JIT 24 ROSARIO

Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos
18 de octubre de 2024
Secretaría de Ciencia y Tecnología - Facultad Regional Rosario

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

AJEA
Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN

FACULTAD REGIONAL ROSARIO
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario
JIT 2024 : Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos ; Compilación de Gilda Evelin Morales ; Coordinación general de Patricia Liliana Mores ; Nicolás José Scenna. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Universidad Tecnológica Nacional, 2025.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-42-0259-2

1. Ciencias Tecnológicas. I. Morales, Gilda Evelin, comp. II. Mores, Patricia Liliana, coord. III. Scenna, Nicolás José, coord.
CDD 607.2

Libro de Actas
Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos
Fecha del Congreso: 18 de octubre de 2024
Lugar de las Jornadas: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Santa Fe, Argentina.

DOI: https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025
ISBN: 978-950-42-0259-2
Fecha de Publicación: 12/2025



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



Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos

18 de octubre de 2024

Secretaría de Ciencia y Tecnología
Facultad Regional Rosario
Universidad Tecnológica Nacional

www.frro.utn.edu.ar

Actas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Editorial

Esta publicación compila los trabajos de investigación y desarrollo presentados en las Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos (JIT) 2024. Este evento es ya una actividad consolidada, ya que ininterrumpidamente se ha convertido en un foro de encuentro de nuestros jóvenes investigadores y una plataforma fundamental para la divulgación y fomento de la actividad científico-tecnológica, reuniendo a estudiantes de grado, graduados jóvenes y estudiantes de maestrías, especializaciones y doctorados, de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Las JIT, desde sus comienzos en 2013 y en todas sus ediciones, han sido organizadas por las cinco Facultades Regionales de la provincia de Santa Fe: Rafaela, Reconquista, Rosario, Venado Tuerto y Santa Fe. Rotando la sede año a año en cada Facultad Regional de la provincia de Santa Fe. En cada oportunidad, la Facultad Regional anfitriona ha invitado a la Facultad Regional más próxima geográficamente, no perteneciente a la provincia de Santa Fe. En este caso, la Facultad Regional San Nicolás.

Los principales objetivos de las JIT son impulsar el interés de la comunidad acerca de las actividades de investigación, desarrollo e innovación tecnológica; fomentar la vocación científica en los jóvenes, incrementar el interés por la ciencia y promover la comunicación de los resultados. Además, se pretende potenciar la capacidad de invención, innovación y participación concreta en las actividades de desarrollo tecnológico.

En esta oportunidad, los participantes optaron entre las categorías: “Trabajo en desarrollo” y “trabajo de investigación”. Participaron más de 85 jóvenes investigadores, alrededor de 98 evaluadores, y se presentaron más de 65 trabajos científicos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Autoridades FR Rosario

Ing. Ciccarelli Rubén F.
Decano

Dr. Scenna Nicolás J
Secretario de Ciencia y Tecnología

Comité Organizador Local JIT 2024 FR Rosario

Dra. Mores Patricia L.
Coordinadora

Dr. Manassaldi Juan I.

Lic. Gueraglia Hernán

Bonfigli Mónica

Morales Gilda E.

Comité Asesor

Ing. David Oscar
Decano Regional Rafaela

Ing. Moschen Brian
Decano Regional Reconquista

Esp. Ing. Donnet Eduardo
Decano Regional Santa Fe

Ing. Rena Jorge
Decano Regional Venado Tuerto

Ing. Laorden Marcelo
Secretario de Ciencia y Tecnología Rafaela

Ing. Capeletti Walter
Secretario de Ciencia y Tecnología Reconquista

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

Ing. Amigo Jorge
Secretario de Ciencia, Tecnología y Posgrado Venado Tuerto

Ing. Avetta Haroldo Tomás
Decano Facultad Regional San Nicolás (invitada)

Dr. Benavidez Edgardo Roque
Sececretario de Ciencia y Tecnología Facultad Regional San Nicolás

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Colaboradores

Ing. Delfratte Evangelina

Ing. Biain Jesús A.

