clase B, D y D. Para cada caso se adoptaron valores medios de humedad relativa, asignando la probabilidad de ocurrencia para la ciudad de Rosario de 0.2, 0.3 y 0.5, respectivamente; de acuerdo al análisis de datos meteorológicos históricos abordado en CAIMI.

A continuación, se presentan los MS empleados para estimar las DS en función de cada evento accidental involucrado. Estas DS son las requeridas por el método simplificado aquí propuesto de acuerdo a la Ec. (3). La obtención de las mismas se lleva a cabo para dos tipos de receptores (unidad j) estableciendo niveles de impacto según el tipo de evento. La intensidad de radiación (impacto generado por incendios) se asume un valor de 15 kW/m2 (unidad j: tanque atmosférico) y un valor de 40 kW/m2 (unidad j: receptor presurizado). La sobrepresión (impacto asociado a explosiones) se establece en un valor de 10 kPa (unidad j: tanque atmosférico) y 20 kPa (unidad j: receptor presurizado) (Cozzani et al., 2006).

2.2.1 Estimación de DS dado un nivel de impacto

2.2.1.1. Modelo simplificado para la estimación de DS ante una explosión BLEVE

Para el cálculo de la DS en las explosiones BLEVE se hace uso del MS propuesto por (Kraft et al, 2023) desarrollado en el centro CAIMI que estima las DS mediante Modelos Simples Adimensionales (SDM) como versión reducida del modelo riguroso de referencia. Estos modelos se obtuvieron correlacionando los resultados con el modelo de referencia y expresando las distancias en función de un conjunto mínimo de variables representativas, fácilmente accesibles en etapas tempranas del diseño. Las variables que más influyen son el volumen del recipiente, la sobrepresión adimensional asociada al nivel de daño del receptor y el Número de Jakob, que incorpora tanto la naturaleza de la sustancia como las condiciones de explosión. De este modo, se obtiene mediante un cálculo rápido la DS frente a este evento ocurriendo el mismo solamente en el caso de ruptura catastrófica del recipiente $LOC_1$.

2.2.1.2. Determinación de DS ante una bola de fuego

La fireball ocurre tras la ruptura catastrófica de un recipiente con gas licuado inflamable ($LOC_1$), generando una nube de vapor que, al encenderse, produce una combustión difusiva de corta duración caracterizada por una intensa radiación térmica que puede dañar a equipos cercanos por radiación o contacto directo con la llama. En recipientes atmosféricos se toma como DS el radio de la bola de fuego. En recipientes presurizados, no se considera para el cálculo de la DS, ya que la probabilidad de escalada es despreciable, el tiempo hasta la falla resulta mayor a la duración del evento (Cozzani et al., 2006).

2.2.1.3. Modelo simplificado para la estimación de DS ante un incendio de chorro

En el caso de fugas grandes ($LOC_2$) y pequeñas ($LOC_3$) y de encontrarse con una fuente de ignición en el entorno cercano, se presenta la posibilidad de ocurrencia del incendio de chorro. La DS fue estimada empleando un MS propuesto en el CAIMI mediante el ajuste de datos de referencia por simulación del Modelo de Chamberlain (1987). Las variables de entrada requeridas son presión de fuga, diámetro de orificio, velocidad de viento y humedad relativa.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

2.2.1.4. Obtención de la DS para VCE

En el caso de las explosiones de nubes de vapor (VCE) se deben utilizar los conjuntos de condiciones ambientales mencionados anteriormente, cada uno con su probabilidad de ocurrencia. La inclusión de estas condiciones es fundamental, ya que factores como la velocidad y dirección del viento y la estabilidad atmosférica influyen directamente en la dispersión del gas liberado, lo cual modifica tanto la extensión de la nube inflamable como la probabilidad de ignición y, por ende, la DS resultante. El campo de sobrepresiones a partir del cual se determina la DS, es estimado mediante simulaciones en el software ALOHA considerando las tres pérdidas de contención.

## 3. Resultados y discusión

En las Figuras 2 y 3, se presentan a modo de comparación las DS obtenidas mediante el método simplificado ($D_{ponderada}$) aquí desarrollado y las calculadas con el procedimiento riguroso (DS basada en riesgo) (Kraft et al. 2023) considerando como receptores: tanques atmosféricos y tanques presurizados, respectivamente. Las mismas permiten visualizar de manera directa el grado de concordancia entre ambos enfoques y la magnitud de las diferencias observadas.

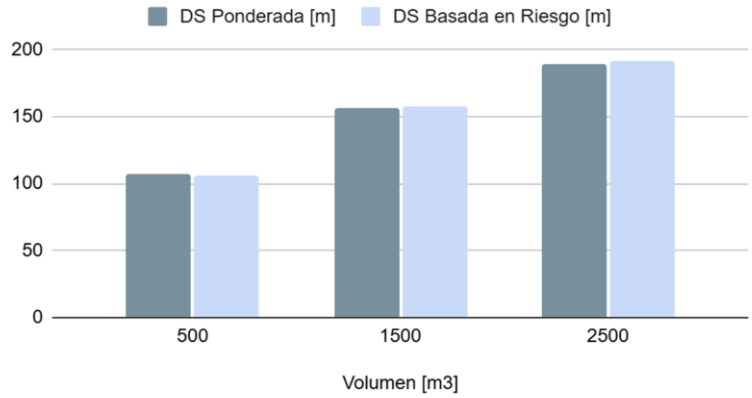



**Figura 2.** Gráfico de barras comparativo de DS para tanques atmosféricos.

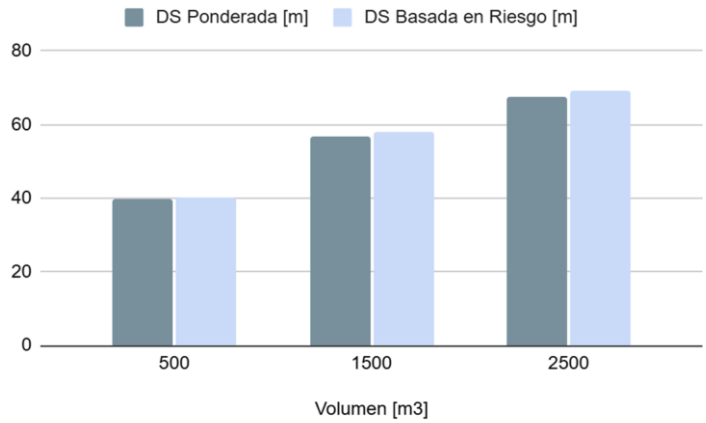



**Figura 3.** Gráfico de barras comparativo de DS para tanques presurizados.

En la Tabla 1, se muestran los errores relativos en porcentaje entre la DS ponderada y la DS basada en riesgo.

**Tabla 1.** Errores relativos porcentuales entre DS ponderada y DS basada en riesgo

| Volumen [m3] | Error relativo porcentual para tanques atmosféricos | Error relativo porcentual para tanques a presión |
|---|---|---|
| 500 | 0.94% | -0.88% |
| 1500 | -0.76% | -2.14% |
| 2500 | -1.56% | -2.08% |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los resultados evidencian que en general el método simplificado tiende a subestimar levemente los valores del método complejo, con errores relativos porcentuales en su mayoría negativos. Los errores relativos son muy pequeños, lo que indica un buen nivel de aproximación del método.

Este comportamiento permite afirmar que el método simplificado es consistente y ofrece resultados muy cercanos al cálculo detallado, reduciendo significativamente el tiempo de cómputo y datos, lo cual lo hace especialmente útil al momento de abordar la optimización de layout en etapas tempranas del diseño. Al mismo tiempo, en complejos ya establecidos el dimensionamiento de zonas de aislación ante contingencias o emergencias, podría efectuarse sin mayores inconvenientes.

## 4. Conclusiones

El estudio realizado permite concluir que el método simplificado constituye una alternativa válida para la estimación preliminar de DS en instalaciones con almacenamiento de GLP. A pesar de incurrir en subestimaciones en la mayoría de los casos evaluados, con respecto al procedimiento complejo, los errores relativos obtenidos fueron bajos y no superaron (en valor absoluto) el 3%. Puede resolverse, en este caso en particular, adicionando un factor de cobertura constante y válido para todo el rango de aplicación práctica. En consecuencia, el método simplificado puede ser empleado en fases iniciales de diseño como un recurso eficiente para orientar decisiones preliminares, y es el único posible cuando los datos son escasos y no pueden utilizarse los métodos rigurosos.

Finalmente, si bien los resultados obtenidos se refieren a una sustancia en particular (GLP) podría inferirse que el procedimiento aquí propuesto tendría validez para otras sustancias peligrosas y, por ende, estructuras diferentes al caso aquí analizado. En futuros trabajos se analizará una generalización de la metodología para cubrir otras sustancias peligrosas y distintos árboles de eventos accidentales típicos empleados en el análisis de riesgos.

## Agradecimientos

Se desea agradecer el apoyo brindado por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario (UTN FRRo). Además, se agradece la guía de la Ing. Romina Kraft y el Dr. Nicolás Scenna.

## Referencias bibliográficas

Chamberlain G.A., 1987, "Developments in Design Methods for Predicting Thermal Radiation from Flares", Chem. Eng. Res. Des. 65:299-309.

Cozzani, V., Gubinelli, G., & Salzano, E. (2006). Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. Journal of Hazardous Materials, 129, 1-21. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.012

Kraft, R. A., Orellano, S., Mores, P. L., & Scenna, N. J. (2023). BLEVE: Safety distances estimation by simple models based on the Jakob number. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 83, 105069. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105069

Kraft, R. A., Orellano, S., Mores, P. L., Rodríguez, N. H & Scenna, N. J. (2023). “Risk-Based Approach for Safety Distance Estimation in the Process Industry”. Proceedings of WCCE11 11th World Congress of Chemical Engineering. ISSN 2953-5565. 1ra Ed. Vol 1 p. 864.

TNO. (2005). Guideline for quantitative risk assessment—Purple Book (3rd Ed.). Committe for the Prevention of Disasters.

Vílchez, J. A., Espejo, V., & Casal, J. (2011). Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24, 281-287. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.01.005

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Base de datos para el Módulo Fisicoquímico de CEIBO 2.0. Un Sistema para el Análisis Cuantitativo de Riesgos y el Diseño Seguro de Procesos

## Physiochemical Database for CEIBO 2.0. A System for Quantitative Risk Analysis and the Safe Design of Processes

Presentación: 30/10/2025

**Lucio Andriani Martínez**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas de Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.
Lucioam2006@gmail.com

### Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una Base de Datos de propiedades fisicoquímicas integrada a la versión CEIBO 2.0, sistema que incorpora módulos de simulación de eventos accidentales, estimación de riesgos, entrada y salida de datos y optimización de layout. La Base de Datos del módulo Físico-químico centraliza la información requerida de las sustancias, cuya organización, estructura de almacenamiento y validación bibliográfica se describen en detalle. En una primera etapa, los datos fueron recopilados en planillas Excel y posteriormente migrados a MySQL mediante una estructura tipo estrella, optimizando así su gestión y desempeño. Actualmente, la Base se encuentra implementada y operativa. Como demostración de su aplicabilidad, se incluye un caso de estudio: la estimación de la distancia de seguridad ante una explosión tipo BLEVE en un tanque de propano, empleando un modelo incorporado a CEIBO que recurre a las propiedades y parámetros obtenidos directamente desde la Base de Datos.

**Palabras clave:** Base de datos, CEIBO, Análisis de riesgo.

### Abstract

This work presents the development of a physicochemical properties database integrated into CEIBO 2.0, a system that incorporates modules for accident simulation, risk estimation, data input/output, and layout optimization. The Physicochemical Database centralizes the required information on substances, with details provided on its organization, storage structure, and bibliographic validation. In the initial stage, the relevant data were compiled in Excel spreadsheets and subsequently migrated to MySQL using a star-type structure, thus enhancing management and performance. The database is currently implemented and fully operational. To demonstrate its applicability, a case study is included: the estimation of the safety distance for a BLEVE-type explosion of a propane tank, using a model integrated into CEIBO that retrieves the necessary properties and parameters directly from the database.

**Keywords:** Database, CEIBO, Risk Analysis.

## 1. Introducción

A la hora del diseño de una planta industrial se debe tener en cuenta la realización de estudios de análisis de riesgos durante todo el proyecto de diseño. Desde las primeras ideas hasta la disposición óptima de los componentes de la planta (layout),

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

contemplando un balance óptimo entre inversión, seguridad y eficiencia. En la actualidad se dispone de diferentes enfoques y paradigmas para el diseño, tales como el Diseño Inherentemente más Seguro (DIS) y el diseño basado en riesgo (DBR), todos ellos basados en la aplicación del Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) (Orellano, 2024).

Dada la gran variedad de procesos existentes, y la enorme combinación de causas y efectos de los accidentes ocurridos, es necesario considerar las posibles combinaciones o mezclas de sustancias, según sus condiciones de almacenamiento y las distintas fases posibles (gaseoso, líquido, vapor, nieblas, aerosoles, particulados, entre otras) considerándose las evoluciones de los potenciales accidentes durante la operación de un proceso. Por otra parte, se conoce que existen numerosos tipos de eventos accidentales, dependiendo del grado de toxicidad, inflamabilidad y potencial formación de mezclas explosivas en aire, de las sustancias o mezclas involucradas (Rahim et al., 2024).

Dentro de este contexto, al utilizar CEIBO, y por ende las posibles demandas a la Base de Datos, según los distintos modos de uso (DBR, DIS o ACR) resulta necesario como mínimo conocer las sustancias que se procesan en cada equipo del proceso, sus características fisicoquímicas en las condiciones tanto de operación normal como durante los distintos eventos accidentales a evaluar, lo cual implica un universo muy grande en cuanto a escenarios posibles y tipos de sustancias involucradas.

Es importante que se destaque que el campo de la simulación de procesos está en la actualidad suficientemente maduro, por lo cual existen diversas bases de datos de propiedades fisicoquímicas de la mayoría de las sustancias involucradas en la ingeniería química (software comercial o bien de libre disponibilidad), aunque en este último caso, en su mayoría no permiten una conexión directa con aplicaciones, por ejemplo NIST database (Lemmon et al. 2007). También existe (de libre disponibilidad) bibliografía impresa sobre propiedades de sustancias químicas. Sin embargo, no siempre se tienen todos los parámetros en un solo lugar ni todas las sustancias de interés. Esto es así ya que, al abordar la simulación de eventos accidentales, se debe de disponer de propiedades que no son necesarias en la simulación de procesos funcionando en condiciones normales (por ejemplo, resolver los balances de materia y energía, o bien el diseño de equipos).

Es importante destacar que, en la versión anterior de CEIBO, se disponía de una conexión a un simulador de procesos (ASPEN HYSYS) para importar datos desde el mismo, tanto fisicoquímicos, como los datos del caso cargado (diagrama de flujo del proceso) y los resultados de la simulación (datos de las corrientes energía intercambiada, entre otros). Se disponía, además, una opción de entrada de datos por parte del usuario. En esta nueva versión (CEIBO 2.0), se pretende añadir una Base de Datos propia, cuyo desarrollo e implementación es el objetivo de este trabajo, a los efectos de dotarlo de mayor autonomía y versatilidad. Por lo tanto, se debe aquí no solo habilitar nuevas posibilidades al software, sino recopilar, depurar e integrar (a los existentes) los datos nuevos -desde diferentes medios digitales de acceso libre o a través de la bibliografía impresa apropiada para tal fin-

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 *Tipos y características de las sustancias incorporadas a CEIBO*

Con respecto a las sustancias a incorporar en la nueva versión de CEIBO, como se ha mencionado, en primer lugar, se contempla los bancos de datos preexistentes en CAIMI. Por otra parte, en esta primera etapa, al igual que en la mayoría de los sistemas informáticos existentes para el análisis de riesgos solo se incorporan las propiedades de las sustancias puras, para luego evolucionar a incorporar la posibilidad de tratar mezclas como PHAST que cuenta con un módulo para libración de mezclas, lo cual será un trabajo posterior. Por tanto, en este punto de partida se consideraron 50 sustancias puras con la posibilidad de extensión a futuro.

En cuanto a la tipología, características y/ o estado de agregación, las condiciones priorizadas para esta primera etapa son en general el estado líquido o gaseoso, por lo que en futuros trabajos se contemplarán particulados, polvos, entre otros, en cuanto a las propiedades necesarias para las simulaciones de explosiones de polvo, difusión de aerosoles y material particulado en aire, entre otros eventos de importancia para el análisis de riesgos.

### 2.2 *Desarrollo y diseño inicial de las bases de datos FQ*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Como primera etapa, a los efectos de diseñar una Base de Datos relacional a partir de los datos y parámetros fisicoquímicos ya incorporados a CEIBO, resulta necesario incorporar los necesarios en la nueva versión CEIBO 2.0; en particular considerándose los nuevos modelos que se integraron al "módulo de modelos" de CEIBO. La Base de Datos se desarrolló en MySQL por ser un sistema de gestión de Bases de Datos de código abierto bajo la Licencia Pública General de GNU (GPL).

2.3 *Elección del Esquema de la Base de Datos*

Se optó por un esquema de estrella, con el fin de generar una base de datos que utilice la menor cantidad de recursos posibles a la hora de su uso. El esquema estrella consta de una entidad llamada "madre" -que para nuestro caso será la entidad "sustancias"-, con el atributo CAS como clave primaria tal como se muestra en la figura 1. Esta se relaciona con todas las otras entidades llamadas "hijas", que son las propiedades de las sustancias que se corresponden con el CAS como clave primaria, con una relación de 1: 1. De esta manera, la Base de Datos contiene la tabla "Sustancia" en el centro y las tablas correspondientes a las "dimensiones y parámetros" necesarios para el cálculo de cada modelo de equipo, contenido en el módulo de equipos de CEIBO 2.0. En otras palabras, la Base de Datos fisicoquímica como tal, se necesita de un atributo aplicable para todos los compuestos que conformen la base. En este caso utilizamos el parámetro CAS (número de registro único de las sustancias asignados por *American Chemical Society*), actuando este atributo como "clave primaria", con el cual se relaciona todas las entidades de la Base que requieren tales propiedades para su cometido,

Los datos seleccionados para su incorporación a la Base de Datos fisicoquímicos, como se ha comentado, surgen principalmente de libros de ingeniería como el Perry et al. (2019), Yaw et al. (2003) entre otros, y Bases de Datos preexistentes en el Centro CAIMI. Estas fuentes, si bien son muy extensas y confiables, no disponen de todos los parámetros y sustancias necesarias para las necesidades de CEIBO 2.0. Por ello, al utilizarse varias fuentes (propiedades toxicológicas, teratogénicas, explosividad medida por la concentración LEL (límite de explosividad mínimo) y UEL (límite de explosividad máximo), entre muchas otras), en los casos donde existían los mismos datos en diversas fuentes, se los ha comparado a fin de no validarse datos que posean una diferencia notable según las distintas fuentes bibliográficas. Unos casos especiales a mencionar resultan las fichas de seguridad de sustancias peligrosas, de libre disponibilidad en la web.

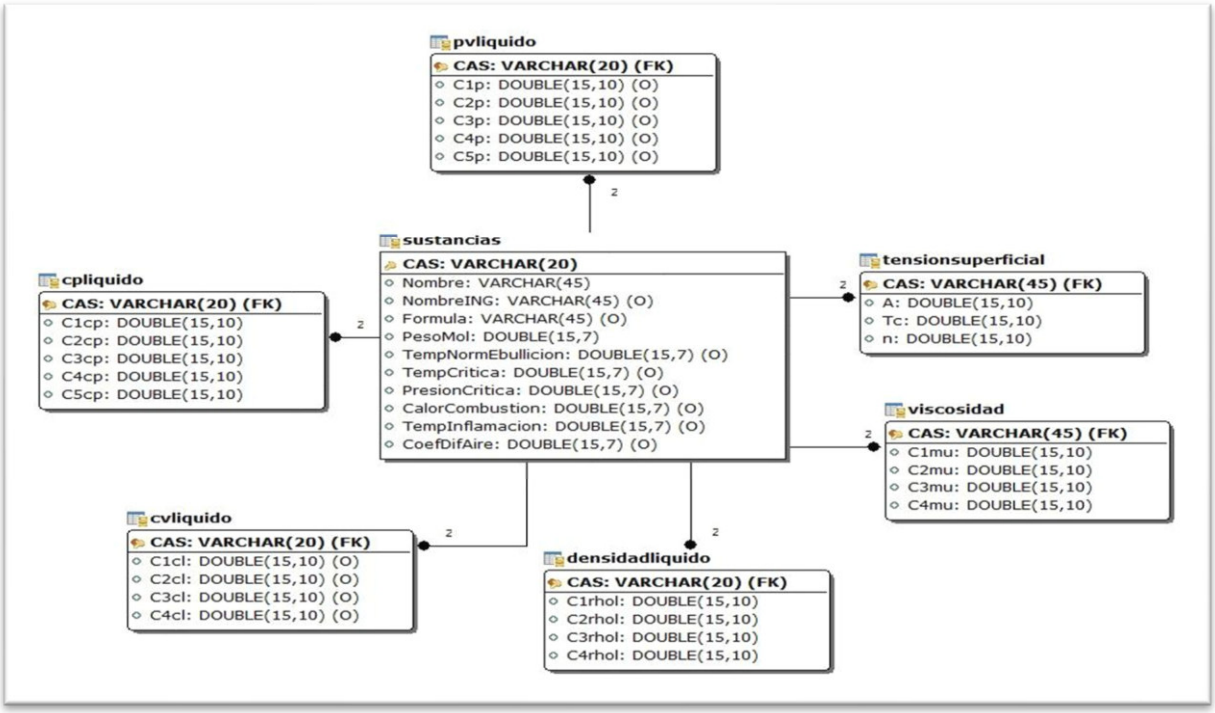



**Figura 1.** Diagrama de red de la base de datos FQ para CEIBO

2.4 *Tratamiento de la información*

En una primera instancia, se recolectaron todos los datos necesarios, y validados, en un libro de Ms. Excel (tanto de sustancias inorgánicas como orgánicas). Merecen destacarse diversas situaciones, como por ejemplo las propiedades

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

dependientes de la temperatura (u otros parámetros como la presión, por ejemplo); lo que implica, como es sabido, la necesidad de incorporar un cálculo basado en modelos que contienen diversos parámetros ya tabulados.

## 3. Resultados y discusión

3.1 *Próximos pasos a seguir*

Como resultado inmediato podemos afirmar que CEIBO 2.0, ya cuenta con un módulo para la estimación de propiedades fisicoquímicas propio, para alimentar modelos para la simulación de eventos accidentales, lo cual es fundamental para realizar un análisis de riesgos cuantitativo. En las secciones anteriores se han mencionado las distintas etapas previstas a futuro, y se han descrito los tipos de datos incorporados al presente. CEIBO 2.0 se encuentra instalado en uno de los ordenadores de CAIMI, Esto es, el software es de uso interno. Posteriormente se ha previsto, en un futuro próximo, liberar el acceso a CEIBO on line para uso en la web.

3.2 *Aplicación de los resultados y discusión*

A continuación, se muestra un ejemplo de aplicación concreta del empleo de la Base de Datos incorporada al módulo fisicoquímico de CEIBO 2.0. En este caso, el cálculo de la distancia segura respecto de un tanque de almacenamiento de propano ante la simulación de un evento accidental, una explosión BLEVE (Boiling-Liquid-Expanding-Vapour-Explosion).

3.3 *Estimación de la Distancia Segura ante una Explosión BLEVE*

Muy sucintamente, una explosión de tipo BLEVE (Boiling-Liquid-Expanding-Vapour-Explosion) puede ocurrir debido al almacenamiento de sustancias tales como el propano, ante eventos accidentales por fallas mecánicas del tanque ante un súbito incremento de la presión interna, o por algún impacto externo (entre otras posibilidades) que produzcan el debilitamiento del material provocando la explosión BLEVE. Otra posibilidad para desencadenar la explosión tipo BLEVE resulta del efecto dominó, por ejemplo dado un incendio en los alrededores, que provoque un aumento de temperatura por calentamiento de las paredes del recipiente contenedor, y del líquido interior; provocándose un aumento de presión sostenido, que de fallar todas las medidas de seguridad para la contención del fenómeno, ocurrirá la liberación explosiva de la sustancia en forma de líquido y vapor que por el calor externo y las condiciones de expansión, provocan además, una bola de fuego en el área circundante.

3.4 *Distancia segura a un tanque de almacenamiento de propano ante un caso de explosión tipo BLEVE*

En el Módulo de modelos de CEIBO 2.0 existen diversos modelos de simulación, que cubren dos modos de uso, relacionados con los modernos paradigmas del diseño seguro. El diseño basado en Riesgo y el Diseño inherentemente Seguro. En el caso de este último, se recurre a medidas de seguridad pasivas; esto es, asegurar que, ante un evento accidental, los receptores (otros equipos, oficinas, personal de planta, vecindario) no sean afectados. Una de las más importantes, es asegurar una distancia segura. El problema es que en general, los simuladores (comerciales o de libre disponibilidad) calculan la vulnerabilidad del entorno en función de la distancia, por lo que la estimación de la distancia segura (dado un nivel umbral para la vulnerabilidad “tolerable”, la distancia necesaria segura) implica un proceso iterativo.

En CEIBO 2.0 se han programado modelos subrogados muy simples obtenido dentro del marco de una tesis en desarrollo en CAIMI, que estiman directamente la distancia segura de diversos eventos accidentales. En particular, el modelo simplificado para la estimación de distancia segura ante la ocurrencia de una explosión BLEVE presentando en la Ec. (1) (Kraft et al., 2023) relaciona la distancia con el tipo de sustancia (representada por el número de Jakob (Ja)), el volumen del recipiente $V$ en el cual se almacena dicha sustancia, y el nivel de sobrepresión umbral “tolerable” ($\Delta P$) además de la presión atmosférica (P ).

$$d_{SDM} = a_1' \cdot \left(\frac{Ja}{1000}\right)^{a_2'} \cdot \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^{a_3'} \cdot \sqrt[3]{V} \quad (1)$$

Siendo los valores de los parámetros del modelo adimensional simple: $a_1'$= 6,045; $a_2'$ = 0,335; $a_3'$ = − 0,708

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

El número de Jakob se estima de acuerdo a la Ec. (2). Las propiedades de la sustancia solicitadas a la Base de Datos son la densidad de líquido (ρL), calor especifico en líquido ($CpL$), temperatura de explosión ($T^{\beta}$), temperatura normal de ebullición ($T^{\gamma}$), densidad de vapor ($\rho V$) y Calor latente de evaporización ($\lambda$).

$$Ja = \frac{\rho L \cdot CpL \cdot (T^{\beta} - T^{\gamma})}{\rho V \cdot \lambda} \quad (2)$$

Presentado el modelo disponible en CEIBO, se puede apreciar que para su ejecución se requieren diversos datos, en particular las propiedades fisicoquímicas necesarias para calcular $Ja$ (Número de Jacob). La Base de Datos desarrollada en este trabajo provee directamente los valores requeridos por este modelo ingresando el número CAS del propano (74-98-6).

Obviamente, también son necesarios los otros datos que figuran en la expresión anterior, para el cálculo la distancia de seguridad $d_{SDM}$. En este caso, los del tanque de almacenamiento y la sobrepresión umbral tolerable (que determina la distancia de seguridad, y depende de las características de cada receptor considerado).

3.5 *Calculo de distancia segura para un caso de explosión BLEVE de un tanque de propano específico*

En este caso se asume que la falla del recipiente ocurre a una presión 19,5 bar correspondiendo una temperatura de explosión de 329,2 K. Se asume para es este ejemplo un volumen de tanque de 625 $m^3$, una presión atmosférica de 101325 Pa y un nivel de vulnerabilidad del tanque de 17000 Pa. En este caso, obtenidos los datos necesarios de las respectivas Bases de Datos, en particular los datos de la sustancia propano, de la Base de Datos Fisicoquímica, se obtiene para la distancia segura el valor de 87,06 m. Este valor se encuentra dentro del rango propuesto para tanques de LPG por el código NFPA 58, superior a los 61 m (tanques de capacidades entre 454 y 757 m3) e inferior a los 91 m (volúmenes de tanque entre 757 y 3785 $m^3$).

## 4. Conclusiones

En este trabajo se presenta una breve descripción de la Base de Datos Fisicoquímica incorporada al módulo de estimaciones fisicoquímicas de la nueva versión de CEIBO (CEIBO 2.0). Se ha descrito el alcance actual, y las etapas futuras de expansión de la cobertura de la Base de Datos,

En cuanto al modo de uso, se ha descrito la vinculación de la Base de Datos con uno de los módulos más demandantes de la misma, el que alberga el conjunto de modelos de simulación para obtenerse la vulnerabilidad del entorno en función de la distancia, u obtenerse directamente la distancia en función de un umbral fijado a la vulnerabilidad de los diversos componentes del entorno circundante. En particular, en el ejemplo resuelto se ha estimado la distancia segura ante un evento accidental BLEVE, lo cual es posible hacerlo directamente, sin utilizar métodos iterativos (como los simuladores de eventos accidentales existentes según el estado del arte), dado que CEIBO 2.0 contiene modelos subrogados simples para realizar dicha estimación fácilmente. Se han descrito brevemente las distintas interacciones entre el modelo de estimación y las Bases de Datos existentes en CEIBO. Por último, es importante destacar que el usuario puede interactuar directamente con la Base de datos Fisicoquímica tanto para incorporar nuevos datos, como para realizar consultas sobre sustancias específicas existentes en la misma, cumpliéndose con el objetivo del trabajo que era la conformación de una base de datos escalable y dinámica para CEIBO 2.0.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Ing. Diego Ponzone y la Ing. Romina A. Kraft, y el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario (UTN-FRRo) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## Referencias bibliográficas

Ab Rahim, M. S., Reniers, G., Yang, M., & Bajpai, S. (2024). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 88, 105274. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274

Lemmon, E., McLinden, M., Huber, M., 2007. REFPROP: Referencefluid thermodynamic and transport properties. NIST standard reference database, 23(8.0).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

NFPA 58 Código del Gas Licuado del Petróleo (2014). ISBN: 978-145591368-8.

Orellano, S. (2024) “Metodología para la optimización de layout y síntesis de procesos considerando el riesgo tecnológico”, Thesis (Doctor en Ingeniería), Universidad Tecnológica Nacional, Rosario.

Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7th ed. McGraw-Hill.

PHAST, software para análisis de riesgos, desarrollado por la DNV, https://www.dnv.com/software/services/plant/consequence-analysis-phast/

Ponzone, D., Viscusso, S., Biscotti, P., Rodriguez, N., Godoy, S. & Scenna, N. (2015). CEIBO: un sistema informático para el diseño inherentemente seguro de procesos. Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, San Rafael, Mendoza, Argentina, 667-673, https://bdigital.uncu.edu.ar /11337

Kraft, R. A., Orellano, S., Mores, P. L., & Scenna, N. J. (2023). BLEVE: Safety distances estimation by simple models based on the Jakob number. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 83, 105069. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105069

Yaws, C. L. (2003). Yaws' Handbook of Thermodynamic and Physical Properties of Chemical Compounds.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rosario

# Propuesta de modelo simplificado para la evaluación de los efectos de jet fires de GNL

## Proposed Simplified Model for the Assessment of LNG Jet Fire Effects

Presentación: 30/10/2025

**Facundo Esci**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina
facundonueve@gmail.com

### Resumen

Los incendios tipo jet fire son escenarios críticos en seguridad de procesos debido a su alta transferencia de calor, capaces de generar fallas en equipos y efectos dominó. Este trabajo propone un modelo simplificado para estimar de manera rápida y confiable las distancias de seguridad frente a fugas de gas natural licuado (GNL) a presión. La metodología se basa en el modelo semiempírico de Chamberlain y un análisis de sensibilidad que identificó como variables clave la presión interna, el diámetro del orificio de fuga, la velocidad del viento y la humedad relativa. Se formuló un modelo matemático simplificado optimizado mediante ajuste funcional, capaz de estimar intensidad de radiación y distancias seguras según la vulnerabilidad del receptor. Los resultados muestran buena aproximación al modelo riguroso, evitando sobreestimaciones y reduciendo la complejidad computacional, ofreciendo una herramienta práctica para gestión de riesgos y diseño de instalaciones de GNL.

**Palabras clave:** Incendio de chorro, gas natural licuado (GNL), distancias de seguridad, modelo simplificado

### Abstract

Jet fire incidents are critical scenarios in process safety due to their high heat transfer rates, which can cause equipment failures and domino effects. This work proposes a simplified model to quickly and reliably estimate safety distances for pressurized liquefied natural gas (LNG) releases. The methodology is based on the semi-empirical Chamberlain model, complemented by a sensitivity analysis identifying key variables: internal pressure, leak orifice diameter, wind speed, and relative humidity. A simplified mathematical model was formulated and optimized through functional fitting to estimate both radiation intensity and safety distances according to receptor vulnerability. Results show good agreement with the rigorous model, avoiding overly conservative overestimations and reducing computational complexity. The proposed approach provides a practical tool for risk management and conceptual design of LNG facilities.

**Keywords:** Jet fire, Liquefied Natural Gas (LNG), Safety distance, Simplified model

## 1. Introducción

Los jets fires son incendios producidos por la ignición de fugas de fluidos inflamables a presión, capaces de generar elevadas tasas de radiación térmica, dañar equipos críticos y provocar accidentes en cadena. Su severidad, sumada a la frecuencia registrada en transporte, plantas de proceso, carga/descarga y almacenamiento, resalta la necesidad de modelos que permitan estimar de forma rápida y confiable distancias seguras.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Entre los enfoques disponibles, Coccorullo & Russo (2016) desarrollaron un modelo sencillo basado en la combinación de SLAB (para la dispersión del combustible) y un modelo de fuente puntual para calcular la intensidad de radiación. Su principal ventaja es la simplicidad, pues requiere solo diámetro de orificio, presión y longitud de tubería, aunque se limita a un único nivel de vulnerabilidad (15 kW/m²). Por otro lado, Reniers & Cozzani (2013) estiman la longitud de la llama y añaden distancias fijas (25–50 m) según el tipo de receptor. Aunque aplicable a distintos equipos, tiende a sobreestimar y exige cálculos previos de geometría del jet.

El objetivo de este trabajo es la obtención de un modelo simplificado para estimar de manera sencilla y confiable distancias de seguridad frente a fugas de gas natural licuado (GNL).

## 2. Materiales y Métodos

2.1 *Generación de escenarios accidentales de referencia*.

En este trabajo se seleccionó como Modelo de Referencia (MR) el modelo desarrollado por Chamberlain (1987) debido a su amplia aplicabilidad y a la aceptación que ha alcanzado en la bibliografía especializada. Este se trata de un modelo semiempírico, clasificado dentro de los modelos de llama sólida, que representa al jet fire como un cuerpo gris que emite energía radiante de manera uniforme desde toda su superficie.

Para describir la geometría de la llama se adopta la forma de cono truncado, lo que permite aproximar su comportamiento radiante. La estimación del campo de radiación generado requiere, de manera secuencial, los siguientes pasos:

- Caracterización del jet fire.
- Cálculo del poder emisivo superficial.
- Determinación del factor de visión entre la llama y el receptor.
- Evaluación de la transmisividad atmosférica.
- Cálculo de la intensidad de radiación incidente a una distancia determinada desde la fuente de emisión.

La definición de los escenarios accidentales se efectúa mediante la parametrización de las variables de entrada requeridas por el MR considerando un rango de aplicabilidad. Para la descripción de la fuente de peligro: tanque presurizado de LNG, se parametriza la presión en el interior del recipiente en 4 valores [0.75, 1.00, 1.25, 1.50 MPa], área transversal del tanque en función de los volúmenes de tanque típicos [1000, 1500, 2000 m3] y las propiedades de la sustancia: peso molecular, densidad del líquido y del vapor, coeficiente adiabático del vapor, tensión superficial y calor de combustión. Con respecto a las condiciones ambientales, se parametrizó la dirección del viento [0, 45, 90, 135, 180º], la velocidad del viento [1.5, 3, 5, 8 m/s] y la humedad relativa [5, 35, 35, 95 %]. La distancia entre la fuente de peligro y el receptor se discretizó en una grilla x-y (51x51) ubicando el escenario accidental en el centro y particionando la grilla con una granulación de 2 m.

2.2 *Análisis de sensibilidad*

Para el desarrollo de un $MS$, resulta indispensable garantizar la simplicidad tanto en la formulación matemática como en la conformación del conjunto de datos de entrada. Este enfoque tiene por finalidad no solamente reducir la complejidad (por ejemplo, la minimización del costo computacional) sino también posibilitar su implementación durante las etapas iniciales del diseño de procesos (diseño conceptual). En este sentido, es necesario seleccionar un conjunto de Variables de Entrada ($IVs$) con la mayor incidencia en los resultados, asegurando al mismo tiempo la confiabilidad de las predicciones. Esta tarea requiere la aplicación de un método de análisis de sensibilidad.

Para ello, se aplica el criterio RMV, un método de análisis de sensibilidad diferencial. Esta métrica cuantifica la variación relativa en la variable de salida $IR$ (intensidad de radiación) como consecuencia de cambios relativos infinitesimales en cada una de las variables de entrada $IV_q$, manteniendo inalteradas las restantes, de acuerdo con la Ec. (1). Dicho procedimiento posibilita valorar la importancia relativa de cada variable de entrada, pudiendo descartarse aquellas cuyo aporte resulte inferior al 15% en términos absolutos.

$$RMV_q = \frac{\partial f(IV_1, IV_2, \dots, IV_Q)/f(IV_1, IV_2, \dots, IV_Q)}{\partial IV_q / IV_q} \quad (1)$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Cuando los valores de $RMV_q$ se mantienen constantes a lo largo de todo el rango de la variable de entrada evaluada $IV_q$ (y son distintos de cero), se puede inferir la existencia de una relación potencial entre dicha variable de entrada y la variable de salida. No obstante, en los casos en que los valores de $RMV_q$ presentan una dispersión significativa, debe analizarse con mayor profundidad los casos donde se presentan las mayores dispersiones. En la Tabla 1, se presenta la media aritmética de los valores de RMV estimados en todo el rango estudiado $\overline{RMV}$ y su desvío estándar $\sigma_{RMV}$.

**Tabla 1.** Valores de $\overline{RMV}$ y $\sigma_{RMV}$.

| Etapa de cálculo | Variable de entrada | $\overline{RMV}$ | $\sigma_{RMV}$ |
|---|---|---|---|
| Velocidad de salida del jet | Presión en el interior del recipiente | 3.571 | 14.617 |
| | Diámetro del orificio de fuga | 0.903 | 2.739 |
| | Área transversal del tanque (superficie liquida en contacto con la capa gaseosa) | 0 | 0 |
| Dimensiones de la llama | Velocidad de viento | 0.066 | 0.233 |
| | Dirección de viento respecto al jet | 0.349 | 1.951 |
| Intensidad de radiación | Humedad Relativa (asociada a la transmisividad atmosférica) | 0.106 | 0.471 |
| | Distancia (asociada al factor de visión) | 2.356 | 5.783 |

De este análisis se infiere una influencia poco significativa del área transversal del tanque siendo descartada en el proceso de formulación del $MS$. La presión en el interior del recipiente parece impactar de manera significativa en la variable de salida, aunque debido a la dispersión de los valores de $RMV$ no puede inferirse una funcionalidad dominante. Una situación similar se presenta al analizar la influencia del diámetro de orificio.

Con respecto a las variables asociadas a las condiciones meteorológicas: la dirección del viento parece ser la más influyente pero únicamente cuando es de 180° con respecto al jet, reduciendo el campo de intensidad de radiación generado. Es por ello que esta variable es eliminada de las variables de entrada, optando por una dirección de viento de 0º respecto al jet fire (peor escenario). La velocidad de viento y la humedad relativa, sin bien no parecen tener una influencia muy importante, se observa una tendencia potencial de las mismas con respecto a la intensidad de radiación incidente, pudiéndose adicionar al conjunto de variables de entradas sin mayor complicación.

Finalmente, el conjunto de variables de entrada queda conformado por: presión en el interior del recipiente parametrizada en 4 valores ($OP = 4$), diámetro de orificio (variable asociada a frecuencia de falla) representada en 4 valores ($D = 4$), velocidad de viento considerando 4 valores representativos ($V = 4$) y humedad relativa contemplando 4 escenarios ($H = 4$). (variables meteorológicas) y distancia de separación dividiendo aún más la granulación espacial dado que solo se considera el impacto en la dirección del viento ($I = 25$).

### 2.3 *Formulación del Modelo Simplificado MS*

El primer paso es lograr obtener un $MS$ útil; esto es, no solamente para la evaluación del impacto ocasionado por el jet fire sobre los diferentes receptores (IR en función de la distancia), sino también, fijado un valor umbral de impacto, obtener en forma directa las DSs. Se debe lograr una relación funcional entre el impacto $IR$ y distancia DS que pueda invertirse; esto es, despejar algebraicamente la Distancia (DS) en función de cada umbral (IR “aceptable”) prefijado.

#### 2.3.1 Selección de la relación funcional entre la distancia y el impacto

Por ello, se analiza inicialmente el ajuste de expresiones matemáticas del tipo: lineal, polinómica, potencial y exponencial mediante la propuesta de un problema de optimización que compare la bondad del ajuste entre las distintas opciones. Las combinaciones exploradas son: función potencial sin - con término independiente, función polinómica (término al cuadrado

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

sin - con término independiente), función lineal y función exponencial sin - con término independiente. La bondad del ajuste de cada una de las alternativas consideradas se cuantifica empleando el coeficiente de correlación $R^2$ (Ec. (2)). A su vez, con la finalidad de garantizar la confiabilidad del $MS$ se solicita la sobreestimación de la variable de salida respecto de los valores calculados implementando el $MR$, como se muestra en la Ec. (3).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{op=1}^{4}\sum_{d=1}^{4}\sum_{v=1}^{4}\sum_{h=1}^{4}\sum_{i=1}^{25}\left(IR_{MR_{op,d,v,h,i}} - IR_{MS_{op,d,v,h,i}}\right)^2}{\sum_{op=1}^{4}\sum_{d=1}^{4}\sum_{v=1}^{4}\sum_{h=1}^{4}\sum_{i=1}^{25}\left(IR_{MR_{op,d,v,h,i}} - \overline{IR_{MR}}\right)^2} \quad (2)$$

$$IR_{MS_{op,d,v,h,i}} \geq IR_{MR_{op,d,v,h,i}} \quad (3)$$

Se define un problema de optimización que maximice el $R^2$ para cada alternativa (Ec. (2)) sujeto a la restricción de igualdad: expresión matemática propuesta para cada alternativa ($IR = f(x)$) y la restricción de desigualdad: sobreestimación en todo el rango analizado (Ec. (3)).

La resolución de este problema se llevó a cabo en el ambiente del software GAMS seleccionando como resolvedor el optimizador local CONOPT (Drud, 1994). La expresión matemática más adecuada resultó ser la función polinómica de grado 2 con término independiente (Ec. (4)).

$$IR_{MS_{op,d,v,h,i}} = c_{1_{op,d,v,h}} \cdot DS_i{}^2 + c_{2_{op,d,v,h}} \quad (4)$$

Los parámetros $c_{1_{op,d,v,h}}$ y $c_{2_{op,d,v,h}}$ se consideran parámetros de ajuste intermedio dado que aún falta determinar las funcionalidades de las restantes variables de entrada. Para ello, se identifican las siguientes dependencias:

- Variable de optimización $c_1$ evidencia variaciones significativas con respecto a: la presión de fuga, el diámetro de orificio y la velocidad de viento.
- Variable de optimización $c_2$ presenta desviaciones asociadas principalmente a las variables de entrada: diámetro de orificio y humedad relativa.

Luego, se advierte la necesidad de particionar el rango de aplicación de la expresión matemática obtenida para mejorar la bondad del ajuste. Se adopta la intensidad de radiación como criterio de corte en virtud de la relevancia de sus valores en la aplicación del $MS$ al momento de cuantificar el daño (nivel de vulnerabilidad del receptor analizado). En este sentido, se reportan valores umbrales de acuerdo al tipo de receptor con la finalidad de definir distancias seguras ante incendios: para equipos a presión se establecen valores en el rango de 40 a 45 $\frac{kW}{m^2}$ mientras que al evaluar distancias de separación contemplando como receptor un equipo atmosférico, se reconoce comúnmente un umbral de 15 $\frac{kW}{m^2}$ (Reniers & Cozzani, 2013). Asimismo, en el contexto de planes de evacuación, los niveles de referencia varían entre 1.5 $\frac{kW}{m^2}$ (zona segura) y 8 $\frac{kW}{m^2}$ (comienzo de la letalidad).

En consecuencia, se definen parámetros diferenciados para la formulación del MS en función de si el receptor corresponde a equipos y estructuras, o bien a personas. Sobre esta base, se fija como punto de corte $PC = 14\ \frac{kW}{m^2}$.

### 2.3.2 Composición de las variables de optimización $c_1$ y $c_2$

En el proceso de obtención de las relaciones funcionales de las variables de entrada que componen la variable $c_1$, el análisis se centra en los resultados obtenidos en el estudio de sensibilidad. Para las variables: presión de fuga y velocidad de viento, si bien el desvío estándar evidencia una dispersión significativa de los RMV, una examinación más detallada del conjunto de valores permite atribuir dicha dispersión a casos puntuales y valores extremos de la parametrización realizada para las simulaciones. Al excluir estos casos, se infiere la existencia de una relación del tipo potencial entre la intensidad de radiación y las variables de entradas mencionadas, con la necesidad de adicionar un término independiente para representar adecuadamente los escenarios con mayor desviación.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En contraste, para el diámetro del orificio el comportamiento resulta más complejo y no es posible establecer una relación funcional consistente. En consecuencia, se opta por definir un parámetro específico para cada diámetro considerado $\left(a_{1_d}\right)$. De esta manera, la variable de optimización $c_1$ se expresa de acuerdo con la Ec. (5):

$$c_{1_{op,d,v}} = a_{1_d} \cdot \left(Pv_{op}{}^{a_2} + a_3\right) \cdot \left(u_{w_v}{}^{a_4} + a_5\right) \tag{5}$$

Un comportamiento análogo se observa al analizar la influencia de la humedad relativa sobre la intensidad de radiación. En este caso, sin embargo, los datos se ajustan satisfactoriamente a una relación de tipo potencial puro. Respecto al diámetro del orificio, nuevamente no se identifica una tendencia funcional clara, por lo que se adopta la misma estrategia de parametrización individual $\left(a_{6_d}\right)$. La formulación de la variable de optimización $c_2$ se presenta en la Ec. (6).

$$c_{2_{d,h}} = a_{6_d} \cdot HR_h{}^{a_7} \tag{6}$$

Luego, la expresión matemática final del $MS$ se muestra en la Ec. (7), la cual consta de 7 parámetros a determinar para cada rango definido por el punto de corte $PC$.

$$IR_{MS_{op,d,v,h,i}} = a_{1_d} \cdot \left(Pv_{op}{}^{a_2} + a_3\right) \cdot \left(u_{w_v}{}^{a_4} + a_5\right) \cdot DS_i{}^2 + a_{6_d} \cdot HR_h{}^{a_7} \tag{7}$$

El problema de optimización desarrollado para la formulación final del $MS$ (Ec. (7)) está constituido por 15610 restricciones y 12730 variables. El tiempo de resolución fue de 11.145 s y requirió 1813 iteraciones para la convergencia. La función objetivo $R^2$ alcanzó un valor de 0.971. Los valores calculados para las variables de optimización se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores de los parámetros del $MS$.

| $PC$ | $D_{ag}$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ | $a_6$ | $a_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\geq 14$ | 0.010 | $-1.303$ | $-0.898$ | $-0.011$ | 0.268 | $-0.561$ | 101.160 | $-4.779 \cdot 10^{-3}$ |
| | 0.013 | $-0.407$ | | | | | 69.246 | |
| | 0.025 | $-0.211$ | | | | | 91.676 | |
| | 0.050 | $-0.173$ | | | | | 191.396 | |
| $< 14$ | 0.010 | $-1495.750$ | $-0.168$ | $-0.795$ | $1.144 \cdot 10^{-4}$ | $-0.999$ | 14.131 | $-1.805 \cdot 10^{-3}$ |
| | 0.013 | $-1185.504$ | | | | | 16.523 | |
| | 0.025 | $-6.317$ | | | | | 6.484 | |
| | 0.050 | $-158.526$ | | | | | 23.583 | |

## 3. Resultados y discusión

En el marco de la distribución de gas natural licuado (GNL), las instalaciones satélites cumplen un papel clave al funcionar como puntos de almacenamiento intermedio y abastecimiento mediante transporte terrestre. Supongamos que, en una de estas plantas, el GNL se almacena en tanques cilíndricos criogénicos de contención simple, diseñados para operar a –160 °C y 1.2 bar. La estación de carga de camiones cisterna se localiza a 50 m de la playa de tanques, distancia definida como criterio de diseño para asegurar un margen adicional de seguridad durante las operaciones de transferencia.

En condiciones normales, la carga de un camión cisterna de 50 m³ se realiza mediante un brazo criogénico de 4”, alimentado por bombas que impulsan el producto a 6,5 bar(g). El caudal nominal de 100 m³/h permite completar la transferencia en aproximadamente 30 minutos, constituyendo una rutina operativa habitual dentro de la instalación.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Durante una de estas operaciones rutinarias, se presenta la rotura súbita del acople rápido del brazo criogénico a causa de una falla mecánica en el sistema de sellado. La liberación repentina de producto origina una fuga equivalente a un orificio de 0.05 m de diámetro, generando un chorro bifásico que se inflama casi de inmediato y evoluciona en un jet fire horizontal.

Las condiciones meteorológicas al momento del incidente corresponden a una velocidad de viento de 5 m/s y una humedad relativa del 50%. Con base en este escenario, se analiza la distancia mínima necesaria para evitar que la radiación térmica del jet fire afecte a los tanques de GNL y provoque un posible efecto dominó. Como umbral de daño sobre un receptor atmosférico se adopta una intensidad de radiación de 15 kW/m², de acuerdo con los criterios propuestos en la literatura técnica (Reniers & Cozzani, 2013)

La estimación de distancias se efectuó aplicando el MR y tres modelos simplificados. Los resultados obtenidos fueron: MR (Chamberlain (1987)) (28 m), MS1 (Ec. 7 invertida) (28.5 m), MS 2 (Reniers & Cozzani (2013)) (74 m) y MS3 (Coccorullo & Russo (2016)) (94 m). La comparación de resultados muestra que el MR y el MS1 ofrecen valores muy próximos, mientras que los MS2 y MS3 conducen a distancias notablemente mayores, reflejando un grado elevado de sobreestimación en la estimación, como puede observarse esquemáticamente en la Figura 1.

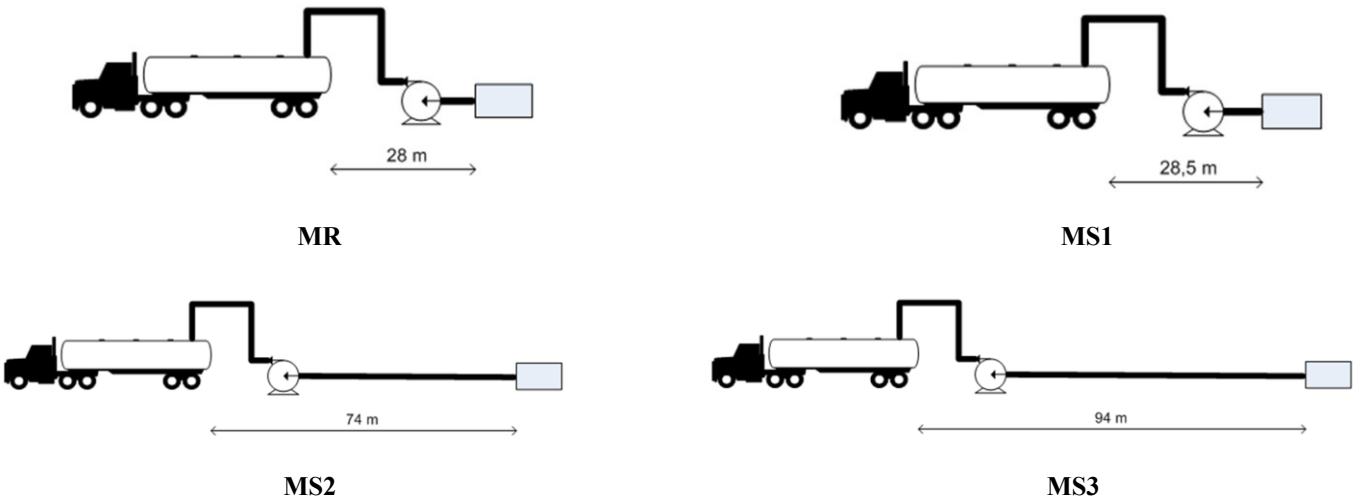



**Figura 1**. Comparación de las DS estimadas implementando el MR, MS1, MS2 y MS3.

## 4. Conclusiones

El análisis realizado confirma la relevancia de contar con modelos simplificados capaces de estimar de manera rápida y confiable las distancias seguras frente a escenarios de jet fire en instalaciones de GNL. A partir de la aplicación del modelo de referencia de Chamberlain y del desarrollo de un modelo simplificado, se evidenció que es posible obtener predicciones cercanas a las de un enfoque riguroso, pero con una reducción significativa en complejidad y costo computacional.

La incorporación de variables clave -como la presión interna, el diámetro del orificio, la velocidad del viento y la humedad relativa- permitió formular una expresión matemática ajustada que no solo reproduce adecuadamente la intensidad de radiación incidente, sino que también posibilita dimensionar distancias de seguridad en función del nivel de vulnerabilidad del receptor. Los resultados muestran que este enfoque ofrece un equilibrio adecuado entre simplicidad y precisión, evitando tanto la subestimación del riesgo como la sobreestimación excesivamente conservadora que caracteriza a otros modelos disponibles en la literatura.

En este sentido, la metodología propuesta constituye una herramienta útil para el diseño conceptual y la gestión de riesgos en plantas de almacenamiento y distribución de GNL, facilitando la toma de decisiones preventivas y la planificación de medidas de protección frente a incendios tipo jet fire. Futuras investigaciones podrán enfocarse en la validación experimental del modelo y en su integración con herramientas probabilísticas que consideren la frecuencia de ocurrencia de fallas, ampliando así su aplicabilidad dentro del análisis de seguridad de procesos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Agradecimientos

Se desea agradecer el apoyo educativo de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario y a la Ing. Romina Kraft por su valioso aporte al presente trabajo.

## Referencias bibliográficas

Chamberlain G.A., 1987, "Developments in Design Methods for Predicting Thermal Radiation from Flares", Chem. Eng. Res. Des. 65:299-309.

Coccorullo, I., & Russo, P. (2016). Jet fire consequence modeling for high-pressure gas pipelines. 110007. https://doi.org/10.1063/1.4968714

Reniers, G., & Cozzani, V. (2013). Domino Effects in the Process Industries Modeling, Prevention and Managing.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Venado Tuerto

# Avances en el proyecto de una base de datos hidrológica para la región de Venado Tuerto

## Progress on the project to create a hydrological database for the Venado Tuerto region

Presentación: 30/10/2025

**Ayelén Grillo**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.
ayelengrillo01@gmail.com

**Estefanía Zoppi**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.
estefi.zoppi@gmail.com

**Florencia Alderete**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.
aldereteflor03@gmail.com

### Resumen

El presente trabajo presenta los avances realizados con la conformación de una base de datos hidrológica espacial para el sur de la provincia de Santa Fe y zonas aledañas. El objetivo es integrar información dispersa o inexistente, mediante obtención periódica de superficies lagunares con técnicas de Teledetección y SIG, junto al registro de datos pluviométricos. Esta iniciativa recopila registros de precipitaciones de 123 localidades y parajes, incorporando además procedimientos de georreferenciación y normalización conforme datos oficiales. Asimismo, se prevé la cuantificación periódica de las lagunas con el fin de analizar su dinámica territorial, junto con la incorporación de variables complementarias, como niveles freáticos y usos del suelo, aportando insumos de valor para estudios hidrológicos, actividades agropecuarias e ingeniería civil. La información normalizada, será puesta a disposición de la comunidad.

**Palabras clave:** Base de Datos, Hidrología, Sur de Santa Fe.

### Abstract

This paper presents the progress made in creating a spatial hydrological database for the southern part of the province of Santa Fe and surrounding areas. The objective is to integrate scattered or non-existent information by periodically obtaining lagoon surface data using remote sensing and GIS techniques, together with rainfall data records. This initiative compiles rainfall records from 123 localities and locations, also incorporating georeferencing and standardization procedures in accordance with official data. Likewise, periodic quantification of the lagoons is planned in order to analyze their territorial dynamics, together with the incorporation of complementary variables, such as water tables and land use, providing valuable input for hydrological studies, agricultural activities, and civil engineering. The standardized information will be made available to the community.

**Keywords:** Database, Hydrology, Southern Santa Fe.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

La falta de conocimiento sobre el funcionamiento de los sistemas hidrológicos conlleva problemáticas de inundaciones que afectan tanto a zonas rurales como urbanas. Estos eventos generan desastres ambientales con consecuencias significativas: pérdidas económicas, riesgo para la vida humana, deterioro de los recursos naturales y afectación de valores e identidades sociales. Las ciudades del sur de la provincia de Santa Fe y zonas aledañas, no escapan a esta realidad.

En esta región, las dificultades en la comprensión de los sistemas hidrológicos se explican principalmente por dos razones: la condición de llanura, donde no existen redes de escurrimiento definidas, sino bajos y lagunas interconectados mediante cañadas naturales y/o canalizaciones (Fuschini Mejía, 1994: 5-7), cuyo comportamiento varía según las lluvias y el estado del suelo; y la escasez de información hidrológica que permita reproducir eventos pasados para ajustar modelos a condiciones reales.

Actualmente, existen modelos y estructuras de simulación que posibilitan analizar unidades espaciales pequeñas de los sistemas hidrológicos de llanura, considerando los procesos del ciclo hidrológico que intervienen en la transformación lluvia–caudal y en la propagación del flujo (Riccardi et al., 2002: 1-4). Estos avances permiten un conocimiento más profundo del comportamiento de los sistemas hidrológicos, constituyendo una herramienta valiosa para el control de inundaciones. A ello se suma la evolución de las tecnologías de modelación, las cuales se han readaptado para integrar productos tecnológicos de otros ámbitos, logrando simulaciones más representativas del área de análisis.

Uno de los insumos fundamentales para estas simulaciones son los Modelos Digitales de Elevación (DEM), provenientes de la teledetección, que ofrecen información altimétrica precisa con resoluciones espaciales diversas según la escala de trabajo (Olaya Ferrero, 2004: 17-30). Asimismo, los productos de imágenes satelitales —como coberturas terrestres y tipologías de suelos— aportan información intrínseca que permite estimar variables del ciclo hidrológico. Estas imágenes también se transforman en máscaras de agua, utilizadas como ingreso de alturas iniciales en la simulación y en la calibración de respuestas espacialmente distribuidas, en conjunto con los Sistemas de Información Geográfica (Soria et al., 2017: 2-8). Finalmente, la información pluviométrica, ya sea de un evento puntual o de un periodo específico, completa los datos necesarios para la simulación.

En este marco, el presente proyecto propone recopilar, digitalizar, georreferenciar y normalizar información clave para que sea procesada en softwares de simulación bidimensionales, organizándola en una base de datos geoespacial. Esta herramienta se proyecta como un insumo esencial para la gestión integral del territorio y la mitigación de la problemática ambiental que afecta a la comunidad, favoreciendo a su vez la transferencia de conocimiento desde el ámbito académico hacia la sociedad.

## 2. Materiales y métodos

En una primera etapa, se recopiló toda la información de carácter hidrológico, tanto de datos existentes como de nuevos datos generados por los laboratorios de Teledetección, Sistemas de Información Geográfica y Medio Ambiente de la facultad. Posteriormente, se diseñó un esquema de presentación de la información, en línea con los criterios establecidos en reuniones de trabajo. Dependiendo del tipo de datos recopilados, se desarrollaron protocolos específicos para su obtención, normalización y definición de periodicidades de recolección.

Por ejemplo, se trabajó en la creación de máscaras de agua para lagunas, a partir de las cuales se extraen datos como superficie y expansión territorial. Aunque el protocolo para la identificación de cuerpos de agua mediante imágenes satelitales ya fue establecido por el laboratorio de Teledetección, en este proyecto se definió además la periodicidad con la que deberán realizarse estos análisis, así como la extracción de parámetros como perímetro, área, ubicación en el territorio y desvío respecto a la superficie media en esa estación, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Otro ejemplo son los datos de precipitación recolectados por aficionados de la región, algunos con registros históricos relevantes. Estos datos, una vez georreferenciados, fueron normalizados mediante diversas pruebas comparativas con estaciones meteorológicas oficiales o de confianza. Posteriormente, se preparó la presentación de la información en formatos diarios, mensuales y anuales para las 123 estaciones (localidades) objetivo. Actualmente, se presenta el trabajo desarrollado hasta esta fase del proyecto.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Variables adicionales, que serán abordadas en etapas posteriores con menor rigurosidad debido a la función limitada de su información, incluyen humedad del suelo, nivel de napa freática, usos del suelo y tipología del suelo. Estas variables serán presentadas en función de la información disponible, y al finalizar el proyecto se propondrá un plan de recolección y generación de datos más completos para estas variables.

Finalmente, toda la información recopilada será almacenada en una base de datos PostgreSQL. Se generarán archivos con consultas básicas para facilitar el acceso y uso por parte de la comunidad. Además, dicha información será publicada en la web en un formato de mapa interactivo, permitiendo su disponibilidad y accesibilidad.

Durante el desarrollo del proyecto, el equipo de trabajo recibirá capacitación en áreas relacionadas como gestión de bases de datos, desarrollo web y otros aspectos pertinentes.

## 3. Resultados y discusión

La recopilación y procesamiento de información hidrológica nos va a permitir generar una base de datos geoespacial sólida que integra distintos insumos provenientes de teledetección, SIG y registros pluviométricos históricos. En el caso de las máscaras de agua de los cuerpos lagunares, los análisis a partir de imágenes satelitales permitieron caracterizar la superficie y expansión de lagunas y bajos interconectados, identificando variaciones mensuales estacionales. A modo ilustrativo, se presenta en la Figura 1 la caracterización de la Laguna de San Eduardo, para un periodo de sequía (Septiembre 2023) y un periodo lluvioso (Febrero 2017), mostrando y cuantificando la variación de la respuesta de la misma.

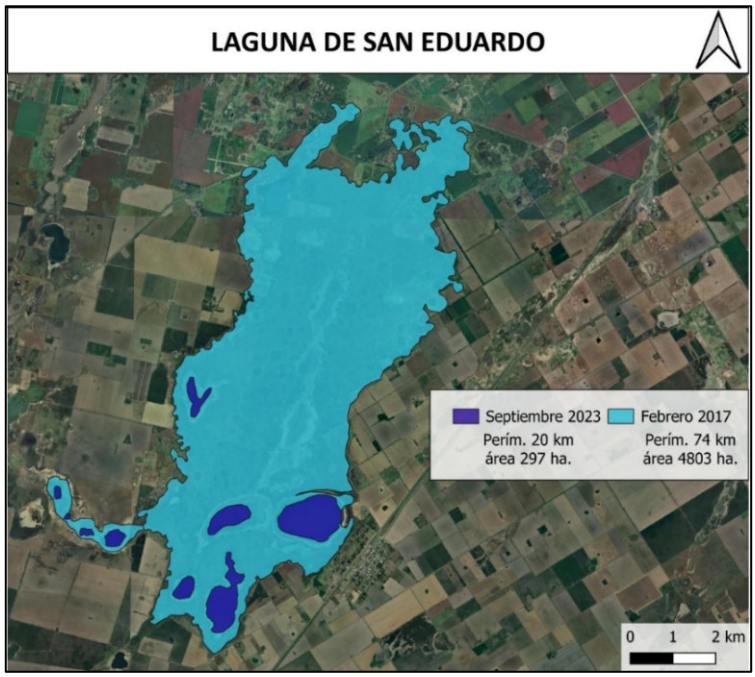



**Figura 1.** Laguna de San Eduardo.

En cuanto a los registros pluviométricos, la normalización y validación frente a estaciones oficiales permitieron ajustar inconsistencias y obtener series temporales confiables para las localidades estudiadas. En la Figura 2, puede observarse la determinación de las áreas de influencia de cada estación meteorológica oficial, respecto a las ubicaciones de los aficionados, para el análisis y validación de las series temporales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

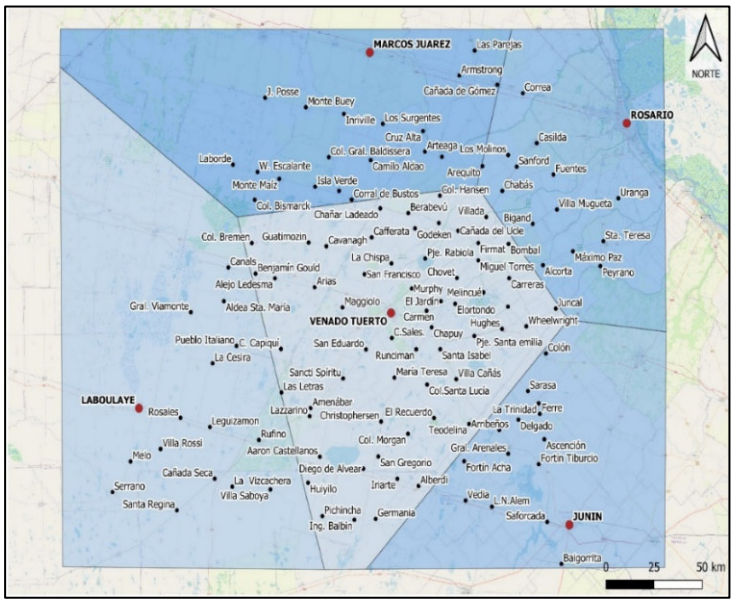



**Figura 2**. Áreas de influencia de las estaciones meteorológicas oficiales para la normalización de la información

La integración de estos datos en la base geoespacial facilitará la simulación lluvia–caudal y la calibración de modelos bidimensionales, mostrando que la combinación de información oficial y colaborativa puede mejorar significativamente la cobertura espacial de la región.

Finalmente, se evidencia que la combinación de tecnologías de teledetección, SIG y modelación hidrológica mejorará la capacidad de anticipación ante inundaciones en sistemas de llanura, permitiendo establecer estrategias de mitigación más precisas y focalizadas. A posteriori, la inclusión de variables adicionales como humedad del suelo, nivel de napa freática y usos del suelo enriquecerá la base de datos y permitirá simulaciones más completas.

## 4. Conclusiones

El proyecto constituye un aporte significativo al avance científico y a la gestión territorial, al generar información geoespacial de calidad para simulaciones hidrológicas e hidráulicas en la región. La incorporación de superficies de agua obtenidas mediante técnicas de teledetección como condiciones iniciales de las lagunas representa una innovación que mejora la precisión de las simulaciones frente a eventos reales. La base de datos geoespacial, construida con softwares libres, asegura la permanencia de los protocolos y la replicabilidad de los análisis, facilitando su uso tanto para estudios especializados como para distintos actores de la comunidad, incluyendo productores agropecuarios, profesionales de la ingeniería, organismos públicos, instituciones educativas y población general. Además, el proyecto promueve la formación de recursos humanos mediante capacitaciones en teledetección, Sistemas de Información Geográfica, manejo de bases de datos geoespaciales, SQL y desarrollo web, fortaleciendo las competencias de becarios y del personal involucrado.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Secretaría de Ciencia y Tecnología de Rectorado, en el marco del PID MSPPVT0010241.

## Referencias bibliográficas

Fuschini Mejía, M. C. (1994). “El agua en las llanuras” (1st ed.). Montevideo, Uruguay: UNESCO- ORCYT.

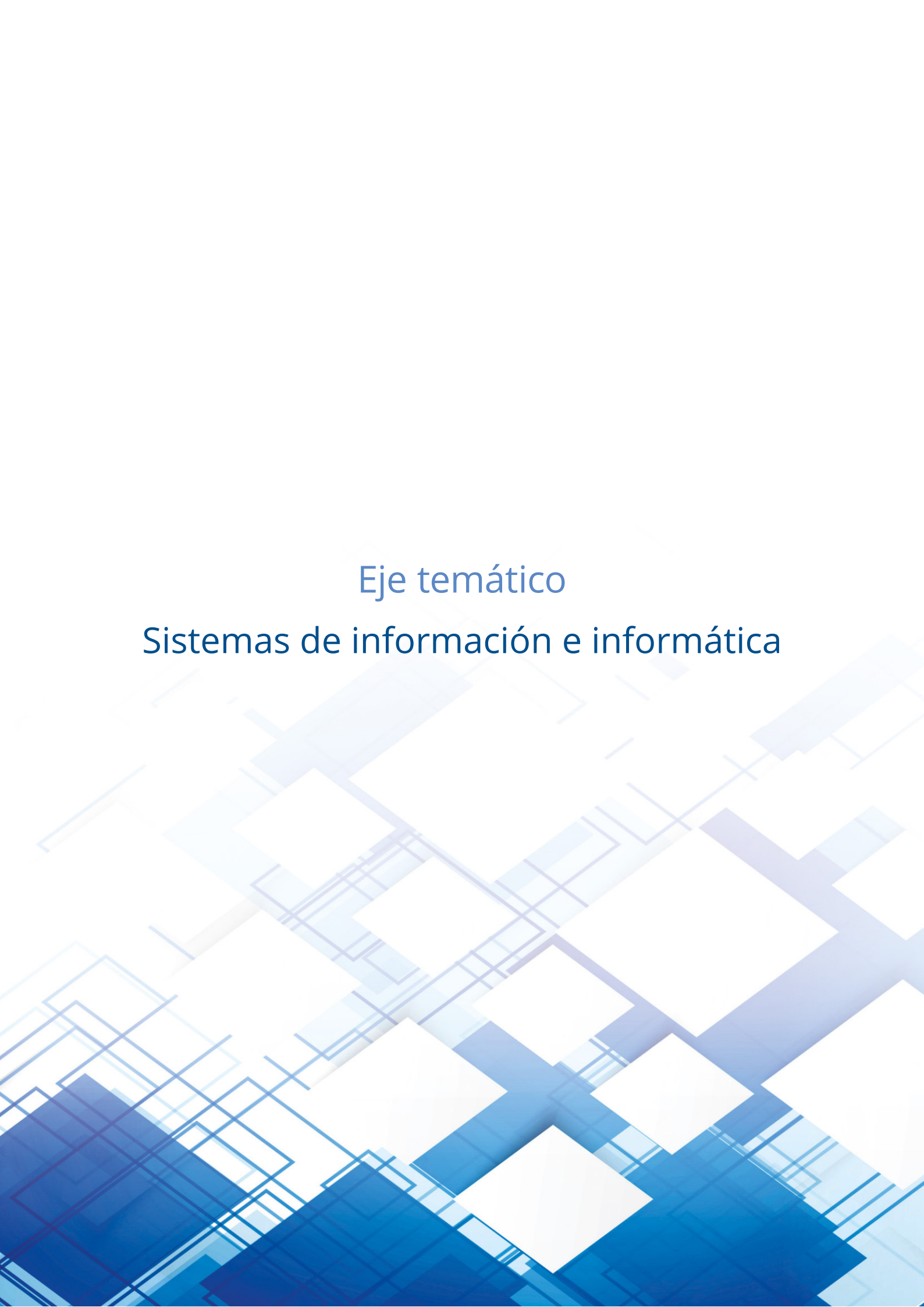
Olaya Ferrero, V. (2004). “Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno. Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico”. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Riccardi, G. (2002). “Modelado de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle en la cuenca del Arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina”.

Soria, M. (2017). “Análisis batimétrico de lagunas poco profundas mediante técnicas de Teledetección y SIG: aplicación a la laguna la victoria”, Cuaderno del Curiham, 51-61.

Eje temático

# Sistemas de información e informática



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Sistemas de información e informática
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiante de grado
**Facultad Regional**: Santa Fe

# Diseño de un perfil UML para modelado conceptual en Simulación

## Designing a UML profile for conceptual modelling in simulation

Presentación: 30/10/2025

**Florencia Abigail Hiembuchner**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina.
florhiembuchner@gmail.com

### Resumen

La simulación de sistemas complejos exige el desarrollo de modelos precisos que representen su estructura y comportamiento. Sin embargo, las herramientas de modelado actuales a menudo no logran capturar las relaciones entre componentes, entradas, salidas y las simplificaciones necesarias para construir modelos consistentes. Este trabajo presenta un perfil UML (Unified Modeling Language) como herramienta de modelado conceptual, vinculada al área de Modelado y Simulación Basado en Eventos Discretos. El perfil propuesto es un paso inicial hacia la representación precisa de los componentes del sistema, estableciendo una base sólida para el desarrollo de modelos claros y coherentes.

**Palabras Clave:** perfil UML, simulación, estereotipos, modelo.

### Abstract

The simulation of complex systems requires the development of precise models that represent their structure and behavior. However, modeling tools fail to capture the relationships between components, inputs, outputs, and simplifications required to build consistent models. This work presents a UML (Unified Modeling Language) profile as a conceptual modeling tool, linked to the field of Discrete Event Modeling and Simulation. The proposed profile is an initial step toward the accurate representation of system components, establishing a solid foundation for the development of clear and coherent models.

**Keywords:** profile UML, simulation, stereotypes, models.

## 1. Introducción

Modelar sistemas es una tarea compleja y desafiante, especialmente en el área de simulación, donde los modelos deben capturar con precisión la estructura, interacciones y comportamientos de sistemas reales. Esta tarea no solo requiere conocimientos propios del tipo de simulación elegida, sino también experiencia acompañada de herramientas que soporten la construcción de modelos consistentes.

Aunque UML (Unified Modeling Language), estandarizado por Object Management Group [OMG], (2017), es un leguaje de modelado ampliamente reconocido y utilizado para la especificación de artefactos de software, su aplicación de forma directa en contextos de simulación presenta limitaciones importantes. En particular, forzar la aplicación de UML en un dominio particular puede conducir a interpretaciones dispares entre distintos modeladores. Esto se explica por la tendencia de los modelos a reflejar la perspectiva individual de quien los construye, más que una representación objetiva del sistema simulado.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Con el objetivo de superar estas limitaciones, el presente trabajo propone un perfil UML orientado a la simulación. Según Eriksson, Penker, Lyons y Fado (2004), un perfil UML es un mecanismo que permite extender el lenguaje UML con el objetivo de adaptar el metamodelo a un dominio particular. Así, el perfil propuesto, aprovecha un estándar ampliamente utilizado, evitando crear un lenguaje nuevo y manteniendo compatibilidad con herramientas existentes. A partir de la propuesta de Robinson (2014), se identificaron conceptos clave para estructurar el dominio, lo que permitió definir estereotipos, valores etiquetados y restricciones. Con estos elementos se definió el perfil UML, que permite representar gráficamente los componentes del dominio, sus relaciones y las simplificaciones incorporadas.

La estructura del trabajo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 presenta la tarea de modelado conceptual según Robinson. La Sección 3 describe los elementos que componen el perfil, detallando las restricciones y reglas de modelado aplicadas. La Sección 4 presenta ejemplos prácticos de aplicación del perfil en escenarios de simulación. La Sección 5 presenta las discusiones, mientras que la Sección 6 aborda las conclusiones junto con las posibles líneas de extensión y mejora futura.

## 2. Modelado conceptual por Robinson

Robinson (2014) diseñó un framework para el modelado conceptual donde define una serie de pasos para llevar a cabo el modelado de un sistema. En primera instancia, destaca la necesidad de comprender el sistema con el fin de describir objetivos que orienten el proceso de desarrollo, así como también la definición de entradas y salidas. Tras la especificación de componentes, entradas y salidas, considera necesario fijar el alcance y el nivel de detalle del modelo. Estos elementos definen qué partes del sistema se representarán y cómo se representarán; del mismo modo que permiten controlar la complejidad, garantizar la consistencia y optimizar la utilidad del modelo. Precisar el nivel de detalle y el alcance es fundamental para que la simulación cumpla con los objetivos planteados sin desviarse hacia elementos innecesarios.

Análogamente, Robinson resalta la importancia de mantener la documentación actualizada respecto a las simplificaciones (abstracción de un comportamiento complejo) y suposiciones (elemento asumido para reducir la incertidumbre) aplicadas al modelo. Ambos elementos posibilitan una comprensión más clara y manejable del sistema. Esto garantiza que todos los interesados estén al tanto de estas excepciones y consideraciones realizadas, proporcionando transparencia y consistencia en el desarrollo del modelo.

## 3. Diseño del perfil UML

El diseño del perfil UML propuesto para la simulación busca extender la notación estándar de UML de manera que se pueda representar de forma explícita y coherente la estructura de sistemas complejos. Para ello, se emplean estereotipos, valores etiquetados y restricciones, los cuales permiten capturar tanto los elementos del sistema como las reglas y relaciones que rigen su comportamiento.

### *3.1. Estereotipos*

Los estereotipos permiten clasificar los elementos de un modelo y proporcionarles significados específicos del dominio de la simulación. En la tabla 1, pueden observarse los distintos estereotipos creados y sobre qué metaclase (es decir, sobre qué constructor del diagrama de clase UML) extienden.

### *3.2. Valores etiquetados*

Los valores etiquetados se utilizan para almacenar información adicional sobre los elementos del modelo. Para la definición del perfil, se utilizaron los valores detallados en la tabla 2, acompañados también de su tipo, relación con el estereotipo correspondiente y una breve descripción de su uso.

### *3.3 Restricciones OCL*

El perfil incorpora restricciones expresadas en Object Constraint Language (OCL), estandarizado por Object Management Group [OMG], (2014), para garantizar la validez de los modelos que apliquen el perfil UML. Las restricciones documentadas en la tabla 3, permiten establecer reglas sobre los atributos, relaciones e interacciones de los componentes, evitando errores conceptuales y asegurando que el modelo cumpla con las especificaciones del sistema real.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 1.** Estereotipos creados y metaclases extendidas.

| Estereotipo | Metaclase | Descripción |
|---|---|---|
| Component | Class | Unidad o elemento que cumple un rol dentro del sistema. |
| Input | Association | Dato que ingresa al sistema. |
| Output | Association | Resultado de la interacción entre componentes. |
| Simplification | Association | Abstracción realizada sobre un componente o relación entre ellos. |
| Justification | Comment | Razón por la cual un componente es excluido. |
| Attribute | Property | Propiedad, característica o cualidad asociada a un componente. |

**Tabla 2.** Valores etiquetados, tipo, estereotipo y descripción.

| Nombre | Tipo | Pertenece al estereotipo | Descripción |
|---|---|---|---|
| isExcluded | Boolean | Component | Representa la elección de incluir o no un componente. |
| Type | InputType | Input | Indica si es parámetro o factor. |
| descriptionInput | String | Input | Descripción del valor de entrada. |
| descriptionOutput | String | Output | Descripción del valor de salida. |
| descriptionSimplification | String | Simplification | Descripción de la abstracción usada. |
| Type | ArgumentType | Attribute | Indica si es entrada o salida. |

**Tabla 3.** Descripción de las restricciones aplicadas al modelo.

| Nombre | Definición |
|---|---|
| EntradaPuedeConectarSoloComponents | context: Input<br>not self.*component.oclIsUndefined*() |
| SalidaPuedeConectarSoloComponents | context:Output<br>not self.*component.oclIsUndefined*() |
| SimplificationSoloPuedeConectarComponents | context: Simplification<br>not self.*component.oclIsUndefined*() |
| AtributoDebeExistirAsociadoAComponent | context:Attribute<br>not self.*component.oclIsUndefined*() |
| SoloExcluidosConJustificacion | context: Component<br>self.*isExcluded* implies not self.*justification.oclIsUndefined*() |
| SiIncluidoEntoncesTieneAlgunaEntradaSalida | context: Component<br>not self.*isExcluded* implies (self.*input*<>null or self.*output*<>null) |

### *3.4. Diagrama del Perfil UML*

El perfil resultante que integra todos los elementos relevantes en el contexto previamente definido según las tablas 1 a 3. Para esta implementación se utilizó Papyrus Eclipse Foundation (2025), una herramienta de modelado orientada al Desarrollo Dirigido por Modelos (MDE) que proporciona un entorno para la creación, edición y análisis de modelos de sistemas complejos, utilizando estándares como UML y SysML.

El perfil construido con el uso de Papyrus se muestra en la Figura 1. Este diagrama resume la estructura propuesta y permite visualizar cómo los estereotipos se vinculan con las metaclases correspondientes, así como las propiedades que caracterizan a cada elemento.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

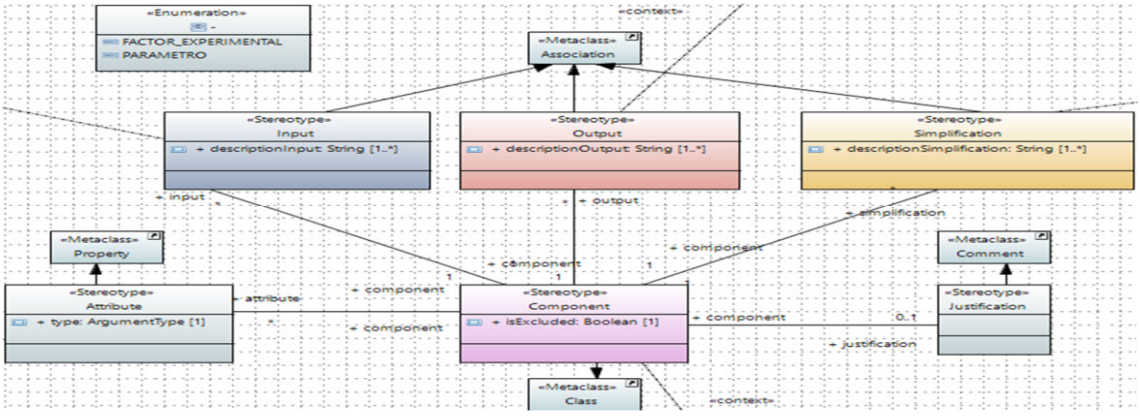



**Figura 1.** Diagrama del perfil UML diseñado.

## 4. Aplicación del Perfil UML a un caso práctico

Con el propósito de evaluar el perfil UML desarrollado, se empleó el caso de estudio propuesto por Alvarez, Sarli, & Blas, 2023. Este caso aborda el despacho de equipaje en un aeropuerto internacional. El objetivo principal es reducir el tiempo de despacho de equipaje de los pasajeros, para ello se analiza la estructura del sistema, incluyendo mostradores, personal, pasajeros y equipaje, así como la interacción entre estos elementos, identificando los puntos críticos. Se consideran entradas como el tiempo entre arribos de pasajeros y se evalúan salidas como la longitud de las colas. El modelado de estos elementos se realizó aplicando el estereotipo Input según lo listado en la tabla 4. Asimismo, las asociaciones sobre las que se identifica el estereotipo Output se presentan en la tabla 5.

**Tabla 4.** Aplicación y definición del estereotipo Input en el caso práctico.

| Definición | Asociación |
|---|---|
| Tiempo entre arribos de pasajeros | se encuentra en |
| Cantidad de mostradores | Atiende |
| Tiempo de atención del empleado en mostrador. | trabaja en |

**Tabla 5.** Aplicación y definición del estereotipo Output en el caso práctico.

| Definición | Asociación |
|---|---|
| Longitud promedio de la cola de pasajeros esperando en un mostrador. | se encuentra en |
| Tiempo promedio de espera por pasajero | se encuentra en |
| Tiempo promedio de atención por pasajero | se encuentra en |
| Porcentaje de ocupación de un mostrador | atiende |

La tabla 6 muestra los elementos sobre los cuales se aplicó el estereotipo Component, indicando para cada elemento si el mismo fue excluido del modelo mediante el atributo isExcluded (y, en caso afirmativo, la justificación correspondiente). De esta manera, se establece una visión precisa sobre cuáles componentes resultan relevantes para los objetivos del modelo y cuáles fueron descartados. La tabla 7 presenta el listado de atributos que complementan con claridad la representación de cada elemento incluido en el modelo.

**Tabla 6.** Aplicación del estereotipo Component en el caso práctico.

| Nombre | isExcluded | Justificación |
|---|---|---|
| Empleado | True | El empleado es relevante para los objetivos, pero se lo considera equivalente al mostrador. |
| Mostrador | False | - |
| Cola | False | - |
| Pasajero | False | - |
| Equipaje | True | El equipaje no es relevante para los objetivos del modelo. |

**Tabla 7.** Listado de atributos aplicados a los distintos componentes.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| Nombre | Componente | Tipo de Argumento |
|---|---|---|
| tiempoDeEspera | Pasajero | Output |
| tiempoDeAtención | Pasajero | Output |
| tiempoDeArribo | Pasajero | Input |
| cantidadDePasajeros | Cola | Output |
| tiempoDeEspera | Cola | Output |
| tiempoOcupado | Mostrador | Output |
| tiempoLibre | Mostrador | Output |

Finalmente, las simplificaciones realizadas sobre el sistema bajo estudio se encuentran detalladas en la tabla 8, al igual que la asociación correspondiente.

**Tabla 8.** Aplicación y definición del estereotipo Simplification en el caso práctico.

| Definición | Asociación |
|---|---|
| El empleado es relevante para los objetivos, pero se lo considera equivalente al mostrador. | Trabaja en |

La aplicación del perfil propuesto al caso práctico de despacho de equipaje se puede visualizar en la Figura 2. En el diagrama se representan los componentes del sistema, junto con sus atributos, entradas y salidas, así como las justificaciones que explican la exclusión de los componentes.

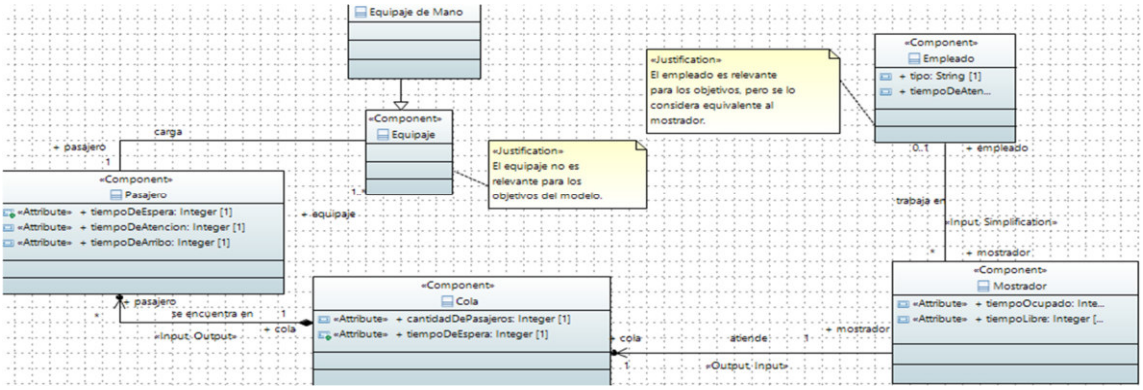



**Figura 2:** Diagrama despacho de equipaje con aplicación de Perfil UML.

## 5. Discusión

El perfil UML desarrollado para el modelo conceptual en simulación surge de un trabajo riguroso de investigación que integra reflexión y aprendizaje. En la fase inicial del diseño del perfil UML, se realizó una selección y análisis del material, buscando profundizar en el tema y reconocer los elementos clave. Paralelamente, se llevó a cabo un proceso de selección de herramientas, y se eligió Papyrus por su enfoque en el modelado basado en UML y MDE, junto con su capacidad de integrarse con distintos entornos de desarrollo.

Una vez completadas estas etapas, se modeló el perfil para luego implementarlo en la herramienta elegida. A medida que se desarrollaba el perfil, se construyó el diagrama de clases con el perfil aplicado para el caso de estudio. Durante el proceso de diseño del perfil UML, se aplicó un proceso iterativo de construcción y verificación, ajustando y perfeccionando los estereotipos, valores etiquetados y restricciones con base en los resultados obtenidos en el diagrama creado. Este enfoque permitió refinar progresivamente el perfil hasta alcanzar la versión final que se presenta en el presente trabajo.

Es importante destacar que el trabajo realizado por Alvarez et al., 2023 constituyó un punto de partida para el desarrollo del perfil, ya que motivó la búsqueda de una alternativa al modelado conceptual en Excel propuesto en dicho artículo. A diferencia del enfoque que proponen los autores, el perfil resultante no sólo ayuda al modelado, sino que también permite automatizar la validación del modelo, reduciendo la presencia de errores de modelado y aumentando la consistencia.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 6. Conclusiones y trabajos futuros

En conclusión, el perfil UML desarrollado para el modelado conceptual en simulación constituye un aporte relevante para la representación clara y coherente de sistemas complejos. Entre sus principales ventajas, permite expresar de manera explícita los componentes del sistema, así como sus entradas, salidas, atributos y simplificaciones, lo que contribuye a la consistencia y transparencia de los modelos. La integración de estereotipos, valores etiquetados y restricciones OCL, junto con la utilización de Papyrus como herramienta de desarrollo, facilita la automatización de validaciones y la reducción de errores conceptuales, aumentando la confiabilidad de los modelos construidos. Además, el proceso iterativo de diseño y validación aplicado sobre diagramas de clases, utilizando un caso práctico —el despacho de equipaje en un aeropuerto—, permitió ajustar y perfeccionar progresivamente el perfil hasta alcanzar una versión robusta y aplicable a diferentes contextos de simulación.

No obstante, el perfil resultante presenta limitaciones. Su enfoque principal se centra en la estructura de los sistemas, sin abordar de manera explícita la dinámica, lo que restringe su capacidad para representar completamente los sistemas modelados. Como líneas futuras de desarrollo, se contempla la incorporación de una perspectiva dinámica que permita modelar tanto la estructura como el comportamiento de los sistemas. Esta mejora fortalecería la utilidad del perfil, promoviendo la construcción de modelos de simulación más completos, flexibles y reutilizables.

## Referencias bibliográficas

Alvarez, G., Sarli, J., Blas, M. J. (2023). Una Propuesta de Extensión de un Framework para el Desarrollo de Modelos Conceptuales para Simulación. Actas del 2023 Congreso Nacional de Ingeniería Informática / Sistemas de Información (CONAIISI).

Eclipse Foundation. (21 de agosto de 2025,). Eclipse Papyrus™ modeling environment. https://eclipse.dev/papyrus/index.html

Eriksson, H.-E., Penker, M., Lyons, B., & Fado, D. (2004). UML 2 toolkit. Wiley Publishing.

Object Management Group. (2014). Object Constraint Language (OCL), version 2.4. https://www.omg.org/spec/OCL

Object Management Group. (2017). Unified Modeling Language (UML), version 2.5.1. https://www.omg.org/spec/UML

Robinson, S. (2014). The practice of model development and use (2nd ed.). New York, NY: Palgrave Macmillan.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Sistemas de información e informática
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Plataforma de subastas descentralizadas a través de blockchain y contratos inteligentes

## Decentralized Auction Platform Using Blockchain and Smart Contracts

Presentación: 30/10/2025

**Nicolás Mauro Courtalón**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Argentina
courtalonnicolasm@gmail.com

### Resumen

La gestión de infraestructuras de datos que garanticen la integridad, disponibilidad y trazabilidad de la información representa un desafío para los usuarios y las organizaciones. En este marco, la tecnología de cadena de bloques surge como una alternativa robusta y descentralizada, capaz de registrar transacciones y datos de manera transparente, inmutable y segura. Sobre esta base, los contratos inteligentes constituyen mecanismos autoejecutables que permiten la formalización y cumplimiento automático de acuerdos, eliminando la necesidad de intermediarios. Este trabajo explora la implementación de una plataforma de software orientada a la gestión de subastas, utilizando blockchain y contratos inteligentes. Su aplicación se ejemplifica con usuarios representados por microrredes eléctricas que pujan en subastas por energía en un mercado de intercambio. Los resultados obtenidos en escenarios de prueba demuestran la factibilidad técnica de emplear blockchain para la realización de dichas subastas, evidenciando su potencial como herramienta en la operación de mercados energéticos distribuidos.

**Palabras clave:** cadena de bloques, contratos inteligentes, subastas

### Abstract

The management of data storage infrastructures that ensure the integrity, availability and traceability of information represents a challenge for users and organizations. In this context, the blockchain technology emerges as a robust and decentralized alternative, capable of recording transactions and data in a transparent, immutable and secure manner. On this basis, smart contracts constitute self-executing mechanisms that enable the formalization and automatic execution of agreements, eliminating the need for intermediaries. This work explores the implementation of a software platform for auction management, using blockchain and smart contracts. Its application is exemplified through users represented by electrical microgrids participating in energy auctions within an exchange market. The results obtained in testing scenarios demonstrate the technical feasibility of employing blockchain for conducting such auctions, highlighting its potential as a tool for the operation of distributed energy markets.

**Keywords:** blockchain, smart contracts, auctions

## 1. Introducción

Las cadenas de bloques, también conocidas como *'blockchain'* por su designación en inglés, constituyen un registro de información digital descentralizado y distribuido en un conjunto de nodos conectados en red. Cada nodo es un equipo puesto al servicio de la cadena, manteniendo una copia de la misma. Cada bloque puede registrar un conjunto de transacciones u operaciones. La seguridad provista en términos de la integridad y trazabilidad de la información responde a que el contenido

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

de un bloque no puede ser alterado sin el consenso de la red (Iglesias, 2023). La naturaleza distribuida, la irreversibilidad de las transacciones y el uso intensivo de cifrado tornan a esta tecnología conceptualmente segura (Lecuit, 2019).

Las citadas propiedades hacen de las cadenas de bloques un ámbito propicio para las transacciones económicas. Sobre esta base se construye el concepto de 'criptomoneda', es decir, un activo digital asegurado mediante criptografía, que facilita las transacciones comerciales entre individuos, sin requerir confianza entre las partes involucradas (Neira Suárez, 2022). Y pese a ser ésta su aplicación más habitual, la tecnología de blockchain no se limita a las transacciones con criptomonedas. Su aplicación se ha extendido a múltiples sectores, como procesos electorales electrónicos, el sector asegurador, la banca, la logística y las cadenas de suministro, donde permite mayor transparencia, trazabilidad y eficiencia. En muchos de estos casos, su potencial se materializa mediante contratos inteligentes (*smart contracts*) (Noriega, 2021).

Un contrato inteligente es, en su esencia, un programa informático desplegado en la blockchain, capaz de ejecutar de manera automática las instrucciones para las que fue diseñado, cuando se cumplen condiciones específicas. Desde una perspectiva técnica, consiste en un conjunto de variables de estado, que representan la información y estado del contrato, y funciones que permiten la transición entre distintos estados. Un usuario interactúa con un contrato inteligente creando una transacción que invoca una de sus funciones, lo que puede desencadenar la ejecución de funciones de otros contratos (John et al., 2023). Desde una perspectiva funcional, un contrato inteligente actúa como un acuerdo autoejecutable, capaz de forzar el cumplimiento de las cláusulas pactadas, sin necesidad de intermediarios ni supervisión externa (Taherdoost, 2023).

La doble naturaleza de los contratos inteligentes, en su concepción de programas distribuidos y mecanismo de ejecución contractual, permite aplicaciones complejas y seguras. Entre ellas, pueden adaptarse subastas electrónicas, beneficiadas en gran medida de la transparencia e inmutabilidad de la blockchain, tornándolas confiables y eliminando intermediarios. Esto último permite la reducción de costos y la minimización del riesgo de manipulación o fraude en el proceso. Con este marco, este trabajo plantea la implementación de una plataforma de subastas a partir de contratos inteligentes, con el objetivo de analizar los desafíos técnicos que implica su utilización en contexto de mercados energéticos. Para ello se considera, a modo de caso práctico de referencia, el comercio de energía entre microrredes de distribución eléctrica, a partir del cual se propone un escenario simulado sobre una blockchain en ejecución local, en un entorno de desarrollo controlado. Las pruebas realizadas demuestran la viabilidad de la propuesta y facilitan la identificación de los puntos dificultosos más importantes. Adicionalmente a la implementación y despliegue de los contratos de subasta, el trabajo desarrolla una aplicación web (de arquitectura cliente-servidor) que permite interactuar directamente con la blockchain para desplegar los contratos (iniciar las subastas) e interactuar con los mismos. La aplicación también facilita un análisis gráfico del progreso y resultados de las subastas.

La sección 2 detalla los componentes de software (libre) utilizados para desarrollar la plataforma y los contratos inteligentes. Posteriormente, la sección 3 destaca el aspecto y virtudes de la aplicación, apoyándose en un caso concreto de ejemplo. Finalmente, en la sección 4 se resumen las conclusiones más importantes, y se plantean desafíos a resolver en trabajos futuros.

## 2. Materiales y métodos

La plataforma se desarrolla por medio del framework ApeWorX (ApeWorX LTD, 2024), por su facilidad de uso y alta compatibilidad con diversos lenguajes de escritura de contratos inteligentes y cadenas de bloques. El software desarrollado utiliza la red Ethereum, la blockchain pública más utilizada para el despliegue de contratos inteligentes (Loporchio et al., 2024). En este entorno, cada transacción requiere el pago de un costo denominado *gas*, que cuantifica los recursos computacionales necesarios para ejecutar una instrucción en la máquina virtual de Ethereum (EVM). El gas asegura que las operaciones tengan un costo asociado, evitando abusos de la red y distribuyendo el uso de recursos de manera justa (Chen et al., 2017). En un entorno de producción, el costo del gas depende tanto de la complejidad de la transacción, como del precio dinámico fijado por el mercado. Sin embargo, en este trabajo las pruebas se realizaron en una red local, destinada a un entorno de desarrollo, disponible en ApeWorX mediante su integración con componentes del framework Hardhat. Este último permite ejecutar, en modo local, un nodo completo de una red con la estructura de Ethereum, lo que permite abstraerse de los costos monetarios y centrarse en la validación técnica de la plataforma.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los contratos inteligentes se escribieron en Solidity, un lenguaje de alto nivel similar a C++, Python o JavaScript (Solidity Team, s.f.). Se desarrolló un contrato de subasta simple que implementa las funcionalidades básicas de una subasta tradicional: recibir ofertas crecientes durante un período determinado, gestionar la devolución de fondos a participantes no ganadores, y transferir el monto final al subastador una vez finalizada. Los usuarios son simulados como cuentas de Ethereum generadas en el nodo de Hardhat. Luego, las operaciones para desplegar un contrato (iniciar una subasta) e interactuar con él (ofertar o solicitar una devolución, por ejemplo), se llevaron a cabo mediante una aplicación web diseñada a partir de los estándares de *web3* (Wan et al., 2024). ApeWorX facilita las librerías necesarias para realizar esta comunicación desde un programa escrito en Python. Por esta razón, la aplicación web se construyó en dicho lenguaje, con una arquitectura cliente-servidor por medio del paquete FastAPI (FastAPI, s.f.). Como se muestra en la Figura 1, el usuario utiliza una interfaz web (*frontend*) comunicada con un servidor (*backend*), el que a su vez interactúa con la blockchain como última capa.

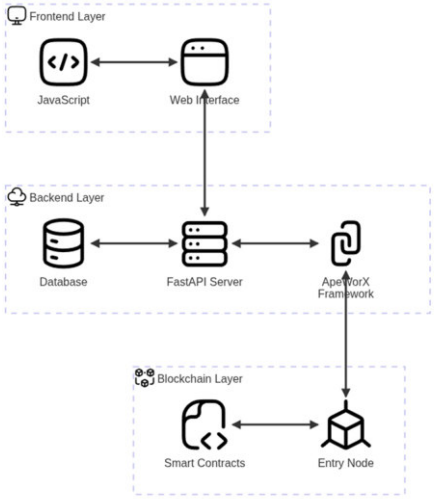



**Figura 1**. Diagrama de arquitectura de la plataforma.

La comunicación entre frontend y backend se realiza mediante una API REST implementada sobre el protocolo HTTP. Si bien HTTP es inherentemente un protocolo sin estado (*stateless*), donde cada solicitud (*request*) es independiente, la aplicación mantiene el estado de las sesiones de usuario mediante el uso de identificadores únicos transmitidos en *headers* personalizados, permitiendo la persistencia de datos entre *requests*. Por otro lado, para la aplicación del servidor, que sirve de interfaz entre el frontend y la blockchain, se implementa una arquitectura por capas, siguiendo principios de *Clean Architecture* (Martin, 2017), separando la lógica de dominio, servicios de aplicación, adaptadores de infraestructura y controladores de presentación. La inversión de dependencias se logra mediante interfaces definidas en la capa de dominio, con adaptadores específicos.

En cuanto a la administración de los datos, si bien es posible extraerlos de las transacciones y contratos desplegados directamente de la blockchain, esto resulta ineficiente para consultas frecuentes. Por lo tanto, se implementó una base de datos local por medio de TinyDB (TinyDB, s.f.), una base de datos orientada a los documentos (NoSQL) de desarrollo rápido y almacenamiento eficiente, para registrar metadatos de las subastas. La elección de TinyDB se fundamenta en su simplicidad para prototipado y su capacidad de funcionar como archivo JSON, facilitando el desarrollo sin requerir la configuración de un servidor de base de datos tradicional.

El frontend fue construido en HTML5, CSS3 y JavaScript. Se utilizaron las librerías Bootstrap 5 para garantizar homogeneidad en el estilo base y diseño responsivo, mientras que Chart.js se utilizó para la visualización de gráficos con estadísticas en tiempo real, cuando las subastas se encuentran en ejecución. En vistas de que se prevén aplicaciones a un mercado entre microrredes eléctricas (Muhtadi et al., 2021), específicamente para la comercialización de energía, cada usuario es identificado en el frontend como una microrred (MR). La designada como MR 0 cumple el rol de subastadora, mientras que las señaladas como MR 1 a MR 4 son potenciales participantes como “compradoras”. La interfaz incluye una sección para el despliegue de subastas, donde es posible:

- Desplegar contratos mediante la configuración de un precio inicial (opcional) y un tiempo de duración.
- Realizar ofertas (en la criptomoneda nativa de Ethereum).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- Consultar balances de las distintas cuentas.
- Recuperar ofertas no ganadoras (devolución de dinero).
- Visualizar el historial de transacciones.

Asimismo, cuenta con una sección en estilo *dashboard*, que permite el monitoreo de las subastas en tiempo real, incluyendo gráficos de evolución de ofertas y registros de participación de los usuarios.

## 3. Resultados y discusión

Para demostrar el funcionamiento del sistema, se simuló, a modo de ejemplo, un escenario de subasta configurado con una duración de 2 minutos, una oferta mínima de 1 Gwei (equivalentes a $10^{-9}$ ETH, en la criptomoneda nativa de Ethereum), y la participación de 4 MRs compradoras (MR 1 a MR 4), operando bajo el mecanismo de subasta inglesa ascendente. La MR 0 actúa como subastadora (despliega el contrato en la blockchain). Los usuarios participantes cuentan con un balance inicial de 10.000 ETH, simulado en el nodo local de Hardhat.

A través de una configuración, se estableció un precio de gas base de 1,13 Gwei; sin embargo, el sistema implementó desviaciones dinámicas que variaron entre 0,26 y 0,87 Gwei durante la ejecución, simulando condiciones más realistas de congestión de la red. Esta variabilidad permitió evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de costo transaccional. La ejecución del caso de prueba siguió la cronología de eventos presentada en la Tabla 1.

**Tabla 1**. Cronología de eventos para el caso práctico simulado.

| Número de evento | Evento | Microrred | Monto ofertado (Gwei) |
|---|---|---|---|
| 1 | Despliegue de contrato | MR 0 | - |
| 2 | Primera oferta | MR 1 | 2 |
| 3 | Segunda oferta | MR 2 | 3 |
| 4 | Tercera oferta | MR 3 | 4 |
| 5 | Cuarta oferta | MR 1 | 5 |
| 6 | Quinta oferta | MR 4 | 6 |
| 7 | Sexta oferta | MR 2 | 7 |
| 8 | Oferta Final | MR 3 | 8 |
| 9 | Fin de la subasta | - | - |

El ejemplo simula un escenario en el cual la MR 0 pone a disposición del mercado una determinada cantidad de energía (para su venta). Para decidir la operación de compra, se ejecuta un mecanismo de subasta implementado a través de un contrato inteligente. Las potenciales compradoras (MRs 1 a 4) utilizan una función del contrato para realizar ofertas. La operación de despliegue del contrato consumió 522.519 unidades de gas, mientras que para las ofertas se registraron: 71.209 unidades para la primera (elevada, puesto que requiere la inicialización de distintas variables de estado), 59.501 unidades para las posteriores, y 42.401 para las últimas. Esta reducción final se debe a las optimizaciones automáticas de la EVM.

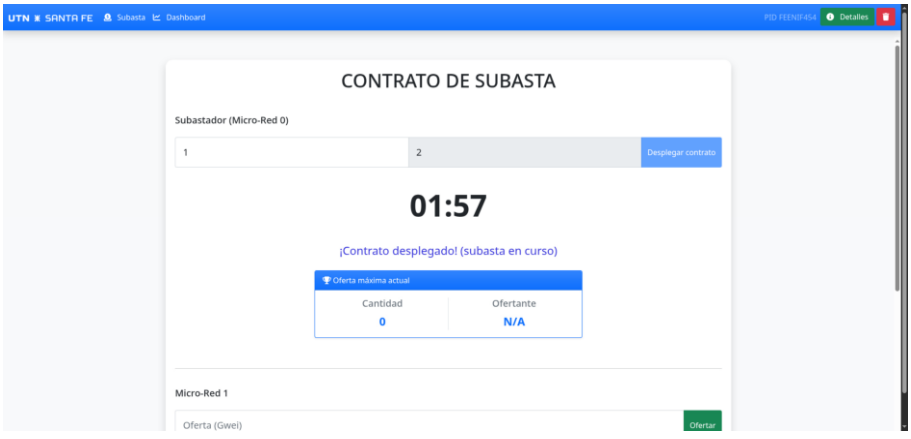



**Figura 2.** Pantalla principal y contrato desplegado.

A los efectos de mostrar la interfaz frontend desarrollada, el proceso fue documentado mediante capturas de pantalla, registrando las salidas del sistema en cada etapa. La Figura 2 muestra el estado inicial con el contrato desplegado y el sistema

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

listo para recibir ofertas. La Figura 3 muestra el estado de la aplicación tras la primera oferta. Y la Figura 4, por su parte, captura el momento de finalización de la subasta, junto con la declaración automática del ganador.

**Figura 3.** Oferta de MR 1.

**Figura 4.** Finalización de la subasta y oferta ganadora.

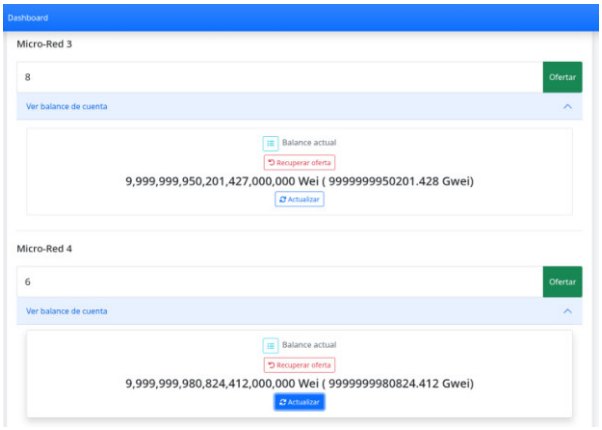



**Figura 5.** Balance de las MRs 3 y 4 luego de la finalización.

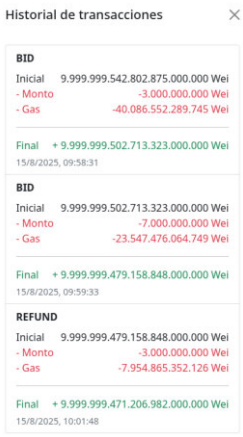



**Figura 6.** Historial de transacciones de la MR 2.

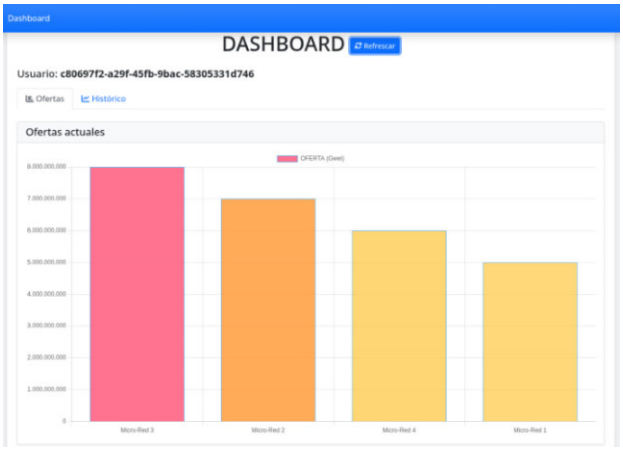



**Figura 7.** Última oferta por cada MR.

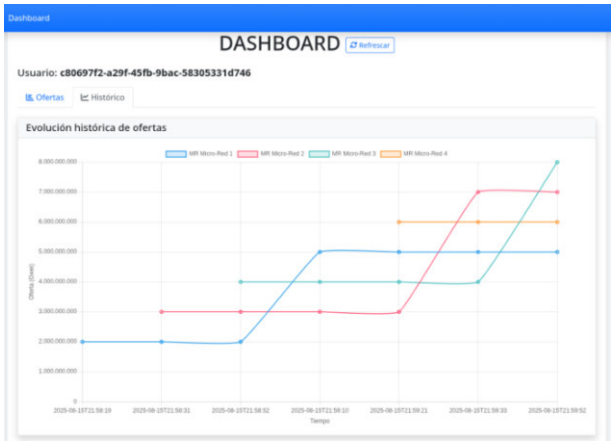



**Figura 8.** Histórico de ofertas según MR.

La gestión de balances y transacciones se documenta en las Figuras 5 y 6. En la Figura 5 se observa el estado final de las MRs 3 y 4. Por su parte, la Figura 6 muestra el historial de transacciones de la MR 2. Aquí se observa que, además del monto ofertado, se debita de la cuenta ofertante una cantidad asociada al gas consumido por la transacción. Finalmente, en las Figuras 7 y 8 se observan sendos gráficos sobre ofertas realizadas en tiempo real, es decir, que se actualizan con las transacciones en la subasta.

## 4. Conclusiones

El trabajo permitió estudiar el funcionamiento de las tecnologías de blockchain, y los desafíos que éstas conllevan en el desarrollo e implementación de contratos inteligentes y de aplicaciones que hagan uso de los mismos. La plataforma presentada es funcional y su uso sobre escenarios simulados de transacciones entre microrredes se aprecia como una prueba conceptual en el ámbito de los mercados energéticos. Asimismo, las pruebas realizadas permitieron detectar numerosas mejoras que es posible incorporar para incrementar sus funcionalidades. Entre ellas, algunas presentan desafíos técnicos importantes y requieren de un conocimiento más profundo de la tecnología. En este sentido, se aspira, a futuro, incorporar diversos tipos de contratos, con la finalidad de evaluar distintos tipos de subasta. La implementación actual sólo permite una

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

subasta inglesa ascendente. Algunos tipos de subasta que serán eventualmente analizados son: subasta holandesa, subasta de Vickrey y la subasta doble continua.

Por otro lado, se identificaron desafíos clave para la evolución de la plataforma: la migración a redes '*Layer 2*' como Polygon o Arbitrum, para reducir los costos de transacción; la optimización de contratos inteligentes para minimizar el consumo de gas; y la implementación de un sistema de intercambio de tokens digitales, representativos de unidades de energía transadas.

## Referencias bibliográficas

ApeWorX LTD. (2024). ApeWorx user guides—Overview [Documentación]. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de https://docs.apeworx.io/ape/latest/userguides/ape/userguides/quickstart.html

Chen, T., Li, X., Luo, X., & Zhang, X. (2017). Under-optimized smart contracts devour your money. En 2017 IEEE 24th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER) (pp. 442–446). IEEE. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7884650

FastAPI. (s.f.). FastAPI. Recuperado el 13 de agosto de 2025 de https://fastapi.tiangolo.com/

Iglesias, M. J. F. (2023). Blockchain. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/FQ3P9

John, K., Kogan, L., & Saleh, F. (2023). Smart contracts and decentralized finance. Annual Review of Financial Economics, 15(1), 523–542.

Lecuit, J. (2019). La seguridad y la privacidad del blockchain, más allá de la tecnología y las criptomonedas. Real Instituto Elcano, 49.

Loporchio, M., Di Francesco Maesa, D., Bernasconi, A., & Ricci, L. (2024). Comparing Ethereum fungible and non-fungible tokens: an analysis of transfer networks. Applied Network Science, 9(1), 72.

Martin, R. C. (2017). Clean architecture: a craftsman's guide to software structure and design. Prentice Hall Press.

Muhtadi, A., Pandit, D., Nguyen, N., & Mitra, J. (2021). Distributed energy resources based microgrid: Review of architecture, control, and reliability. IEEE Transactions on Industry Applications, 57(3), 2223-2235.

Neira Suárez, B. (2022). Origen y definición de las criptomonedas: el Bitcoin y los Non Fungible Tokens (Tesis de grado). Universidad de Oviedo.

Noriega C., G. A. (2021). ¿Blockchain es más que criptomonedas?, presente y futuro. Universidad Externado de Colombia. https://bdigital.uexternado.edu.co/entities/publication/e28fe339-2f89-467f-aa4a-f46c860b39c9

Solidity Team. (s.f.). Solidity—Solidity 0.8.30 documentation. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de https://docs.soliditylang.org/en/v0.8.30/

Taherdoost, H. (2023). Smart contracts in blockchain technology: A critical review. Information, 14(2), 117.

TinyDB. (s.f.). TinyDB documentation. Recuperado el 5 de agosto de 2025 de https://tinydb.readthedocs.io/

Wan, S., Lin, H., Gan, W., Chen, J., & Yu, P. S. (2024). Web3: The next internet revolution. IEEE Internet of Things Journal, 11(21), 34811-34825.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Sistemas de información e informática
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de posgrado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Modelo de detección de perturbaciones en redes de media tensión mediante DEVS

## Model for detecting disturbances in medium voltage networks using DEVS

Presentación: 30/10/2025

**Christian German Schwab**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
schwab1024@yahoo.com.ar

### Resumen

La detección de perturbaciones en una red de media tensión es realizada por sistemas de control y adquisición de datos que son de acceso exclusivo de las Empresas concesionarias del servicio eléctrico. Aquellos Organismos, de orden público o privado, que tengan por objeto la regulación y control del servicio eléctrico, requieren canales indirectos para el acceso a esta información. El objetivo de este trabajo es presentar un modelo de simulación que permita detectar la ubicación de dichos incidentes en redes de media tensión, garantizar la confiabilidad de las mediciones obtenidas, así como también, presentar la implementación de dicho modelo en una plataforma de simulación concreta.

**Palabras clave:** Detección, perturbaciones, calidad, redes.

### Abstract

Disturbance detection in a medium-voltage network is performed by control and data acquisition systems that are exclusively accessible to the electric service concessionaires. Public and private organizations responsible for regulating and controlling the electric service require indirect channels for accessing this information. The objective of this work is to present a DEVS-based model that allows detecting the location of such incidents in medium-voltage networks, as well as ensuring the reliability of the measurements obtained, as well as present the implementation of this model on a specific simulation platform.

**Keywords:** Detection, disturbances, quality, grids, electric, DEVS.

## 1. Introducción

La detección de perturbaciones en una red de media tensión es importante para las empresas distribuidoras del servicio eléctrico, pero también para organismos regulatorios nacionales y de los propios estados provinciales. Para las empresas de distribución eléctrica es relevante porque es una actividad tendiente a la mejora de la calidad del servicio, y representa para la empresa una reducción de costos por mantenimiento, y para los usuarios del servicio menores costos por daños a dispositivos. En el caso de los organismos regulatorios es relevante, porque permite identificar la parte de la red que requiere mayor esfuerzo por parte de la empresa para mejorar la calidad técnica o de producto. Para esto, las empresas del sector eléctrico tienen implementados sistemas de control y adquisición de datos que permiten detectar perturbaciones y automatizar maniobras y operaciones, tendientes minimizar los costos asociados a los efectos de estas perturbaciones. Los sistemas de control acceden a la medición interna de los componentes electromecánicos a fin de informar los datos a las gerencias que están encargadas del control de calidad de servicio.

Todo organismo, ya sea públicos o privados, fuera de las empresas que presentan el servicio, no tiene acceso directo a los sistemas anteriores. Esto implica que para el acceso a dicha información se requiere de un canal secundario de acceso. Los

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

datos, a su vez, tienen un nivel de disponibilidad muy baja, lo que dificulta la tarea de regulación. Cuando los datos están disponibles y se realiza su intercambio, su interpretación siempre está sujeta al modelo de datos cada empresa; por lo que se deben reinterpretar al momento de su procesamiento para poder obtener conclusiones. Una forma de mitigar la baja disponibilidad de estos canales es, mediante la instalación de sensores en puntos representativos de la red, que midan los parámetros de forma directa y los reporten a centros de procesamiento del organismo regulador.

La finalidad de este trabajo es presentar un modelo que permita detectar perturbaciones eléctricas en una red de media tensión mediante el análisis de los niveles de tensión que caracterizan a cada segmento de red. Para la especificación del modelo se emplea el formalismo Discrete Event System Specification (DEVS) (Zeigler et al., 2018), siendo los modelos finales implementados en DEVS-Suite (ACIMS, 2023). El modelo resultante no solo contribuye a la detección de perturbaciones, sino que además facilita la información de los parámetros de operación de una red eléctrica a organismos que no tienen acceso directo a los mismos.

La organización del trabajo es la siguiente. En la Sección 2 se presenta la estructura de los componentes del modelo DEVS y sus funciones generales. En la Sección 3 se presenta el progreso de los resultados obtenidos. En la Sección 4 se presenta una discusión sobre los resultados actuales y el trabajo futuro sobre el modelo. Finalmente, en la Sección 5 se presenta las conclusiones parciales en el desarrollo realizado.

## 2. Métodos

El sistema se representó mediante tres componentes acoplados entre sí. El primer componente (Control) implementa un modelo de control que detecta perturbaciones en una red eléctrica de distribución de media tensión. El segundo componente (Simulador) implementa un modelo de simulación que alimenta al modelo de control. Finalmente, el tercer componente (Registrador) es un componente de registro que recoge los mensajes intercambiados por los dos primeros componentes y los guarda en un archivo para su posterior análisis.

### *2.1. Componente de control*

Para el diseño del componente de control se parte de una simplificación de una red eléctrica de media tensión. Como se puede observar en la Figura 1, esta red está compuesta por una zona de control que abarca un segmento de red en media tensión dado, y por sus componentes que son los segmentos de red en media tensión, pero de un nivel de tensión inferior. Para tener de referencia, los niveles de tensión se pueden encontrar por la reglamentación AEA 95702 (AEA, 2020) aprobada por resolución SRT 11/22 (SRT, 2022), y se subdividen en:

- *Instalaciones de Baja Tensión (BT)*: tensiones iguales o menores a 1 kV.
- *Instalaciones de Media Tensión (MT)*: tensiones mayores a 1 kV. y hasta 33 kV.
- *Instalaciones de Alta Tensión (AT)*: tensiones mayores a 33 kV. y hasta 220 kV.
- *Instalaciones de Extra Alta Tensión (EAT)*: tensiones mayores a 220 kV.

El componente de control, a su vez está compuesto por tres (3) clases de componentes. El primer componente es un modelo DEVS atómico llamado sensor, que se encarga de medir un conjunto de variables de interés que, en el contexto de este trabajo, solo será la medición de la variable tensión. Este componente mide la RMS (Root Mean Square o raíz cuadrada media) instantánea de la red y la almacena en una lista. Cuando existe una lectura desde el medio, el componente realiza las siguientes tareas: realiza una medición, si la lista no está completa, agrega el valor de la medición a la lista, en caso de que la lista este completa elimina el último elemento, y agrega el valor al principio de la lista. Si la lista está completa, realiza un promedio de todos los valores acumulados y lo transmite por su puerto de salida. Después de emitir su valor se pone en espera hasta el siguiente ciclo. Este componente tiene un puerto de entrada y dos puertos de salida. El puerto de entrada es para recibir la lectura del medio. Uno de los puertos de salida, es para trasmitir una tupla cuyo contenido es, el valor promedio calculado y el estado del segmento de red. El otro puerto es para transmitir los valores de estado hacia el componente de registro.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

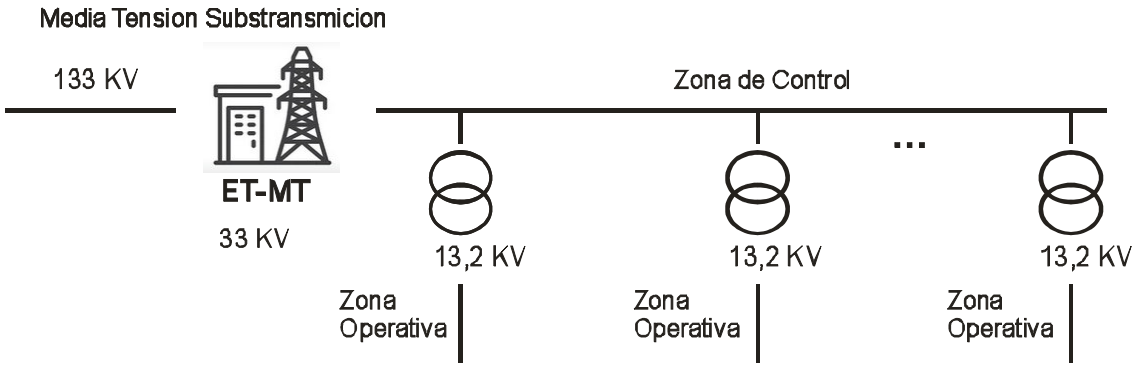



**Figura 1.** Diagrama conceptual de una red de alta tensión.

El segundo componente es un modelo DEVS atómico llamado controlador de segmento. Este componente es el encargado de determinar si el sensor está entregando valores congruentes con las mediciones o si está sufriendo algún tipo de desperfecto. Tiene un puerto de entrada y dos puertos de salida. El puerto de entrada es para recibir la tupla entregada por el sensor. Uno de los puertos de salida es para entregar una tupla que contiene el estado congruente con los valores recibidos al controlador de línea, mientras que el otro es para reportar sus variables de estado al componente de registro. Para determinar la congruencia de los valores recibidos, y así distinguir cuando un sensor está entregando valores según la medición que realiza, de cuando sufre algún desperfecto y entrega valores, que si bien válidos, no se corresponden con la realidad de la variable de interés. Este comportamiento es importante porque no se puede garantizar el funcionamiento óptimo de los sensores el 100% del tiempo. Por lo que cuando ocurre la detección de una perturbación, es deseable saber si es un estado genuino de la red o si es un falso positivo de perturbación. A continuación, veremos algunos casos.

Por ejemplo, supongamos que el sensor mide en una línea 13,2 KV de una línea trifásica en un momento t0 que la RMS se encuentra al 90% de su tensión nominal. En el siguiente ciclo al momento t1, es posible que la lectura sea del 20% de la tensión nominal, con lo que se deduce que está ocurriendo una caída de tensión. Cuando cae la tensión, lo esperable es una de estas situaciones: que se mantenga en el mismo estado, que se recupere a la normalidad, o que se interrumpa el servicio. Lo que no es esperable que en el ciclo inmediato posterior exista una abrupta elevación de tensión.

Un ejemplo complementario, es suponer que el sensor acuse una interrupción y en el ciclo inmediato posterior, se detecte una elevación de tensión, o una caída de tensión abrupta. Para lo anterior es necesario considerar que, la recuperación de un segmento de red durante una interrupción es operada por dispositivos electrónicos automáticos en caso de que la falla sea leve, o personal de campo si la falla es grave (rotura de conductor). Para este trabajo, se considera que la falla por interrupción consiste en la rotura del conductor.

Para modelar el comportamiento descripto en el párrafo anterior, se propone una máquina de estados dependiente del estado del sensor (Figura 2). Cuando el controlador de segmento recibe el estado del sensor, toma la medición y el estado del segmento de red. Si el estado siguiente de la máquina de estado no es error entonces, este componente envía su estado por el puerto de salida. El controlador de segmento puede volver a su estado normal cuando recibe por 5 veces consecutiva la misma entrada.

El tercer componente del componente de control es un modelo DEVS atómico llamado controlador de línea. El controlador de línea recibe el estado de los controladores de segmento y verifica la congruencia del estado de un segmento de red según su ubicación jerárquica. Tiene una entrada por donde recibe los estados de los controladores de segmento directamente acoplados y tiene dos puertos de salida. Por el primer puerto de salida se informa la detección de la perturbación, y por la segunda salida se informa las variables de estado al controlador de registro. Cuando el controlador de línea recibe el estado de alguno de los controladores de segmento, los almacena en una lista. Si la lista no contiene el estado de todos los controladores de segmento, entonces el componente espera hasta la recepción de un nuevo estado Si la lista contiene los estados de cada controlador de segmento entonces verifica su congruencia. Para verificar la congruencia de los estados de cada segmento de red, se toma el estado del controlador de segmento del segmento de red que sea antecesor de los segmentos de red derivados. Es decir, en la Figura 2, el segmento de red de mayor tensi°ón será el segmento de red antecesor, y los segmentos de red después de las subestaciones transformadores serán los segmentos derivados.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

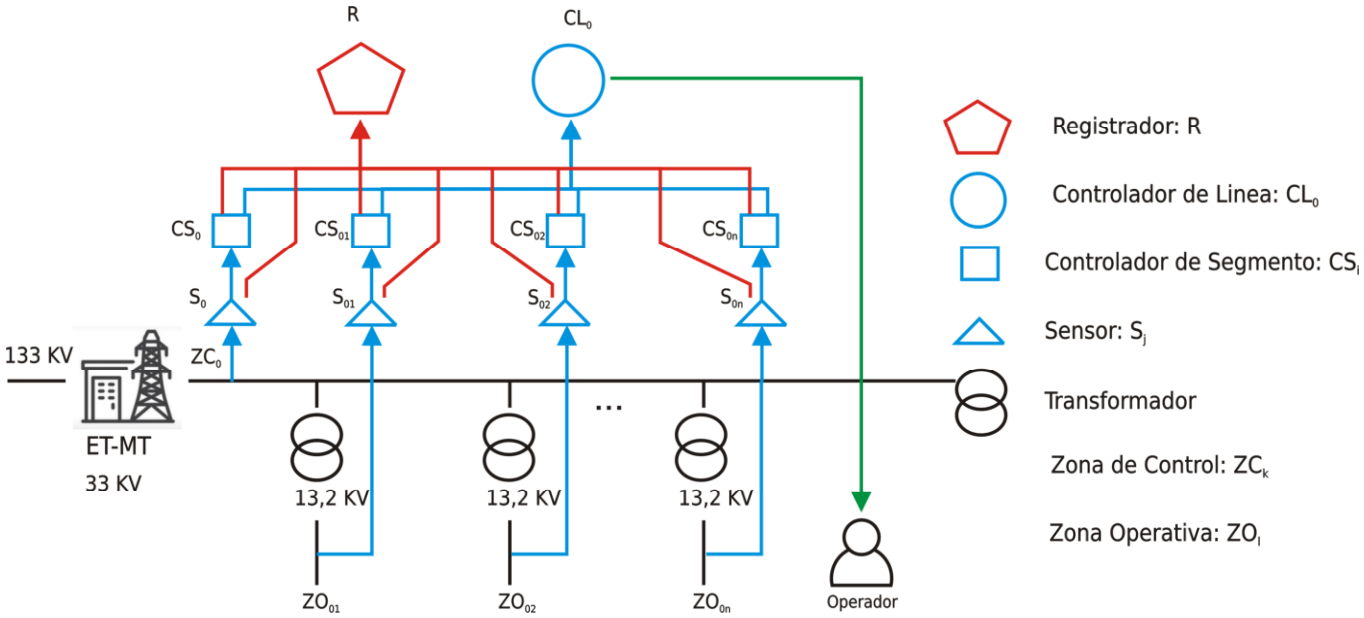



**Figura 2**. Diagrama conceptual de una red de alta tensión con los elementos del componente de control

El controlador de línea calcula la congruencia entre los estados de los segmentos de red de la siguiente manera. Si en el segmento de red antecesor tiene un estado normal, es posible que en los segmentos de red derivados existan los estados, normal, baja tensión, alta tensión o interrupciones. Esto último porque se supone que existe una o varias perturbaciones aguas abajo en la red. Si en el segmento de red antecesor existe una perturbación, es posible que en los segmentos de red derivados existan estados congruentes con la perturbación del antecesor. Por ejemplo, si en el segmento de red antecesor presenta una interrupción del servicio, es congruente que en los segmentos de red derivados se propague esa interrupción. Un ejemplo de una situación incongruente, tomando el caso anterior es que, en los segmentos de red derivados exista un estado normal. Esta situación es incongruente porque, si en el segmento de red antecesor no hay tensión, por transitividad no es posible que en los segmentos derivados exista tensión.

### *2.2. Componente Simulador*

El componente Simulador es un modelo DEVS acoplado que tiene la función de simular una red eléctrica. Está diseñado para ser una simplificación de una red eléctrica real, destinado a alimentar de valores al componente de control para probar su efectividad. Está compuesto por dos clases de componentes. La primera es la clase controlador de *Generación* y la segunda es la clase controlador de *Transformación*.

El controlador de *Generación* es un modelo DEVS acoplado que está compuesto a su vez por un modelo DEVS atómico llamando *Generador Eléctrico*, un modelo DEVS atómico llamado *Generador de Falla* y un modelo DEVS atómico llamado *Generador de Reposición*. *Generador Eléctrico* es un componente que tiene la función de generar un valor de tensión en el puerto de salida del modelo controlador de *Generación*. *Generador de Falla* es un componente que tiene la función de generar una perturbación en un tiempo aleatorio siguiendo una distribución de Weibull. La generación de la falla consiste en variar aleatoriamente el porcentaje de tensión entregado por el *Generador Eléctrico*.

El controlador de *Transformación* es un modelo DEVS acoplado que está compuesto a su vez por un modelo DEVS atómico llamado *Transformador Eléctrico*, un modelo DEVS acoplado Generador de Falla y un modelo DEVS acoplado *Generador de Reposición*. *Transformador Eléctrico* es un componente cuya función es realizar la transformación del valor que recibe como entrada y enviar el resultado a su puerto de salida.

### *2.3. Componente Registrador*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

El componente *Registrador* es un modelo DEVS atómico, cuya función es registrar en un archivo toda entrada que reciba. Cuando inicia se mantiene en espera hasta que recibe una entrada en su puerto de entrada. Cuando se recibe se guarda la entrada del puerto en un archivo y luego queda a la espera de un nuevo registro.

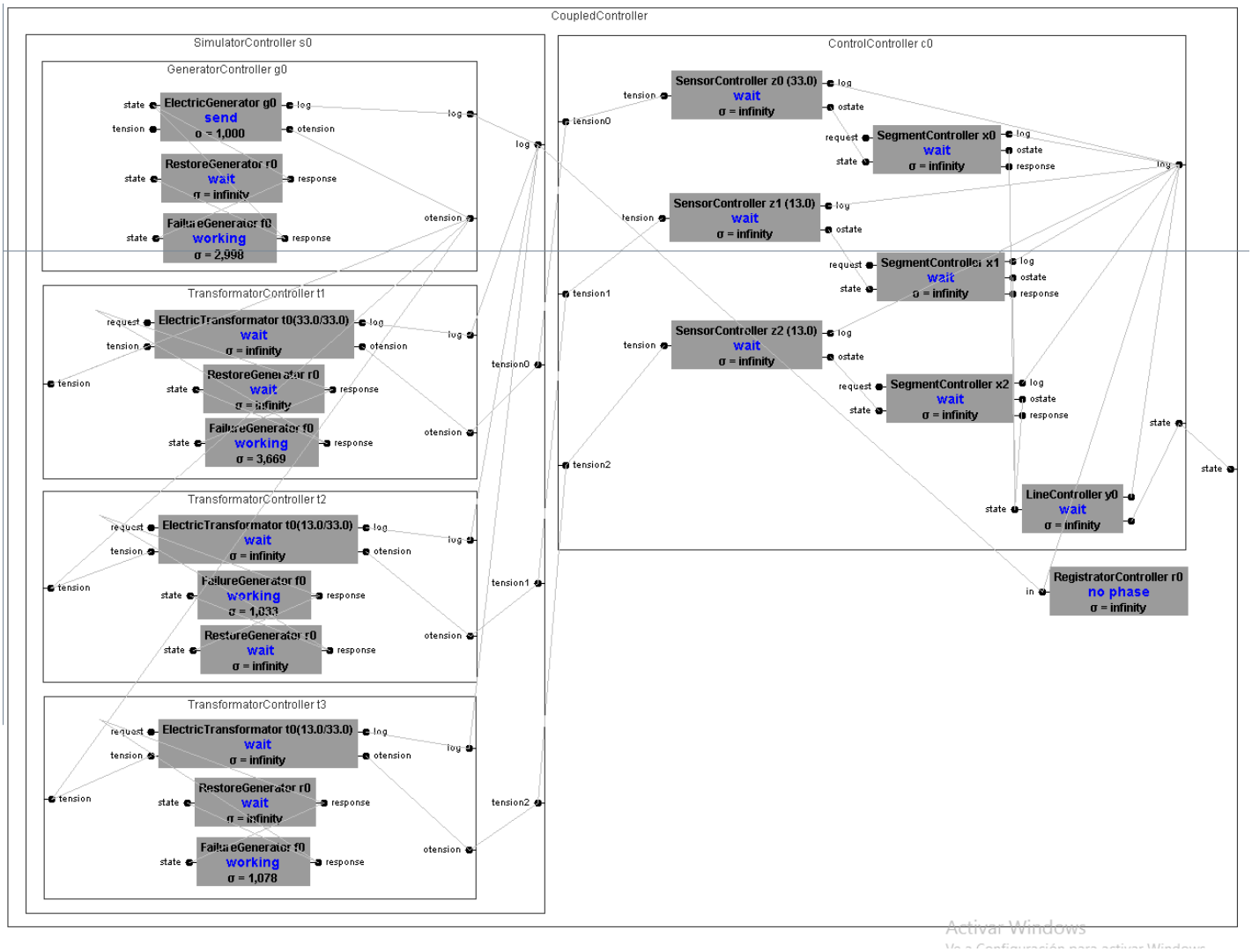



**Figura 3**. Modelo DEVS implementado en DEVS-Suite.

## 3. Resultados

A partir de la especificación anterior se obtuvo los siguientes resultados:

1. Un modelo DEVS acoplado que permite simular el funcionamiento aproximado de una red eléctrica en media tensión, reducida a segmentos de red en una jerarquía de dos niveles (33KV y 13,2 KV).
2. Un modelo DEVS acoplado que describe un sistema de detección de errores que permite ubicar de manera aproximada una serie de perturbaciones en una red, en las condiciones comentadas en el párrafo anterior, tal como se plantearon los objetivos del trabajo.
3. Una implementación de los modelos DEVS diseñados en DEVS-Suite versión 7 (ACIMS, 2023), la cual se utilizará como base para continuar con la aproximación de la descripción de una operación real de una red eléctrica (Figura 3).
4. Una estimación del tiempo entre fallas usando una distribución de probabilidad Weibull.

## 4. Discusión

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En esta sección se plantea la discusión sobre algunos resultados obtenidos por el modelo anterior. Particularmente se aborda la forma en la que se obtuvieron las distribuciones de probabilidad para el cálculo del tiempo entre falla, el cálculo del tiempo de reposición entre fallas, y la distribución de probabilidad de la ocurrencia de las distribuciones.

Para el cálculo de la distribución de probabilidad de la ocurrencia entre fallas, es posible obtener los parámetros de la distribución a partir de conjunto de datos de interrupciones de empresas distribuidoras eléctricas. La distribución que según la literatura (Jardine y Tsang, 2013) mejor modela estos eventos es la distribución de probabilidad Weibull. Por su parte, para el cálculo de la distribución de probabilidad del tiempo de reposición entre fallas, falta identificar la distribución de probabilidad que mejor describa la situación. Se tiene la misma situación para el cálculo de probabilidad para la determinación de la ocurrencia del tipo de perturbación. Lo anterior no está considerado en el modelo.

## 5. Conclusiones

Este trabajo consiste en el desarrollo e implementación de un modelo basado en DEVS que permita detectar perturbaciones en una red eléctrica de media tensión y garantizar que dichas mediciones sean congruentes con la configuración de la red a lo largo del tiempo. A partir de lo expuesto en este trabajo, se puede concluir que es factible la construcción de un modelo DEVS que describa la ocurrencia de perturbaciones eléctricas en una red de media tensión. Asimismo, es posible la utilización de un modelo DEVS que permita la identificación del momento y lugar de la ocurrencia de la perturbación, cumpliendo con el objetivo principal del trabajo.

Tomando en consideración que esta presentación corresponde a un trabajo en proceso, la conclusión respecto del segundo objetivo está pendiente de verificación.

## Referencias bibliográficas

ACIMS (2023). DEVS-Suite, v7.0.0.0. Disponible en: https://acims.asu.edu/devs-suite/

Jardine, A., Tsang, A. (2013). Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications. CRC Press

Superintendencia de Riesgos de Trabajo (2022). Resolución 11/22, Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

Zeigler, B., Muzy, A., Kofman, E. (2018). Theory of Modeling and Simulation: Discrete Event & Iterative System Computational Foundations – Third Edition. Londres: Academic Press.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Sistemas de información e informática
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Generación del modelo computacional para simulación basada en eventos discretos a partir de un modelo de diseño

## Generation of the Computational Model for Discrete-Event Simulation from a Design Model

Presentación: 30/10/2025

**Victoria Elizabeth Meichtry Regner**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
meichtryv4@gmail.com

### Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una herramienta de software (plugin) que implementa un lenguaje de dominio específico (DSL) para modelos de simulación basado en eventos discretos. La gramática del lenguaje se define utilizando el framework Xtext, lo que permite la creación de modelos textuales con sintaxis y estructura definidas. Para garantizar la corrección semántica de los modelos, se implementaron restricciones de validación en Java. La principal contribución de este proyecto radica en la transformación automática de estos modelos en código ejecutable. Se utiliza el motor de transformación de modelos Acceleo, para que a partir del metamodelo Ecore (derivado de la gramática) se genere un conjunto de clases Java que constituyen un motor de simulación. Este motor permite ejecutar los modelos definidos por el usuario, simular su comportamiento dinámico y analizar los resultados.

**Palabras clave:** modelos, traducción, simulación

### Abstract

This project presents the development of a software tool (plugin) that implements a domain-specific language (DSL) for discrete-event simulation models. The grammar is defined using the Xtext framework, allowing the creation of textual models with defined syntax and structure. To ensure the semantic correctness of the models, validation constraints were implemented in Java. The main contribution of this project lies in the automatic transformation of these models into executable code. The Acceleo model transformation engine is used to generate a set of Java classes that constitute a simulation engine from the Ecore metamodel (derived from the grammar). This engine allows user-defined models to be executed, their dynamic behavior to be simulated, and the results to be analyzed.

**Keywords:** models, transformation, simulation

## 1. Introducción

La simulación basada en eventos discretos es una técnica utilizada para analizar y predecir el comportamiento de sistemas complejos. Sin embargo, para poder simular, es necesario tener previamente un modelo. El proceso de desarrollo de modelos de simulación a menudo se centra en la implementación computacional directa, descuidando las inconsistencias que se pueden generar en etapas previas (modelo conceptual y modelo de diseño), lo que puede llevar a modelos mal estructurados, difíciles de validar y con poca trazabilidad (Robinson, 2014). Para abordar este problema, recientemente los esfuerzos del grupo de trabajo se han enmarcado en estructurar el proceso de modelado para simulación basada en eventos discretos (DES), siguiendo el conjunto de artefactos propuesto por Robinson.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Este artículo se centra en la materialización del artefacto modelo computacional, el cual toma información del modelo de diseño y luego, a partir de reglas de transformación, permite obtener la implementación en software o modelo computacional asociado. Para esto, se propone una herramienta dividida en tres módulos principales. En primer lugar, tenemos el módulo de gramática, necesario para la representación textual del modelo de diseño. En segundo lugar, el módulo de restricciones, útil para realizar las validaciones necesarias para que el modelo sea correcto. Por último, se presenta módulo de transformación modelo-código el cual realiza la traducción desde el modelo de diseño al modelo computacional. Los módulos de gramática y restricciones han sido desarrollados previamente, por lo que en este trabajo se desarrolla el módulo de transformación modelo-código.

Este proyecto tiene como motivación principal automatizar y simplificar muchas de las tareas complejas involucradas en la creación de modelos de simulación; facilitar el proceso de modelado, el mantenimiento y la actualización; mejorar la calidad de las decisiones, al permitir especificar el modelo de diseño y simularlo; liberar tiempo, al trasformar el modelo de diseño en el modelo computacional.

El trabajo se desarrolla detalladamente en las siguientes secciones. En la sección 2 se explican los fundamentos teóricos del modelado y simulación, en la sección 3 se describe el módulo de transformación modelo-código. Luego, en la sección 4 se muestra un ejemplo que permite conocer la forma de uso del framework y las ventajas que presenta. Por último, la sección 5 está dedicada a las conclusiones y trabajos futuros.

## 2. Fundamentos teóricos y herramientas

Según Robinson, como se puede ver en Fig.1, el proceso de modelado en el área de simulación consiste en distintas etapas. El proceso de modelado es iterativo, por lo que se repite tantas veces como sea necesario hasta obtener una buena aproximación del modelo que se está buscando según el objetivo de estudio y los conocimientos previos.

Este proyecto se centra en las actividades para la obtención de las etapas “modelo de diseño” y “modelo computacional” en el proceso de modelado, proponiendo el desarrollo de una herramienta que permitirá obtener la definición de modelos computacionales a partir de modelos de diseño para simulaciones basadas en eventos discretos.

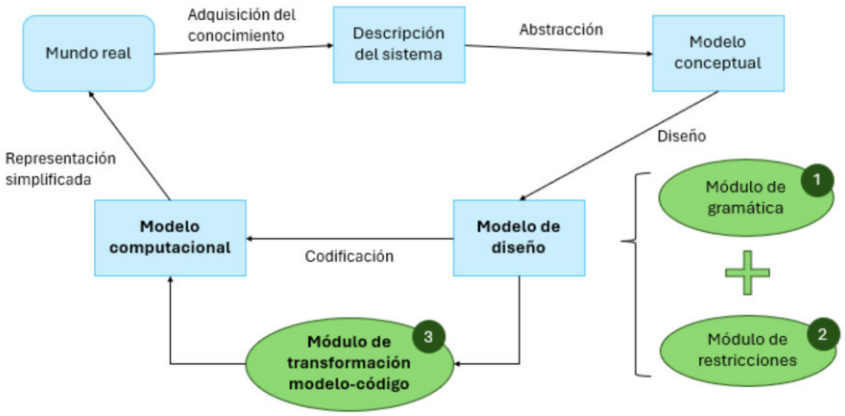



**Figura 1**. Esquema del proceso de simulación y su relación con la herramienta desarrollada.

En primer lugar, como se puede observar en la Fig. 1. se presenta el desarrollo de un Lenguaje de Dominio Específico (DSL) textual para DES, cuya gramática se implementó utilizando el framework Xtext. Esta gramática permite definir de manera estructurada y formal tanto la estructura estática (entidades, atributos, eventos, actividades, retardos) como la dinámica (efectos de los eventos primarios mediante diagramas de actividades PlantUML) de un modelo que se pretende simular. Para la validación del lenguaje, se definieron restricciones con el fin de determinar si un modelo es válido o no. Este conjunto de restricciones fue realizado con lenguaje Java. Como consecuencia de esto, se obtiene un modelo de diseño correcto.

Luego de realizar la definición del lenguaje y la validación, nos centramos en la transformación de la gramática (modelo de diseño) hacia el modelo computacional, obteniendo así trazabilidad a través de los modelos. Por lo tanto, el foco central de este trabajo reside en la automatización de la generación del código fuente ejecutable del modelo computacional a partir de una instancia válida del modelo de diseño. Esto se logra mediante una traducción de modelo-a-código implementada con

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Acceleo, que toma el metamodelo Ecore (derivado de la gramática Xtext) y genera automáticamente un conjunto completo de clases que constituyen un motor de simulación basado en eventos discretos. Este enfoque no solo asegura la fidelidad entre el diseño y la implementación, sino que también reduce la introducción de errores y el tiempo de modelado.

La definición de cada módulo de esta herramienta se ha realizado a través de Eclipse. Eclipse es una plataforma de software que engloba un conjunto de herramientas de programación de código abierto y multiplataforma, diseñadas para facilitar el desarrollo de aplicaciones. Dentro de las herramientas de soporte de dicha plataforma, aquellas que fueron utilizadas en el desarrollo del trabajo corresponden a Xtext y Acceleo.

## 3. Módulo de transformación

A continuación, se toma un fragmento del código para explicar el *módulo de transformación modelo-código*. La plantilla que fue utilizada para traducción de código toma como entrada un modelo Ecore (DESMetamodel.ecore) y genera como salida el código fuente Java de un modelo computacional de simulación.

Para entender el desarrollo de la transformación se muestra en la Fig. 2 la regla de traducción para entidades del modelo de diseño.

```
93  [template public generateEntity(entity : Entity, modelName : String)]
94  [file (modelName.concat('/estadodelsistema/').concat(entity.name.toUpperFirst()).concat('.java'), false, 'UTF-8')]
95  package [modelName/].estadodelsistema;
96
97
98   // Clase que representa la entidad [entity.name/] en el modelo.
99
100 public class [entity.name.toUpperFirst()/] {
111     public [entity.name.toUpperFirst()/]() {
112         super();
113         // Constructor basico
114     }
174 [/file]
175 [/template]
176
```

**Figura 2**. Regla de traducción para definir las entidades del modelo.

El fragmento de código que observamos en Fig. 2, muestra una regla de traducción escrita en el lenguaje de plantillas Acceleo, la cual es la encargada de generar automáticamente el código Java de las clases entidad a partir de las definiciones en el modelo de diseño (gramática).

Realizando un análisis de cada una de las líneas del código, encontramos que, en primer lugar, se define la plantilla *generateEntity*, la cual toma dos parámetros: entidad y nombre del modelo. Siguiente a esto, encontramos el archivo de salida que se va a generar, se construye la ruta de archivo java (toma el nombre del modelo y lo concatena con la carpeta estadodelsistema y el nombre de la entidad con la extensión .java). A continuación, se declara el paquete Java en donde se encontrará la clase que se va a generar.

En la línea 98 se genera un comentario que explica el propósito de la clase, incluyendo dinámicamente el nombre de la entidad. Luego, se define el constructor de la clase, se genera un constructor público básico y vacío para la clase. Por ultimo, las etiquetas en las líneas 174 y 175 cierran las instrucciones que se abrieron al principio. En esta porción de código, queda oculta la definición de la transformación de atributos, sus respectivos getters y setters y los métodos declarados como funciones en el modelo de diseño.

Luego de entender el uso del lenguaje para la traducción, en la Tabla 1 se muestran los mapeos desarrollados para la transformación del modelo de diseño al modelo computacional.

**Tabla 1**. Transformaciones realizadas para obtener el modelo computacional.

| Modelo de diseño | Modelo computacional | Explicación |
|---|---|---|
| Nombre del modelo | Paquete raíz de la transformación | El nombre del modelo definido en el modelo de diseño se utilizará para especificar el paquete raíz de la transformación en el modelo computacional. |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | |
|---|---|---|
| Entidad | Clase entidad dentro del paquete estadodelsistema | Cada entidad en el modelo de diseño se transforma en una clase que representa una entidad en el modelo computacional y tiene su comportamiento. |
| Atributos | Atributos privados de la entidad | Cada uno de los atributos definidos dentro de una entidad en el modelo de diseño se transforman en atributos dentro de la clase entidad, con su tipo de dato correspondiente. Además, para cada atributo se implementan los getters y setters. |
| Funciones | Método publico dentro de la clase entidad | Cada función definida dentro de una entidad con el cuerpo, tipo de retorno y retorno en el modelo de diseño se transforma en un método ejecutable en el modelo computacional. |
| Actividades | Salida de texto por pantalla | Dentro del modelo de diseño se define que evento inicia la actividad y que evento se da al finalizar la actividad, esto se ve representado mostrando por pantalla un mensaje al ejecutarse el evento de inicio. |
| Demoras/Retrasos/Retardos | Salida de texto por pantalla | Dentro del modelo de diseño se define que evento inicia la demora/retraso/retardo y que evento se da al finalizar la demora/retraso, esto se ve representado mostrando por pantalla un mensaje al ejecutarse el evento de inicio. |
| Eventos (primarios) | Clase evento (el nombre es una concatenación de todos los equivalentes) | Cada evento en el modelo de diseño se transforma en una clase que representa un evento en el modelo computacional. |
| Efecto de los eventos primarios | Anotación @ToDo descripción_efecto | La definición del efecto de cada evento primario en el modelo de diseño se transforma en una anotación @ToDo descripción_efecto en el modelo computacional. |

Esta arquitectura predefinida y el conjunto de reglas de mapeo aseguran que todo modelo de diseño válido se transforme en un esqueleto de software consistente y bien estructurado. El modelador puede concentrarse en implementar solo parte de la lógica necesaria en el modelo computacional, reduciendo así errores y acelerando el proceso de desarrollo.

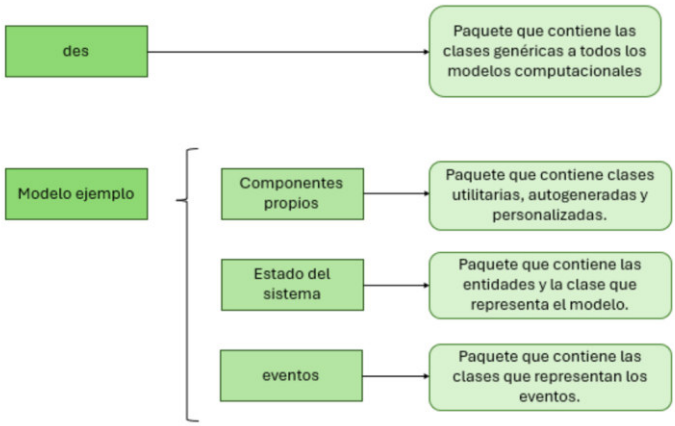



**Figura 3**. Definición de la estructura del modelo computacional

Para entender como está definida la estructura del modelo computacional a continuación se explica a partir de la Fig. 3. cómo se organizan los paquetes y las clases Java.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

El proceso de transformación genera una estructura de dos capas claramente identificadas. En primer lugar, tenemos el paquete *des* que contiene un conjunto de clases genéricas y reutilizables que implementan la lógica central de cualquier motor de simulación por eventos discretos. Estas clases son comunes a todos los modelos generados.

El paquete *des* proporciona el "esqueleto" de la simulación. Contiene las siguientes clases fundamentales:

- *Evento.java*: Es una clase abstracta que representa la noción de un evento discreto. Todas las clases de eventos específicos del modelo generado heredarán de esta. Define atributos clave como el tiempoDeOcurrencia y tiempoQueFaltaParaQueOcurra.
- *ListaDeEventos.java*: Lista que contiene el próximo tiempo en el cual ocurrirá cada tipo de evento. Implementa la lista de eventos futuros. Mantiene todos los eventos programados, ordenados por su tiempo de ejecución. Su método principal (obtenerMasInminente()) extrae el próximo evento a procesar.
- *RelojDeSimulacion.java*: Es una clase que tiene la variable que mantiene el valor actual del tiempo simulado. El reloj avanza de manera irregular, saltando al tiempo del próximo evento en la lista de eventos futuros.
- *EstadoDelSistema.java*: Una clase que incluye colección de variables de estado necesarias para describir el sistema en un punto en el tiempo.
- *ContadoresEstadisticos.java*: Clase dedicada al cálculo y almacenamiento de todas las métricas de performance del modelo. Registra valores como tiempos promedios, máximos, utilizaciones, y acumula sumatorias para sus cálculos finales. Incluye variables que almacenan información estadística referida al comportamiento del sistema.
- *LibreriaDeRutinas.java*: Subprogramas usados para generar observaciones aleatorias desde las distribuciones de probabilidad asociadas al modelo. Provee métodos utilitarios para la generación de números aleatorios según diversas distribuciones de probabilidad (ej.: uniforme, exponencial, normal).
- *GeneradorDeReportes.java*: Subprograma que calcula las estimaciones de las medidas de performance (a partir de los Contadores Estadísticos). Típicamente lee los datos de ContadoresEstadisticos y los presenta en forma de tabla o reporte.
- *RutinaDeInicializacion.java:* Contiene la lógica para inicializar el modelo al tiempo cero: setea el reloj de simulación en cero, inicializa el estado del sistema, inicializa los contadores estadísticos e inicializa la lista de eventos.
- *ProgramaPrincipal.java*: Subprograma que invoca a la Rutina de Tiempo para determinar evento inminente, transfiriendo el control a la Rutina de Evento asociada para que actualice el Estado del Sistema. Es la clase que orquesta la simulación.
- *RutinaDeTiempo.java*: Subprograma que determina el próximo evento desde la Lista de Eventos, actualizando el Reloj de Simulación al instante cuando éste tiene lugar.

Por otro lado, según la estructura que definimos para el modelo computacional tenemos la carpeta *modeloejemplo*. Este paquete, cuyo nombre se deriva directamente del nombre del modelo de diseño, es generado automáticamente y contiene las clases específicas de la simulación, creadas mediante la transformación de los componentes definidos en la gramática. Incluye tres subpaquetes. El primer paquete *modeloejemplo.componentespropios*, este paquete contiene clases utilitarias que son específicas para el modelo generado. Son "propios" porque su estructura y propósito están definidos por las necesidades particulares del modelo de diseño. A saber:

- *ContadoresEstadisticosEjemplo.java*: Hereda de la clase base *des.ContadoresEstadisticos*. Extiende su funcionalidad añadiendo campos y métodos específicos para las métricas de este modelo.
- *GeneradorDeReportesEjemplo.java*: Hereda de *des.GeneradorDeReportes*. Sobrescribe los métodos de generación de reportes para formular los resultados de una manera significativa para el problema de que se está modelando.
- *LibreriaDeRutinasEjemplo.java*: Hereda de *des.LibreriaDeRutinas*. Contiene métodos adicionales para generar variables aleatorias con parámetros específicos definidos en el modelo.
- *ListaDeEventosEjemplo.java*: Hereda de *des.ListaDeEventos*. Esta clase se genera para proporcionar una tipificación específica al modelo. La lista que se genera contiene eventos definidos en el paquete eventos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

El segundo paquete que encontramos es *modeloejemplo.estadodelsistema*, contiene las clases entidad que representan los componentes principales del sistema. Cada clase aquí es una transformación directa de una entidad definida en el modelo de diseño. Además de esto, esta carpeta contiene la clase ModeloDelEjemplo.java la cual hereda des.EstadoDelSistema. En esta clase se ejecuta el comportamiento del modelo. Por último, se define el paquete *modeloejemplo.eventos*, contiene la implementación concreta de los eventos primarios definidos en el modelo de diseño. Cada clase en este paquete hereda de la clase base *des.Evento*.

## 4. Resultado de ejecución y discusión

Como resultado principal, se obtuvo una herramienta de software integral que comprende: (1) un editor de DSL para crear modelos de diseño DES textuales válidos, y (2) un generador de código que produce automáticamente el modelo computacional ejecutable.

Para ilustrar el proceso de transformación de manera concreta, se presenta a continuación el ejemplo que se utiliza en la catedra de Simulación, materia de 4to año de la carrera Ingeniería en Sistemas de Información. El ejemplo consiste en un *mostrador* de despacho de equipaje de un aeropuerto atendido por un empleado, al que arriban *pasajeros* que forman una *cola* para ser atendidos. El modelo de diseño captura las entidades, sus atributos, actividades, retardos y eventos. Entre las entidades del modelo se encuentra la entidad *Cola*, la cual es definida en el modelo de diseño según la Fig. 4(a).

Al aplicar la transformación al modelo de diseño, obtenemos como resultado la Fig. 4(b), la cual representa el modelo computacional para el modelo de diseño “Despacho equipaje”. La regla de transformación generateEntity, mostrada en la Fig. 2, procesa la definición textual que se observa en la Fig. 4(a) y genera automáticamente la clase Java Cola.java que vemos en la Fig. 4(c).

**Figura 4**. (a) Definición de la entidad *Cola*, (b) Resultado luego de ejecutar la traducción y (c) Clase Java que representa la entidad Cola.

La Fig. 4(b) muestra la estructura de paquetes generada, destacando la ubicación de la clase *Cola* y las demás entidades transformadas (Pasajero, Mostrador). La Fig. 4.c. muestra un fragmento del código Java generado para la clase *Cola*, evidenciando la correspondencia directa y la trazabilidad entre el modelo de diseño y el código ejecutable final.

## 5. Conclusiones

Se ha presentado un flujo de trabajo completo para el modelado y simulación basado en eventos discretos. El núcleo de esta contribución es la transformación automática de un modelo de diseño textual, validado semánticamente, en un código de simulación ejecutable mediante el uso de Acceleo.

Se concluye que (1) la definición de una gramática utilizando Xtext es un método efectivo para formalizar el artefacto modelo de diseño para DES, (2) la implementación de restricciones específicas del dominio es importante para guiar al usuario hacia la creación de modelos válidos y (3) la generación de código mediante Acceleo es una técnica viable para automatizar

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

la creación del modelo computacional, asegurando la fidelidad con el diseño, aumentando la productividad y minimizando errores.

Como trabajo futuro, se planea extender la capacidad de la herramienta para reducir al máximo la intervención manual requerida del usuario. Entre los distintos aspectos que se desean abordar encontramos: revisión completa para minimizar el código que deberá introducir el modelador, anotaciones personalizadas para configuraciones avanzadas y el desarrollo de la traducción de las rutinas de evento a diagramas PlantUML.

## Referencias bibliográficas

Blas, M. J., Meichtry, V. E., Gonnet S. (2025). Diseño de Simulaciones basadas en Eventos Discretos. Actas del 2025 Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa.

Eclipse Foundation. (2025). Eclipse IDE. Eclipse. https://www.eclipse.org/

Efftinge, S., Zarnekow, S. (2025). Xtext. https://www.eclipse.org/Xtext/

Obeo Network. (2025). Acceleo. https://www.eclipse.org/acceleo/

Robinson, S. (2014). Simulation: The Practice of Model Development and Use (2nd ed.). Palgrave Macmillan.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Sistemas de información e informática
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Diseño de una arquitectura IoT adaptable con una integración NoSQL/SQL implementada a múltiples sistemas ciberfísicos: caso de un vivero hidropónico

## Design of an adaptable IoT architecture with a NoSQL/SQL integration implemented to multiple cyber-physical systems: case of a hydroponic nursery

Presentación: 30/10/2025

**Juan Ignacio Alaguibe**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
juanialaguibe@gmail.com

### Resumen

Este trabajo presenta una propuesta de arquitectura IoT para entornos industriales, basada en la integración de bases de datos NoSQL y relacionales mediante un servicio API. La captura de datos es realizada por sistemas ciberfísicos y almacenada inicialmente en una base NoSQL para otorgar flexibilidad frente a cambios estructurales, para luego transformarse y consolidarse en una base relacional que asegura integridad y eficiencia en las consultas. Se desarrolló un prototipo en un vivero hidropónico utilizando sensores, Arduino y Raspberry Pi a nivel físico, con InfluxDB y Grafana como tecnologías de soporte. Los resultados evidenciaron las ventajas del modelo híbrido al permitir la incorporación de nuevos sensores sin necesidad de rediseñar la estructura de datos, al tiempo que garantizó consultas rápidas y consistentes para la toma de decisiones. Esta arquitectura ofrece un marco flexible y escalable, con potencial de ser extendido a diversos sistemas ciberfísicos industriales.

**Palabras claves:** arquitectura de Iot, entornos industriales, bases de datos unificadas.

### Abstract

This work presents a proposal of IoT architecture for industrial environments, based on the integration of NoSQL and relational databases through an API service. Data capture is carried out by cyber-physical systems and initially stored in a NoSQL database to provide flexibility against structural changes, then transformed and consolidated into a relational database that ensures integrity and efficiency in queries. A prototype was developed in a hydroponic nursery using sensors, Arduino and Raspberry Pi at the physical level, with InfluxDB and Grafana as supporting technologies. The results highlighted the advantages of the hybrid model by allowing the incorporation of new sensors without the need to redesign the data structure, while ensuring fast and consistent consultations for decision making. This architecture offers a flexible and scalable framework, with the potential to be extended to various industrial cyber-physical systems.

**Keywords:** Iot architecture, industrial environments, unified databases.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

Hoy en día los datos, y por extensión la información, son de los bienes más preciados e importantes al igual que el conocimiento (Rico et al., 2023). En los entornos industriales son vitales para mantener un buen control de los dispositivos y poder tener una rápida y eficiente toma de decisiones a nivel de negocios.

Sin embargo, muchas veces esta cantidad de datos resulta abrumante. En una industria con múltiples dispositivos enviando datos cada segundo, visualizarlos sin procesamiento no suele ser posible a simple vista. Además, se debe considerar que para interpretar estos datos en crudo puede llegar a requerir conocimiento experto del dominio.

Además, no siempre será necesaria la intervención humana para realizar control sobre estos dispositivos. El auge de las inteligencias artificiales y su rápida evolución permiten a día de hoy la automatización de tareas de orden básico, que impliquen acciones mecánicas basadas en análisis de grandes volúmenes de datos.

Actualmente, las arquitecturas más importantes para industria 4.0 son la alemana RAMI 4.0 (Plattform Industrie 4.0, 2018) y al americana IIRA (Industrial Internet Consortium, 2021), siendo la primera la más difundida.

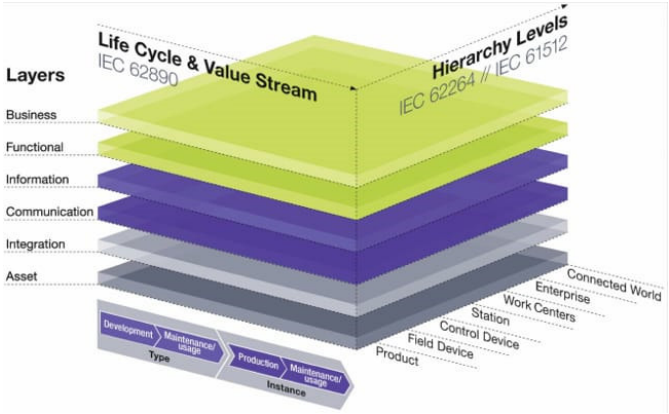



**Figura 1**. Arquitectura RAMI 4.0.

RAMI 4.0 (Figura 1) ofrece el modelo tridimensional arquitectura orientada a servicios que organiza la digitalización a través de tres ejes: la Jerarquía de Fábrica que comprende desde dispositivos hasta la empresa, el Ciclo de Vida del Producto que comprende desde diseño hasta el mantenimiento, y las Capas de Arquitectura que engloban desde los elementos físicos hasta el negocio. El almacenamiento y estandarización de la comunicación orientada a la seguridad por diseño se realizan a través de una interfaz digital llamada Asset Administration Shell.

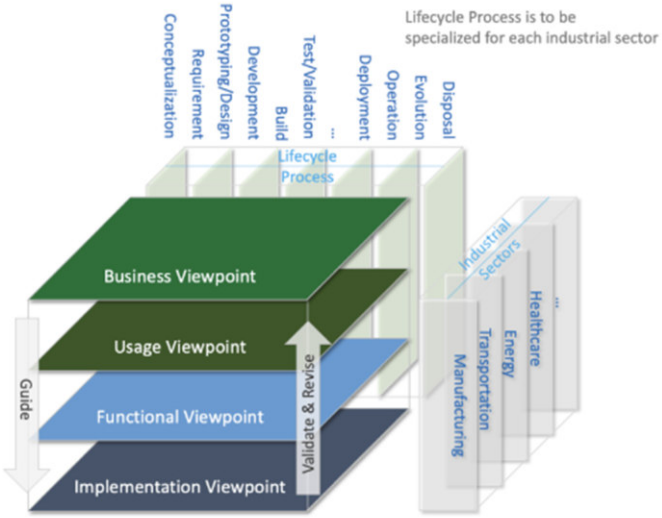



**Figura 2**. Arquitectura IIRA.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La arquitectura IIRA (Figura 2) ofrece un marco de referencia abierto y basado en estándares de sistemas IoT, diseñado como guía de su desarrollo, documentación y despliegue. Se definen cuatro enfoques para abordar las preocupaciones de los stakeholders: Negocio, Uso, Funcional e Implementación. Fomenta interoperabilidad y la confiabilidad.

El objetivo de este trabajo es presentar el diseño de una arquitectura que logré vincular flexibilidad de almacenamiento, eficiencia de consultas y toma de decisiones creativa en entornos industriales, y que logre convivir en el ecosistema de los modelos de referencia impuestos en el mercado, sin tener que ajustarse estrictamente a ellos.

## 2. Materiales y métodos

La arquitectura presentada requiere de elementos de hardware y software por igual (Figura 3). Para la correcta implementación de la misma existen elementos que perciben el "exterior" de la arquitectura, compuesta por los sensores y dispositivos de interés para el sistema.

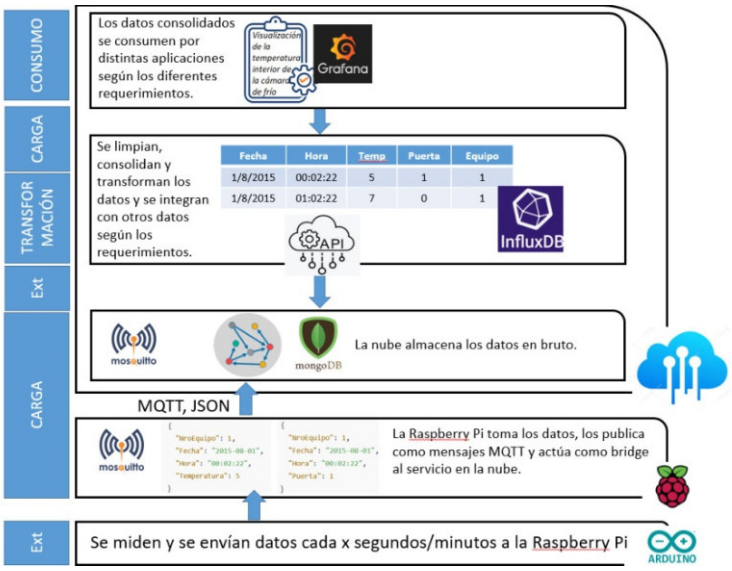



**Figura 3**. Arquitectura de capas propuesta, con tecnologías específicas.

Así, los datos son recuperados del entorno a través de los sensores. Estos datos son recibidos por un Arduino, que es capaz de realizar tareas de control a través de estos datos, para luego enviarlos a una Raspberry Pi en formato JSON. En la Raspberry Pi se realizan tareas de transformación de datos para crear submodelos representativos del dispositivo o sistema de interés. Luego, este modelo es enviado a una base de datos No SQL para su almacenamiento. Este tipo de base de datos nos da flexibilidad para la incorporación de nuevos elementos o la modificación de los sistemas, sin afectar al formato de carga.

Acorde a las reglas del negocio, un servicio de API extrae los datos de la base de datos No SQL y realiza tareas de transformación en los mismos que sean valiosos para los stakeholders. Estos mismos datos se almacenan en una base de datos relacional para cumplir correctamente con los principios ACID y asegurar la integridad de los datos.

Esta arquitectura no utiliza el patrón ETL (extracción, transformación, carga), sino uno ELT (extracción, carga, transformación) para los datos de la base de datos no relacional. Esto agiliza la disponibilidad de los datos, realizando procesos de transformación solo cuando es necesario.

Estos datos son usados por un dashboard o aplicaciones de terceros para su visualización y consumo. Estos datos, que han sido transformados para ser relevantes y útiles, son utilizados para la toma de decisiones que requieran habilidades blandas propias de la mente humana, y para ejercer tareas de control específicas que por motivos de reglas de negocio no puedan ser resueltas por algoritmos de control o inteligencias artificiales.

## 3. Resultados y discusión

Se desarrolló un prototipo de esta arquitectura como soporte didáctico y ejemplo de estudio sobre aplicación de tecnologías, aunque implementado sobre una única base de datos. Las tecnologías usadas fueron un vivero hidropónico

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

(Caliusco et al., 2023; Mattei, 2024) con Arduino y Raspberry Pi, InfluxDB como host de bases de datos en nube, y Grafana como dashboard para visualizar los datos (Figura 4). Traemos este modelo como prototipo de interés ya que permitía subir la información sin estructura fija, pero recuperarlos con sentencias similares a las SQL.

**Figura 4**. Dashboard de Grafana del sistema prototipo.

InfluxDB permite subir los datos declarando campo-valor, similar a la forma en que se suben JSON en MongoDB. Luego, para recuperar los datos se usan sentencias SQL o de Flux, que resultaban de naturaleza relacional.

En contraste con los marcos de referencia existentes, la arquitectura propuesta introduce un nivel adicional de flexibilidad con respecto a RAMI 4.0, mediante el uso de NoSQL y el enfoque ELT, lo cual facilita la rápida adaptación a nuevos sensores y métricas.

Permite la incorporación de nuevos sensores a los sistemas ciberfísicos, resultando en datos sin estructura fija que son aceptados por las bases de datos no relacionales. Así, estos datos se almacenan de forma temporal en una especie de “data pool” hasta ser procesados o indicados como “irrelevantes” por tiempo.

El uso de bases relacionales sirve para almacenar datos relevantes y procesados de forma persistente, otorgando información representativa a los stakeholders y responsables de la toma de decisiones.

La forma en como se visualicen los datos procesados queda a responsabilidad de la tecnología del dashboard. Para elementos que requieran conocer el intervalo de tiempo para determinada acción, puede llegar a ser más representativo conocer elementos de inicio y fin de intervalo antes de una gráfica de tiempo (en referencia al prototipo).

En cuanto a complejidad de búsqueda, la búsqueda de información en bases no relacionales acorde a su tipo y forma de almacenamiento, en su peor caso resulta lineal. Mientras tanto, en las bases relacionales la búsqueda de información resulta más eficiente, ya que al ser datos procesados requieren menos iteraciones para encontrar los datos necesarios, y se puede implementar búsqueda binaria para recuperar un elemento específico a través de alguna condición filtro.

La división de bases de datos, unidas por una API, logra aislarlas una de la otra, por lo que cambios realizados en una no afectaran a la otra. El único componente que debe revisarse es la API, por lo que resulta un punto crítico de la implementación.

Sin embargo, cabe señalar ciertas dificultades a resolver. Una de ellas es decidir como representar los nuevos sensores que se agregan a un sistema. El añadir, por ejemplo, a un sistema un nuevo sensor o métrica debe generar debate desde la toma de decisiones a fin de saber si se necesita modificar la tabla asignada a tal sistema. Puede decidirse entre crear una nueva tabla del sistema, o crear una tabla para el sensor y usar una clave foránea. La responsabilidad de solucionar esta situación a nivel arquitectura es la API.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 4. Conclusiones

La arquitectura presentada, a nivel teórico, logra satisfacer estándares de flexibilidad y robustez para gestionar datos industriales. Separar las bases de datos permite aprovechar las ventajas de cada una, y el servicio de API el combinarlas de forma coherente.

Además, permite una futura implementación de inteligencia artificial de forma transversal. Esto en busca de automatizar procesos complejos o reglas de negocios. Dejando como producto final datos procesados al factor humano, para aprovechar las capacidades mentales con una interfaz cómoda, que evita la sobrecarga de información para la persona.

El prototipo desarrollado (Figura 4), aunque con una sola base de datos y orientado a series de tiempo, evidenció las ventajas de un método de carga de datos similar a como funciona en bases no relacionales (como MongoDB) y recupereración similar a las sentencias SQL. Los datos presentados en el dashboard daban una vista clara de la evolución de los valores a través del tiempo, y Grafana permite agregar valor agregado en ciertos aspectos (como barras celestes para indicar el momento en que se activa).

Sin embargo, es necesario señalar ciertos desafíos para futuras investigaciones. Entre estas encontramos la necesidad de decidir a nivel implementación si redefinir tablas al agregar nuevas métricas, o la alta dependencia de la API.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Se agradece de manera particular al Grupo de Investigación para la Educación de la Ingeniería (GIEDI) y al Grupo Interdisciplinario de Transformación Digital Aplicada (GITDA).

## Referencias bibliográficas

Caliusco, M. L., Orué, M. y Mattei, A. (2023, agosto). “Laboratorio Autocontenido Hidropónico 4.0”. *Actas del VIII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica – III Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria*, Santa Fe, Argentina, 370-380.

Industrial Internet Consortium. (2021). *The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture* (Versión 1.8). Object Management Group. Disponible en https://www.iiconsortium.org/IIRA.htm

Mattei, A. (2024). *Autonomous Hydroponic Laboratory (AHL): Development of an I4.0-compliant product*. Tesis de Maestría, University Emen/Leer.

Plattform Industrie 4.0. (2018). *Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) – An Introduction*. Disponible en https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html

Rico, M., Caliusco, M. L., Galli, M. R. y Taverna, M. L. (2023). “Revisión del significado del concepto de Industria 4.0 y los desafíos asociados a las tecnologías y sistemas de información”. *Revista Eletrônica Argentina-Brasil de Tecnologias da Informação e da Comunicação*.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Sistemas de información e informática
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Diseño e implementación de un prototipo de un sistema “Single Sign-On” (SSO) para la Facultad Regional Santa Fe (FRSF), UTN

## Design and implementation of a prototype of a ‘Single Sing-On’ system for the Facultad Regional Santa Fe (FRSF), UTN

Presentación: 30/10/2025

**Nahuel Agustín Nuñez**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Sant Fe, Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Sistemas de Información (CIDISI), Santa Fe, Argentina
nnunez@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

Los sistemas de autenticación centralizados o ‘Single Sign-On’ (SSO) son actualmente un mecanismo común de autenticación de usuarios, cuando estos deben acceder a diferentes sistemas y se les procura facilitar el acceso a estos sistemas sin tener múltiples credenciales de acceso. En la Facultad Regional Santa Fe, se presenta esta situación, y como una solución se propuso un proyecto de grado que defina los lineamientos para implementar un SSO con los recursos tecnológicos que cuenta la Facultad. En el presente trabajo se muestra los avances que se tienen hasta el momento.

**Palabras clave:** Single Sign-On, SSO, autenticación

### Abstract

Centralized authentication systems or single sign-on (SSO) are currently a common mechanism for user authentication when users need to access different systems and are encouraged to facilitate access to these systems without having multiple login credentials. This situation arises at the Santa Fe Regional Faculty, and as a solution, a thesis project was proposed that defines the guidelines for implementing SSO with the Faculty's technological resources. This paper presents the progress made to date.

**Keywords:** Single Sign-On, SSO, authentication

## 1. Introducción

En la actualidad, la Facultad Regional Santa Fe (FRSF) posee distintos sistemas de información, los cuales implementan su propio sistema de autenticación con sus respectivas credenciales, lo que dificulta el acceso de los usuarios al tener que gestionarlas a todas ellas. Para simplificar la gestión de *credenciales de acceso*, se propone unificar la ‘autenticación’ de los usuarios diseñando e implementando un sistema Single Sign-on (SSO), donde se utilice solo un conjunto de credenciales que pueda ser compartido por todas las aplicaciones.

Las capacidades requeridas para el ‘Sistema de Single Sign On’ (SSO) son: 1) Debe permitir *autenticar* a un usuario a través de su identificación de usuario y contraseña; 2) Debe mostrar al usuario todos los sistemas a los que tiene acceso una vez autenticado; 3) Debe poder ser invocado por un sistema autorizado para validar credenciales; 4) Debe poder transferir el acceso a un sistema autorizado para el usuario con las credenciales de este.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En el contexto de la FRSF todos los integrantes de la comunidad universitaria deben tener un 'cuenta de correo institucional' que se genera en el servidor de correo institucional Outlook, utilizando una base de datos de usuarios en un Azure Active Directory (AD).

La propuesta de este trabajo es diseñar un Sistema SSO utilizando esta base de usuarios AD, aprovechando las credenciales existentes.

## 2. Investigación preliminar

Establecido el objetivo del proyecto, se plantea un proceso de investigación de los conceptos y tecnologías involucradas, de manera de comprender claramente lo que un SSO significa, los procesos y tecnologías normalmente utilizadas, para, posteriormente seleccionar las más adecuadas para el contexto planteado.

Los objetivos de las actividades de investigación inicial propuestas fueron:

- Definición de Autenticación.
- Single Sign On: significado y uso.
- Protocolos de autenticación: más utilizados, comparación.
- Soluciones actuales: herramientas y tecnologías.
- Situación actual de UTN FRSF.

### 2.1 *Autenticación*

La autenticación es un término que se refiere al proceso de comprobar la autenticidad de un hecho o documento. En informática, este término está asociado con la verificación de la identidad de un usuario. Normalmente, un usuario prueba su identidad proporcionando sus credenciales, es decir, cualquier documento, objeto o estructura de datos que avala la identidad de la persona mediante algún método de confianza acordadas previamente (RAE).

### 2.2. *Single Sign On: significado y uso*

El Single Sign-On (SSO) o inicio de sesión único es un tipo de autenticación en la que un usuario inicia sesión en un sistema y obtiene automáticamente acceso a otros servicios. Es ampliamente utilizado en entornos organizacionales donde los usuarios requieren acceso a varias herramientas a diario, evitando la necesidad de recordar diferentes credenciales para cada aplicación.

La implementación del SSO consiste en la definición de un servicio central de autenticación en el que se basan las aplicaciones cuando un usuario se conecta. En este enfoque, si un usuario no autenticado solicita acceso a una aplicación que requiere información de identidad, la aplicación en cuestión redirige al usuario al servicio central. En este servidor, el usuario se autentica y es redirigido a la aplicación original autenticado.

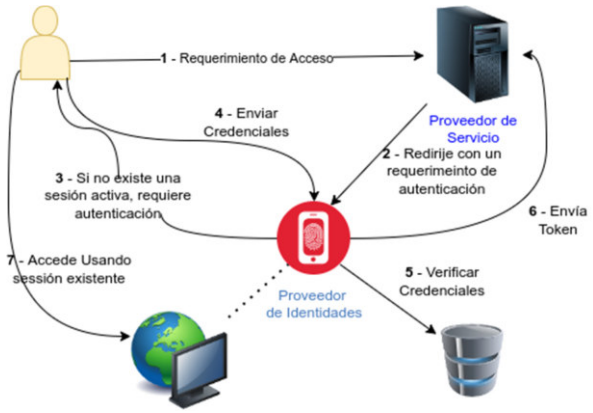



**Figura 1**. Proceso de SSO.

Después de un tiempo, si ese mismo usuario pasa a otra aplicación que también requiere información de identidad y que depende del mismo servicio central para realizar la autenticación del usuario, la segunda aplicación puede aprovechar la sesión que el usuario inició al iniciar la sesión en la primera aplicación. Este proceso se muestra en la Figura 1.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

2.3 *Protocolos de autenticación*

2.3.1 LDAP / LDAPS

Lightweight Directory Access Protocol (LDAP) es un protocolo de aplicación de código abierto que permite que las aplicaciones accedan y autentiquen información específica del usuario en los servicios de directorio.

LDAP es el idioma que comprende Microsoft Active Directory, para acceder o autenticar cualquier dato almacenado en Active Directory (AD).

2.3.2 OAuth 2.0

OAuth 2.0 es un protocolo abierto de autorización que permite a una aplicación obtener acceso limitado a recursos de un usuario en otro servicio, sin necesidad de manejar directamente las credenciales del usuario. En lugar de compartir usuario y contraseña, se utilizan tokens de acceso emitidos por un servidor de autorización. Aunque OAuth 2.0 fue diseñado principalmente para autorización, puede complementarse con OpenID Connect (OIDC) para agregar una capa de autenticación estandarizada. Este conjunto se ha convertido en la opción más utilizada en la actualidad para implementar soluciones de inicio de sesión único (SSO) en aplicaciones web y móviles.

## 3. Solución propuesta

Para la prueba de implementación de un servicio de SSO se seleccionan las siguientes herramientas:

3.1 *Tecnologías a utilizar*

3.1.1 Protocolos.

- LDAPS (Lightweight Directory Access Protocol Secure): para la comunicación segura con el servidor Active Directory institucional.
- OAuth 2.0: protocolo de autorización que permite delegar credenciales y emitir tokens de acceso.
- OpenID Connect (OIDC): extensión de OAuth 2.0 que agrega capa de autenticación, necesaria para habilitar el inicio de sesión único (SSO) entre aplicaciones.

3.1.2 Frameworks y librerías.

- Spring Boot: framework base para desarrollar el servidor de autenticación.
- Spring Security: librería de seguridad de Spring para gestionar autenticación y autorización.
- Spring LDAP: módulo que simplifica la integración de aplicaciones Spring con servidores LDAP/Active Directory.
- Spring Authorization Server: proyecto oficial de Spring que implementa un servidor de autorización compatible con OAuth 2.0 y OpenID Connect.

3.1.3 Consideraciones.

Todas las aplicaciones que utilicen SSO deben estar registradas en el Servidor de Autenticación. Se utiliza Authorization Code como flujo por defecto.

3.2 *Arquitectura*

La solución planteada se basa en la implementación de un servidor central de autenticación que actúe como intermediario entre los distintos sistemas internos de la UTN FRSF y el Active Directory (AD) institucional. Este sistema recibirá las solicitudes de autenticación de las aplicaciones, autenticará las credenciales ingresadas por los usuarios contra el AD, y devolverá los tokens de acceso a las aplicaciones cliente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

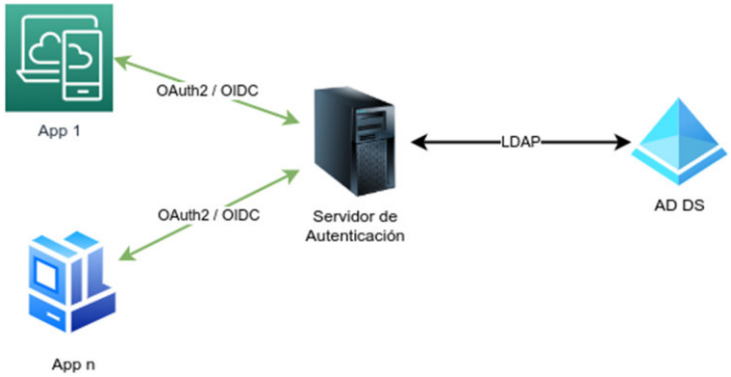



**Figura 3**. Arquitectura para SSO

En el diagrama de la Figura 3 se representa la siguiente estructura: aplicaciones clientes, ubicadas en el lado izquierdo (se comunican con el Servidor de autenticación en lugar de directamente contra el AD DS), el servidor de Autenticación, ubicado en el centro (gestiona el flujo de autenticación, los tokens y sesiones de los usuarios) y el Active Directory (AD), de la facultad, que almacena las credenciales del usuario

3.3 *Flujo de autenticación propuesto*

El funcionamiento del sistema puede describirse en las siguientes etapas:

a) Acceso inicial a una aplicación: el usuario intenta ingresar a una de las aplicaciones internas de la facultad.

b) Redirección al Servidor de Autenticación: la aplicación cliente no valida directamente las credenciales, sino que redirige al usuario hacia el Servidor de Autenticación para delegar el proceso de login.

c) Ingreso de credenciales: el Servidor de Autenticación muestra una pantalla centralizada de login. El usuario introduce su correo institucional y contraseña.

d) Validación contra Active Directory: El Servidor de Autenticación se conecta al AD de la facultad mediante el protocolo LDAPS, validando que las credenciales ingresadas sean correctas.

e) Generación de tokens: si la autenticación es exitosa, el Servidor de Autenticación inicia el flujo de OAuth 2.0 / OpenID Connect : Authorization Code. Se emiten tokens de acceso, refresh e ID Token.

f) Redirección a la aplicación: el usuario es redirigido nuevamente a la aplicación cliente junto con el token emitido. La aplicación valida el token y, si es correcto, permite el acceso al sistema sin necesidad de solicitar nuevamente usuario y contraseña.

g) Inicio de sesión único (SSO). A partir de este momento, si el usuario intenta acceder a otra aplicación integrada con el Servidor de Autenticación, no será necesario autenticarse de nuevo: la sesión ya estará activa y el token será reutilizado.

3.4 *Justificación de la propuesta*

La solución propuesta centraliza la autenticación en un servidor de identidad basado en estándares abiertos (LDAPS, OAuth 2.0 y OpenID Connect) e integra el Active Directory existente de la facultad como fuente única de usuarios. Esta elección se justifica por:

- Compatibilidad con la infraestructura actual: Se reutiliza el AD institucional mediante LDAPS, evitando duplicar identidades y reduciendo costos operativos y de mantenimiento.
- Interoperabilidad y futuro asegurado: OAuth 2.0/OIDC son estándares ampliamente adoptados. Facilitan integrar aplicaciones nuevas y existentes (Java/Spring, PHP/Symfony, frontends modernos).
- Seguridad alineada a mejores prácticas: Se adopta Authorization Code como flujo principal. El uso de ID Token para identidad y Access Token para autorización minimiza el intercambio de credenciales entre aplicaciones. La comunicación con AD se cifra mediante LDAPS.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- Escalabilidad funcional: La plataforma (Spring Boot + Spring Authorization Server + Spring Security + Spring LDAP) permite evolucionar hacia multifactor (MFA), políticas de acceso por roles y auditoría de eventos.
- Mantenibilidad y comunidad: El ecosistema Spring ofrece documentación, ejemplos y comunidad activa. Esto acelera el desarrollo y facilita la resolución de problemas.

## 4. Desarrollo

Como etapa inicial, se comienza con las pruebas de concepto. Para ello se van a utilizar: Aplicación cliente desarrollada en Spring Boot configurada como clientes OAuth2/OIDC del servidor de autenticación. Zentyal Server para simular el Active Directory de la facultad durante el desarrollo y pruebas se implementó un servidor Zentyal en una máquina virtual. Este servidor, basado en Ubuntu y con soporte para Samba 4, fue configurado como Controlador de Dominio Active Directory mediante el módulo 'Domain Controller and File Sharing'.

4.1 *Prueba 1. Conexión del servidor de autenticación con Active Directory simulado*

El objetivo es verificar la posibilidad de autenticar usuarios contra un directorio activo desde el servidor desarrollado en Spring Boot. Para más simpleza, se utilizará el protocolo LDAP sin TLS.

4.1.1 Configuraciones en Zentyal Server

Primero se realizan las configuraciones necesarias para poder conectarse a través de LDAP. El servicio LDAP quedó disponible en el puerto estándar (389), lo que permitió realizar una conexión inicial sin cifrado, apropiada para un laboratorio controlado. Se creó el dominio de prueba: *example.local* y luego se creó un usuario de prueba (*Usuario: agustin* y *Password: agustin*).

4.1.2 Servidor de autenticación

Se comienza un proyecto Spring Boot con las dependencias: 'Spring LDAP', 'Spring Security', 'Spring Web' y 'Thymeleaf'. Para esta prueba es importante *Spring LDAP*, que nos permite con una simple configuración poder conectarnos al AD. Por otro lado, Spring Security es el encargado de gestionar la autenticación y autorización en la aplicación. Mientras que Spring Web permite exponer controladores y vistas para interactuar con el usuario. y Thymeleaf es el motor de plantillas usado para generar la vista básica de "login exitoso". Se implementa la clase de configuración 'LdapConfig.java' encargada de establecer el enlace con el directorio simulado y de delegar a este la validación de credenciales. Debe considerarse que *context source* se debe configurar con credenciales de un usuario administrador para que el servidor acepte la conexión. Además, se implementa una vista básica si el login es exitoso y su controlador. Se accede al formulario de login generado por Spring Security y se ingresan las credenciales del usuario de prueba. Si el resultado fue exitoso, el usuario pudo autenticarse en el sistema mediante el servidor de autenticación. Se comprobó que la verificación de credenciales no dependía de una base de datos local, sino del Active Directory simulado y el tiempo de respuesta en el proceso de autenticación fue inmediato y no se registraron errores en la conexión LDAP.

Esta prueba permitió validar la viabilidad técnica de la solución planteada: el servidor de autenticación puede delegar de forma confiable la validación de credenciales en el Active Directory institucional, lo que constituye la base para la implementación posterior de OAuth2/OpenID Connect y el inicio de sesión único (SSO).

Una vez validada la autenticación básica contra LDAP, el siguiente paso será extender esta integración hacia un flujo completo de OAuth2/OpenID Connect para habilitar el inicio de sesión único (SSO) en las aplicaciones cliente.

4.2 *Prueba 2: integración de la aplicación cliente con el servidor de autenticación mediante OAuth2/OpenID Connect*

Se plantea la próxima prueba que tiene el objetivo de comprobar que una aplicación cliente puede delegar el proceso de autenticación de sus usuarios al servidor de autenticación y recibir los tokens correspondientes para establecer una sesión de usuario.

## 5. Conclusiones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La implementación de un sistema SSO como mecanismo de autorización de acceso a sistemas relacionados, claramente es una medida que facilita al usuario el acceso a los sistemas utilizando un juego de credenciales único. Los aspectos negativos deben ser administrados adecuadamente para que los beneficios sean superiores.

La prueba de conceptos comentada en el punto 3 muestra que es posible implementar un SSO con la infraestructura de base real que el contexto requiere. Esto representa una base sólida para avanzar hacia un entorno de autenticación centralizado, con beneficios en usabilidad, seguridad y administración de usuarios. Los próximos pasos serán incluir otro tipo de aplicaciones clientes e integrarlas en el entorno de pruebas. Cuando esto funcione, se definirá un proceso de pruebas con el servidor de AD real. Hasta el momento, el proyecto avanza de acuerdo a lo previsto.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF) PID – SIECFE0010213TC - “Marcos de trabajo para realizar defensa en profundidad en sistemas de software” y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## Referencias bibliográficas

Microsoft (2025), “Introducción a Active Directory Domain Service”, Disponible en <https://learn.microsoft.com/es-es/windows-server/identity/ad-ds/get-started/virtual-dc/active-directory-domain-services-overview>

Microsoft (2025), “Requisitos de AD FS”, Disponible en <https://learn.microsoft.com/es-es/windows-server/identity/ad-fs/overview/ad-fs-requirements >

Auth0, (2025), “¿Qué es el inicio de sesión único (SSO)?”, Disponible en <https://auth0.com/es/intro-to-iam/what-is-single-sign-on-sso#! >

Kukic, Ado, (), “The Definitive Guide to Single Sign On”

Dang, June, (2023), “Single Sign On protocols: SAML vs OpenID Connect”, Disponible en < https://dev.to/junedang/single-sign-on-protocols-saml-vs-openid-connect-5cfh>

Eje temático

# Tecnología de las organizaciones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Tecnologías de las organizaciones
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Maximizando la eficiencia y confiabilidad industrial: ¿puede el Aprendizaje Automático potenciar el mantenimiento predictivo?

## Maximizing industrial efficiency and reliability: Can Machine Learning enhance Predictive Maintenance?

Presentación: 12/09/2025

**Emily Knoll**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
knollemily5@gmail.com

**Guillermina Perren**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
gperren03@gmail.com

**Sheila Favole**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
sheilafavole13@gmail.com

### Resumen

El mantenimiento industrial es esencial para garantizar la continuidad operativa, reducir costos y preservar la seguridad de los procesos. A lo largo del tiempo, las organizaciones han aplicado principalmente dos enfoques: el mantenimiento correctivo y el preventivo. Sin embargo, ambos presentan limitaciones, el primero actúa una vez ocurrida la falla (no la previene), y el segundo se realiza de forma programada; aun así, no siempre logra anticipar averías ni optimizar el uso de recursos. En este escenario, el análisis de datos y las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 emergen como herramientas clave para mejorar la gestión del mantenimiento. El empleo de registros históricos, sensores, sistemas de monitoreo y técnicas de machine learning permite identificar patrones de falla, predecir fallas y planificar acciones más eficientes. Este trabajo presenta una revisión de la literatura sobre métodos de mantenimiento predictivo basados en aprendizaje automático, así como una propuesta metodológica para el desarrollo de un agente inteligente capaz de recomendar acciones de mantenimiento precisas y oportunas.

**Palabras clave:** Mantenimiento predictivo, Agente inteligente, Industria 4.0

### Abstract

Industrial maintenance is essential to ensure operational continuity, reduce costs, and preserve process safety. Over time, organizations have mainly applied two approaches: corrective and preventive maintenance. However, both have limitations: the former acts after a failure has occurred (it does not prevent it), and the latter is performed on a scheduled basis; even so, it does not always manage to anticipate breakdowns or optimize the use of resources. In this scenario, data analysis and technologies associated with Industry 4.0 emerge as key tools for improving maintenance management. The use of historical records, sensors, monitoring systems, and machine learning techniques allows for the identification of failure patterns, the prediction of failures, and the planning of more efficient actions. This paper presents a review of the literature on predictive maintenance methods based on machine learning, as well as a methodological proposal for the development of an intelligent agent capable of recommending accurate and timely maintenance actions.

**Keywords:** Predictive maintenance, Intelligent agent, Industry 4.0

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## 1. Introducción

La continuidad operativa, la reducción de costos y la seguridad de los procesos son pilares fundamentales en el ámbito industrial. Tradicionalmente, las organizaciones han recurrido a dos enfoques principales: el mantenimiento correctivo, que se ejecuta únicamente tras la falla del equipo, y el mantenimiento preventivo, que se programa de acuerdo con tiempos o ciclos de uso. Si bien ambos métodos han permitido sostener la producción durante décadas, presentan limitaciones, ya que no siempre logran anticipar averías ni optimizar el uso de recursos técnicos y económicos.

En este escenario, marcado por la creciente digitalización e incorporación de tecnologías asociadas a la Industria 4.0, surge la necesidad de adoptar estrategias más precisas. El análisis de datos, sustentado en registros históricos, sensores y sistemas de monitoreo, ha demostrado ser una herramienta clave para identificar patrones de falla y predecir el comportamiento de los equipos. En particular, el mantenimiento predictivo (PdM) ha cobrado relevancia al permitir la detección temprana de anomalías en equipos y la planificación de intervenciones antes de que ocurra una avería, reduciendo tanto los tiempos de inactividad como los costos asociados.

Los artículos consultados han evidenciado un incremento en el uso de técnicas de machine learning para fortalecer los sistemas de mantenimiento predictivo, dado que estos modelos permiten detectar correlaciones complejas en grandes volúmenes de datos que serían difíciles de identificar para los operadores humanos. Sin embargo, los estudios también revelan importantes desafíos: la dependencia de datos de alta calidad y en grandes cantidades, la dificultad de implementar soluciones interpretables para técnicos y operarios, y las barreras económicas y organizativas que enfrentan especialmente las pequeñas y medianas empresas.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo exponer los principales enfoques de la literatura en torno al mantenimiento predictivo basado en machine learning y delinear la propuesta de un agente inteligente que, a partir del análisis de datos históricos y contextuales, pueda recomendar acciones de mantenimiento más precisas y eficientes. Se busca con ello identificar los desafíos y oportunidades que esta tecnología ofrece para su implementación en entornos industriales locales.

## 2. Metodología

El proyecto comenzó con una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre inteligencia artificial, mantenimiento predictivo y sistemas de monitoreo de equipos industriales para identificar las mejores prácticas y métodos relevantes para el proyecto. Dentro de esta revisión, Carvalho et al. (2019: 2) realiza un estudio sistemático de la literatura que aborda el problema crítico de la eficiencia del mantenimiento de equipos en la industria, donde las fallas pueden causar interrupciones en la producción. Postula que el éxito del Mantenimiento Predictivo (PdM) depende de una elección adecuada de métodos de Machine Learning (ML). La metodología utilizada implicó una revisión exhaustiva de publicaciones en IEEEXplore y ScienceDirect entre 2009 y 2018, enfocándose en estudios que compararon técnicas de ML aplicadas a PdM. Los resultados indican un creciente interés en PdM desde 2013, impulsado por el aumento de datos industriales y avances en ML. Los métodos de ML más empleados son Random Forests, redes neuronales (ANN, CNN, LSTM, deep learning), Support Vector Machines y k-means, utilizando predominantemente datos reales de señales de vibración. En general, la integración de ML en PdM ha demostrado resultados positivos, como la reducción de costos y la mejora de la eficiencia y seguridad operativas.

Siguiendo con los artículos que analizan enfoques y técnicas para el mantenimiento predictivo, Tessoni y Amoretti (2022: 748) centran su trabajo “Advanced Statistics and Machine Learning Methods for Multi-Step Multivariate Time Series Forecasting in Predictive Maintenance” en la predicción precisa de fallas en mantenimiento predictivo, crucial para calcular el tiempo restante de vida útil (RUL) de los equipos mediante series temporales multivariadas. Para ello, los autores comparan métodos estadísticos avanzados (VAR, VMA, VARMA y Theta) con enfoques de Machine Learning (ERNN, LSTM y GRU), evaluando su precisión con cinco conjuntos de datos públicos y una implementación multivariada del método Theta. Los resultados muestran que VARMA superó a la mayoría de los demás métodos. A pesar de ser el peor estadístico, el método Theta consistentemente superó a los modelos de Machine Learning. No obstante, el estudio no pudo identificar el mejor modelo RNN.

Por su parte, Steurtewagen y Van den Poel (2021: 3) ponen el foco en un aspecto clave: la interpretabilidad de los modelos de aprendizaje automático, tradicionalmente considerados como “cajas negras”. Para ello, utilizaron un modelo XGBoost supervisado con datos de sensores e informes, enriquecido con valores de Shapley para obtener diagnósticos. La evaluación

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

se basó en las AUC. Los resultados mostraron una alta precisión predictiva (AUC del 90.1%) en la identificación de fallas, y los valores de Shapley identifican los parámetros clave. Esto facilitó un diagnóstico coherente con los informes de inspección y la intuición de los operadores.

Complementando estos aportes, Schwendemann et al. (2021: 289) realizan una revisión específica sobre la necesidad de minimizar el tiempo de inactividad no programado en rodamientos de rectificadoras, señalando la falta de soluciones universales y el predominio de datos de laboratorio sin ruido. La metodología empleó una revisión de literatura sobre técnicas de Machine Learning (ML), como Redes Neuronales, SVM y Transfer Learning, para la clasificación de fallas y la predicción de la vida útil restante (RUL). Los resultados indican que los métodos de clasificación logran alta precisión, pero están adaptados a escenarios específicos y datos limpios. La predicción de RUL, en cambio, se ve limitada por la escasez crítica de conjuntos de datos públicos con datos reales y ruidosos, lo que restringe la generalización.

Además de los estudios que se centran en minimizar el tiempo de inactividad no programado en equipos críticos, investigaciones recientes han explorado aplicaciones de mantenimiento predictivo en escenarios de alta generación de datos. En este sentido, Dintén Herrero y Zorrilla (2022) presentan un caso de estudio centrado en el diagnóstico de fallas de una bomba de agua para una pequeña aldea, abordando la necesidad de una plataforma intensiva en datos para la Industria 4.0 que permita construir y desplegar modelos de aprendizaje automático, especialmente en escenarios donde la generación de datos es elevada y el análisis debe cumplir requisitos de tiempo real. Específicamente, el caso de estudio se centra en el diagnóstico de fallas de una bomba de agua para una pequeña aldea con el objetivo de predecir fallas y evitar problemas graves de suministro, buscando una precisión al 75% y un tiempo de respuesta inferior a 100 milisegundos. La metodología utilizada se basó en la implementación de una plataforma de Big Data fundamentada en la arquitectura RAI 4.0, sobre la cual se desarrolló un servicio de mantenimiento predictivo desplegado en la nube Amazon Web Services (AWS). El proceso de construcción del predictor siguió el modelo CRISP-DM, incluyendo etapas como la comprensión del negocio y de los datos, la preparación de datos, el modelado con algoritmos como Random Forest, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbors y Redes Neuronales Artificiales, y la evaluación con validación cruzada de pliegues y métricas como precisión, TPR y FAR. Como resultados principales, se seleccionó el algoritmo K-Nearest Neighbors para el despliegue debido a que fue el más rápido en generar una respuesta, logrando una precisión del 99.87% y un tiempo de respuesta promedio de 7.02 ms, lo que satisface los objetivos iniciales de precisión y tiempo de respuesta del negocio. Sin embargo, el modelo no es capaz de predecir las fallas con antelación, lo cual se plantea como trabajo futuro.

En los procesos de mecanizado, el desgaste de herramientas representa un problema costoso que afecta la calidad del producto y puede causar paradas no planificadas. Para afrontarlo, Traini et al. (2019) desarrollaron un marco de mantenimiento predictivo aplicado a fresadoras CNC, incluyendo la recolección de datos de sensores de vibración, corriente y emisión acústica, su procesamiento y la aplicación de modelos de clasificación y regresión. Los resultados mostraron que las redes neuronales lograron la mejor predicción de la vida útil restante, mientras que los árboles de decisión potenciados alcanzaron un 96% de precisión en la clasificación de estados de desgaste, confirmando los beneficios económicos y operativos del uso de ML en mecanizado. De manera complementaria, Ayvaz & Alpay (2021) implementaron un sistema de mantenimiento predictivo en tiempo real en una planta industrial, utilizando sensores IoT y algoritmos de machine learning para analizar más de 8 millones de registros y reducir variables a 19 factores clave. Algoritmos como Random Forest y XGBoost alcanzaron valores de $R^2$ superiores a 0.97, demostrando la escalabilidad de los sistemas de PdM y su capacidad para mejorar la disponibilidad operativa.

En la Industria 4.0, uno de los grandes desafíos es lograr un mantenimiento predictivo eficiente, ya que la gran cantidad de datos generados y la falta de modelos universales dificultan su implementación. Para analizar esta problemática, se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura, evaluando 562 artículos iniciales y seleccionando 38 que cumplían los criterios de relevancia. Los resultados, presentados por Dalzochio et al. (2020), muestran que persisten limitaciones vinculadas con la calidad de los datos, la latencia de los sistemas y la dificultad de integrar información contextual, destacándose además que las ontologías juegan un rol clave para favorecer la interoperabilidad entre plataformas y enriquecer los análisis predictivos. Complementando estas perspectivas, Schwendemann et al. (2021) realizan una revisión específica sobre la necesidad de minimizar el tiempo de inactividad no programado en rodamientos de rectificadoras, señalando la falta de soluciones universales y el predominio de datos de laboratorio sin ruido. La metodología evaluó técnicas de machine learning como redes

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

neuronales, SVM y transfer learning para la clasificación de fallas y la predicción de la vida útil restante, evidenciando que los métodos de clasificación logran alta precisión, pero su aplicabilidad queda limitada a escenarios específicos y datos limpios, mientras que la predicción de la vida útil se ve restringida por la escasez de conjuntos de datos reales y ruidosos.

Asimismo, en el mantenimiento de edificios, Cheng et al. (2020) propusieron un marco predictivo que integra modelos BIM, sensores IoT y registros de gestión de instalaciones para equipos MEP. El análisis mediante redes neuronales y SVM permitió alcanzar un 96.5% de precisión en la predicción de condiciones futuras en chillers universitarios, optimizando la planificación de reparaciones y reduciendo costos, aunque se destacan limitaciones como la dependencia de personal especializado y la necesidad de comparar con algoritmos más avanzados. Por otra parte, estudios recientes han explorado aplicaciones de mantenimiento predictivo en escenarios de alta generación de datos. Dintén Herrero y Zorrilla (2022) presentan un caso de estudio sobre diagnóstico de fallas en una bomba de agua para una pequeña aldea, destacando la necesidad de plataformas de Big Data que permitan construir y desplegar modelos de ML en tiempo real. Utilizando la arquitectura RAI 4.0 y AWS, desarrollaron un servicio predictivo siguiendo el modelo CRISP-DM, evaluando algoritmos como Random Forest, SVM, K-Nearest Neighbors y redes neuronales artificiales, seleccionando finalmente KNN por su rapidez y precisión han del 99.87% con un tiempo de respuesta promedio de 7.02 milisegundos, cumpliendo los objetivos de negocio, aunque sin lograr anticipar fallas.

A diferencia de los enfoques anteriores, Florian, Sgarbossa y Zennaro (2021) proponen un modelo orientado a los costos que integra tanto la inversión en tecnologías de TI como los costos operativos de mantenimiento, los cuales están influenciados por el rendimiento del modelo de ML. Para ello, desarrollan una metodología basada en un modelo matemático que evalúa la probabilidad de interceptar fallos correctamente mediante el uso de una matriz de errores y la curva ROC (Receiver Operating Characteristics), cuantificando así los costos asociados. Este modelo se incorpora en un sistema de apoyo a la decisión (DSS) que guía la implementación del mantenimiento predictivo, optimizando el umbral de decisión del clasificador de aprendizaje automático con el fin de minimizar los costos totales de mantenimiento. La aplicación del DSS a un caso de estudio real de una caja de cambios en la industria de procesamiento de semillas oleaginosas demostró un ahorro significativo del 54% en comparación con la estrategia de mantenimiento preventivo óptima y un 36% respecto de la estrategia de mantenimiento actual. Estos resultados evidencian que los métodos tradicionales de optimización de umbrales resultan menos efectivos económicamente que la aproximación planteada.

En el panorama empresarial actual, las Pymes son el motor de la economía, representando la gran mayoría de las empresas, sin embargo, se enfrentan a grandes desafíos, especialmente en lo que respecta a la adopción e implementación de nuevas tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML). La experiencia demuestra que a las Pymes les resulta particularmente difícil desarrollar e implementar estrategias de IA, debido a limitaciones como la falta de experiencia, competencia y capacidad para la implementación exitosa de soluciones de ML; ausencia de una estrategia de digitalización clara; déficit en las habilidades y competencias de sus empleados en IA y ML; y acceso a recursos monetarios muy limitados para este tipo de proyectos. A menudo presentan deficiencias en perfiles claves como analistas de datos e ingenieros de software, lo que obliga a integrar expertos externos. Frente a estos desafíos, Welte, Estler y Lucke (2019) proponen una metodología sistemática y práctica para la implementación de soluciones de aprendizaje automático orientadas al mantenimiento predictivo en Pymes, incorporando de forma holística tanto los aspectos organizativos como la cualificación de los empleados, factores que suelen pasarse por alto en otros modelos de proceso.

## 3. Resultados y discusión

Aunque nuestro proyecto se encuentra actualmente en la etapa de revisión bibliográfica, la metodología planteada nos permite delinear claramente los resultados esperados y discutir sus potenciales implicaciones. El objetivo principal es desarrollar un agente inteligente que utilice técnicas de aprendizaje automático para recomendar situaciones de mantenimiento precisas y eficientes, calculadas en datos históricos y el contexto del equipamiento industrial.

La Figura 1 sintetiza la ruta metodológica definida para alcanzar este objetivo, desde la revisión de la literatura y la definición del alcance del proyecto, hasta el entrenamiento de algoritmos, la predicción y el desarrollo de un agente inteligente capaz de interactuar con el usuario final. Actualmente, el avance del proyecto se encuentra en la segunda etapa,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

correspondiente al análisis de bibliografía y la definición de los requerimientos iniciales, lo que sienta las bases para las fases posteriores de depuración de datos y entrenamiento de modelos.

Se espera que este agente inteligente logre detectar patrones y correlaciones ocultas en los grandes volúmenes de datos de mantenimiento e información contextual de los equipos. Esto permitirá anticipar fallos con mayor precisión y ofrecer recomendaciones de mantenimiento específicas y oportunas, superando así las limitaciones de los enfoques tradicionales basados en reglas predefinidas o programaciones periódicas, que a menudo resultan ineficientes y no se adaptan a las condiciones cambiantes de los equipos. La literatura revisada apoya esta dirección, indicando que el mantenimiento predictivo (PdM) basado en Machine Learning (ML) es fundamental para reducir costos y tiempos de inactividad no planificados en la industria, mejorando la disponibilidad, la eficiencia operativa y la confiabilidad del equipamiento. Estos hallazgos sugieren que la aplicación de dicho agente inteligente en contextos industriales podría generar un impacto positivo comparable al descrito en la investigación actual.

Asimismo, se proyecta que el uso de algoritmos de ML, incluyendo enfoques supervisados para la clasificación y regresión, no solo permitirá predecir el tiempo restante de vida útil (RUL) de los componentes., sino también aportar un valor diagnóstico significativo. La interpretación de los modelos, a menudo considerados "cajas negras", se buscará mejorar mediante herramientas como los valores Shapley, lo que permitirá a los operadores y técnicos comprender qué variables son más relevantes en la aparición de fallas, aumentando así la confianza y la adopción de la solución.

En términos de discusión, se reconoce que el proyecto enfrentará desafíos comunes en el campo del PdM, como la garantía de la calidad y la disponibilidad de datos relevantes, así como la transferibilidad de los modelos entre diferentes tipos de equipos o industrias. No obstante, la propia metodología del proyecto (representada en la Figura 1) incluye la identificación de estos desafíos y la propuesta de recomendaciones y soluciones para superarlos, lo que representa una contribución valiosa en este campo.

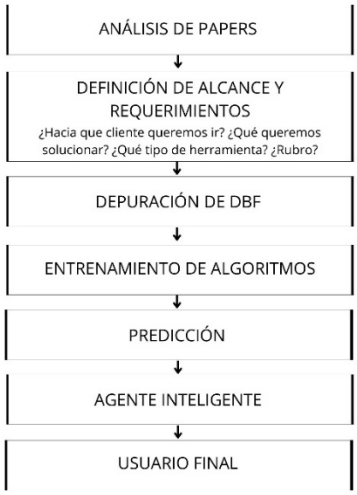



**Figura 1**. Ruta metodológica del proyecto de investigación.

## 4. Conclusiones

El mantenimiento predictivo apoyado en técnicas de aprendizaje automático constituye una herramienta fundamental para mejorar la confiabilidad y eficiencia de los procesos industriales, permitiendo anticipar fallas y optimizar recursos. Si bien los resultados empíricos aún no se encuentran disponibles, la evidencia recopilada en la literatura confirma los beneficios de su aplicación, pero también evidencia desafíos relacionados con la calidad de los datos, la interpretabilidad de los modelos y las barreras de adopción en Pymes. En este marco, la propuesta de un agente inteligente orientado al mantenimiento predictivo se plantea como una alternativa viable para superar estas limitaciones y generar un impacto positivo en la gestión industrial.

## Referencias bibliográficas

Ayvaz, S., & Alpay, K. (2021). Predictive maintenance system for production lines in manufacturing: A machine learning approach using IoT data in real-time. Expert Systems with Applications, 173, 114598.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. de P., Basto, J. P. y Alcalá, S. G. S. (2019). “A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance”. Computers & Industrial Engineering, 137, 106024.

Cheng, J. C. P., Chen, W., Chen, K., & Wang, Q. (2020). Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms. Automation in Construction, 112, 103087.

Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., & Barbosa, J. (2020). Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges. Computers in Industry, 123, 103298.

Dintén Herrero, J., & Zorrilla, M. (2022). Big Data and predictive maintenance for Industry 4.0: A case study on water pump fault diagnosis. Journal of Industrial Information Integration, 28, 100297.

Florian, E., Sgarbossa, F., & Zennaro, I. (2021). “Machine learning-based predictive maintenance: A cost-oriented model for implementation”. International Journal of Production Economics, 236, 108114.

Schwendemann, T., Schuh, B., Witt, M. y Kluge, A. (2021). “A Survey of Machine-Learning Techniques for Condition Monitoring and Predictive Maintenance of Bearings in Grinding Machines”. Applied Sciences, 11(1), 289.

Steurtewagen, B. y Van den Poel, D. (2021). “Adding interpretability to predictive maintenance through machine learning on sensor data”. International Journal of Production Research, 59(15), 4688–4701.

Tessoni, F. y Amoretti, M. (2022). “Advanced Statistics and Machine Learning Methods for Multi-Step Multivariate Time Series Forecasting in Predictive Maintenance”. Applied Sciences, 12(2), 748.

Traini, E., Bruno, G., D’Antonio, G., & Lombardi, F. (2019). Machine learning framework for predictive maintenance in milling. IFAC-PapersOnLine, 52(13), 177–182.

Welte, R., Estler, M., & Lucke, D. (2019). “A method for implementation of machine learning solutions for predictive maintenance in small and medium sized enterprises”. Procedia CIRP, 93, 909-914.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Tecnología de las organizaciones
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiante de grado
**Facultad Regional**: Rafaela

# Propuesta de transformación digital: Caso de estudio aplicado al sector alimenticio y metalúrgico

## Digital transformation proposal: Case study applied to the food and metallurgical sectors

Presentación: 30/10/2025

**Luis Nadalutti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
luisnadalutti6@gmail.com

**Brenda Voisard**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
voisardbrenda@gmail.com

### Resumen

Este trabajo presenta un diagnóstico del nivel de digitalización en dos empresas industriales argentinas y la formulación de un plan de transformación alineado con los principios de la Industria 4.0. La metodología aplicada, basada en entrevistas y en el marco de referencia RAMI 4.0, permitió relevar distintas áreas organizacionales y representar su situación mediante un mapa de calor. Los resultados obtenidos posibilitaron identificar retrasos tecnológicos, seleccionar áreas prioritarias y proponer acciones iniciales orientadas a la transición digital.

**Palabras clave:** Transformación digital, RAMI 4.0, Industria 4.0

### Abstract

This paper presents a diagnosis of the level of digitalization in two Argentine industrial companies and the formulation of a transformation plan aligned with the principles of Industry 4.0. The methodology applied, based on interviews and the RAMI 4.0 framework, allowed for the identification of different organizational areas and the representation of their status through a heat map. The results obtained made it possible to identify technological delays, select priority areas, and propose initial actions aimed at the digital transition.

**Keywords:** Digital transformation, RAMI 4.0, Industry 4.0

## 1. Introducción

La Industria 4.0 representa la curta revolución industrial, caracterizada por la integración de tecnologías digitales, inteligentes y conectadas en los procesos productivos. En este contexto, la transformación digital se convierte en un eje estratégico para las organizaciones, ya que permite optimizar recursos, mejorar la toma de decisiones y aumentar la competitividad. Para guiar este proceso el propósito de la implementación del modelo de referencia RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0) es identificar oportunidades de mejora dentro de una empresa u organización y transformar ese aspecto en un retorno positivo, ya sea en tiempos, personas, dinero u otros recursos, considerando su arquitectura la cual

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

consiste en un mapa tridimensional de soluciones que muestra cómo afrontar la transición hacia la Industria 4.0 de forma estructurada (Tenea Tecnologías, 2021). Lo que se planteó anteriormente posee un carácter particular en las pymes argentinas debido a que muchas no poseen cierta tecnología para digitalizarse, es decir, se encuentran en los comienzos debido a problemas económicos del país, falta de capital humano y problemas de índole cultural, por todo esto la digitalización es un desafío para las pymes argentinas (Vélez & Morero, 2024). Las empresas que adoptan este modelo pueden mejorar su eficiencia, flexibilidad de sistemas, máquinas (Schweichhart) y capacidad de respuesta al mercado. Para evaluar el grado de preparación de una organización frente a este cambio, se requieren metodologías de diagnóstico que permitan relevar el estado de situación en términos de tecnología, procesos y personas. En este caso de estudio ampliaremos la metodología de transformación digital frente a dos empresas una alimenticia y otra metalúrgica en donde podemos ver el estado de digitalización que poseen.

## 2. Materiales y métodos

La metodología utilizada en este trabajo se desarrolló en dos etapas complementarias. En la primera, se recopiló información clave de la empresa con el objetivo de caracterizar su contexto y funcionamiento. Se relevaron datos del entrevistado, su actividad principal en la empresa, el tamaño de la organización según empleados e ingresos, los principales productos y su volumen de producción. Además, se evaluaron las distintas áreas de la cadena de valor de Porter (logística, operaciones, marketing, infraestructura tecnológica, investigación y desarrollo, y mantenimiento) asignando una ponderación subjetiva de acuerdo con la importancia estratégica y la percepción del entrevistado. También se identificaron los costos más relevantes en cada área, se analizaron los proveedores críticos y se indagó sobre el uso de herramientas tecnológicas para la gestión de información, así como las prácticas de mantenimiento aplicadas a los equipos más significativos.

La segunda etapa consistió en la aplicación de un cuestionario diseñado para profundizar en las distintas áreas de la empresa y detectar oportunidades de mejora relacionadas con la transformación digital. Se abordaron aspectos como el registro y control de procesos, la utilización de herramientas digitales, la planificación de la producción, el grado de automatización y la satisfacción del cliente. Las respuestas fueron ponderadas mediante un sistema de puntajes calculadas de la siguiente manera:

$$\text{Puntaje resultante} = \text{Puntaje de la pregunta} \times \text{Puntaje de la respuesta} \quad (1)$$

Para calcular el puntaje total de un área se suman los valores de cada pregunta vinculada a esa área. El resultado se ajusta mediante la división por un valor de referencia que corresponde a la suma de los puntajes máximos de dichas preguntas.

$$\text{Puntaje del área} = \frac{\Sigma(\text{Puntaje resultante})}{\Sigma(\text{Puntaje de la pregunta})} \quad (2)$$

El valor obtenido en la ecuación 2 es el nivel de digitalización en porcentaje, que identifica la prioridad a la hora de digitalizar.

Estos valores permiten elaborar un Mapa de calor donde se identifican áreas críticas y se diseña un plan preliminar de acción para impulsar la transformación digital. El mapa de calor fue hecho mediante una escala cromática, del verde al rojo y se observa que los niveles de digitalización ubicados en la zona verde representan las áreas más factibles de digitalizar.

Mediante el uso del Modelo RAMI 4.0, se pueden identificar los activos técnicos (assets) que intervienen en una problemática, analizar su ubicación en la pirámide organizacional 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.

En el eje capas (Layers), el nivel empresarial (Business) especifica los objetivos de negocio o económicos y/u oportunidades de mejora que las organizaciones quieren alcanzar mediante la aplicación de un plan de transformación digital para respaldar sus procesos de decisión. La identificación de este objetivo de digitalización es un aspecto crítico debido a que es el que conduce la definición del resto de los ejes y capas, para lograr la transformación digital.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

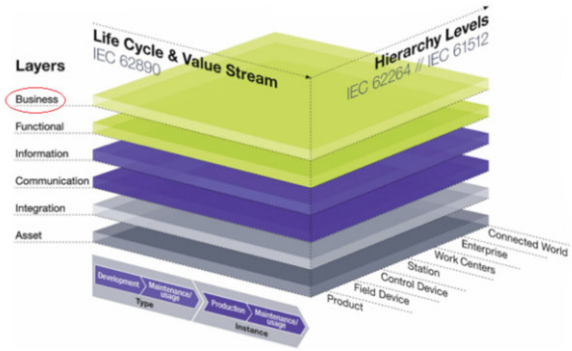



**Figura 1**. Modelo RAMI 4.0

## 3. Resultados y discusión

Para la ponderación subjetiva de las áreas, correspondiente a la primera parte de la entrevista, se toma la ponderación 1 (uno) como el valor más importante y al valor 6 (seis) como la ponderación más baja.

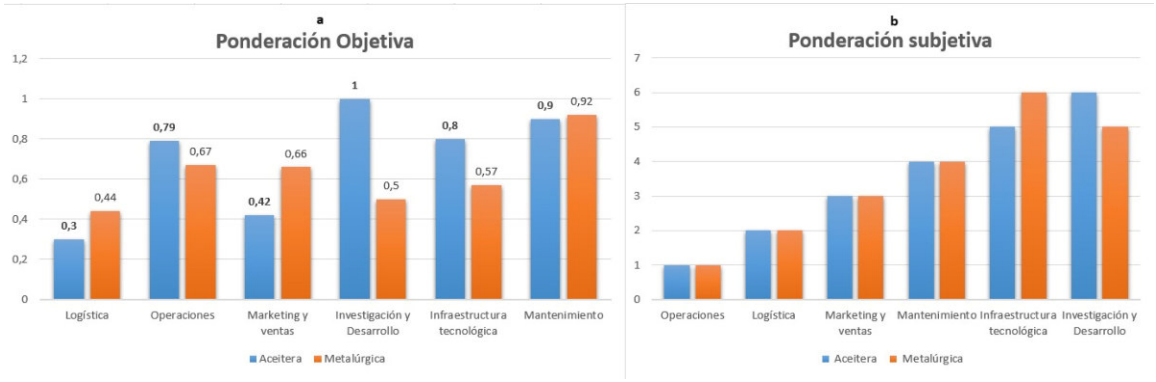



**Figura 2**. Gráficos de ponderaciones de empresa aceitera y metalúrgica. Gráfico de ponderaciones objetivas: (a). Gráfico de ponderaciones subjetivas: (b)

**Tabla 1**. Mapa de calor

| | INTERESES | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NdD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 |
| 0,2 | 0,15 | 0,3 | 0,45 | 0,6 | 0,75 | 0,9 |
| 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,2 |
| 0,3 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 |
| 0,3 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,5 | 1,8 |
| 0,4 | 0,35 | 0,7 | 1,05 | 1,4 | 1,75 | 2,1 |
| 0,4 | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2 | 2,4 |
| 0,5 | 0,45 | 0,9 | 1,35 | 1,8 | 2,25 | 2,7 |
| 0,5 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
| 0,6 | 0,55 | 1,1 | 1,65 | 2,2 | 2,75 | 3,3 |
| 0,6 | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3 | 3,6 |
| 0,65 | 0,65 | 1,3 | 1,95 | 2,6 | 3,25 | 3,9 |
| 0,7 | 0,7 | 1,4 | 2,1 | 2,8 | 3,5 | 4,2 |
| 0,75 | 0,75 | 1,5 | 2,25 | 3 | 3,75 | 4,5 |
| 0,8 | 0,8 | 1,6 | 2,4 | 3,2 | 4 | 4,8 |
| 0,85 | 0,85 | 1,7 | 2,55 | 3,4 | 4,25 | 5,1 |
| 0,9 | 0,9 | 1,8 | 2,7 | 3,6 | 4,5 | 5,4 |
| 0,95 | 0,95 | 1,9 | 2,85 | 3,8 | 4,75 | 5,7 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

El grado de digitalización de ambas industrias requieren que se realice un diagnóstico integral del estado actual de sus áreas observando sus procesos, nivel de implementación de tecnologías y capacitación de personal.

### 3.1. Especificación inicial de la digitalización propuesta para la empresa metalúrgica

Para el caso de la metalúrgica, diferenciada de la alimenticia en que sus celdas están remarcadas en blanco, las áreas más propensas a partir del análisis realizado mediante el mapa de calor son Operaciones y Logística ya que presentan una alta relevancia estratégica para la empresa y, al mismo tiempo, bajos niveles de digitalización. Esto evidencia una brecha crítica

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

que afecta directamente la continuidad productiva y los costos operativos de la empresa, ya que los problemas en la gestión de stock generan paradas de línea, pérdidas de tiempo y sobrecostos. En este sentido, el área de Logística interna fue seleccionada como foco prioritario para iniciar la transformación digital, dado que su impacto es transversal al resto de las operaciones y permite obtener beneficios inmediatos en términos de disponibilidad de insumos, reducción de desperdicios y mayor eficiencia en la planificación productiva. La digitalización propuesta se centra en optimizar el control de inventarios y garantizar el suministro de componentes críticos, alineándose con los objetivos estratégicos de la organización.

A continuación, se presenta la arquitectura del modelo de industria 4.0, según el estándar RAMI 4.0 aplicado en este trabajo:

**Dimensión de las capas de la digitalización (Layers)**

**Negocio (Business):** Estudiar y optimizar los niveles de stock para evitar faltantes o sobrantes de repuestos (tornillos, bulones, arandelas). Objetivo: reducir costos de inventario y asegurar continuidad operativa.

**Funciones (Functional):** Recolección y análisis de datos de consumo, reposición automática según stock de seguridad definidos, generación de reportes de rotación y proyecciones de demanda.

**Información (Information):** Datos diarios de entradas y salidas de componentes, niveles de stock de seguridad, stock total por componente, histórico de consumo, alertas de faltantes.

**Comunicación (Communication):** Ethernet con OPC-UA para la comunicación estandarizada con el ERP, integrando sensores o terminales de captura de datos en tiempo real.

**Integración (Integration):** Dispositivos de captura de datos (lectores de código de barras/RFID) conectados al ERP, integrados con módulos de compras y producción.

**Entidad (Asset):** Base de datos del módulo ERP (gestión de stock e inventario), terminales de entrada de datos en planta (lectores, tablets, PC industriales).

**Dimensión del ciclo de vida y valor agregado (Life Cycle & Value Stream)**

En el ciclo de vida del activo, la empresa define en la etapa de planificación los parámetros de stock de seguridad y niveles mínimos y máximos por repuesto; en la fase de operación, registra en tiempo real las entradas y salidas de componentes desde el ERP mediante dispositivos de captura; en mantenimiento, utiliza el historial de consumos para programar mantenimientos preventivos y evitar paradas por faltantes; y finalmente, en la etapa de reciclaje/disposición, identifica insumos obsoletos o de baja rotación para su devolución o sustitución, generando valor agregado al optimizar costos y disponibilidad.

**Dimensión de niveles jerárquicos (Hierarchy Levels)**

En el nivel empresa, se gestiona el inventario corporativo; en el nivel planta, se integra el stock con áreas productivas específicas; en el nivel estación, se registran consumos directamente desde los puestos de trabajo; y en el nivel producto, cada repuesto cuenta con un código único que asegura su trazabilidad en toda la cadena de suministro.

3.2. Especificación inicial de la digitalización propuesta para la empresa aceitera

A partir de los resultados obtenidos en el mapa de calor, se observa que el área de *Marketing y Ventas* presenta un nivel intermedio de digitalización, pero al mismo tiempo constituye un sector estratégico para el crecimiento de la empresa, dado que impacta directamente en la relación con los clientes y en la expansión comercial. La falta de herramientas digitales consolidadas limita la trazabilidad de pedidos, la retroalimentación de los consumidores y la capacidad de generar información para la toma de decisiones comerciales. Por este motivo, se seleccionó *Marketing y Ventas* como área prioritaria para iniciar el proceso de transformación digital, proponiendo la implementación de un portal web de clientes que centralice la información, agilice la interacción con el mercado y mejore la experiencia del usuario. Esta digitalización permitirá a la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

empresa no solo optimizar sus procesos internos, sino también ampliar su cartera de clientes, fortalecer la fidelización y posicionarse de manera más competitiva en el sector.

**Negocio (Business):** Digitalizar los procesos de Marketing y Ventas mediante un portal web de clientes que permita registrar usuarios, visualizar productos, realizar pedidos en línea y recibir actualizaciones en tiempo real. El objetivo es reemplazar tareas manuales, centralizar la información en una base de datos y optimizar la gestión comercial, mejorando la experiencia del cliente y la eficiencia interna.

**Funciones (Functional):** Gestión de catálogos y pedidos en línea, seguimiento del estado de compras, notificaciones automáticas de promociones y novedades, panel administrativo con indicadores de ventas y clientes, encuestas de satisfacción y reportes de frecuencia de compra y estacionalidad.

**Información (Information):** Base de datos con perfiles de clientes, historial de transacciones, medios de pago, patrones de compra y métricas de desempeño comercial; almacenamiento de resultados de encuestas y retroalimentación para análisis de satisfacción.

**Comunicación (Communication):** Portal web con protocolos seguros (HTTPS, API REST) que conectan clientes con el back-office empresarial; notificaciones automáticas vía correo electrónico y, en fases futuras, integración con mensajería instantánea.

**Integración (Integration):** Sincronización con sistemas ERP/CRM para mantener actualizado el inventario, los precios y la información financiera; conexión de pedidos digitales con la gestión administrativa y logística de la empresa.

**Entidad (Asset):** Infraestructura en la nube (servidores, bases de datos y seguridad), portal web accesible desde PC y dispositivos móviles, y equipos de los usuarios internos que gestionan el panel administrativo.

**Dimensión del ciclo de vida y valor agregado (Life Cycle & Value Stream)**

En la fase de planificación se diseña la arquitectura del portal, las funcionalidades de ventas en línea y los procesos de registro de clientes; en la etapa de operación, el portal permite la interacción directa de los clientes para realizar pedidos, recibir notificaciones y participar en encuestas; en mantenimiento, los datos históricos de compras y feedback de usuarios se utilizan para actualizar productos, mejorar la plataforma y ajustar las estrategias de marketing; finalmente, en la fase de reciclaje o renovación, la información recopilada sobre patrones de consumo y fidelización se convierte en valor agregado para diseñar nuevas campañas comerciales, optimizar inventarios y fortalecer la relación con los clientes.

**Dimensión de niveles jerárquicos (Hierarchy Levels)**

En el nivel producto, cada bien ofrecido se digitaliza en el catálogo y se vincula a un historial de transacciones; en el nivel estación de trabajo, los administradores gestionan pedidos y reportes desde el panel del portal; en el nivel control, se automatizan reglas de negocio para validar compras, medios de pago y disponibilidad de stock; en el nivel empresa, la integración con ERP/CRM garantiza coherencia de la información y soporte a la planificación estratégica; finalmente, en el nivel mundo conectado, el portal establece vínculos digitales con clientes y socios externos, ampliando el alcance comercial de la organización en entornos globales.

## 4. Conclusiones

En lo estudiado en este análisis se pudo notar que, si bien se conoce un poco y hay empresas que tienen algunos procesos digitalizados o en proceso de digitalizar, hay casos en los que no y se podría hacer ya que cuentan con las condiciones para realizarlo. Mediante la RAMI 4.0 pudimos obtener una propuesta inicial de digitalización para 2 empresas. En la empresa alimenticia se pudo notar que una de las áreas con mayor potencial a digitalizar es marketing, por lo que incorporar un portal web de clientes permitiría mejorar la trazabilidad y ampliar la cartera de clientes. La empresa metalúrgica por su parte, mediante la digitalización del área de logística interna, permite minimizar pérdidas por falta de stock, evitar paradas de línea y asistir en la toma de decisiones.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Los resultados que se obtuvieron muestran que la transformación digital no debe ser tomada como una meta difícil de alcanzar, sino como un proceso continuo donde se integran activos físicos y digitales con los objetivos estratégicos que persigue cada organización. En este sentido, la implementación de las propuestas planteadas permitirá a ambas empresas reinventarse hacia un modelo más eficiente, competitivo y alineado con los principios de la Industria 4.0, garantizando beneficios en términos de costos como en la creación de valor para clientes y colaboradores. Como trabajo futuro se espera continuar con el desarrollo de la propuesta de digitalización para ambas empresas.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rafaela (UTN - FRRa) y a las empresas utilizadas como caso de estudio. El trabajo se encuentra en el marco de los siguientes proyectos de investigación: “Transformación digital en PyMEs. Aplicación en la trazabilidad de productos de empresas del sector alimenticio y metalúrgico” y “Metodología para la transformación digital de procesos en la industria aceitera”.

## Referencias

Schweichhart, K. (s.f.). *PLATAFORM INDUSTRIE 4.0.* Obtenido de <https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/a2-schweichhart-reference_architectural_model_industrie_4.0_rami_4.0.pdf?utm_source=.com>

Tenea Tecnologías. (19 de Octubre de 2021). *Tenea*. Obtenido de <https://blog.tenea.com/rami-4-0-el-modelo-de-arquitectura-de-referencia-para-la-industria-4-0/>

Vélez, J., & Morero, H. *(2024)*. "Los desafíos de la digitalización en Pymes manufactureras de la Argentina: un recorrido sobre los avances empíricos recientes". *Revista PID*. Obtenido de https://revistas.unc.edu.ar/index.php/pid/article/view/45150?utm_source=.com

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Tecnologías de las organizaciones
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional**: Reconquista

# El margen bruto agrícola. Un aporte para enriquecer la metodología de cálculo

## The Agricultural Gross Margin. A Contribution to Enrich the Calculation Methodology

Presentación: 30/10/2025

**Fabio García**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
fabiogarciaa16@gmail.com

**Sandra Hurt**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
sandrahurt643@gmail.com

**Ian Duarte**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
ianduarte2002@gmail.com

**Nahuel Isaías**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
isaiasnahuelnicolas@gmail.com

### Resumen

El presente trabajo se enmarca en un grupo de investigación de la Universidad Tecnológica Nacional orientado a la generación de herramientas metodológicas para la gestión agropecuaria. La agricultura en el norte de Santa Fe enfrenta alta variabilidad climática y un mercado que exige mayor calidad, lo que demanda indicadores más completos para la toma de decisiones. En este contexto, se analiza el Margen Bruto Agrícola proponiendo una reformulación metodológica que incorpora variables habitualmente poco consideradas: calidad del grano, humedad de ingreso al acopio, merma por manipuleo y merma volátil, aplicadas en función de los kilos efectivamente entregados. La propuesta se apoya en las normas de comercialización de la Bolsa de Comercio de Rosario y en datos de calidad relevados en laboratorios y acopios de la región. Este enfoque metodológico busca evaluar con mayor precisión el desempeño productivo y el resultado económico de los sistemas agrícolas, fortaleciendo modelos de planificación agropecuaria.

**Palabras claves**: Margen Bruto Agrícola, Calidad del grano, Humedad de ingreso, Merma por manipuleo.

### Abstract

This work is part of a research group at the National Technological University, focused on developing methodological tools for agricultural management. Agriculture in northern Santa Fe faces high climatic variability and a market that demands greater quality, requiring more comprehensive indicators for decision-making. In this context, the Agricultural Gross Margin is analyzed through a methodological reformulation that incorporates variables usually overlooked: grain quality, moisture at delivery to storage, handling losses, and volatile shrinkage, applied according to the actual kilograms delivered. The proposal is based on the commercialization standards of the Rosario Board of Trade and on quality data collected from laboratories and storage facilities in the region. This methodological approach aims to evaluate more precisely the productive performance and economic outcome of agricultural systems, strengthening planning models in the agro-productive sector.

**Keywords:** agricultural Gross Margin, Grain quality, Moisture Content at Intake, Handling Losses.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

El sector agrícola desempeña un rol crucial en la economía del país, siendo la rentabilidad de las explotaciones un factor determinante para su sostenibilidad y crecimiento. Por ello, el Margen Bruto Agrícola (MBA) emerge como un indicador clave para la evaluación de la eficiencia económica de los sistemas productivos, y permite orientar las decisiones de gestión.

El Margen bruto, mide la rentabilidad de una actividad agrícola, restando los costos directos de producción de los ingresos generados por la venta de los productos. Sirve para analizar la viabilidad de diferentes cultivos, tomar decisiones de gestión y comparar la eficiencia entre distintas actividades o explotaciones, proporcionando una visión de los resultados económicos de corto plazo (Arce, 1998).

De manera similar, diversos autores coinciden en definir el MBA como la diferencia entre los ingresos brutos y los costos directos de la producción por hectárea. Martínez Ferrario (1995) lo presenta como el valor de la producción ($) menos el costo directo ($), ello divido por la cantidad de hectáreas utilizadas. José Pierri (2012), en su trabajo analiza los márgenes brutos de las explotaciones agrícolas y su enfoque se centra en la relación entre ingresos y costos directos, lo que implica una definición tradicional del margen bruto. La FAO (1995) describe el margen bruto como la diferencia entre el valor bruto de la producción y los costos totales. Pérez Vial Santos y Soto Moreno Jorge (1998) lo consideran como la diferencia entre la entrada bruta por hectárea (compuesto por la producción, multiplicada el precio) y los costos variables (gastos relacionados directamente con los volúmenes de la producción).

Si bien varios autores coinciden en la definición del margen bruto, esta metodología tradicional presenta limitaciones al no considerar factores relevantes que inciden fundamentalmente en el ingreso bruto, y por ende en el margen final obtenido.

En el presente trabajo se propone una reformulación metodológica en el ingreso bruto que incorpora variables que son ignoradas con frecuencia, como la merma física, asociada a la humedad de recibo del grano, la merma por manipuleo, la merma volátil y el factor de calidad del grano que surge del análisis obligatorio correspondiente. Esta propuesta busca ofrecer una determinación más precisa del ingreso directo por hectárea y por ende optimizar la toma de decisiones del productor agrícola.

# 2. Metodología

La propuesta metodológica busca superar las limitaciones del enfoque tradicional. Se presenta un modelo que incorpora variables claves, con el fin de lograr el objetivo de tener una estimación más precisa del ingreso bruto. La metodología se estructura en dos etapas: primero, el ajuste del volumen comerciable mediante la incorporación de las mermas; y segundo, la corrección del valor del ingreso según el factor de calidad.

## 2.1. *Inclusión de la Merma Total*

El modelo tradicional define al ingreso bruto como el producto entre el rendimiento y el precio de venta del grano:

$$\text{Ingreso Bruto}\left(\frac{\$}{\text{ha}}\right) = \text{Rendimiento}\left(\frac{\text{tn}}{\text{ha}}\right) \times \text{Precio}\left(\frac{\$}{\text{tn}}\right)$$

Sin embargo, el rendimiento se ve afectado negativamente por la incidencia de las mencionadas mermas.

En la práctica comercial de entrega de granos a un acopio por parte del productor, se consideran tres tipos de ellas aplicables sobre los kilos brutos entregados:

- *Merma física*. Corresponde a la pérdida de peso del grano debido a la humedad contenida en él. Todos los granos tienen una humedad base de comercialización que es el punto que separa lo que se considera como grano seco o grano húmedo. Todo grano entregado como húmedo, está sujeto a la merma física correspondiente. Se calcula aplicando un porcentaje de descuento sobre el peso bruto entregado, según normas de comercialización específicas. La fórmula oficial para calcular la merma física según la CAC-BCR es:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

$$\text{Merma Física} = 100\% - \left(\frac{\text{Humeda Final}}{\text{Humedad Inicial} - \text{Humedad Final}}\right) \times 100$$

- *Humedad inicial*. Es el porcentaje de humedad con el que ingresa al grano al acopio. Se puede determinar mediante los métodos

  a) Método de horno (estándar). Se pesa una muestra húmeda del grano, luego se coloca en un horno a 105°C durante 24 horas. Se pesa nuevamente después de secar y la humedad se calcula como:

$$\text{Humedad (\%)} = \left(\frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}}\right) \times 100$$

  b) Método rápido con medidores electrónicos. Se usan medidores de humedad portátiles basados en conductividad eléctrica. Da un valor instantáneo, útil para monitoreo en campo. Son menos precisos que el horno, pero prácticos para decisiones rápidas.

- *Humedad final*. Es la humedad base de recibo considerada en las normas de comercialización respectivas, después del secado o almacenamiento, cuando el grano alcanza un nivel seguro para su conservación. Se determina con los mismos métodos (horno o medidor de humedad)

Como se puede observar en la Figura 1 la humedad base de recibo considerada en dicha norma para la comercialización de Soja es de 13,5 %, cuando exceda la tolerancia establecida se aplicará la merma porcentual correspondiente.

**Figura 1**. Norma de calidad para la comercialización de Soja

**Norma de calidad para la comercialización de SOJA**
NORMA XVII - S.A.G.P y A. 151/2008

| Rubros | Base (%) | Tolerancia de recibo (%) | Rebajas | Mermas |
|---|---|---|---|---|
| Materias Extrañas | 1,0% | 3,0% | Para valores superiores a 1,0% y hasta 3,0% se rebajará a razón de 1,0% por c/% o fracción proporcional. Para valores superiores a 3,0% a razón de 1,5% por c/% o fracción proporcional. | - |
| Incluido tierra | 0,5% | 0,5% | Para valores superiores a 0,5% a razón de 1,5% por c/% o fracción proporcional. | - |
| Granos negros | - | 1,0% | - | - |
| Granos qiebrados y/o partidos | 20,0% | 30,0% | Para valores superiores al 20,0% y hasta 25,0% se rebajará a razón de 0,25% por c/% o fracción proporcional. Para valores superiores al 25,0% y hasta 30,0% se rebajará a razón de 0,5% por c/% o fracción proporcional. Para valores superiores a 30,0% a razón de 0,75% por c/% o fracción proporcional. | - |
| Granos dañados (brotados, fermentados, ardidos, dañados por calor, podridos) | 5,0% | 5,0% | Para valores superiores a 5,0% a razón de 1,0% por c/% o fracción proporcional. | - |
| Incluido granos quemados o "avería" | - | 1,0% | Para valores superiores a 1,0% a razón de 1,0% por c/% o fracción proporcional. | - |
| Granos verdes | 5,0% | 10,0% | Para valores superiores a 5,0% se rebajará a razón de 0,2% por c/% o fracción proporcional. | |
| Humedad | - | 13,5% | - | Cuando exceda la tolerancia establecida, se aplicará la merma procentual correspondiente según tabla vigente. Debería abonarse la tarifa de secada convenida o fijada |
| Chamico | - | 5 sem. por kg. | - | Para mercadería recibida que exceda la tolerancia de recibo, se practicarán las mermas correspondientes |

- *Merma por manipuleo*. Se refiere a la pérdida física de producto que ocurre durante las distintas etapas de manejo del grano dentro del sistema de acopio. Esta merma es observable y cuantificable, y se produce por acciones mecánicas o humanas que afectan la integridad del grano, como, por ejemplo: carga y descarga de camiones, traslados internos, procesos de limpieza, entre otros. Se determina mediante porcentajes establecidos por el acopio o por normas de comercialización. Normalmente los porcentajes a aplicar oscilan entre el 0,1% y 0,4% respecto del total de kilos entregados.
- *Merma volátil*. No es una perdida física visible como los granos rotos, podridos, etc, sino una disminución del peso debido a procesos internos del grano y su interacción con el ambiente. Se considera volátil porque varía según factores como la temperatura, humedad ambiente, tipo de grano, tiempo de almacenamiento, entre otros factores. corresponde a pérdidas de peso por evaporación de humedad o emisiones volátiles durante el almacenamiento. Se calcula según parámetros específicos de cada grano y condiciones de almacenamiento. Los valores promedio que aplican los acopios rondan entre el 0,1% y 0,4% respecto del total de kilos entregados.

En la tabla 1 se presenta un ejemplo de su aplicación para el cultivo de maíz, soja, trigo y girasol, partiendo de la humedad de recibo del grano hasta lograr el porcentaje de descuento en concepto de merma que el acopio aplicará sobre los kilos totales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 1.** Determinación de Merma Física, Manipuleo y Volátil en %

| Cultivos | Soja | Girasol |
|---|---|---|
| Humedad de recibo | 15,0 | 12,50 |
| Humedad considerada | **13,5** | **11** |
| % de Merma Física | 1,73 | 1,69 |
| Merma Manipuleo | 0,25 | 0,25 |
| M. Física + Manipuleo | 1,98 | 1,94 |
| Merma Volátil | 0,30 | 0,30 |
| Merma total (%) | 2,28 | 2,24 |

Fuente: Elaboración Propia[1]

Las mermas determinadas impactan directamente en el componente del rendimiento utilizado en la determinación del Ingreso Bruto o Ingreso Directo de la ecuación del Margen Bruto respectivo de cada cultivo, ya que, para reflejar correctamente la realidad de cada situación, al rendimiento inicial considerado, se le debe restar la merma total determinada anteriormente, quedando como sigue:

$$\text{Rendimiento}\left(\frac{\text{tn}}{\text{ha}}\right) = \text{Rendimiento}\left(\frac{\text{tn}}{\text{ha}}\right) - \text{Merma Total}\left(\frac{\text{tn}}{\text{ha}}\right)$$

2.2. *Inclusión del Factor de Calidad*

El segundo ajuste es la integración del factor de calidad que impacta directamente en los Ingresos Brutos. EL FC se refiere al conjunto de atributos físicos, químicos y sanitarios que determinan el valor comercial e industrial del grano. Estos influyen directamente en el precio de venta, en la aceptación por parte de compradores y en la aptitud del grano para distintos procesos de transformación (como molienda, extracción de aceite o alimentación animal).

El FC de cada grano debe determinarse aplicando los criterios establecidos en las normas de comercialización respectivas. Se puede ver las mismas en www.bcr.com.ar.

Por ejemplo, para el caso de la soja, el FC máximo posible de obtener es del 100%. Cualquier deterioro en la calidad (materias extrañas, granos dañados, granos quebrados, entre otros) va disminuyendo el FC hasta obtener el factor definitivo sobre el cuál se va a aplicar el precio de venta por la comercialización.

Si tomamos por ejemplo el girasol, el FC puede ser superior al 100%, debido principalmente al impacto de la bonificación en concepto de materia grasa que contenga dicho grano.

En la tabla 2 se presentan datos recopilados de dos laboratorios de análisis de calidad de granos durante los últimos diez años. Se puede observar el número total de análisis realizados (cantidad de análisis), el volumen total de granos evaluados (toneladas analizadas), el promedio de toneladas por análisis, y el factor de calidad promedio obtenido.

**Tabla 2.** Factor de Calidad histórico en base a relevamiento de laboratorios de análisis de calidad de granos.

| Cultivos | Soja | Girasol |
|---|---|---|
| Cantidad de análisis | 1.676 | 2.088 |
| Toneladas analizadas | 116.656 | 135.915 |
| Toneladas promedio por análisis | 69,60 | 65,10 |
| Factor de calidad promedio | 98,76% | 112,40% |

Fuente: Elaboración Propia.

[1] *Nota: La merma total se calcula sumando la merma física, por manipuleo y volátil.*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

De este modo, se propone redefinir el componente del Ingreso Bruto de la ecuación para la determinación del Margen Bruto como:

$$\text{Ingreso Bruto}\left(\frac{\$}{\text{ha}}\right) = \text{R}\left(\frac{\text{tn}}{\text{ha}}\right) \times \text{Precio Referencia}\left(\frac{\$}{\text{tn}}\right) \times \text{Factor de Calidad (\%)}$$

Para comprender la propuesta y cuantificar el impacto real en el Ingreso Bruto por hectárea que recibe el productor agropecuario, se presente seguidamente un ejemplo comparativo entre las dos metodologías de determinación. Los datos iniciales sobre los que se basa el ejemplo se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3.** Datos del caso comparativo

| **Conceptos** | Soja | Girasol |
|---|---|---|
| **Rendimiento (tn/ha)** | 1,90 | 1,80 |
| **Precio de venta (u$s/tn)** | 380 | 395 |
| **Humedad de recibo (%)** | 15% | 12,50% |
| **Humedad base de comercialización (%)** | 13,50% | 11% |
| **Merma por manipuleo (%)** | 0,25% | 0,25% |
| **Merma volátil (%)** | 0,30% | 0,30% |
| **Factor de calidad (%)** | 98,80% | 112,40% |

En base a los datos del cuadro anterior, se presentan en la tabla 4 las diferencias en la determinación del Ingreso Bruto por hectárea entre la metodología tradicional y ampliamente aceptada (IB = P x Q) y la propuesta del presente trabajo (IB = P x Q x FC), donde "Q" se verá disminuido en función de las mermas totales mencionadas más arriba.

**Tabla 4. Comparación de los ingresos brutos.**

| | Soja | | Girasol | |
|---|---|---|---|---|
| | Tradicional | Propuesta | Tradicional | Propuesta |
| **Merma física por humedad (%)** | - | 1,73% | - | 1,69% |
| **Merma por manipuleo (%)** | - | 0,25% | - | 0,25% |
| **Merma volátil (%)** | - | 0,30% | - | 0,30% |
| **Merma total (%)** | - | 2,28% | - | 2,24% |
| **Toneladas netas sujetas a precio** | - | 1,86 | - | 1,76 |
| **Ingreso directo (u$s/ha)** | 722 | 696,76 | 711 | 781,30 |
| **Diferencia (u$s/ha)** | - | -25,24 | - | 70,30 |

Fuente: Elaboración Propia.

## 3. Resultados y discusiones

Si tomamos como parámetro de referencia para determinar el Margen Bruto de un cultivo y aplicamos la metodología tradicional en el cálculo del Ingreso Bruto por hectárea multiplicando el precio de comercialización por el rendimiento obtenido, no estaríamos reflejando la realidad de la operación comercial, ya que como se puede apreciar en el ejemplo, para el caso de la soja, según el método tradicional nos arrojaría un valor de u$s 722 por hectárea, mientras que aplicando las mermas correspondientes y el factor de calidad, ese valor equivalente es de u$s 696,76, arrojando una diferencia negativa de u$s 25,24/ha. Para el caso del girasol considerado en el ejemplo, esa diferencia es de u$s 70,30/ha. En todos los casos, el grano entregado por el productor está sujeto a mermas y al factor de calidad. La información histórica relevada sustenta la afirmación de que no es prudente proyectar el Margen Bruto de un cultivo considerando como FC un 100% y sin ningún tipo de mermas.

Comprender esto es esencial para el proceso de planificación y gestión empresarial, ya que en muchas ocasiones las diferencias generadas pueden transformar un MB positivo en uno negativo y viceversa.

La propuesta metodológica permite una estimación más precisa del ingreso bruto agrícola al considerar variables como mermas y factor de calidad. No obstante, su aplicación presenta limitaciones vinculadas a la variabilidad de datos entre

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

regiones, los costos de implementación de análisis de laboratorio y la confiabilidad de las mediciones. Aun así, el modelo constituye una herramienta útil para la planificación agropecuaria, ofreciendo mayor precisión en la evaluación económica de los sistemas productivos.

## 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que factores como la calidad del grano, la merma física generada en función de la humedad de recibo, la merma por manipuleo y la merma volátil, ejercen una incidencia directa y significativa sobre el ingreso directo que recibe el producto por sus granos entregados, afectando el resultado final del Margen Bruto.

Esto confirma la necesidad de integrar dichas variables en el cálculo, superando la mirada simplificada que solo considera rendimientos y precios. Además, la inclusión de estas variables le permite al productor tomar decisiones más informadas para optimizar la gestión de sus recursos.

Todos los años, al momento de planificar sus cultivos agrícolas, el productor deberá considerar en el cálculo escenarios probables de humedad de recibo, mermas y factor de calidad a los fines de representar fielmente el posible resultado económico de la actividad.

En síntesis, la reformulación metodológica propuesta corrige una deficiencia conceptual en el cálculo del Margen Bruto y aporta una herramienta de gestión más precisa para la planificación agrícola. No obstante, al tratarse de un trabajo en desarrollo, se prevé avanzar en futuras investigaciones que profundicen en el impacto económico regional, validen la metodología en diferentes zonas y mejoren la disponibilidad de datos de calidad para su aplicación práctica.

## Referencias bibliográficas

Arce, H. (1998). *Administración, gestión y control de empresas agropecuarias*. Editorial Macchi.

Cámara Arbitral de Cereales - Bolsa de Comercio de Rosario. (s.f.). *Normas de comercialización*. Cámara Arbitral de Cereales - Bolsa de Comercio de Rosario. Disponible en < https://cac.bcr.com.ar/es/arbitraje-y-calidad/normas-de-comercializacion>

Cámara Arbitral de Cereales de la Bolsa de Comercio de Rosario (BCR). (2008). *Norma XVII. Norma de calidad para la comercialización de soja*. Cámara Arbitral de Cereales - Bolsa de Comercio de Rosario.

Daza, C. G. (Coord.). (2009). *Indicadores económicos para la gestión de empresas agropecuarias: Bases metodológicas* (Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales, N.º 11). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/indicadores-economicos-para-la-gestion-de-empresas-agropecuarias.-bases-metodologicas-1/>

Leavy, S., Melilli, M. P., Telleria, M. G., & Signorelli, A. G. (2022). *Márgenes brutos de las principales actividades agrícolas: en base a los cultivos de trigo/soja 2da, soja 1ra y maíz - Junín, General Arenales, Leandro N. Alem*. AER Junín, INTA. Disponible en <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/12160>

Leavy, S., & Signorelli, A. G. (2024). *Márgenes brutos de las principales actividades agrícolas Leandro N. Alem*. AER Vedia, INTA. Disponible en <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/20767>

Leavy, S. (2024). *Márgenes brutos de trigo en Leandro N. Alem, campaña 2023–2024*. Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, INTA. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2024/04/inta_crbsasnorte_eeapergamino_margen_bruto_trigo_alem_2023.pdf>

Martínez Ferrario, E. (1995). *Estrategia y administración agropecuaria*. Troquel.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1995). *Anexo - Análisis de margen bruto*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Disponible en <https://www.fao.org/4/x8826s/x8826s0d.htm>

Pierri, J. (2012). *Costos y márgenes en la producción de trigo 1998–2012*. Disponible en <https://www.ciea.com.ar/web/wp-content/uploads/2016/12/Doc11-Pierri.pdf>

Santos, P. V., & Soto, J. M. (1998). *Costos y márgenes de producción*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) & Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional de Investigación La Platina. Serie La Platina Nº 69, Colección Gestión Agrícola. Santiago, Chile: Impresos CGS Ltda.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

MENCIÓN ESPECIAL

**Eje temático:** Tecnología de las organizaciones
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Reconquista

# Determinación de costos y rentabilidad de la apicultura en el norte de Santa Fe

# Determination of Costs and Profitability of Beekeeping in Northern Santa Fe

Presentación: 30/10/2025

**Juan Diaz**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
juampidiaz2004@gmail.com

**Daniela Tomadin**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina
danitomadin@hotmail.com

## Resumen

La apicultura en el norte de Santa Fe es una actividad económica relevante, pero su rentabilidad está limitada por el desconocimiento de los costos reales y la falta de planificación. El objetivo principal de este estudio es determinar la estructura de costos y los márgenes de rentabilidad de la producción de miel a granel en la región. Para lograrlo, la metodología se basa en un relevamiento a campo, analizando tres escalas productivas (35, 210 y 525 colmenas) y tres escenarios de rendimiento de miel (pesimista, probable y optimista). Los resultados preliminares indican que la amortización de materiales y colmenas es el rubro con mayor incidencia sobre el costo total. Además, la escala productiva y el rendimiento de miel por colmena se identificaron como variables críticas que determinan la sostenibilidad económica de las explotaciones. El estudio, aún en desarrollo, busca proveer parámetros de referencia para la gestión y toma de decisiones.

**Palabras clave:** Apicultura, costos de producción, rentabilidad, escalas productivas, norte de Santa Fe.

## Abstract

Beekeeping in northern Santa Fe is a significant economic activity; however, its profitability is constrained by limited knowledge of actual production costs and a lack of strategic planning. This study aims to determine the cost structure and profit margins associated with bulk honey production in the region. The methodology involves field data collection across three production scales (35, 210, and 525 hives) and considers three honey yield scenarios: pessimistic, probable, and optimistic. Preliminary findings indicate that the depreciation of equipment and hives represents the highest proportion of total production costs. Furthermore, both production scale and honey yield per hive emerge as critical variables influencing the economic sustainability of beekeeping operations. This ongoing study seeks to provide benchmark parameters to support more informed management and decision-making processes.

**Keywords:** Beekeeping, production costs, profitability, production scales, northern Santa Fe

## 1. Introducción

La apicultura en Argentina representa una actividad agropecuaria de gran relevancia, tanto por su aporte a la economía nacional como por su fundamental rol ambiental en la polinización de cultivos y ecosistemas. El país cuenta con más de 22.000 apicultores y cerca de 4 millones de colmenas registradas en el Registro Nacional de Productores Apícolas (RENAPA).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La producción promedio anual alcanza las 75.000 toneladas de miel, de las cuales más del 90 % se exporta, principalmente a Estados Unidos, Alemania y Japón, posicionando a Argentina entre los principales proveedores a nivel mundial.

En este contexto, la provincia de Santa Fe ocupa un lugar destacado, con más de 430.000 colmenas distribuidas entre 2.215 productores, lo que refleja la importancia de la apicultura en el territorio provincial. Particularmente, el norte santafesino —y en especial el departamento General Obligado— concentra cerca de 43.000 colmenas, consolidándose como una zona clave para la producción apícola a nivel provincial (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca [MAGyP] & Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria [SENASA], 2023).

No obstante, a pesar de su potencial, el sector apícola en el norte santafesino enfrenta limitaciones sustanciales que condicionan su rentabilidad y desarrollo sostenible. Entre ellas se destacan el desconocimiento de los costos reales de producción, la falta de una planificación económica efectiva y la escasez de información para la gestión. Esta situación dificulta que muchas explotaciones alcancen la escala necesaria para sostenerse y crecer en el tiempo, limitando las posibilidades de inversión en tecnología, innovación o expansión, y afectando así su competitividad. La problemática se agrava debido a que muchos apicultores desarrollan esta actividad como complemento de otras ocupaciones, lo que puede generar diferencias significativas en los resultados productivos aún bajo condiciones similares y en la gestión de recursos.

En este marco, el presente trabajo se propone determinar la estructura de costos (Sapag & Sapag, 2014; Polimeni, Fabozzi & Adelberg, 1997) de la apicultura y establecer los márgenes de rentabilidad de la producción de miel a granel en la región norte santafesina. Para ello, se llevó a cabo un relevamiento a campo y el planteo de una estructura de costos, analizando la actividad bajo tres escalas productivas representativas (35, 210 y 525 colmenas) y tres escenarios de rendimiento de miel por colmena -pesimista, más probable y optimista-, siguiendo la metodología propuesta por Sapag y Sapag (2014). Es importante aclarar que el análisis se centra exclusivamente en la producción de miel a granel en tambores, una modalidad habitual de comercialización en la zona, y se decidió no incluir los subproductos de la colmena ni las actividades de agregado de valor, con el fin de enfocar la investigación en la dinámica principal de los sistemas apícolas. Los escenarios productivos planteados se basaron en datos históricos, dado que no se cuenta aún con información actualizada hasta que se finalice el relevamiento de encuestas, proceso que se encuentra en desarrollo.

Con esta investigación, se busca aportar información y herramientas que favorezcan una mejor gestión y planificación, ofreciendo a los productores parámetros de referencia claros que contribuyan a la toma de decisiones sobre la conveniencia de considerar la apicultura como actividad principal o complementaria. De esta manera, el estudio contribuye directamente a la sustentabilidad y el fortalecimiento del sector apícola local. Cabe mencionar que, dado que el presente trabajo se encuentra aún en etapa de elaboración y desarrollo, no se dispone en este momento de información completa y precisa en relación con determinados rubros de costos fundamentales, como material vivo, valor de mano de obra, costos sanitarios y kilómetros recorridos entre apiarios, entre otros componentes que forman parte del relevamiento.

## 2. Materiales y métodos

Para construir la base de información se toman como referencia los datos obtenidos a partir de encuestas realizadas a productores apícolas representativos de la región. De esta manera, el relevamiento permite captar una visión integral del funcionamiento de los sistemas apícolas locales y de los factores que inciden en la rentabilidad de la actividad, cuyos datos están en espera de ser recabados.

La modalidad de venta de miel a granel es la forma habitual de comercialización para los productores de la zona, quienes generalmente destinan la mayor parte de su producción a acopiadores o exportadores. Metodológicamente, se decidió no incluir los subproductos de la colmena (como polen, propóleo, jalea real o cera) ni las actividades de agregado de valor asociadas a la venta fraccionada o directa al consumidor. Esta delimitación se justifica porque estos elementos representan una proporción menor de la producción regional y responden a lógicas de mercado diferentes, permitiendo así enfocar el análisis en la dinámica principal de los sistemas apícolas y facilitar la comparación entre distintos niveles de producción.

Para caracterizar la actividad se consideraron tres escalas productivas representativas. La primera escala correspondió a 35 colmenas, equivalentes a un apiario típico de un productor de subsistencia o de dedicación parcial a la apicultura. La segunda escala comprendió 210 colmenas, distribuidas en seis apiarios, representando un nivel intermedio de producción con

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

mayores requerimientos de organización y recursos. Finalmente, se analizó una tercera escala de 525 colmenas, equivalentes a quince apiarios, característicos de productores especializados con fuerte orientación comercial.

De manera complementaria, se definirán tres escenarios de rendimiento basados en información histórica de los últimos años. El escenario pesimista se calculó como el promedio de los valores mínimos de producción, reflejando situaciones de baja productividad asociadas a condiciones climáticas adversas, problemas sanitarios o limitaciones en la disponibilidad de recursos florales, en este caso es de 15 kilos de miel por colmena. El escenario más probable correspondió al valor medio de la serie histórica, constituyendo una referencia realista de lo que un productor promedio podría esperar en términos de rendimiento bajo condiciones normales de producción de 30 kilos de miel por colmena. Por último, el escenario optimista se determinó a partir del promedio de los valores máximos, considerando campañas con condiciones ambientales favorables y manejo eficiente de las colmenas de 50 kilos de miel por colmena.

Con esta información histórica se determina el volumen de producción de miel según cada escala y rendimiento que se presenta en la tabla 1.

**Tabla 1.** Cantidad de producción

| Rendimiento/Escala productiva | 35 Colmenas | 210 Colmenas | 525 Colmenas |
|---|---|---|---|
| Pesimista (15 kg/c) | 525 kg | 3.150 kg | 7.875 kg |
| Probable (30 kg/c) | 1.050 kg | 6.300 kg | 15.750 kg |
| Optimista (40 kg/c) | 1.400 kg | 8.400 kg | 21.000 kg |

Con estos datos se puede calcular el ingreso que tendría cada nivel productivo, información que luego servirá para determinar los costos, el resultado y los márgenes de cada escala.

**Tabla 2**. Ingresos

| | 35 Colmenas | | 210 Colmenas | | 525 Colmenas | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pesimista | 525 kg | $1.128.750 | 3.150 kg | $6.772.500 | 7.875 kg | $16.931.250 |
| Probable | 1.050 kg | $2.257.000 | 6.300 kg | $13.545.000 | 15.750 kg | $33.862.500 |
| Optimista | 1.400 kg | $3.010.000 | 8.400 kg | $18.060.000 | 21.000 kg | $45.150.000 |

Tomando como referencia los diferentes resultados productivos y el precio de la miel por kilogramo en el mercado ($2.150/kg), según Portal Apícola (2025), se puede proyectar los ingresos que obtendría el productor según el volumen de producción alcanzado. De esta manera, al multiplicar la cantidad de kilogramos producidos por el valor de venta vigente, es posible estimar la facturación bruta. Este análisis resulta muy útil, ya que permite comparar distintos escenarios de producción (alta, media o baja) y visualizar cómo impactan directamente los ingresos económicos del apicultor. Asimismo, brinda una herramienta para una planificación financiera.

Estos resultados son indispensables para luego poder ver la rentabilidad de la actividad, para así el productor poder considerar a la actividad como secundaria o primaria.

La estructura de costos utilizada en el análisis incluyó todos los rubros fundamentales para la actividad: indumentaria y equipamiento necesarios para el manejo seguro de las colmenas, materiales y colmenas (tanto las estructuras como los insumos de reposición), alimentación suplementaria basada en azúcar y torta proteica, sanidad enfocada principalmente en el control de la varroa, movilidad vinculada al traslado de colmenas y a la logística interna, mano de obra, servicios básicos como mantenimiento, envases para la comercialización a granel y el servicio de extracción de miel, etapa clave en la obtención del producto final, siguiendo la clasificación propuesta en la literatura sobre contabilidad de costos (Polimeni, Fabozzi, & Adelberg, 1997; Horngren, Datar, & Rajan, 2012).

A continuación, se presenta una tabla de los precios actualizados correspondiente a la indumentaria típica utilizada en el sector:

**Tabla 3.** Indumentaria y equipamiento

| Ind./equipamiento | Cantidad | Costo unitario | Costo total | Vida útil (años) | Amortización |
|---|---|---|---|---|---|
| Ahumador | 1 | $ 29.850 | $ 29.850 | 5 | $ 5.970 |
| Pinza con palanca | 1 | $ 45.700 | $ 45.700 | 7 | $ 6.529 |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Cepillo doble cerda | 1 | $ 4.900 | $ 4.900 | 5 | $ 980 |
| Careta | 2 | $ 18.000 | $ 36.000 | 5 | $ 7.200 |
| Guantes | 2 | $14.000 | $ 28.000 | 5 | $ 5.600 |
| Buzo | 2 | $ 77.100 | $ 154.200 | 5 | $ 30.840 |
| Mameluco | 2 | $ 108.600 | $ 217.200 | 5 | $ 43.440 |
| Sombrero | 2 | $16.900 | $ 33.800 | 5 | $ 6.760 |
| Polainas | 2 | $ 25.000 | $ 50.000 | 5 | $ 10.000 |
| Botas | 2 | $ 20.940 | $ 41.880 | 5 | $ 8.376 |
| Total indumentaria y equipamiento | | | $ 641.530 | | $ 125.695 |

Como se puede observar en la Tabla 3, se presentan de manera detallada los diferentes costos unitarios correspondientes al equipamiento necesario para el desarrollo de la actividad apícola, junto con la cantidad requerida para llevar a cabo las labores de campo de manera eficiente. Además, se incorpora la información de la vida útil estimada de cada elemento, lo cual resulta fundamental para poder calcular no solo el costo total de adquisición, sino también la correspondiente amortización anual que debe considerarse en la evaluación económica de la actividad. Todos los valores de referencia se expresaron en pesos argentinos y corresponden a julio de 2025, tomando como base los precios vigentes al momento del relevamiento, lo que permite contar con una aproximación realista y actualizada de los costos y rendimientos de la actividad apícola en la región. Cabe destacar que estos elementos se los considera para un trabajo de dos personas, lo cual es representativo para explotaciones pequeñas a medianas.

**Tabla 4.** Costos parciales

| Diferentes escalas | 35 | 210 | 525 |
|---|---|---|---|
| Costo movilidad | | | |
| Costo mano de obra | $ 408,150.00 | $ 2,087,775.00 | $ 5,577,120.00 |
| Amortización indumentaria | $ 125,694.57 | $ 125,694.57 | $ 125,694.57 |
| Amortización materiales y colmenas | $ 727,221.25 | $ 4,363,327.50 | $ 10,908,318.75 |
| Costo alimentación (azúcar) | $ 231,000.00 | $ 1,386,000.00 | $ 3,465,000.00 |
| Costo de alimentación (torta proteica) | $ 276,273.90 | $ 1,657,643.40 | $ 4,144,108.50 |
| Costo de sanidad | $ 53,135.60 | $ 318,813.60 | $ 797,034.00 |
| Costo de envases | $ 254,545.45 | $ 1,527,272.73 | $ 3,818,181.82 |
| Costo de extracción | $ 225,750.00 | $ 1,354,500.00 | $ 3,386,250.00 |
| Costo teléfono, luz y agua | $ 1,500,000.00 | $ 2,000,000.00 | $ 2,500,000.00 |
| Costo Materiales Varios | $ 250,000.00 | $ 300,000.00 | $ 500,000.00 |
| Total Costos | $ 4,051,770.78 | $ 15,121,026.80 | $ 35,221,707.64 |

En la Tabla 4 se presenta la estructura de costos parciales, entre los que se incluyen algunos a controlar, como teléfono, luz, agua y materiales varios. Además, los costos están diferenciados según escalas de cantidad de colmenas, con su respectivo total resultante de la suma de todos los componentes. Esta información resulta de gran utilidad para el productor, ya que permite identificar qué rubros tienen mayor incidencia dentro del costo total, lo cual puede observarse de manera más clara en la figura 1 correspondiente.

Por otra parte, se está a la espera de los resultados provenientes de encuestas realizadas a productores, cuyo objetivo es relevar la información vinculada a la cantidad de kilómetros recorridos entre apiarios. Este aspecto resulta determinante para poder calcular con mayor exactitud el costo de movilidad y logística, ya que el traslado de colmenas y el desplazamiento frecuente hacia los apiarios constituye una de las erogaciones más significativas, especialmente en emprendimientos de mediana y gran escala.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

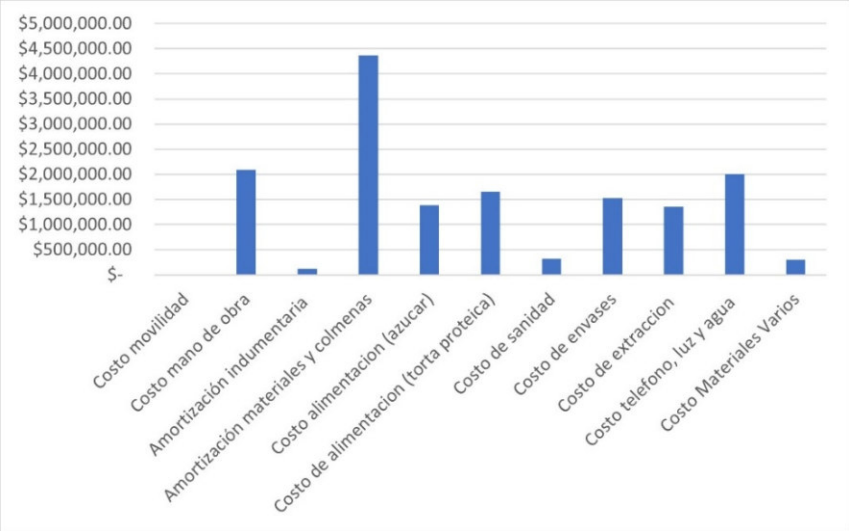



**Figura 1**. Gráfico de incidencia de los rubros sobre el costo total. Elaboración propia.

Como se observa en la figura 1, el rubro más representativo para el productor corresponde a la amortización de materiales y colmenas. Este se registra como amortización debido a que no es posible imputar todo su impacto económico en un único año, dado que dichos bienes poseen una vida útil determinada y su valor debe distribuirse a lo largo de la misma.

En lo que respecta a la recolección de datos mediante encuestas, se procura alcanzar la mayor cantidad posible de productores con el objetivo de obtener entre 20 y 30 respuestas, lo cual permitirá disponer de una base sólida y representativa para el análisis. En cuanto al criterio de selección de los encuestados, no se establece un enfoque exclusivo en determinado tipo de apicultor, ya que se considera que tanto las explotaciones de pequeña como de gran escala aportan información valiosa. Esta decisión metodológica se fundamenta en la diversidad productiva que caracteriza a la región, lo cual hace inapropiado restringir la muestra a un único perfil de productor.

## 3. Resultados y discusión

Hasta el momento, el análisis permitió estructurar la información relevada en torno a los principales rubros de costos que inciden en la producción apícola en la región. Se identificaron categorías claves como indumentaria y equipamiento, materiales y colmenas, alimentación, sanidad, movilidad, mano de obra, servicios básicos, envases y extracción de miel.

El procesamiento inicial de los datos indica que existen diferencias relevantes en la distribución de costos según la escala productiva, aunque los valores finales aún se encuentran en etapa de ajuste y verificación. Estos avances parciales constituyen una base para la construcción de tablas comparativas que permitirán, en la próxima etapa, calcular el costo total por kilo de miel en cada escenario de rendimiento considerado.

A partir de los resultados preliminares se observa que la escala productiva aparece como un factor central para analizar la rentabilidad de la actividad, ya que incide directamente en la proporción de costos fijos y variables por colmena. Asimismo, el rendimiento de miel por colmena se plantea como una de las principales fuentes de incertidumbre, lo que refuerza la necesidad de contemplar diferentes escenarios productivos.

Estos hallazgos iniciales confirman la importancia de continuar con la sistematización de datos y el desarrollo de indicadores económicos que permitan valorar con mayor precisión la sostenibilidad de la apicultura en el norte de Santa Fe.

## 4. Conclusiones

La apicultura en el norte de Santa Fe es una actividad de gran importancia económica regional, a pesar de los desafíos que presenta, especialmente en la rentabilidad y la gestión de costos. El análisis ha permitido identificar los principales factores que influyen en la estructura productiva, un paso clave para entender la dinámica del sector. Se ha determinado, a priori, que la escala productiva y el rendimiento de las colmenas son variables críticas que determinan la sostenibilidad económica de las explotaciones.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Considerando que este trabajo se encuentra aún en fase de desarrollo y que la recopilación de información completa sobre algunos rubros de costos fundamentales como material vivo, mano de obra, costos sanitarios, movilidad sigue en curso, las presentes conclusiones tienen un carácter preliminar. No obstante, servirán como una base esencial para la siguiente etapa del proyecto, en la cual se llevará a cabo un análisis cuantitativo detallado de los márgenes de rentabilidad por colmena y por kilogramo de miel, contemplando diversos escenarios de producción.

Finalmente, como parte del desarrollo futuro de este trabajo, el objetivo es desarrollar una aplicación móvil para la gestión apícola. Esta herramienta tecnológica facilitará a los productores la administración de sus operaciones, permitiendo una toma de decisiones más eficiente y una mejor planificación de sus actividades.

## Referencias bibliográficas

Balletta, A. & otro. (2022). Innovación, redes y territorio: un análisis del sistema apícola del centro de Santa Fe. Revista Agroalimentaria, *(2022)*, Universidad de los Andes.

García, A. (2005). Administración de empresas agropecuarias. Editorial Universidad de La Salle.

INTA Informa. (s.f.). Sección Apicultura. https://intainforma.inta.gob.ar/secciones/apicultura

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca [MAGyP] & Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria [SENASA]. (2023). Boletín Oficial sobre producción apícola en Argentina. https://www.argentina.gob.ar/

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (s.f.). Apicultura. https://magyp.gob.ar/apicultura/.

Portal Apícola. (2025). Precio de la miel en el mercado nacional. https://www.portalapicola.com/precio-miel-2025

Polimeni, R. S., Fabozzi, F. J., & Adelberg, A. H. (1997). Contabilidad de costos. McGraw-Hill Interamericana.

Registro Nacional de Productores Apícolas (RENAPA). https://renapa.magyp.gob.ar.

Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos*. McGraw-Hill Interamericana.

Vazquez, F. & otros. (s.f.). Informe síntesis, economía regional, cadena apícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Ministerio de Economía de la Nación.

Venanzi, S. & otros. (2025). Margen bruto de apicultura. Campaña 2024/2025. INTA Bordenave.

Eje temático

# Transportes y vías de comunicación

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Transporte y vías de comunicación
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Sanata Fe

# Impacto del costo del combustible en el transporte de carga de granos en la Ruta Nacional 11

## Impact of fuel costs on grain cargo transportation on National Route 11

Presentación: 30/10/2025

**Valentín Cicare**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Estudios de Transporte (CETRAM), Santa Fe, Argentina.
valecicare@gmail.com

**Resumen**

El presente trabajo analiza el impacto del Gas Natural Comprimido (GNC) como combustible alternativo en el transporte de carga en Argentina. Este estudio se enfoca en el transporte de soja sobre la Ruta Nacional N°11, en el tramo Rosario-Formosa. El objetivo es comparar el costo del diésel frente a su alternativa, el GNC, evaluando cuánto impacta el costo de combustible respecto al valor de la carga transportada. Si la diferencia de costos es considerable se podrá impulsar la conversión de la flota de camiones que circulan sobre la R.N. N°11 a GNC. Se realizó una recopilación de datos como carga transportada, costos, distancias y consumos, que se dejaron fijos con el fin de poder analizar la relación de los costos de ambos combustibles. Los resultados mostraron un favorable saldo al utilizar GNC implicando que además del beneficio ambiental, resulta un 48% más económico su uso con respecto al diésel.

**Palabras clave:** GNC, costo, impacto, transporte.

**Abstract**

This report analyzes the impact of Compressed Natural Gas (CNG) as an alternative fuel on freight transportation in Argentina. This study focuses on soybean transportation on National Route 11, on the Rosario-Formosa stretch. The objective is to compare the cost of diesel versus its alternative, CNG, evaluating the impact of fuel costs on the value of the transported cargo. If the cost difference is significant, it may be possible to promote the conversion of the truck fleet operating on National Route 11 to CNG. Data was collected, including cargo transported, prices, distances, and fuel consumption, which were kept constant in order to analyze the cost relationship between the two fuels. The results showed a favorable balance when using CNG, implying that, in addition to the environmental benefits, its use is 48% more economical than diesel.

**Keywords:** CNG, cost, impact, transportation

## 1. Introducción

El Gas Natural Comprimido (GNC) es una alternativa amigable a la hora de disminuir los costos relacionados con el transporte de carga. Además, tiene beneficios medioambientales como, por ejemplo, una disminución en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Argentina cuenta con una amplia infraestructura de GNC. El 9 de julio de 2023 fue inaugurado el Tramo 1 del GPNK conectando la provincia de Neuquén con la provincia de Buenos Aires. Esta información es importante ya que el Tramo 2, de unos 450 Km conectará la provincia de Buenos Aires con la provincia de Santa Fe abasteciendo gran parte del territorio

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

provincial implicando que la Ruta Nacional N°11 (R.N. N°11), corredor vial de gran importancia y relevante para el Noreste Argentino, cuente con un abastecimiento extra de GNC.

Esta vía tiene un rol muy importante ya que conecta a lo largo de sus 980 km las provincias de Santa Fe, Chaco y Formosa, como se muestra en la Figura 1, pasando por sus respectivas capitales como Santa Fe, Resistencia y Formosa, conectándolas con el complejo agroexportador del Gran Rosario, siendo este uno de los más grandes y relevantes del mundo.

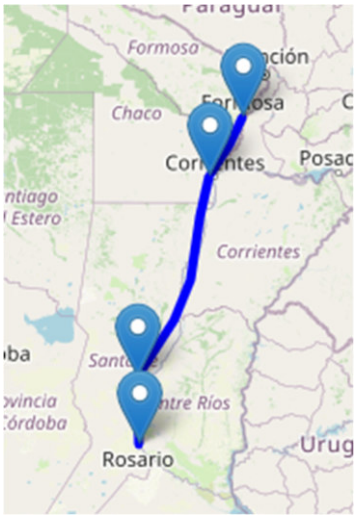



**Figura 1**. Imagen satelital de las ciudades y R.N. N°11.

## 2. Materiales y métodos

El trabajo se realizó en base a una recopilación de datos tomados en un tiempo único para lograr identificar el impacto de los combustibles en un viaje completo donde el camión sale cargado y vuelve vacío a su origen.

### 2.1. *Cálculo del costo por camión para ambos combustibles.*

La Tabla 1 contiene el valor del costo del litro de diésel (Redacción aire digital). Por otra parte, la Tabla 2 muestra el valor del precio del metro cúbico del GNC (Redacción aire digital). Dichos valores se utilizaron para el cálculo del costo del consumo de diésel y de GNC partiendo de cuatro ciudades (Origen): San Justo, Vera, Resistencia y Formosa, y teniendo como destino el Gran Rosario (Destino). Con estos valores se obtuvo el porcentaje que representa el costo del combustible con relación al valor de la carga transportada. La Tabla 3 presenta el valor de 1 tonelada de soja y el valor de la carga transportada por un camión de 30 toneladas (Cámara Arbitral de Cereales de Rosario) que se tomó como referencia.

**Tabla 1:** Datos del diésel

| DIESEL | | |
|---|---|---|
| Vacio | 0,30 | L/Km |
| Cargado | 0,40 | L/Km |
| Precio | 1.420 | $/L |

**Tabla 2:** Datos del GNC

| GNC | | |
|---|---|---|
| Vacio | 0,35 | m3/Km |
| Cargado | 0,43 | m3/Km |
| Precio | 463 | $/m3 |

**Tabla 3:** Valor de la soja

| SOJA | |
|---|---|
| $ 385.000 | 1 Tonelada |
| $ 11.550.000 | 30 Tonelada |

Las Tablas 4 y 5 evalúan el consumo de combustible para el camión cargado y vacío, tanto en litros de diésel, como en metros cúbicos de GNC. Una vez obtenido el valor económico de los diferentes consumos, en la columna de relación se puede apreciar cuanto representa el combustible en comparación al valor de la carga transportada. La relación en las columnas de vuelta vacío se marca como cero debido a que el camión no transporta carga, aunque luego se incluye en el costo total.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 4.** Costos del diésel.

| DIESEL | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ida Cargado | | | Vuelta Vacio | | | Total | |
| Ciudad | Km | Cargado (L) | Costo | Relacion | Vacio (L) | Costo | Relacion | Costo | Relacion |
| San Justo | 270 | 108 | $ 165.780 | 1,44% | 81 | $ 124.335 | 0% | $ 290.115 | 2,51% |
| Vera | 425 | 170 | $ 260.950 | 2,26% | 128 | $ 195.713 | 0% | $ 456.663 | 3,95% |
| Resistencia | 710 | 284 | $ 435.940 | 3,77% | 213 | $ 326.955 | 0% | $ 762.895 | 6,61% |
| Formosa | 900 | 360 | $ 552.600 | 4,78% | 270 | $ 414.450 | 0% | $ 967.050 | 8,37% |

**Tabla 5.** Costo del GNC.

| GNC | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ida Cargado | | | Vuelta Vacio | | | Total | |
| Ciudad | Km | Cargado (m3) | Costo | Relacion | Vacio (m3) | Costo | Relacion | Costo | Relacion |
| San Justo | 270 | 116 | $ 82.431 | 0,71% | 95 | $ 67.095 | 0% | $ 149.526 | 1,29% |
| Vera | 425 | 183 | $ 129.753 | 1,12% | 149 | $ 105.613 | 0% | $ 235.365 | 2,04% |
| Resistencia | 710 | 305 | $ 216.763 | 1,88% | 249 | $ 176.435 | 0% | $ 393.198 | 3,40% |
| Formosa | 900 | 387 | $ 274.770 | 2,38% | 315 | $ 223.650 | 0% | $ 498.420 | 4,32% |

La Tabla 6 presenta el número de camiones que pasan por año por las ciudades antes mencionadas con destino a Rosario. Estos valores fueron tomados de informes de la Secretaría de Transporte de la nación, particularmente de un Informe sobre la matriz origen-destino generado en el año 2018 (último año publicado). Esta cantidad de camiones corresponde exclusivamente al transporte de soja.

**Tabla 6.** Datos de Camiones que pasan por año.

| COD | CIUDAD | CAMIONES | TONELADAS |
|---|---|---|---|
| SSJ | San Justo | 11708 | 351.240 |
| SER | Vera | 6815 | 204.450 |
| HCP | Resistencia | 190 | 5.700 |
| FCP | Formosa | 280 | 8.400 |

En la Tabla 7 se determina el costo total del combustible (tanto para diésel como para GNC) teniendo en cuenta la cantidad de camiones que circulan por el corredor. Luego se calcula la diferencia entre ambos costos y lo que representa dicha diferencia, estimándose que el GNC resulta un 48% más económico.

**Tabla 7.** Costo total.

| CIUDAD | N° de CAMIONES | DIESEL | GNC | DIFERENCIA | % |
|---|---|---|---|---|---|
| San Justo | 11708 | $ 3.396.666.420 | $ 1.750.650.408 | $ 1.646.016.012 | 48% |
| Vera | 6815 | $ 3.112.154.938 | $ 1.604.012.475 | $ 1.508.142.463 | 48% |
| Resistencia | 190 | $ 144.950.050 | $ 74.707.620 | $ 70.242.430 | 48% |
| Formosa | 280 | $ 270.774.000 | $ 139.557.600 | $ 131.216.400 | 48% |

2.2. *Comparación de los costos recomendados por la Confederación Argentina de Transporte Automotor de Cargas (CATAC) y el precio por Km usando diésel y GNC.*

Se utilizó como base un estudio sobre el impacto de los distintos rubros en el costo por kilómetro ($/Km) tanto para diésel como para GNC para estimar el costo de transporte utilizando un camión de flota propia para la misma cantidad de Km para luego comparar tarifas de larga distancia de referencia (CATAC).

La Tabla 8 presenta los porcentajes (%) de costos que plantea CATAC para estimar el costo por km para transporte de carga de larga distancia. Estos valores corresponden al mes de marzo de 2024 (último mes publicado). Los porcentajes se utilizaron para luego poder calcular el costo por km de todos los rubros para enero de 2025 en el caso de diésel. Utilizando el mismo criterio, estos costos actualizados se utilizaron en la Tabla 9 para obtener los porcentajes y el costo total por km para el caso del GNC.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Tabla 8:** Costo por km para camión particular.

| DIESEL | | |
|---|---|---|
| **RUBRO** | **$/Km** | **%** |
| MANO DE OBRA | $ 275,3 | 15,9% |
| COMBUSTIBLE | $ 497,0 | 28,7% |
| NEUMATICO | $ 202,6 | 11,7% |
| MANTENIMIENTO | $ 107,4 | 6,2% |
| MATERIAL RODANTE | $ 145,5 | 8,4% |
| PATENTES Y REGISTROS | $ 24,2 | 1,4% |
| SEGUROS | $ 43,3 | 2,5% |
| GASTOS GENERALES | $ 53,7 | 3,1% |
| COSTOS FINANCIEROS | $ 381,0 | 22,0% |
| TOTAL | $ 1.731,7 | 100% |

**Tabla 9:** Costo por km para camión particular.

| GNC | | |
|---|---|---|
| **RUBRO** | **$/Km** | **%** |
| MANO DE OBRA | $ 275,3 | 19,5% |
| COMBUSTIBLE | $ 180,6 | 12,8% |
| NEUMATICO | $ 202,6 | 14,3% |
| MANTENIMIENTO | $ 107,4 | 7,6% |
| MATERIAL RODANTE | $ 145,5 | 10,3% |
| PATENTES Y REGISTROS | $ 24,2 | 1,7% |
| SEGUROS | $ 43,3 | 3,1% |
| GASTOS GENERALES | $ 53,7 | 3,8% |
| COSTOS FINANCIEROS | $ 381,0 | 27,0% |
| TOTAL | $ 1.413,5 | 100% |

La Tabla 10 presenta el costo de transporte utilizando la tarifa de referencia que plantea CATAC (para 1 tonelada y para un camión completo: 30 toneladas) y los costos necesarios para realizar un viaje completo (ida y vuelta) considerando que el camión es propio (tanto para diésel como para GNC). Se analizan los viajes desde las 4 ciudades de origen planteadas hasta el Gran Rosario.

**Tabla 10.** Costo de camión particular y costo de contratar un tercero.

| Ciudad | KM | CATAC | | FLOTA PROPIA | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | UNITARIO | 1 CAMION | DIESEL | GNC |
| San Justo | 270 | $ 37.804 | $ 1.134.120 | $ 935.122 | $ 763.315 |
| Vera | 425 | $ 52.911 | $ 1.587.330 | $ 1.471.951 | $ 1.201.514 |
| Resistencia | 710 | $ 66.482 | $ 1.994.460 | $ 2.459.024 | $ 2.007.235 |
| Formosa | 900 | $ 74.841 | $ 2.245.230 | $ 3.117.073 | $ 2.544.382 |

## 3. Resultados y discusión

*3.1. Consumos y valores de Diesel*.

En la Figura 2 se observa la evolución del costo en combustible diésel desde las ciudades de origen hasta el complejo agroexportador del Gran Rosario. Se plasman tres curvas las cuales representan, la curva azul oscuro es la de un viaje completo, ósea el costo total de combustible para un camión, la curva azul es la ida del camión desde el origen hasta el destino (va con carga) y por último la curva azul claro es la vuelta del camión desde el destino hasta el origen (vuelve vacío).

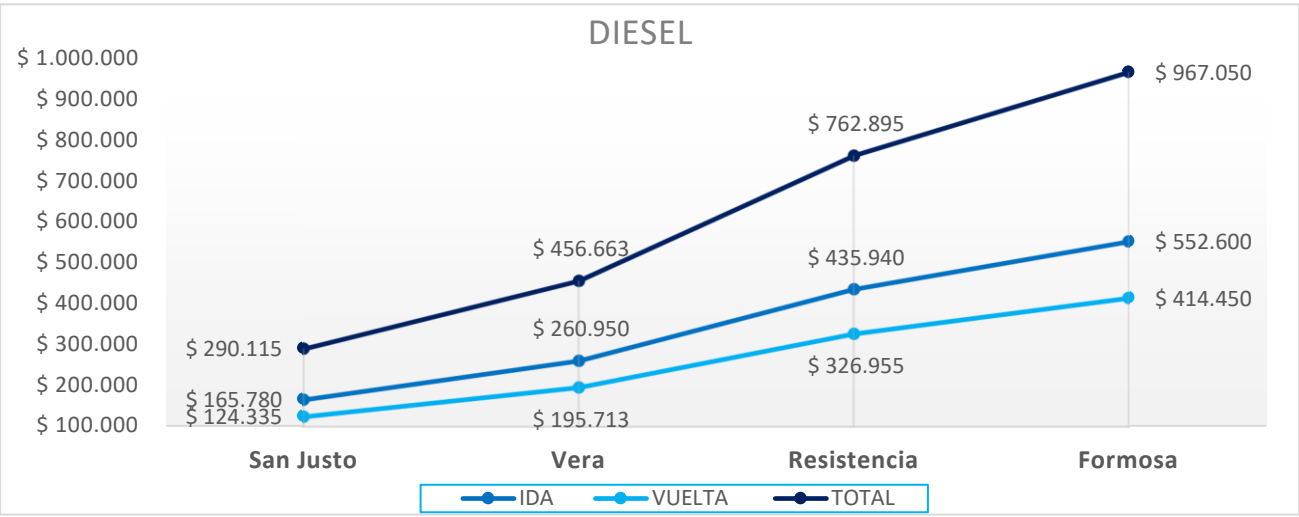



**Figura 2.** Evolución del impacto de diésel.

3.2. *Consumos y valores de GNC.*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En la Figura 3 se observa la evolución del valor de combustible GNC desde las ciudades de origen hasta el complejo agroexportador de Rosario, se visualizan tres curvas las cuales representan, la curva amarilla oscura es la de un viaje completo, ósea el costo total de combustible para un camión, la curva amarilla es la ida del camión desde el origen hasta el destino (va con carga) y por último el trazo amarillo claro es la vuelta del camión al origen (vuelve vacío).

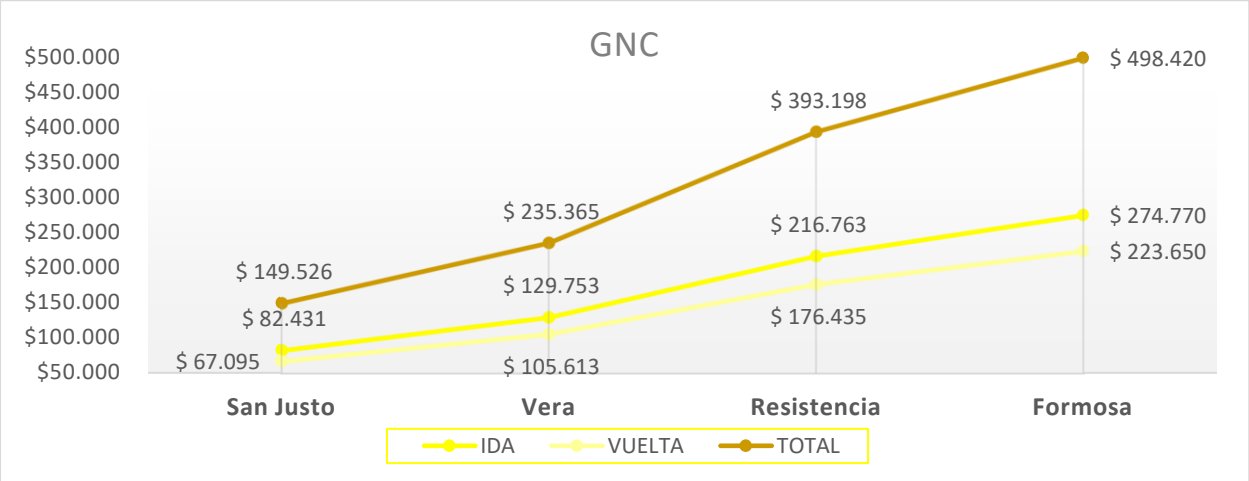



**Figura 3.** Evolución del impacto de **GNC**.

3.3. *Consumos y valores del Mix.*

En la Figura 4 se representa el impacto de ambos combustibles quedando a la vista que el costo total del GNC es un 48% más barato en comparación con el costo total de diésel, por otro lado, es perceptible que con GNC se puede realizar un viaje completo mientras que con un costo similar de plata solo se puede realizar el viaje de ida con diésel.

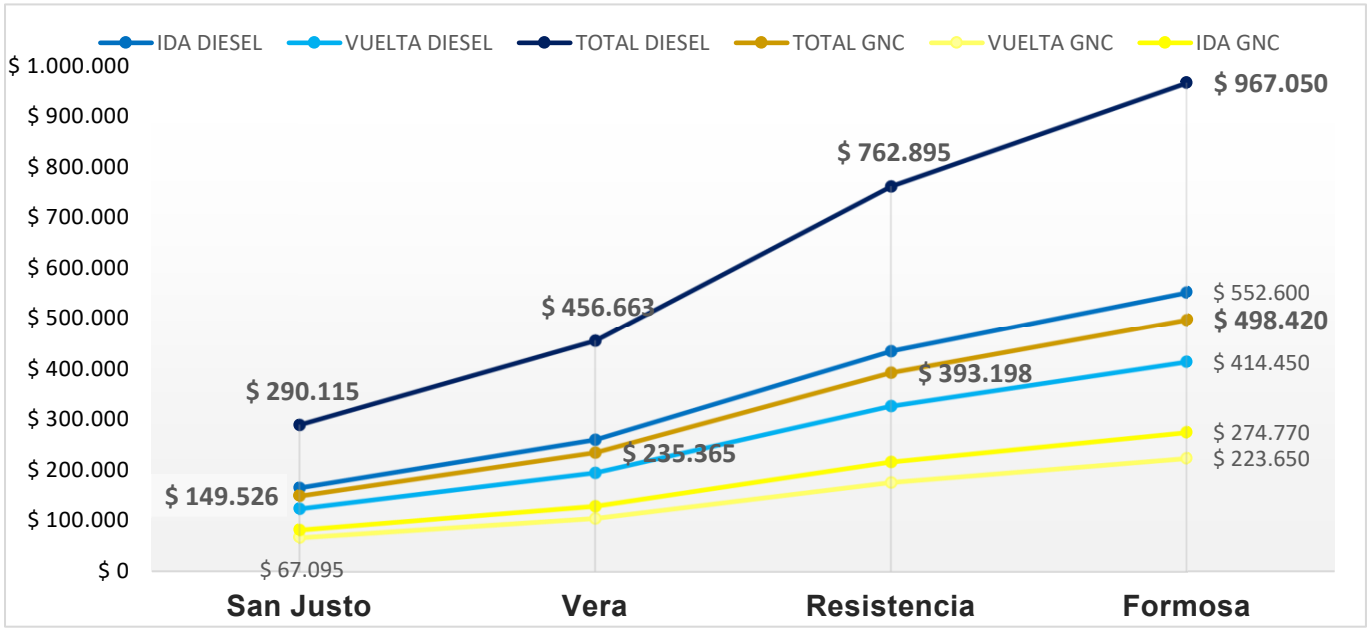



**Figura 4.** Evolución del impacto de los combustibles en el costo del transporte de carga.

Del análisis surge que resultaría muy importante para abaratar los costos del transporte de carga que se mueve por la R.N. N°11, migrar los camiones de Diésel a GNC, obteniendo beneficios tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

3.4. *Costo de transporte propio y un tercero.*

En la Figura 5 se graficaron los costos totales para llevar la carga con un camión particular utilizando tanto diésel como GNC para enero de 2025. Además, se encuentra graficado el costo del flete utilizando las tarifas recomendadas por CATAC. En la comparación se ve que si el traslado de la carga es de corta distancia resulta conveniente utilizar un camión propio ya

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

sea de GNC o Diesel y a medida que la carga se aleja de la ciudad de destino resulta más conveniente la utilización de un camión propio utilizando GNC. Sin embargo, cuando la distancia es considerablemente grande (Origen: Formosa) conviene utilizar transporte por terceros para realizar el traslado de la carga debido al impacto que tiene la vuelta "vacío" con el camión propio.

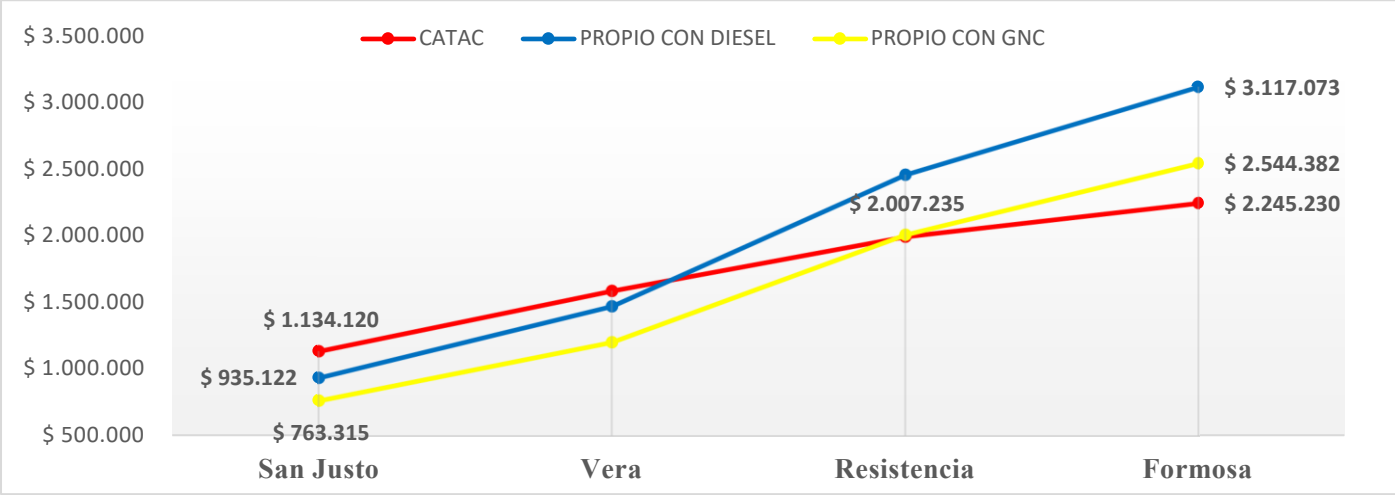



**Figura 5.** Evolución del costo de viaje.

Basado en los datos presentados, resulta evidente que el GNC no solo supera al diésel en términos de eficiencia, sino que también ofrece una ventaja económica considerable, lo que lo convierte en una alternativa más competitiva.

## 4. Conclusiones

El impacto del combustible fue calculado para un solo camión que funciona con diésel y uno que funciona con GNC. Analizando solo el combustible, los datos muestran que la utilización de GNC reduce el costo un 48% y por lo tanto la disminución del impacto del combustible con relación a la carga transportada pasa de entre 2,5% al 8,3% con diésel (según la distancia del origen al destino) a entre 1,3% al 4,4% con la utilización de GNC. Esto también demuestra que resulta favorable para impulsar el cambio de la flota de camiones con diésel a camiones con GNC.

La reducción de los costos del transporte de carga utilizando GNC ($/Km), es beneficioso aun cuando se comparan con las tarifas de referencia elaborada por CATAC para distancias menores a los 700 km desde origen a destino. Para distancias superiores a este valor lo recomendado es contratar un transporte por terceros para trasladar la carga debido al impacto del costo del viaje de vuelta vacío.

## Agradecimientos

Se agradece el acompañamiento del Centro de Estudios de Transporte (CETRAM), el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## Referencias

Cámara Arbitral de Cereales de Rosario (2025) "Precios Pizarra del día 20/08/2025". Disponible en: <https://www.cac.bcr.com.ar/es/precios-de-pizarra>

Redacción Aire Digital (3 de Agosto de 2025). Nuevo aumento de combustibles: así quedaron los precios en la ciudad de Santa Fe. *Aire Digital.* Disponible en: <https://www.airedesantafe.com.ar/santa-fe/nuevo-aumento-combustibles-asi-quedaron-los-precios-la-ciudad-santa-fe-n625026>

Redacción Aire Digital (6 de Marzo de 2025). Nuevo incremento del GNC en la ciudad de Santa Fe: cuánto cuesta el metro cúbico. *Aire Digital*. Disponible en: <https://www.airedesantafe.com.ar/santa-fe/nuevo-incremento-del-gnc-la-ciudad-santa-fe-cuanto-cuesta-el-metro-cubico-n610458>

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Secretaria de Transporte (2025) “Matriz Origen-Destino vial de Transporte de Cargas - años 2012, 2014, 2016 y 2018”. Disponible en: <https://datos.transporte.gob.ar/dataset/matriz-od-vial-cargas>

Confederación Argentina de Transporte Automotor de Cargas (1 de Marzo de 2025). “Costos del Transporte de Larga Distancia”. Disponible en: <https://api.apicatac.com/wp-content/uploads/2024/04/24-03-LARGA-DISTANCIA.pdf>

Confederación Argentina de Transporte Automotor de Cargas (1 de Enero de 2025). “TARIFA DE REFERENCIA NACIONAL PARA EL TRANSPORTE DE CEREALES, OLEAGINOSAS SUBPRODUCTOS Y FERTILIZANTES”. Disponible en: <https://api.apicatac.com/wp-content/uploads/2025/03/2025-01-TARIFA-CEREALES-NACIONAL.pdf>

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático**: Transportes y vías de comunicación
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional**: Rafaela

# Análisis y propuesta de mejora de intersección crítica mediante simulación del tránsito urbano con NETEDIT y SUMO – Caso de estudio ciudad de Rafaela

## Analysis and Improvement Proposal of a Critical Intersection through Urban Traffic Simulation with NETEDIT and SUMO – Case study of Rafaela

Presentación: 30/10/2025

**Santiago Jesús Gasparotti**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
gasparottisantiago396@gmail.com

**Resumen**
El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento del tránsito urbano, mediante un relevamiento de observación directa del tránsito y de modelar una intersección de calles utilizando softwares NETEDIT y SUMO SIMULATOR (Simulation of Urban MObility), herramientas que permiten modelar y simular distintas situaciones de circulación y evaluar el impacto de posibles intervenciones. Se busca con esto optimizar la seguridad vial y la circulación, sin alterar significativamente la dinámica urbana. Para este caso en particular se seleccionó una intersección de calles de la ciudad de Rafaela: el cruce entre Boulevard Santa Fe y Sargento Cabral que posteriormente se convierte en calle Pueyrredón. Esta esquina se caracteriza por registrar un alto flujo vehicular y peatonal, junto con un índice de siniestralidad elevado. En la misma y a través del software, se evaluarán diferentes soluciones según el análisis y alternativas que se fijarán en este estudio.

**Palabras clave:** Seguridad Vial - Intersección de calles - NETEDIT/SUMO – Optimización del Tráfico.

**Abstract**
This study aims to analyze urban traffic behavior through a direct traffic observation survey and modeling of a street intersection using NETEDIT and SUMO SIMULATOR (Simulation of Urban MObility) software, tools that allow for the modeling and simulation of different traffic situations and the evaluation of the impact of potential interventions. The aim is to optimize road safety and traffic flow without significantly altering urban dynamics. For this particular case, a street intersection in the city of Rafaela was selected: the intersection of Santa Fe Boulevard and Sargento Cabral, which later becomes Pueyrredón Street. This intersection is characterized by high vehicular and pedestrian traffic, along with a high accident rate. At this intersection, and using the software, different solutions will be evaluated based on the analysis and alternatives established in this study.

**Keywords**: Road Safety - Street Intersection - NETEDIT/SUMO - Traffic Optimization.

## 1. Introducción

A través de modelar una intersección de calles utilizando softwares NETEDIT y SUMO SIMULATOR (Simulation of Urban MObility), que son herramientas que permiten simular distintas situaciones de circulación y evaluar el impacto de posibles intervenciones, se comienza a evaluar el caso de estudio seleccionado.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Rafaela es una ciudad de crecimiento dinámico y traza urbana homogénea, con su clásico trazado en forma de "tablero de ajedrez", genera una mayor concentración en los boulevares, convirtiendo el flujo de tránsito menos denso en las demás calles. En ese contexto, el Boulevard Santa Fe actúa como una arteria troncal que divide y conecta el casco céntrico. Una de sus intersecciones más conflictivas es el cruce con Sargento Cabral, que se transforma en Pueyrredón tras la bifurcación.

**Figura 1**. Vista superior de la intersección de Bv. Santa Fe y S. Cabral y Pueyrredón.

Tomamos esta intersección como la problemática a estudiar a través del software. Esta intersección presenta las siguientes características: flujo bidireccional intenso por el boulevard, giro a la izquierda frecuente, giro en U frecuente y escasa separación entre calzada y peatón. La combinación de estas variables lo convierte en uno de los puntos con mayor siniestralidad de la zona céntrica. Para abordar esta problemática, es fundamental recurrir a herramientas de simulación de tráfico que permitan:

- Modelar la infraestructura vial existente.
- Simular el comportamiento de los vehículos.
- Implementar modificaciones virtuales y evaluar su impacto antes de realizar obras o cambios en la normativa.

En este trabajo, se utiliza el software NETEDIT que es una herramienta del ecosistema SUMO (Simulation of Urban MObility), para crear un modelo preciso del sector crítico, analizar su estado actual y aplicar mejoras propuestas. Las mejoras que se proponen analizar son:

a) Prohibir el giro a la izquierda para reducir maniobras conflictivas
b) Agrandar carril para aumentar la capacidad de circulación.
c) Añadir semáforos para regular el flujo en la intersección.

Por último, observaremos si una combinación entre las mejoras propuestas puede elegirse como mejora definitiva. Debemos aclarar que se realizarán en total 4 planos: un detalle la situación actual (sin mejoras), un agrandamiento de carril, una prohibición de giro a la izquierda e incorporación de semáforos.

## 2. Materiales y métodos

2.1. *Objetivo*

El mismo es desarrollar un modelo de simulación en NETEDIT que reproduzca fielmente la dinámica del tránsito en el cruce seleccionado para este caso, de Bv. Santa Fe y Sargento Cabral/Pueyrredón, y realizar las siguientes acciones:

- Evaluar el impacto de intervenciones viales propuestas.
- Documentar un procedimiento detallado para el uso de NETEDIT, de manera que pueda ser replicado por otros estudiantes, técnicos o autoridades municipales.
- Fundamentar con evidencia visual y cuantitativa la eficacia de las mejoras sugeridas.

2.2. *Objetivos específicos del Software*

- Representar gráficamente la red vial del sector en NETEDIT.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- Configurar parámetros de circulación como sentidos de las calles, número de carriles, semáforos y restricciones de giro.
- Definir y simular el flujo vehicular actual.
- Implementar virtualmente las mejoras y comparar los resultados con la situación inicial.
- Generar un tutorial técnico sobre el uso de NETEDIT aplicado a un caso real de Rafaela.

2.2.1. Descripción de NETEDIT

Es el editor gráfico de redes viales del simulador SUMO. Permite crear, modificar y optimizar redes de calles y carreteras, además de configurar elementos de control del tránsito como semáforos, límites de velocidad y direcciones permitidas. El mismo trabaja sobre una estructura de *edges* (tramos de calle) y *nodes* (nodos o intersecciones), los cuales pueden tener atributos como: sentido de circulación, número de carriles, velocidad máxima, restricciones de giro y control semafórico.

A partir de este punto, comienza la explicación de las herramientas informáticas que utilizaremos:

2.2.2. Procedimiento detallado de uso

A. Creación de una nueva red

- Abrir NETEDIT.
- Ir a File → New network.
- En el cuadro de diálogo inicial, NETEDIT ofrece dos opciones principales:
- Importar desde OpenStreetMap (*From OSM*): recomendable cuando se busca representar con exactitud una zona real ya cartografiada.
- Crear desde cero (*Empty network*): opción que permite al usuario diseñar completamente la red vial de manera manual, controlando cada tramo, intersección y parámetro de circulación.

En este caso, se optará por la creación desde cero, con el fin de comprender en profundidad el proceso de construcción y configuración de cada elemento de la red.

B. Añadir calles (Edges)

- Colocar en Estado Network (estado predeterminado cuando abrimos un nuevo documento).
- Activar el Modo Edición de Tramos (*Edge Mode*), representado por un ícono de línea en la barra de herramientas.
- Como paso electivo, podemos activar la opción SHOW GRID, la cual es una casilla que nos permitirá hacer una manzana recta o varias intersecciones/esquinas en la misma calle. En este caso, será utilizada para una prolija representación.
- Hacer clic en el punto inicial y luego en el punto final para trazar una calle.
- NETEDIT genera por defecto un tramo con un sentido de circulación único y un solo carril. Si hacemos el tramo de izquierda a derecha, esa es la dirección que toma el sentido de la calle. De todas maneras, el mismo se puede modificar de la siguiente manera, Edge Operations => Reverse Edge.
- Repetir el procedimiento para cada calle que forme parte de la red a modelar.
- En la barra izquierda, en Num Lanes, podremos cambiar la cantidad de carriles por mano.

Lo siguiente que debemos hacer, es observar las conexiones de la calle, ya que el simulador no distingue cuales son los giros permitidos o no. El mismo se realiza con la siguiente herramienta:

C. Herramienta Connection Mode

Se utiliza para crear, modificar o eliminar las conexiones entre carriles en una intersección. En la práctica, es la herramienta que define qué movimientos pueden realizar los vehículos (seguir recto, girar a la derecha o a la izquierda).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

- Continuar en Network e ir a Modes en la barra superior.
- Seleccionar Connection Mode (ícono de flechas verdes).
- Nos colocará en color rojo todas las esquinas.
- Hacer zoom sobre la intersección donde queremos trabajar.
- Eliminar las conexiones prohibidas, seleccionando y haciendo clic sobre ambas calles suprimiendo o agregando la conexión entre las mismas.

De esta manera, podremos presentar una de las mejoras, que trata de prohibir el giro a la izquierda. Una vez realizado el chequeo de nuestras conexiones, podremos añadir semáforos, autos y modificar el flujo de los mismos.

D. Añadir semáforos en NETEDIT

- Localizar la intersección donde se quiere colocar el semáforo.
- Hacer clic sobre el nodo (punto de unión de calles) que representa esa intersección.
- En el panel de propiedades, buscar la opción Type y cambiarla a Traffic Light.
- Configurar las fases semafóricas.
- El programa realiza un semáforo por defecto, en caso de necesitar cambiar o prohibir una dirección seleccionaremos la misma y con click derecho podremos cambiar la misma por color.
- Guardar los cambios para que el semáforo quede en el programa.

E. Añadir vehículos manualmente

- Colocar en modo Demand.
- Cambiar a Vehicle Mode. Se puede acceder desde Modes => Vehicle Mode.
- Hacer clic en la calle o carril donde quieres que aparezca el vehículo al comenzar la simulación.
- Configurar las propiedades: colocar opción Flow (from-to-edges), esta opción permite realizar el trazado del vehículo desde donde nosotros queramos, permitiendo varias direcciones para el mismo punto de partida. Con la misma colocaremos todas las rutas posibles que realice el vehículo.
- Vehicle ID (opcional): nombre único para identificar el vehículo (por ejemplo, car_01).
- Route: define el origen (calle/carril donde empieza) y el destino (calle/carril donde termina).
- Tiempo de simulación (Ver): tiempo en que se reproduce el movimiento de la simulación.
- Cantidad de Vehículos por hora (VerperHour): flujo/cantidad de autos que se reproducen en la simulación por hora.
- Type: elegir entre distintos tipos de vehículos definidos (auto, bus, camión, moto) o crear uno nuevo con parámetros personalizados como velocidad máxima, aceleración y tamaño.

F. Verificar la Simulación

Una vez realizada las simulaciones debemos verificar si se adaptan a la situación correcta del Estado Actual. Una vez aplicadas las herramientas mencionadas anteriormente, tendremos los conocimientos necesarios para realizar los planos y sus respectivas mejoras y análisis.

## 3. Resultados y discusión

Del análisis de la modelización propuesta y de las mejoras planteadas resultan como alternativas mas viables las siguientes:

### 3.1. *Prohibición del giro a la izquierda*

La eliminación de giros a la izquierda en todo el sector central del boulevard busca reducir las maniobras de alto riesgo que generan conflictos entre flujos opuestos. Esta restricción disminuye el número de puntos de conflicto en las intersecciones, reduce el tiempo de espera de los vehículos que circulan en línea recta y mejora la seguridad vial al minimizar situaciones propensas a accidentes. Haciendo que se pueda acceder desde al Boulevard desde las calles perpendiculares. Es la solución

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

con menor necesidad de inversión para realizar. Sin embargo, si no se planifican bien los accesos alternativos, puede provocar congestión en calles paralelas o perpendiculares**.**

3.2 *Ensanchamiento de carriles*

El aumento del número de carriles en el Boulevard Santa Fe, especialmente en su tramo central, tiene como objetivo incrementar la capacidad de circulación y reducir la acumulación de vehículos en horas pico. Al disponer de tres carriles por sentido, se optimiza el flujo vehicular y se disminuyen los tiempos de espera en intersecciones críticas. Esta medida también permite una mejor distribución del tránsito entre carriles, reduciendo la probabilidad de embotellamientos localizados. Se puede comprender que esta medida se puede aplicar sin necesidad de realizar un cambio físico en el boulevard, si no, simplemente prohibiendo el estacionamiento de los autos en el mismo. Ahora bien, si se elimina el espacio de estacionamiento, lo cual puede afectar negativamente a comercios y residentes cercanos. Además, el aumento de la capacidad vehicular puede atraer más autos (efecto de demanda inducida), reduciendo los beneficios a mediano plazo, sumado a que puede aumentar la velocidad promedio de circulación, elevando el riesgo para peatones si no hay medidas de seguridad complementarias.

3.3 *Instalación de semáforos*

La colocación de un semáforo en la intersección de Bv. Santa Fe y Sargento Cabral/Pueyrredón permite regular el cruce de múltiples flujos vehiculares y peatonales. Un control semafórico bien programado equilibra los tiempos de paso, garantiza la seguridad de los peatones y evita que un flujo vehicular predomine sobre otro, favoreciendo una circulación más justa y ordenada. Aunque, pasado a la realidad podemos comprender que no sería la opción más favorable, ya que el Boulevard Santa Fe arrastra un trayecto de semáforos programados no correctamente, e incluir un semáforo más en el centro requeriría un nuevo análisis de tiempos para su colocación. A su vez, puede generar embotellamientos en las demás cuadras del centro y requiere un costo de instalación elevado. Por último, podemos concluir con que una 4ta mejora o mejora definitiva es la combinación entre las mejoras 1 y 2, ya que elimina maniobras conflictivas (giro a la izquierda) y aumenta la capacidad efectiva del corredor sin obra civil pesada (libera carriles).

## 4. Conclusiones

El presente estudio motiva al aprendizaje y desarrollo de competencias técnicas en simulación, análisis y propuesta de soluciones urbanas, fortaleciendo la formación de futuros profesionales capaces de intervenir de manera efectiva en el diseño y optimización de sistemas de transporte.

Del análisis de las 3 propuestas desarrolladas se cumple con el objetivo de que en un primer paso se podría estar desarrollando los puntos 1 y 2 (ensanchar el carril y prohibir el giro a la Izquierda) las cuales no necesitan una inversión en infraestructura excesiva y a su vez, puede revertirse en caso de no funcionar.

De forma genérica se desarrolla cumpliendo todas sus etapas, integrando el trabajo práctico dentro del contexto académico de las carreras de Ingeniería Industrial y Civil. Esta experiencia no solo permitió aplicar herramientas de simulación y modelado como NETEDIT y SUMO, sino que también reforzó la comprensión de conceptos teóricos vinculados a la planificación urbana, la movilidad y la optimización del tránsito. De esta manera, se promueve un aprendizaje más efectivo y orientado a la práctica profesional.

Como conclusión general, el siguiente análisis da un ejemplo de cómo plantear a través de un software la modelización de un flujo de tránsito y valorizar diferentes alternativas en función de requerimientos específicos que se planteen.

La concreción de este trabajo abre la posibilidad de desarrollar nuevos proyectos que aborden otras problemáticas de movilidad en la ciudad, aplicando metodologías similares para la evaluación de alternativas. Entre ellas, podrían incluirse estudios de sincronización semafórica, incorporación de transporte público en la simulación o análisis de infraestructura ciclista y peatonal.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Mg. Eduardo Monier, coordinador e investigador de apoyo, perteneciente al grupo GIAMNCI (Grupo de investigación de métodos numéricos en ciencia e ingeniería), el Esp. Ing. Diego Pollini y Alexis Walter; Mauro Zvic como Becarios BINID, en el marco del proyecto “Desarrollo y Simulación de un Sistema de Brazo Robótico mediante Visión Artificial con Aplicación Didáctica y Proyección Industrial.”.

## Referencias bibliográficas

- Eclipse SUMO (2025). Simulation of Urban Mobility (SUMO) – Official Download Page. Disponible en <https://eclipse.dev/sumo/>.
- Traffic Simulation with SUMO (2023). YouTube Video. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=QYT2TdwRPC0>.
- SUMO NETEDIT: How to edit networks [Part 1] (2025). YouTube Video. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=igElLY9pqYM>.
- Gobierno de Rafaela. (s.f.). Infografías sobre movilidad urbana. Disponible en <https://www.rafaela.gob.ar/gobiernoabierto/InfografiasLista.aspx?i=21>.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Transportes y vías de comunicación
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Análisis de la superestructura ferroviaria existente para la implementación de un servicio urbano de pasajeros en Santa Fe

## Analysis of the existing railway superstructure for the implementation of an urban passenger service in Santa Fe

Presentación: 30/10/2025

**Candela Lozano**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo Científico de Estudios de Transporte, Accidentología y Movilidad (CETRAM), Santa Fe, Argentina
candelalozano08@gmail.com

**Mariana Natta**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo Científico de Estudios de Transporte, Accidentología y Movilidad (CETRAM), Santa Fe, Argentina
mnatta@frsf.utn.edu.ar

### Resumen

Este trabajo es un avance de un proyecto que se desarrolla en CETRAM, cuyo objetivo es estudiar la factibilidad de implementar un servicio ferroviario de pasajeros en Santa Fe sobre estructura existente. Parte de la hipótesis de disponibilidad de vía finalizado el Plan Circunvalar destinado a desviar los trenes de cargas del medio urbano. La metodología comprende relevamientos fotográficos para evaluar el estado estructural, análisis de vehículos ferroviarios operando en Argentina y procesamiento de información mediante Sistemas de Información Geográfica (GIS). Los resultados preliminares evidencian vías con condiciones operativas aceptables, y existencia de alternativas tecnológicamente compatibles para un servicio de tren ligero de pasajeros. La propuesta es innovadora, ya que es el primer proyecto en Santa Fe que articula la recuperación de estructuras ferroviarias con planificación territorial orientada a la sostenibilidad y crecimiento urbano vinculado al transporte.

**Palabras clave:** transporte, desarrollo, ferrocarril, ciudad.

### Abstract

This work is an advance of a project being developed at CETRAM, whose objective is to study the feasibility of implementing a passenger railway service in Santa Fe on existing infrastructure. It is based on the hypothesis of track availability once the Circunvalar Plan—aimed at diverting freight trains from the urban area—is completed. The methodology includes photographic surveys to assess structural conditions, analysis of railway vehicles operating in Argentina, and data processing through Geographic Information Systems (GIS). Preliminary results show tracks with acceptable operating conditions and the existence of technologically compatible alternatives for a light rail passenger service. The proposal is innovative, as it is the first project in Santa Fe that combines the recovery of railway infrastructure with territorial planning oriented toward sustainability and urban growth linked to transportation.

**Palabras clave:** transport, development, railway, city.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

# 1. Introducción

La ciudad de Santa Fe presenta importantes desafíos en materia de movilidad urbana. Las deficiencias del sistema de transporte público de colectivos, vinculadas a la baja cobertura, la escasa frecuencia y la mala de calidad del servicio, han incentivado el uso de medios individuales, generando congestión vehicular, impactos ambientales negativos y mayores costos sociales y económicos. En este contexto, la existencia de infraestructura ferroviaria en el ejido urbano —particularmente los ramales C y F23, actualmente utilizados por el Ferrocarril Belgrano Cargas con tres o cuatro formaciones diarias— constituye una oportunidad estratégica para repensar la movilidad en la ciudad.

Existen antecedentes en el país, como el tren Paraná-Colonia Avellaneda, en la provincia de Entre Ríos, y diversos estudios académicos recientes (Vecchio,2021; Saus et al,2022), que demuestran el potencial del modo ferroviario para integrarse al transporte urbano. Sin embargo, en Santa Fe no se ha desarrollado aún un proyecto que combine la recuperación de infraestructuras con una visión de planificación territorial orientada a la sostenibilidad, aunque si hubo un proyecto denominado Tren Urbano que fue impulsado por el entonces intendente Mario Barletta en 2011, pero no tuvo desarrollo por falta de autorizaciones y fallas técnicas en las unidades.

En este marco, el proyecto en desarrollo estudia la factibilidad de implementar un servicio ferroviario de pasajeros que conecte el noreste de la ciudad con el núcleo urbano central, articulando la movilidad con estrategias de ordenamiento urbano ya que el sector mencionado está despoblado y podría albergar un proyecto de urbanización que garantiza mayor demanda de pasajeros. La metodología adoptada incluye análisis documental, trabajo de campo con relevamientos fotográficos para diagnosticar el estado de la superestructura, relevamiento de vehículos ferroviarios disponibles en el país que podrían adaptarse a las condiciones locales y el uso de herramientas SIG para caracterizar densidades poblacionales y accesibilidad.

El aporte de este trabajo radica en integrar la recuperación de estructuras existentes con una visión de movilidad sostenible e intermodal, así como en explorar su potencial para impulsar procesos de desarrollo urbano en el sector noreste de la ciudad.

# 2. Materiales y métodos

*2.1 Relevamiento de la Estructura ferroviaria.*

*2.1.1* Descripción de la metodología

El análisis del estado de la superestructura ferroviaria se efectuó mediante un relevamiento virtual utilizando la herramienta Google Street View, lo que permitió recorrer y documentar en forma sistemática el ramal C y el ramal F23. Este procedimiento se adoptó como estrategia metodológica debido a la accesibilidad que brinda el servicio y la posibilidad de generar un registro visual inicial para su posterior comparación y evaluación a fin de determinar el estado de las estructuras y las características socio ambientales del entorno.

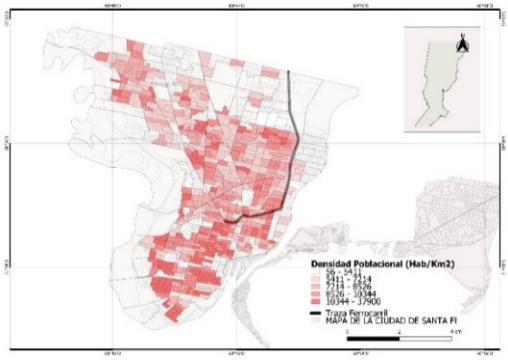



**Figura 1.** Mapa temático-Proyecto ferroviario y la densidad de población.

El relevamiento fotográfico fue complementado con el uso de Sistema de información geográfica (SIG), (*QGIS* Development Team*,2025*) en los que se georreferenciaron los tramos de observación y se incorporaron capas temáticas correspondientes a densidad poblacional (INDEC, 2023). Esto permitió contextualizar el estado de la infraestructura ferroviaria en relación con su entorno urbano inmediato, así como conocer sectores con potencial demanda de transporte y

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

puntos de conflicto que requieren medidas adicionales de seguridad producto de situaciones socioespaciales en condición de vulnerabilidad.

2.1.2 Zona de estudio

El área de enfoque se localiza en el sector noreste de la ciudad de Santa Fe y corresponde a un tramo de las trazas ferroviarias de los ramales C y F23 (Saus et al, 2022). Este corredor, de aproximadamente 8 (km) de extensión, forma parte de la red de trocha métrica operada por el Ferrocarril Belgrano Cargas, con una frecuencia diaria de tres a cuatro formaciones, que atraviesa la Ciudad de noreste a suroeste. En la Figura 2 se muestra el recorrido de los ramales C y F23 (Argenmap-IGN, 2025).

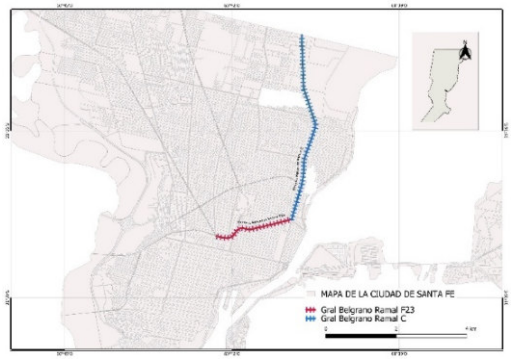



**Figura 2.** Mapa de Santa Fe con localización del tramo en estudio – Ramales C y F23.

El tramo relevado inicia en la intersección de la traza ferroviaria con calle Callejón Funes y finaliza en la intersección de la vía con Av. Facundo Zuviría. Fue seleccionado por su potencial para integración intermodal, ya que su extremo en Av. Facundo Zuviría se localiza en un sector central de la ciudad, próximo a múltiples corredores de colectivos urbanos, lo que lo posiciona como nodo estratégico de conexión con la red ferroviaria. El análisis se efectuó cuadra por cuadra, tomando capturas fotográficas con una frecuencia de 100 metros, en aquellos sitios donde la disponibilidad de imágenes lo permitía (Google Street View,2025).

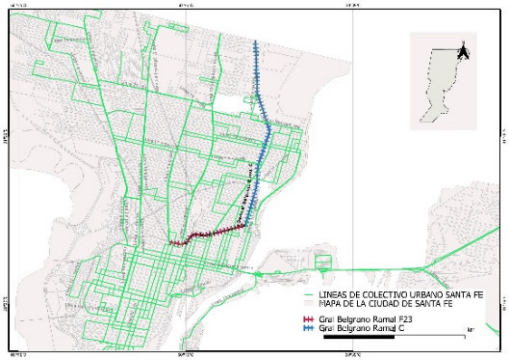



**Figura 3.** Mapa de corredores de colectivos urbanos y tramo en estudio - Ciudad de Santa Fe.

2.1.3 Criterios de observación

Con el objetivo de caracterizar de manera sistemática la superestructura ferroviaria y su entorno inmediato, se definieron criterios específicos para su evaluación. En la tabla 1 se exponen las categorías y elementos considerados.

**Tabla 1.** Criterios de observación aplicados en el relevamiento.

| Categoría | Aspectos evaluados |
|---|---|
| Superestructura | Estado de Rieles, durmientes y fijaciones |
| Balasto | Estado, tipo de material y condición de drenaje |
| Señalización | Presencia y estado de señalización vertical y horizontal, semaforización. |
| Paso a Nivel | Estado, desgaste, visibilidad y dispositivos de seguridad existentes |
| Entorno inmediato | Proximidad de viviendas, ciclovías, establecimientos educativos y usos urbanos. |
| Mantenimiento en general | Vegetación, limpieza, obstrucciones en zona de camino. |

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026



2.1.4 Descripción de la estructura ferroviaria actual

Se documentó el estado del tramo ferroviario, abarcando rieles, durmientes, balasto, señalización y entorno inmediato. Los rieles se observaron mayoritariamente en buen estado, mientras que los durmientes y sus fijaciones presentan un desgaste avanzado, dificultando la identificación de su integridad a simple vista. El balasto, compuesto por tierra compactada muestra irregularidades en algunos tramos, coincidentes con problemas de alineación de la vía reportados durante la operación de trenes de carga (Manual integral de vías, 2014).

**Figura 4.** Estado de la superestructura de la vía a la altura de las calles Pedro Vittori y Domingo Silva.

El sistema de señalización asociado a cruces peatonales y vehiculares presenta inconsistencias, mientras que algunas intersecciones muestran demarcaciones, defensas y cartelería visible, otras carecen totalmente de estos dispositivos. Se registraron distintos tipos de señalización en cada paso a nivel, así como la presencia o ausencia de barreras, semáforos y elementos de seguridad peatonal.

El mantenimiento de la vegetación a lo largo del recorrido es heterogéneo, con sectores que afectan parcialmente la visibilidad en los pasos a nivel. El entorno inmediato incluye viviendas, establecimientos educativos y recreativos, sin obstrucciones significativas para la circulación de los trenes de carga.

**Figura 5 y 6.** Cruce a nivel en buenas y regulares condiciones de seguridad.

Se identifican varias estaciones y cabinas fuera de uso, algunos presentan deterioro en techos, aberturas y mobiliario, y en ciertos casos se ha constatado ocupación no autorizada. Estos edificios se encuentran integrados al medio circundante, con viviendas, calles, veredas y espacios verdes próximos. Sus ubicaciones y conectividad con la trama urbana podrían considerarse relevantes en futuros estudios de planificación de transporte urbano.

2.2 *Análisis de vehículos ferroviarios*

2.2.1 Criterios de selección.

Para el análisis de esta sección se seleccionaron vehículos ferroviarios de origen argentino que presentaran características similares a las requeridas para un eventual tren urbano en los ramales FC y F23. La elección se basó en aspectos como la infraestructura existente, la cantidad de kilómetros recorridos, el tipo de servicio ferroviario (urbano/suburbano), la tracción de los vehículos, entre otros.

2.2.2 Casos de estudio

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

De todas las ciudades relevadas, se analizaron dos servicios: Paraná-Colonia Avellaneda en Entre Ríos, y Maipú-Las Heras en Mendoza. Estos servicios fueron considerados adecuados como casos de estudio debido a que operan en ciudades intermedias con poblaciones comparables a la ciudad de Santa Fe, lo que permite establecer parámetros realistas en cuanto a la potencial demanda. Ambos trenes cubren trayectos urbanos/suburbanos, de entre 12 y 17 km, en tiempos aproximados de 40 minutos, lo que refleja un modelo de transporte eficiente para distancias urbanas.

2.2.3 Evaluación técnica

Al evaluar las características técnicas de los trenes, se observaron diferencias significativas en cuanto a la tracción utilizada. Mientras que el tren de Mendoza emplea tracción eléctrica importada de San Diego (EE. UU) con catenarias, el servicio de Entre Ríos utiliza tracción diésel-eléctrica con vehículos provistos por la empresa argentina Materfer. Considerando la infraestructura energética de la ciudad de Santa Fe y la inversión necesaria para la electrificación ferroviaria, se optó por centrar el análisis en el tren de Entre Ríos, cuya tecnología de tracción resulta más viable a nivel local por sus menores requerimientos técnicos y económicos. Asimismo, el uso de tracción diésel-eléctrica permite mayor flexibilidad en la planificación del trazado, reduce los tiempos y costos asociados a la implementación del sistema.

**Tabla 2.** Comparación de casos de estudio

| | Contexto urbano | | | Iniciativa Política | | Datos Técnicos | | | Capital | | Operación | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nro de Hab. Del recorrido | Año del Proyecto | Año de Inauguración | Proyecto y Gestión | Fabricante | Motor | Tracción | Trocha | Financiamiento | Tarifa-Método de pago | Km Recorridos | Duración del viaje | Capacidad | Pasajeros Transportados por mes | Infr. | |
| Entre Rios (Parana-Colonia Avellaneda) | Parana 268.889 - La Picada 602 - Colonia Avellaneda 9.304 | 2010 | 2011-2020-2023 | Sergio Urribarri-Gustavo Bordet | Materfer | Combustión y eléctrico | Diésel-eléctrica | Ferrocacrril General Urquiza - Mediana (1.435mm) | – | $930-$550, efectivo | 12Km | 40 minutos | 120 sentados | 17.000 | Historica, modernizada | ha sido renovada, las vías y trazado siguen el diseño original de mediados del siglo XX. |
| Mendoza (Maipu-Las Heras) | Maipu 214.412 - Godoy Cruz 195.183 - Ciudad de Mendoza 127.160 - Las Heras 243.399 | 2009 | 2012-2018 | Celso Jaque-Francisco Pérez-Alfredo Cornejo | Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (España)-Sistema Metropolitano San Diego, California (donación) | Electrico (catenarias) | Electrico | Ferrocarril General San Martin - Ancha (1.676mm) | Bonos verdes 8070 mill. - Prestamo del Banco Nación 29882 mill. - Fondos provinciales 28365 mill. | $1.000-$500-$400, tarjeta sube | 17km | 39 minutos | 179 sentados | 350.000 | Moderna | La obra incluyó electrificación, señalamiento, comunicaciones, restauración de puentes, drenaje, zanjas y semaforización. |

## 3. Resultados y discusión

2.1 *Estructura ferroviaria*.

El estudio indica que las vías de los ramales FC y F23 son apropiadas para un servicio de tren ligero urbano, con irregularidades puntuales en durmientes y balasto que pueden resolverse mediante intervenciones localizadas. La señalización y los pasos a nivel requieren de refuerzos estratégicos para garantizar la seguridad y operación eficiente del tren. Se observan cabinas y estaciones cuyas ubicaciones permiten considerarlas como posibles paradas, favoreciendo la conectividad y el desarrollo en ese sector de la ciudad, cruzando este dato con otros referidos a atractores de movilidad y densidad de población.

2.2 *Vehículos ferroviarios*.

Se obtuvo que el análisis comparativo permite justificar la elección del tren Paraná–Colonia Avellaneda como modelo base para el proyecto en Santa Fe, destacando que su tecnología se adapta mejor a las condiciones locales y a los recursos disponibles.

## 4. Conclusiones

Los resultados indican que las vías de los ramales FC y F23 son aptas para la operación de un servicio de tren ligero urbano, aunque presenta irregularidades puntuales, estas podrían corregirse mediante intervenciones localizadas. La tracción diésel-eléctrica se perfila como la opción más adecuada, por su compatibilidad con la infraestructura existente y menores requerimientos técnicos y económicos.

En conjunto, estos hallazgos respaldan la factibilidad técnica del proyecto y su potencial para promover un transporte urbano eficiente y un desarrollo urbano planificado.

En cuanto a los estudios referidos a la potencial urbanización del sector noreste como nodo de desarrollo urbano orientado al transporte, el proyecto aún no ha avanzado en esa etapa de investigación.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

## Agradecimientos

Se agradece al Ing. Fernando Imaz (CETRAM – UTN) por su guía y supervisión durante el desarrollo del proyecto, así como a la Dra. Arq. María Alejandra Saus (IHUCSO/ UNL - CONICET) por sus valiosos aportes y orientación en materia de investigación urbana y ferroviaria. Este trabajo se enmarca en el proyecto "Planificación de un servicio ferroviario de pasajeros para la ciudad de Santa Fe, incorporando estrategias de desarrollo urbano orientado al transporte en el sector Noreste del ejido municipal" (UTN – CONICET).

## Referencias bibliográficas

Gobierno de la Nación Argentina (s. f.) *Transporte ferroviario*. Comisión Nacional de Regulación del Transporte (CNRT). https://www.argentina.gob.ar/transporte/cnrt/transportistas-ferroviarios.

Gobierno de la Provincia de Entre Ríos (2024, 30 de agosto). El Gobierno Provincial gestionó nueva frecuencia para el Servicio de Trenes que conectan Paraná y Colonia Avellaneda. Ministerio de Planeamiento, Infraestructura y Servicios. https://www.entrerios.gov.ar/minplan/noticias/20240830-el-gobierno-provincial-gestiono-nueva-frecuencia-para-el-servicio-de-trenes-que-conectan-parana-y-colonia-avellaneda.

Gobierno de la Provincia de Mendoza (2025, 20 de abril). Metrotranvía: de Maipú a Las Heras en 45 minutos, con matices de todo tipo. MDZ Online. https://www.mdzol.com/sociedad/2025/4/20/metrotranvia-de-maipu-las-heras-en-45-minutos-con-matices-de-todo-tipo-1203400.html

Instituto Geográfico Nacional (IGN). (s.f.). Cartografía ferroviaria de Argentina. https://mapa.ign.gob.ar/?zoom=4&lat=-40&lng=-59&layers=argenmap,lineas_de_transporte_ferroviario_AN010#

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). (2022). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Buenos Aires, Argentina.

Manual Integral de Vías. (2014). *Mantenimiento y operación de infraestructura ferroviaria-Nuevo Central Argentino*.

Saus, M. A. (2022.). *Atlas del Ferrocarril Belgrano: Redes de escala nacional y regional–local desde una mirada santafesina*. Santa Fe: Ediciones UNL.

Saus, M. A., Aguirre, A., I., & Gauna, G. F. (2022*). Evaluación de una estación ferroviaria desafectada como futuro nodo de transporte y desarrollo urbano sostenible (Gran Santa Fe, Argentina)*. Scientific Electronic Library Online. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-43922022000100012

Sociedad de Transporte Mendoza (s. f.) *Metrotranvía*. STM – Sociedad de Transporte Mendoza, sitio oficial. https://stmendoza.com/metrotranvia/

Vecchio, G. (2021). *Estaciones como nodos y lugares: El potencial del tren para el desarrollo urbano orientado al transporte*. https://www.redalyc.org/journal/198/19868219009/html/

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Transportes y vías de comunicación
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Santa Fe

# Relevamiento preliminar del uso y conocimiento de SRI en Argentina

## Preliminary survey of the use and knowledge of SRI in Argentina

Presentación: 12/09/2025

**Lucia Schonfeld Toci**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Estudios de Transporte, Accidentología y Movilidad (CETRAM), Santa Fe, Argentina.
luschonfeldtoci@gmail.com

### Resumen

El presente trabajo aborda la problemática del uso de Sistemas de Retención Infantil (SRI) en Argentina, dispositivos fundamentales para preservar la vida de las infancias en el transporte. A pesar de la normativa vigente y la evidencia científica que demuestra su eficacia, su utilización continúa siendo limitada y muchas veces incorrecta, lo que reduce significativamente su eficiencia. Con el objetivo de conocer la situación actual, se realizó una encuesta online a más de 223 personas de distintas provincias del país, a fin de relevar hábitos de uso, conocimiento de la normativa y barreras percibidas. Los resultados muestran una baja tasa de uso correcto y un escaso reconocimiento de homologaciones, influenciados por factores culturales y económicos. Este relevamiento preliminar busca visibilizar estas deficiencias y sentar las bases para futuras acciones de concientización, políticas públicas y mejoras estructurales que permitan avanzar hacia una movilidad más segura para los niños.

**Palabras clave:** Sistemas de Retención Infantil – Seguridad Vial – Argentina – Prevención – Infancias.

### Abstract

This study addresses the issue of Child Restraint Systems (CRS) usage in Argentina, devices that are essential to protect children's lives in traffic environments. Despite existing regulations and scientific evidence supporting their effectiveness, their use remains limited and often incorrect, which reduces its efficiency. To assess the current situation, an online survey was conducted with over 223 participants from different provinces of the country, focusing on usage habits, knowledge of regulations, and perceived barriers. Results indicate a low rate of correct use and limited recognition of homologation standards, influenced by cultural and economic factors. This preliminary survey aims to highlight these deficiencies and lay the foundation for future awareness campaigns, public policies, and structural improvements to foster safer mobility for children.

**Keywords:** Child Restraint Systems – Road Safety – Argentina – Prevention – Childhood.

## 1. Introducción

Los siniestros viales constituyen una de las principales causas de mortalidad infantil en Argentina y representan un problema de salud pública prevenible. Desde su desarrollo en la década de 1960, los SRI han demostrado ser herramientas altamente efectivas para proteger la vida de los niños, gracias a su capacidad de contener y distribuir las fuerzas generadas en una colisión. La física del impacto lo explica con claridad: la inercia impulsa al cuerpo hacia adelante con una fuerza proporcional a la masa y la desaceleración; en el caso de los niños, cuya anatomía es más vulnerable, este fenómeno puede derivar en lesiones severas incluso a bajas velocidades. Diversos informes nacionales e internacionales han demostrado que

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

el uso de SRI reduce en más de un 60 % el riesgo de muerte y lesiones graves en caso de colisión. Sin embargo, a pesar de la obligatoriedad establecida en la Ley de Tránsito 24.449, reforzada por el Decreto 32/2018, su implementación efectiva continúa siendo deficiente.

Las estadísticas de la Sociedad Argentina de Pediatría (SAP) y de la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV) señalan que sólo uno de cada cuatro menores viaja con un SRI adecuado y que más del 80 % de los dispositivos son utilizados de manera incorrecta. Estas cifras evidencian no sólo barreras económicas, sino también factores culturales y sociales que configuran dinámicas de riesgo: la creencia de que "en viajes cortos no es necesario", la costumbre de ubicar a los niños en el asiento delantero, o la falta de conocimiento sobre homologaciones y formas correctas de instalación.

En este contexto, el presente trabajo, enmarcado dentro del proyecto de investigación titulado "Análisis de los sistemas de retención infantil (SRI) comercializados en Argentina", tiene como objetivo realizar un relevamiento preliminar del uso y conocimiento de SRI en Argentina a partir de una encuesta online. Esta no pretende ofrecer resultados concluyentes ni representativos a nivel nacional, sino una primera fotografía exploratoria que permita identificar tendencias actuales y orientar futuras etapas del proyecto. Se busca aportar evidencia que permita dimensionar la magnitud del problema y, al mismo tiempo, abrir un espacio de reflexión sobre las posibilidades de cambio cultural y político necesarias para preservar la vida de las infancias en la vía pública.

## 2. Materiales y métodos

Para realizar el relevamiento se diseñó una encuesta estructurada mediante la plataforma Google Forms, distribuida en línea durante el mes de agosto de 2025. Está compuesta por 20 preguntas distribuidas en 7 secciones temáticas, en las que se abordaron las siguientes temáticas:

- datos sociodemográficos (provincia y ciudad de residencia).
- características de los viajes con niños (frecuencia, edad de los menores, tipo de trayectos).
- uso y frecuencia del SRI (siempre, a veces, nunca).
- tipo de SRI utilizado y método de fijación (cinturón de seguridad, sistema ISOFIX, LATCH).
- ubicación y sentido de marcha del niño.
- prácticas de chequeo previo a su uso.
- conocimiento de la normativa vigente y de sellos de homologación.
- barreras percibidas para su implementación.
- razones de elección del dispositivo.
- disponibilidad de SRI en transporte no propio y alternativas en ausencia del mismo.

En total se obtuvieron 223 respuestas provenientes de distintas provincias del país, lo que permitió un abordaje preliminar con representación geográfica diversa. De estas respuestas un 60.3% correspondió a adultos que viajan habitualmente con niños de entre 0 y 12 años, que conformó nuestra muestra efectiva.

La conformación de la muestra respondió a un muestreo no probabilístico por conveniencia, dado que la encuesta fue difundida en redes sociales, entre familiares, amigos y pares de la carrera que respondieron de forma voluntaria. Este tipo de muestreo no asegura representatividad estadística de toda la población argentina, pero constituye un insumo exploratorio valioso para identificar tendencias preliminares en el uso y conocimiento de los Sistemas de Retención Infantil (SRI).

Con el fin de favorecer la transparencia, se facilita una copia de cada respuesta registrada a través del siguiente enlace:

Encuesta sobre uso de Sistemas de Retención Infantil (SRI) en Argentina - Formularios de Google.pdf

## 3. Resultados y discusión

El relevamiento alcanzó un total de 223 respuestas válidas, de las cuales el 60,3% correspondió a adultos que viajan habitualmente con niñas y niños de entre 0 y 12 años. Este grupo conformó la base del análisis y permitió dimensionar prácticas concretas en distintos contextos y edades. La muestra se concentró en la región centro y litoral del país, con fuerte

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

presencia de Santa Fe, y reflejó realidades heterogéneas: desde lactantes hasta preadolescentes, lo que habilitó observar la aplicación de múltiples tipos de SRI.

En cuanto a la frecuencia de uso, cerca de la mitad de los encuestados declaró emplear siempre un sistema de retención, mientras que el resto lo hace de manera discontinua, ya sea casi siempre, a veces o rara vez. Casi un 9% directamente no lo utiliza nunca, lo que evidencia que, aun cuando existe conocimiento sobre la importancia del dispositivo, su incorporación cotidiana está lejos de ser universal.

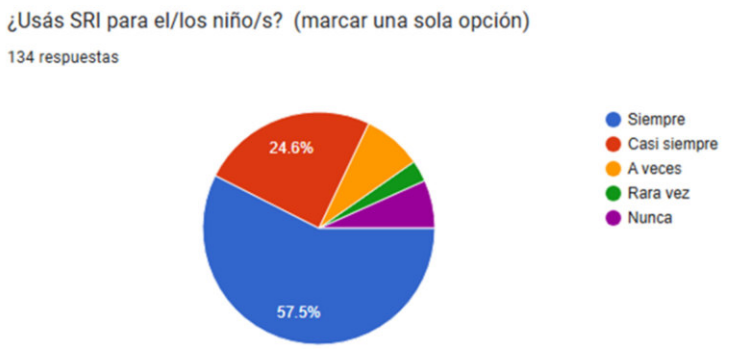



**Figura 1.** Distribución del uso declarado de SRI (gráfico de torta).

El análisis de los tipos de dispositivos mostró que la butaca con arnés se impone como la opción predominante, con un 43,3% de menciones. Le siguen el cinturón de seguridad del vehículo y el booster con respaldo, mientras que más atrás aparecen la silla convertible, el alzador y el huevito. Este ordenamiento revela que la butaca con arnés aparece consolidada como la elección más frecuente, que el uso extendido del cinturón en niños pequeños refleja un riesgo por su aplicación prematura, y que la baja presencia del huevito indica un menor cumplimiento de las recomendaciones en los primeros meses de vida. En la ubicación dentro del habitáculo, el asiento trasero lateral derecho fue el más elegido, seguido por el lateral izquierdo. El asiento delantero casi no fue utilizado, aunque en menores de cuatro años la práctica de viajar a contramarcha sigue siendo reducida, lo que expone otra deuda en términos de seguridad.

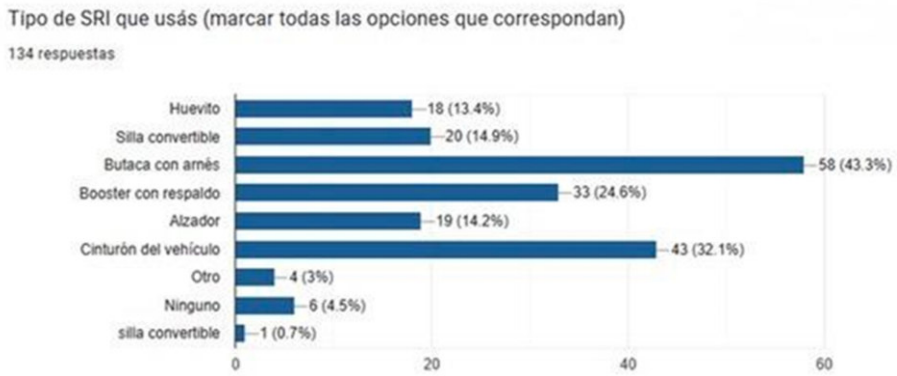



**Figura 2**. Tipo de SRI implementado (gráfico de barras).

El uso correcto también mostró grietas significativas. Apenas un tercio de los adultos declaró asegurar siempre al niño de manera adecuada, otro tercio lo hace solo algunas veces y un 9,6 % reconoció no hacerlo nunca. A esto se suma que una parte considerable de los encuestados no realiza chequeos básicos —como verificar la tensión del arnés o el ángulo de reclinado—, lo que reduce drásticamente la eficacia protectora del dispositivo. Aquí se advierte con claridad que no alcanza con tener un SRI, sino que es indispensable instalarlo y usarlo correctamente.

El conocimiento normativo se mostró igualmente limitado. Más de la mitad de los encuestados no está al tanto de la legislación que obliga al uso de SRI hasta los 10 años, y un 48,9 % admitió no conocer los sellos de homologación que certifican la calidad de los dispositivos. La falta de información técnica y normativa se refleja luego en las prácticas de compra y uso, reproduciendo errores que podrían prevenirse con mayor difusión.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Al consultar las razones que explican el no uso constante, las respuestas fueron claras: los trayectos cortos aparecen primero, seguidos por la incomodidad y la ausencia de SRI en transportes no propios. Este hallazgo conecta con la percepción social de que la seguridad puede relativizarse en viajes breves, un factor cultural que pesa más que la evidencia científica. Frente a la pregunta sobre qué medidas incentivarían un uso más frecuente, el 44 % de los encuestados remarcó la necesidad de controles más estrictos, mientras que también se señalaron campañas de concientización y asesoría en la instalación. El énfasis en el control sugiere que, además de información, existe la expectativa de que el Estado refuerce la fiscalización.

En lo que respecta a los criterios de elección, los adultos priorizaron la comodidad del niño, la disponibilidad del dispositivo y la confianza en la marca. A esto se sumó la recomendación de conocidos, que aparece como un factor de influencia importante en la decisión, mientras que el diseño y la publicidad tuvieron un papel menor. Este dato abre la puerta a pensar que la confianza interpersonal y la experiencia compartida pesan más que las estrategias de marketing en la compra de un SRI.

Por último, al indagar sobre los viajes en transporte no propio —como taxis, remises o autos de terceros—, la mayoría de los niños no cuenta con SRI y se recurre al cinturón trasero o incluso a viajar sin sujeción. Un grupo minoritario admitió cancelar el viaje ante la imposibilidad de garantizar la seguridad. Esta situación revela una carencia estructural: la oferta de transporte público y contratado no contempla la presencia de SRI, dejando a las familias sin alternativas seguras.

En síntesis, el análisis de los datos permite delinear un escenario claro: solo la mitad de los adultos utiliza siempre un SRI, más de la mitad desconoce la normativa vigente y la correcta instalación está lejos de ser una práctica habitual. Este panorama confirma lo planteado en la introducción: existe una brecha cultural y práctica entre la norma y el comportamiento social. El relevamiento no pretende ser representativo a nivel nacional, pero constituye una primera fotografía exploratoria que visibiliza la magnitud del problema y plantea la urgencia de avanzar hacia un cambio cultural y normativo que garantice la seguridad de las infancias en el tránsito.

## 4. Conclusiones

Este relevamiento preliminar permitió visibilizar el estado actual del uso y conocimiento de los Sistemas de Retención Infantil (SRI) en Argentina, evidenciando que aún persisten prácticas y percepciones que comprometen la seguridad vial infantil. Más allá de los porcentajes concretos, lo que emerge con claridad es la existencia de una brecha cultural y estructural: mientras la normativa exige, la práctica social relativiza; mientras la evidencia científica demuestra eficacia, los hábitos cotidianos priorizan trayectos cortos, comodidad o la falta de disponibilidad en transportes ajenos.

El valor de este estudio no radica únicamente en los números obtenidos, sino en la posibilidad de abrir un diagnóstico exploratorio que ilumine los factores que condicionan la adopción plena de los SRI. La falta de conocimiento normativo y técnico, la influencia de creencias sociales, la ausencia de fiscalización y las limitaciones del transporte público configuran un escenario donde la vida de las infancias depende de decisiones individuales y no de una política integral de protección.

Este trabajo, enmarcado dentro del proyecto “Análisis de los sistemas de retención infantil (SRI) comercializados en Argentina”, sienta las bases para futuras etapas de investigación que profundicen en la eficacia de los dispositivos disponibles y en la relación entre mercado, normativa y usuario. Más aún, plantea la urgencia de acciones coordinadas de concientización, educación y control, orientadas a cerrar la brecha entre norma y práctica. La seguridad vial infantil no puede quedar librada al azar: requiere de un compromiso social y político que garantice, de manera universal, el derecho de los niños y niñas a viajar protegidos.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo brindado por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF), que facilitó los espacios institucionales necesarios para el desarrollo de la presente investigación. Asimismo, se reconoce la orientación académica del profesor y director de proyecto, Alejandro Luy, cuya guía resultó fundamental para la consolidación de este trabajo. Finalmente, se valora la colaboración de familiares, amigos y pares de la carrera, quienes contribuyeron completando la encuesta y posibilitando la obtención de los datos aquí analizados.

## Referencias bibliográficas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, Pilar (2014). Metodología de la Investigación. Mexico. McGraw – Hill.

Scheaffer, R.L., Mendenhall, W. y Ott, L. (1987). Diseño y análisis de encuestas por muestreo. México. Grupo Editorial Iberoamérica.

Muñoz-Solís, L. (Ed.). (2014). Manual de lesiones por accidentes de tráfico. Editorial Médica Panamericana. (Publicado en Madrid,

Ishikawa, H., & Masumura, S. (Eds.). (2018). Impact Biomechanics: From the Head to the Foot and from the Vehicle to the Human. Singapur. Springer-Verlag.

Sitio web de la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV): (www.argentina.gob.ar/seguridadvial)

Agencia Nacional de Seguridad Vial. (2020). Módulo 5: Elementos de seguridad – Sistema de Retención Infantil. Centro de Formación en Políticas y Gestión de la Seguridad Vial.

Sociedad Argentina de Pediatría: Sociedad Argentina de Pediatría

Eje temático

# Electrónica, computación y comunicaciones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Electrónica, computación y comunicaciones
**Modalidad:** Trabajo en desarrollo (Work in Progress) – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Rafaela

# Prototipo de la digitalización del proceso de recolección y transporte de leche

## Prototype of the digitalization of the milk collection and transportation process

Presentación: 30/10/2025

**Juan Armentano**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
juanarmentano03@gmail.com

**Juan Gómez Gagliardi**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
gomezjuancruz2002@gmail.com

**Felipe Sola**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
felipe.sola03@gmail.com

### Resumen

Se desarrolla la construcción de un prototipo que simula la digitalización del proceso de recolección y transporte de leche cruda en la industria láctea. El trabajo se centra en digitalizar un camión cisterna a escala para monitorizar temperatura, pH, caudal, volumen y geolocalización. El estudio, recuperado de un trabajo de investigación, tiene el objetivo de mejorar la planificación de la producción mediante el monitoreo en tiempo real de la calidad del producto. Se basa en la arquitectura RAMI 4.0 y en tecnologías de la Industria 4.0.

**Palabras clave:** industria 4.0, digitalización, industria láctea, microcontrolador ESP32.

### Abstract

A prototype is being built to simulate the digitalization of the raw milk collection and transportation process in the dairy industry. The project focuses on digitizing a scale tanker truck to monitor temperature, pH, flow rate, volume, and geolocation. The study, derived from a research paper, aims to improve production planning through real-time monitoring of product quality. It is based on RAMI 4.0 architecture and Industry 4.0 technologies.

**Keywords:** industry 4.0, Digitalization, dairy industry, ESP32 microcontroller.

## 1. Introducción

El planteo de la problemática y desarrollo de la arquitectura funcional fue recuperado del trabajo de investigación de Roldán, M.L., Querini, P., Torres, J.L. (2023), denominado “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”, en el marco del VII Congreso de Ingeniería Mecánica en la UTN Regional Santa Fe.

El trabajo consiste en la descripción y desarrollo de la solución técnica de la etapa de recolección de datos del proyecto citado. Para ello, se identifican los procesos, los elementos involucrados, su funcionamiento y relación entre sí. El objetivo es

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

demostrar el comportamiento de la lógica de la solución, a partir de un prototipo a escala. Aplicando los conocimientos de electrónica y programación en computación, se fundamenta la selección de dispositivos, su función en el sistema, conexiones y programación.

## 2. Materiales y métodos

El desarrollo del sistema de recolección de datos en tiempo real se estructuró en cuatro etapas, diseñadas para cumplir con objetivos específicos y garantizar la integración efectiva de los componentes del sistema.

2.1. Determinación de la secuencia de funcionamiento

De acuerdo a la problemática y a la solución recuperada, se definió una secuencia de funcionamiento de los dispositivos de recolección de datos. Para ello, se empleó un diagrama de bloques identificando dispositivos, acciones y actividades vinculadas.

2.2. Selección de dispositivos.

Se seleccionaron un dispositivo de control y sensores compatibles, para replicar la función identificada en el proyecto. El criterio para la elección del primer elemento fue su capacidad de conexión inalámbrica para la transmisión de información. Para los restantes, se tuvo en cuenta el tipo de conexión y la señal de salida, para garantizar el registro y administración de los valores con el microcontrolador. La información necesaria se obtuvo de los manuales del fabricante de cada elemento.

2.3. Desarrollo del código de programación.

Para el desarrollo del código se utilizó el entorno de desarrollo integrado Thonny IDE, para comandar mediante el lenguaje micropython al microcontrolador. Fue necesario consultar en los sitios web del fabricante, las librerías requeridas para establecer la conexión y garantizar el correcto funcionamiento.

2.4. Construcción de la solución.

Se construyó una representación de un camión cisterna para montar los sensores seleccionados y comprobar la lógica funcional de la etapa de recolección de datos.

## 3. Resultados y discusión

3.1. Lógica Funcional.

La figura 1 presenta en un diagrama de flujo de la lógica funcional en la que se basa el prototipo. El proceso comienza al cargar el recipiente con leche (representación de la cisterna), este flujo es detectado por el caudalímetro de carga, dando inicio al programa. En este instante, el ESP-32 comienza a tomar datos del sensor de temperatura interna, de geolocalización y caudal, en intervalos de cinco segundos, los cuales son proyectados en la consola del entorno Thonny IDE. Cuando el recipiente esté lleno o el flujo cese, deja de tomar datos de caudal, y se solicita información de temperatura ambiente, de pH y el valor de volumen final cargado.

Lo descrito en el párrafo anterior se mantiene hasta que el recipiente comienza a descargarse, detectado por el caudalímetro de descarga, dando inicio a la segunda parte del programa. En ese instante, finaliza la toma de datos de geolocalización y temperatura ambiente. Una vez vacío el recipiente, cesa el envío de datos de pH y temperatura de la leche, dando por finalizado el programa.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

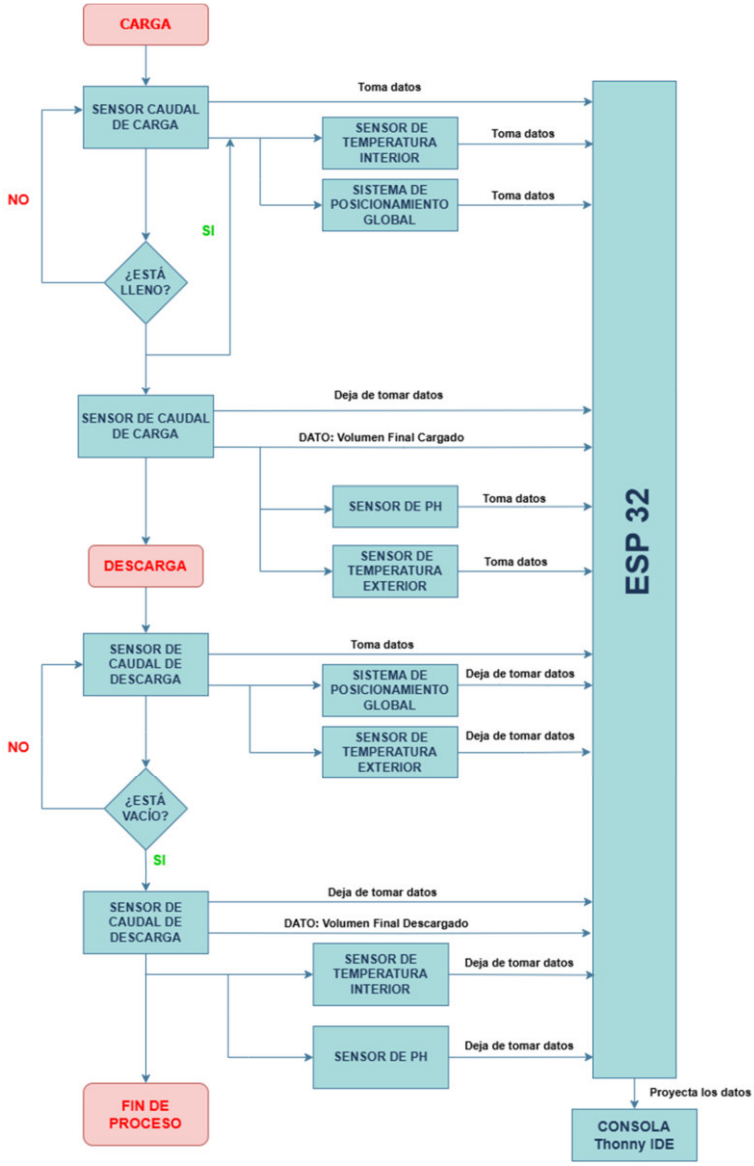



**Figura 1.** Lógica funcional del prototipo.

3.2. Selección y conexión de dispositivos.

3.2.1 Dispositivo controlador.

El dispositivo de control seleccionado para la recolección y transmisión de la información es un microcontrolador ESP32-WROOM, integrado en una placa de desarrollo que facilita el acceso y conexión a sus pines. La placa de desarrollo se alimenta con una tensión de 5 V CC, mientras que el microcontrolador ESP32-WROOM opera internamente a un máximo de 3,3 V CC, por lo que debe considerarse esta limitación al momento de diseñar las interconexiones y la alimentación de los periféricos.

3.2.2 Sensor de temperatura.

El sensor de temperatura empleado es un DS18B20 con un encapsulado estanco, adecuado para la medición de temperatura en fluidos. En este caso, simula al sensor real dentro de la cisterna. Este dispositivo puede alimentarse tanto con 3,3 V CC como con 5 V CC. No obstante, para garantizar un funcionamiento correcto en la comunicación digital y evitar ruido eléctrico, es necesario implementar una resistencia de pull-up de 4,7 KΩ entre la tensión 3,3 V CC y la línea de datos. En la figura 2 se presenta el diagrama de conexión correspondiente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

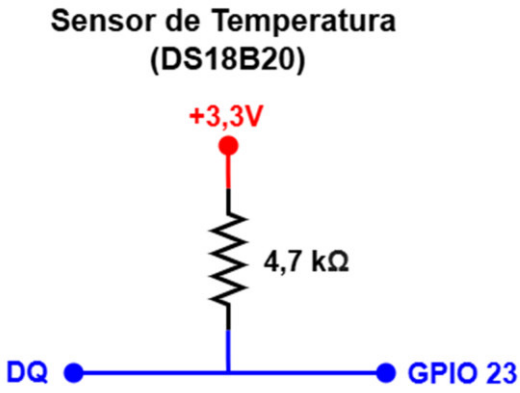



**Figura 2.** Conexión del sensor DS18B20.

El termómetro para medir la temperatura ambiente es el modelo DHT22. Es un sensor digital que mide temperatura y humedad con un rango de -40°C a 80°C y 0% a 100% RH respectivamente, con una precisión de ±0.5°C para temperatura y ±2-5% RH para humedad. Su resolución es de 0.1°C y 0.1% RH, y su tiempo de respuesta es menor a 2 segundos. Funciona con un voltaje de 3.3V a 5.5V y utiliza un protocolo de comunicación digital de un solo pin, lo que lo hace eficiente y de bajo consumo. Para garantizar una correcta comunicación digital y evitar ruido eléctrico, es necesario implementar una resistencia de pull-up de 10KΩ entre la tensión 3,3 V CC y la línea de datos. En la figura 3 se presenta el diagrama de conexión correspondiente.

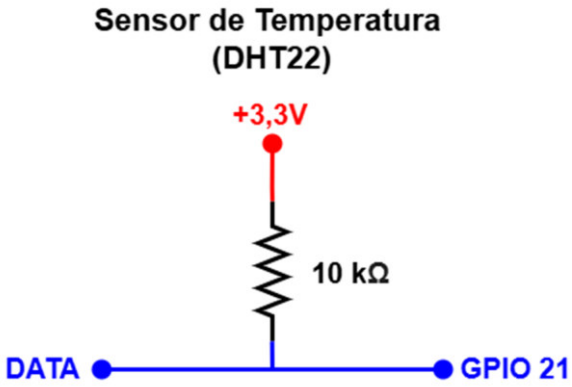



**Figura 3.** Conexión del sensor DHT22.

3.2.3 Sensor de caudal.

El sensor de caudal empleado es uno de tipo turbina modelo YF-S201, con un funcionamiento basado en un transistor de efecto hall, que mediante un rotor con un imán, convierte la variación de campo magnético en una señal directamente proporcional al caudal que circula por el mismo. El dispositivo utiliza para su alimentación y salida digital 5 VCC, por lo que la señal debe adaptarse a los 3,3 VCC que admite el microcontrolador. Para ello, el pin digital requiere un divisor resistivo que reduzca la tensión a un nivel seguro. Asimismo, es necesario implementar una resistencia de pull-up de 10 kΩ entre los 5 VCC y la línea de datos, garantizando una correcta comunicación con el microcontrolador. En la figura 4 se presenta el diagrama de conexión correspondiente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

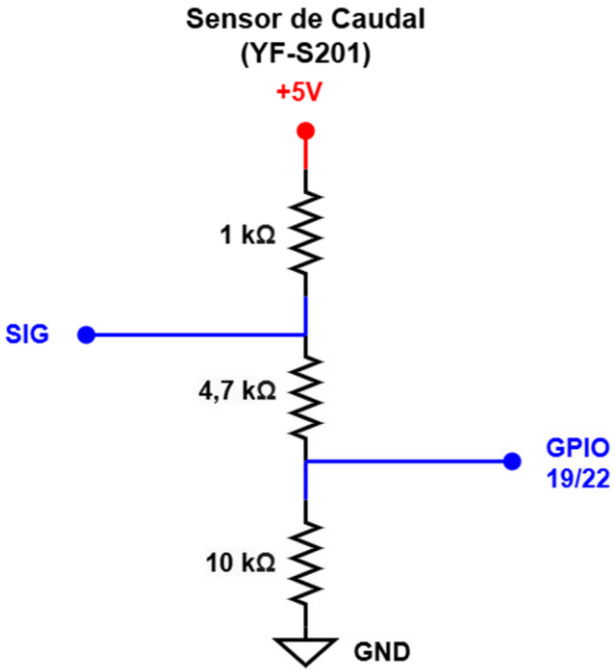



**Figura 4.** Conexión del sensor YF-S201.

3.2.4. Sensor de pH.

Se emplea un kit medidor de pH analógico que incorpora un electrodo E201-BNC y una placa de conexión de señal con conector tipo BNC denominada PH-4502C, que se comunica con el microcontrolador. Se debe alimentar con una tensión de 3.3V o 5V de corriente contínua, posee una resistencia interna de 250MΩ. Su rango de medición se encuentra entre 0 a 14 pH con una precisión de ± 0.1 pH y un error alcalino de 0.2 pH. Posee un indicador LED verde de encendido, y uno rojo de límite de pH.

3.2.5. Dispositivo de geolocalización.

El GPS seleccionado es el módulo GPS NEO 6M. Se alimenta con un voltaje de 2.7V hasta 3.6V, con un consumo de 45mA. Dispone de hasta cinco actualizaciones de ubicación por segundo, con una precisión de posición horizontal de doscientos cincuenta centímetros. Tiene una velocidad de actualización de navegación de 1 Hz. El dispositivo cuenta con una antena externa y EEPROM incorporada, que se comunica con el protocolo UBX Binario, RTCM y salida estándar NMEA.

3.3. Código de programación.

El programa fue diseñado para monitorear y registrar datos de temperatura interior, exterior, humedad, caudal de leche, pH de la misma y ubicación, utilizando un ESP32 junto con los sensores seleccionados. Se llevó a cabo dentro del entorno de programación integrado Thonny IDE. El código del programa en cuestión, se encuentra en el anexo número 1 del presente documento.

3.4. Sistema físico.

La figura 5 representa el prototipo inicial realizado, el mismo contiene los sensores anteriormente mencionados. Cabe resaltar que posee tanto un sensor de caudal de entrada (en la parte superior), como uno de salida (en la parte lateral). En la parte frontal se encuentra el microcontrolador, a su vez conectado mediante un puerto USB a una computadora para alimentar de energía eléctrica al mismo y dar inicio al código de programación. Durante el funcionamiento se puede visualizar en el monitor de la computadora las variables registradas según la lógica del sistema.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

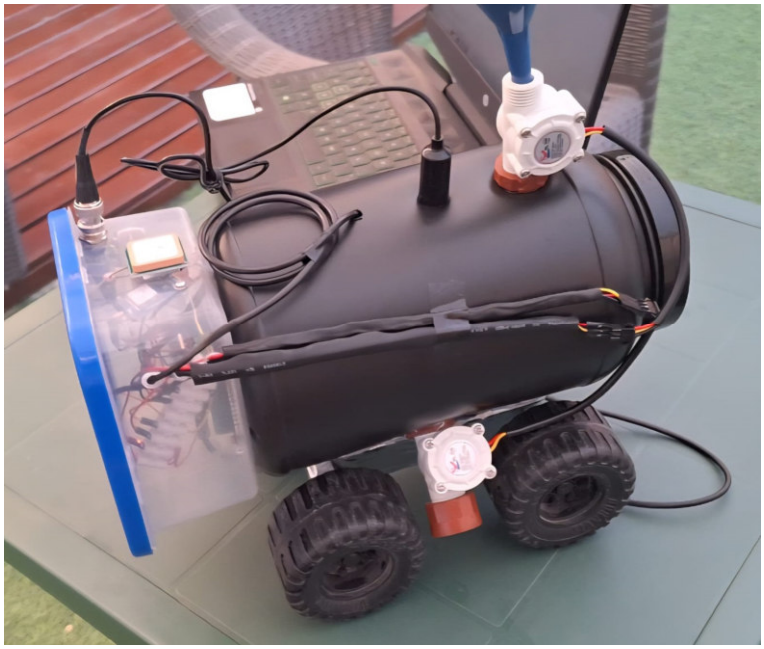


**Figura 5.** Sistema físico.

## 4. Conclusiones

Se ha logrado replicar el funcionamiento de una solución técnica para digitalizar el proceso de recolección y transporte de leche cruda, demostrando de forma simplificada el control de calidad en tiempo real. Es posible afirmar que la integración de tecnologías de la Industria 4.0, como sensores y controladores, es una estrategia efectiva para monitorear parámetros críticos en el transporte de la leche. Como trabajo futuro se puede avanzar sobre la solución técnica real, implementando dispositivos electrónicos de tipo industrial que posean las protecciones y certificaciones fitosanitarias necesarias para las condiciones de funcionamiento diarias de un camión cisterna.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Mg. Eduardo Monier, coordinador e investigador de apoyo, perteneciente al grupo al Grupo de Investigación de Métodos Numéricos en Ciencia e Ingeniería (GIAMNCI).

## Referencias bibliográficas

Roldán, M. L., Querini, P. y Torres J. L. (2023). “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”, Actas del 8º Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Santa Fe, Argentina, 13 al 15 de septiembre.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

**Eje temático:** Electrónica, computación y comunicación
**Modalidad:** Trabajo de investigación – estudiantes de grado
**Facultad Regional:** Venado Tuerto

# Desarrollo de un sistema para la adquisición de datos para celdas de carga

## Development of a data acquisition system for load cells

Presentación: 30/10/2025

**Juan Manuel Elizagoyen**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC), Venado Tuerto, Argentina.
manuelizagoyen@gmail.com

**Joaquín Berho**
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC), Venado Tuerto, Argentina.
joaquinberho@gmail.com

### Resumen

En el laboratorio GIDEC se utilizan celdas de carga y lectores para ensayos relacionados con proyectos de investigación. La dependencia de sistemas comerciales limita la economía y la adaptabilidad a distintos ensayos. Este trabajo propone un sistema alternativo y económico basado en placas Arduino y software de libre acceso para la adquisición de fuerzas. La metodología incluyó la evaluación de opciones comerciales, la selección de Arduino como plataforma central y el desarrollo de un programa en Python que registra y exporta datos en tiempo real a archivos .xls, facilitando el análisis posterior. Los resultados muestran la factibilidad del sistema, permitiendo conexión, lectura y calibración de las celdas en tiempo real, verificada mediante anillos dinamométricos certificados por INTI. Se resolvieron desafíos iniciales relacionados con compatibilidad de librerías y calibración de constantes de carga. Este desarrollo aporta al laboratorio la posibilidad de crear lectores propios y establece bases para futuras integraciones con sistemas de adquisición automatizados.

**Palabras clave:** Celdas de carga, Arduino, Adquisición de datos

### Abstract

Load cells and readers are used in the GIDEC laboratory for research-related tests. The dependence on commercial systems limits their cost effectiveness and adaptability to different tests. This work proposes an alternative and cost-effective system based on Arduino boards and freely available software for force acquisition. The methodology included the evaluation of commercial options, the selection of Arduino as the central platform, and the development of a Python program that records and exports data in real time to .xls files, facilitating subsequent analysis. The results demonstrate the feasibility of the system, allowing real-time connection, reading, and calibration of the cells, verified using INTI-certified dynamometer rings. Initial challenges related to library compatibility and load constant calibration were resolved. This development gives the laboratory the ability to create its own readers and lays the groundwork for future integrations with automated acquisition systems.

**Keywords:** Load cells, Arduino, Data acquisition.

## 1. Introducción

En el laboratorio de investigación de características de la madera (GIDEC) de la Universidad Tecnológica Nacional, se llevan adelante distintos ensayos destinados a la caracterización de la madera, principalmente relacionados con la aplicación en estructuras civiles.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

En muchos de estos estudios, resulta fundamental medir con precisión las fuerzas aplicadas sobre las probetas, lo que convierte a las celdas de carga y sus respectivos sistemas de adquisición de datos en herramientas indispensables (ISO, 2011).

Sin embargo, se presentaban serias dificultades en la continuidad de los ensayos, ya que los lectores comenzaban a deteriorarse con frecuencia y no existía disponibilidad de reposición inmediata. A ello se sumaban limitaciones en las velocidades de transmisión de datos, los elevados costos de adquisición de equipos comerciales y los inconvenientes prácticos para obtener datos de las celdas estándar, lo que restringía tanto la eficiencia del trabajo experimental como la posibilidad de ampliar la capacidad de investigación del laboratorio (INTI, 2015).

Tradicionalmente, el laboratorio ha trabajado con equipos comerciales que cumplen con los requerimientos básicos, pero que presentan limitaciones relevantes. Entre ellas se destacan los elevados costos y mantenimiento, la dependencia de proveedores externos, la falta de flexibilidad para adaptar el sistema a distintas configuraciones de ensayo y la imposibilidad de exportar los valores leídos (Kausel, 2015). Estas condiciones dificultan la posibilidad de ampliar la capacidad experimental del laboratorio y de explorar nuevas líneas de investigación que requieran instrumentación personalizada.

En este contexto surge la necesidad de diseñar y construir un sistema propio de adquisición de datos que permita la lectura y calibración de celdas de carga en tiempo real. La elección de una plataforma abierta y económica, como Arduino, junto con el uso de software de libre acceso (Python), representa una oportunidad para reducir costos, incrementar la autonomía tecnológica del laboratorio y fomentar el aprendizaje práctico de los estudiantes involucrados (Banzi, 2014; Python Software Foundation, 2015).

## 2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del sistema se utilizaron los siguientes componentes y herramientas:

- Placa de desarrollo electrónico Arduino: se seleccionó esta plataforma por su accesibilidad, bajo costo y la amplia comunidad de desarrolladores. Es la base del sistema para la lectura de la señal analógica de la celda de carga.
- Celda de carga: se utilizaron varias celdas de carga, estas celdas convierten la fuerza aplicada en señal eléctrica analógica
- Amplificador HX711: se utilizó este módulo amplificador de 24 bits para leer con precisión la señal de bajo voltaje de la celda de carga.
- Máquina de ensayos Quasar 600 y anillo dinamométrico calibrado por el INTI: estos elementos se utilizaron para verificar la precisión y calibrar la celda de carga. La máquina proporciona un valor de fuerza de referencia, mientras que los anillos dinamométricos certifican la exactitud de las mediciones.
- Lenguaje de programación Python: se desarrolló un software de escritorio de libre acceso para interactuar con la placa Arduino y procesar los datos en tiempo real.
- Entorno de programación Arduino IDE: se utilizó para programar el microcontrolador y establecer la comunicación serial con el ordenador.

La metodología se centró en un enfoque de desarrollo ágil para el diseño y la implementación del sistema. Se analizaron alternativas comerciales que, aunque cumplían con los requisitos básicos, presentaban limitaciones como altos costos, la dependencia de proveedores externos y la imposibilidad de exportar datos, lo que justificó el desarrollo de una solución propia.

El procesamiento de la señal es el siguiente:

1. Adquisición de la señal: El amplificador HX711 lee la señal de la celda de carga. El microcontrolador Arduino se comunica con el HX711 a través de un protocolo de comunicación para obtener una lectura digital.

2. Conversión de datos: El microcontrolador procesa la lectura digital del HX711 y la convierte a una unidad de fuerza (kilogramos o Newtons) utilizando una constante de calibración.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

3. Transmisión de datos: El microcontrolador envía los datos convertidos a la computadora a través del puerto USB en un formato legible.

En la Figura 1 diagrama de flujo que ilustra el proceso completo de adquisición de datos. En la Figura 2 se presenta el lector desarrollado en el laboratorio. En la Figura 3 se observa la máquina de ensayos Quasar 600 con montaje de anillo dinamométrico. La Figura 4 muestra una vista ampliada de la celda de carga acoplada al anillo dinamométrico.

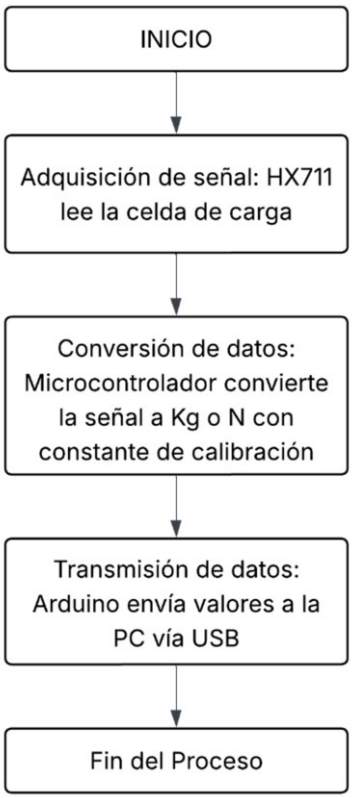



**Figura 1**. Diagrama de flujo que ilustra el proceso completo de adquisición de datos.

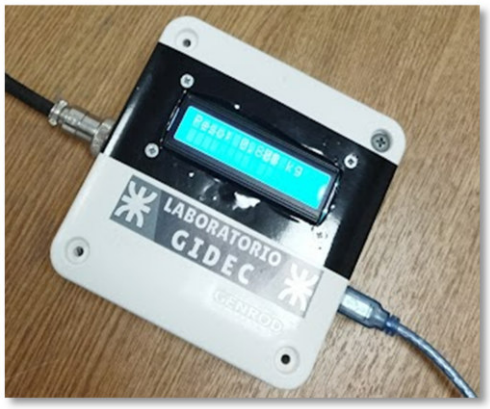



**Figura 2**. Lector desarrollado en el laboratorio GIDEC.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

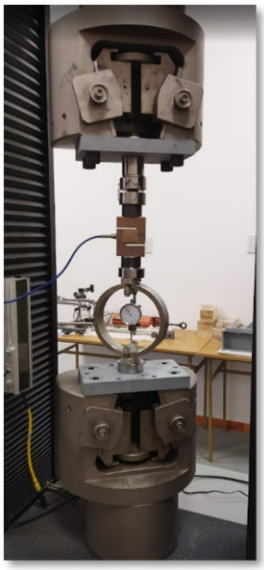


**Figura 3**. Máquina de ensayos Quasar 600 con montaje de anillo dinamométrico.

**Figura 4**. Celda de carga con anillo dinamométrico.

*Procedimiento de calibración*. El sistema fue calibrado mediante un procedimiento riguroso destinado a garantizar la precisión de las lecturas. Para ello, se acopló la celda de carga a un anillo dinamométrico y el conjunto se montó en la máquina de ensayos Quasar 600, donde se aplicaron distintas cargas controladas. En cada caso se registraron simultáneamente los valores de referencia proporcionados por el anillo dinamométrico y los datos obtenidos por el sistema desarrollado. Posteriormente, se empleó un software en Python para determinar la constante de calibración, ajustando la lectura del microcontrolador hasta lograr la coincidencia con la medición patrón. Este procedimiento se repitió varias veces con el fin de asegurar la consistencia y confiabilidad de los resultados, analizando entre 10 y 15 muestras por cada punto de carga para obtener mediciones robustas y reproducibles.

## 3. Resultados y discusión

El sistema desarrollado permitió la conexión, adquisición y registro de datos de celdas de carga en condiciones de ensayo reales. Durante las pruebas, los valores obtenidos mostraron una adecuada correlación con los patrones de referencia INTI, presentando diferencias menores al 1–2 % en la mayoría de los puntos medidos (INTI, 2015). Esto evidencia la confiabilidad del sistema para su aplicación en ensayos de laboratorio. Asimismo, se verificó la estabilidad del registro en tiempo real, sin pérdidas de datos ni interrupciones en la comunicación entre la placa Arduino y el software en Python (Python Software Foundation, 2015). Una de las principales ventajas observadas fue la posibilidad de exportar directamente los valores a hojas de cálculo (.xls), lo que facilitó el procesamiento posterior y la construcción de curvas carga–deformación (Kausel, 2015).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

Entre las limitaciones encontradas, se destaca la necesidad de realizar calibraciones frecuentes al cambiar el rango de medición de la celda de carga, lo cual constituye un aspecto a optimizar en futuras versiones. No obstante, los resultados obtenidos confirman la factibilidad de implementar sistemas de bajo costo con una precisión aceptable para la investigación aplicada en el área de materiales. Además, sistemas similares de adquisición de datos ya habían sido implementados en otros laboratorios de la UTN, como lo demuestran Juanto et al. (2017: 6). A continuación, se presenta una tabla y una gráfica (Figura 5) donde se realiza la comparativa que muestra la validación del sistema con un anillo dinamométrico certificado por el INTI, usando la máquina de ensayos Quasar 600 y el lector. Se registraron los valores de fuerza obtenidos por el sistema desarrollado y se compararon con los valores de referencia, con un número de 11 muestras que varió entre 0 y 2500 Newton.

**Tabla 1.** Validación de mediciones del sistema vs. patrón INTI.

| Punto de Medición | PATRON [N] | DEFORMACIÓN [mm] | Máquina ensayos [N] | Máquina ensayos [kg] | DEFORMACIÓN CALIBRACION [mm] | Máquina ensayos [N] Calibración | Máquina ensayos [kg] Calibración | Lector [kg] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 0 | 0,000 | 0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | 0 |
| **2** | 2500 | 0,185 | 2500 | 255 | 0,180 | 2432 | 248 | 255 |
| **3** | 5000 | 0,370 | 5000 | 510 | 0,370 | 5000 | 510 | 515 |
| **4** | 7500 | 0,554 | 7500 | 765 | 0,550 | 7453 | 760 | 767 |
| **5** | 10000 | 0,738 | 10000 | 1019 | 0,720 | 9756 | 995 | 1016 |
| **6** | 12500 | 0,925 | 12500 | 1274 | 0,900 | 12151 | 1239 | 1283 |
| **7** | 15000 | 1,111 | 15000 | 1529 | 1,080 | 14581 | 1486 | 1515 |
| **8** | 17500 | 1,297 | 17500 | 1784 | 1,270 | 17127 | 1746 | 1767 |
| **9** | 20000 | 1,483 | 20000 | 2039 | 1,450 | 19555 | 1993 | 2020 |
| **10** | 22500 | 1,667 | 22500 | 2294 | 1,630 | 21968 | 2239 | 2272 |
| **11** | 25000 | 1,855 | 25000 | 2548 | 1,820 | 24528 | 2500 | 2528 |

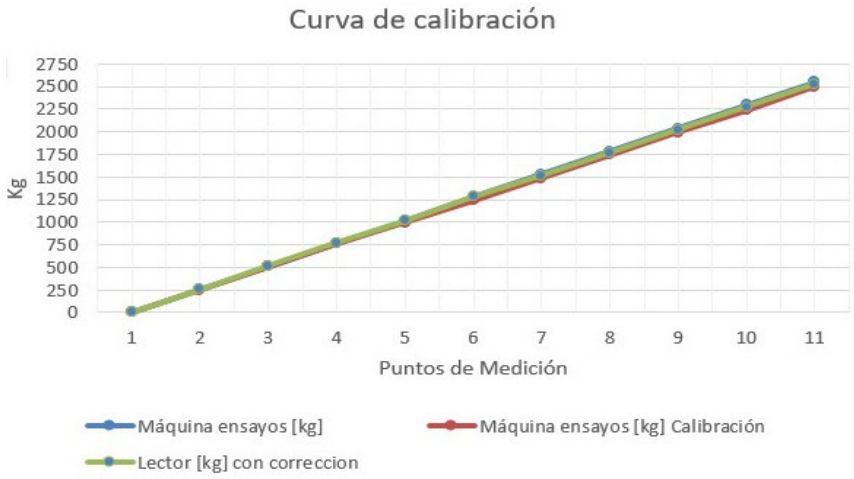



**Figura 5**. Grafica de la curva de calibración.

## 4. Conclusiones

Se logró implementar un sistema económico, versátil y confiable para la adquisición de datos de celdas de carga, validado frente a patrones certificados.

Los resultados muestran que la diferencia entre el sistema desarrollado y las mediciones patrón se mantuvo dentro de márgenes aceptables (<2 %), lo que respalda su aplicabilidad en investigación.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1987.2026

La posibilidad de registrar y exportar datos en tiempo real representa una ventaja significativa frente a equipos comerciales cerrados, aportando autonomía tecnológica al laboratorio.

Este trabajo constituye un primer paso hacia la independencia tecnológica del GIDEC, permitiendo proyectar futuras líneas de desarrollo, como la integración a sistemas de control automatizado, el diseño de interfaces gráficas más amigables y la ampliación de la compatibilidad con distintos sensores de fuerza.

## Agradecimientos

Se agradece a los integrantes de los laboratorios GIDEC y METROLOGÍA (alumnos, docentes y graduados) por su colaboración en el desarrollo de este trabajo.

## Referencias bibliográficas

Banzi, M. (2014). *Getting Started with Arduino*. Sebastopol, CA: Maker Media, Inc.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). *Normas de calibración de anillos dinamométricos*. Buenos Aires: INTI.

ISO 376:2011. *Materiales metálicos - Calibración de instrumentos para la medición de fuerza estática uniaxiales*. Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization.

Kausel, E. (2015*). Data acquisition and processing for engineering measurements.* Cham: Springer.

Python Software Foundation. *Python Language Reference, version 3*. Disponible en https://www.python.org/

Juanto, S., Alustiza, D., Prodanoff, F., Quintero, C. y Cristofoli, N. (2017). “Desarrollo propio de un sistema de adquisición de datos para trabajos de laboratorio”. *Revista de Ingeniería, Investigación y Desarrollo Educativo (RTyC-UTN)*, UTN – Facultad Regional La Plata. Disponible en https://ria.utn.edu.ar/items/67c7f3b3-6807-4a1a-bd64-0bf5eea3dc90

# Jornada Jóvenes Investigadores Tecnológicos

Facultad Regional Venado Tuerto

30 de octubre de 2025

UTN FRVT