Ing. Kraft Romina A.

Lic. Ferrogiaro Federico

Mg. Pogliacomi Fabian

Astivia Sofía

Comité Académico y Científico

Evaluadores

Esp. Ing. Agosta Rodrigo M. (FRSF)

Dr. Alarcon Martin (FRRq)

Ing. Alarcón Diego M. (FRSF)

Ing. Alarcón Rodrigo (FRRq)

CPN. Ambrosini Marcela S. (FRSF)

Ing. Amigo Jorge (FRVT)

Ing. Antón Elvio D. (FRRq)

Mg. Ardiles Soledad (FRRq)

Dra. Arias Ana M. (FRRo)

Dra. Balzarini Ma. Florencia (FRRo)

Dra. Battaglia Laura (FRSF)

Mg. Begliardo Hugo (FRRa)

Ing. Beltramini Loreley B. (FRSF)

Dr. Benavidez Edgardo (FRSN)

Ing. Bertossi Valeria I. (FRSF)

Ing. Biain Jesus A. (FRRo)

Dra. Blas Ma. Julia (FRSF)

Lic. Boglione Rosana (FRRa)

Dr. Bonetti Carlos (FRRa)

Dr. Braccia Lautaro (FRRo)

Ing. Braun Oscar (FRVT)

Esp. Bricca Mónica (FRVT)

Dr. Cabrera Santiago P. (FRSF)

Dra. Caliusco Ma. Laura (FRSF)

Ing. Capeletti Walter (FRRq)

Dr. Cejas Ezequiel (FRVT)

Dr. Chamorro Juan C. (FRVT)

Ing. Costamagna Pablo (FRVT)

Esp. Crudeli Rossana (FRRq)

Ing. Dabove Daniel (FRVT)

Ing. De Federico Sara (FRRo)

Dr. Diab Jacinto (FRVT)

Ing. Díaz Daniela (FRRo)

Dr. Díaz Felipe (FRRa)

Mg. Lic. Enrique Claudio M. (FRSF)

Dra. Fernández Erica (FRRa)

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Ing. Ferreras Ma. Emilia (FRSF)

Ing. Ferreyra Matias O.(FRVT)

Ing. Filippetti Ma. Cecilia (FRVT)

Dra. Fina Brenda (FRVT)

Dr. Fornari Javier J. (FRRa)

Dr. Francesconi Javier (FRRo)

Dra. Fuentes Mora Mauren (FRSF)

Dr. Gimenez Walter F. (FRSF)

Mg. Ing. Giordani Claudio (FRRo)

Ing. Esp. Gon Fabian R. FRSF)

Lic. Griffa Carina (FRRa)

Ing. Imaz Fernando J. (FRSF)

Ing. Inés Mariano N.(FRSN)

Ing. Kraft Romina A. (FRRo)

Dr. Leale Guillermo (FRRo)

Esp. Ing. Leurino Esborraz Rodrigo (FRSF)

Dr. Loyarte Ariel S. (FRSF)

Dra. Luisetti Julia (FRRo)

Ing. Maenza Rosa R. (FRRo)

Dr. Manassaldi Juan I. (FRRo)

Dra. Mansilla Graciela A. (FRSN)

Dr. Martín Héctor D. (FRRq)

Mg. Martinet Roxana (FRRo)

Mg. Medin Cristian F. (FRRo)

Dra. Mendoza Sandra (FRRq)

Ing. Meyer Lya (FRVT)

Ing. Mónaco Héctor (FRRa)

Mg. Monier Eduardo C. (FRRa)

Ing. Mores Patricia L. (FRRo)

Ing. Muñoz Baltar Ariel (FRRo)

Dr. Mussati Miguel C. (FRRo)

Dr. Mussati Sergio F. (FRRo)

Dr. Nittmann Juan (FRRa)

Dr. Oliva Diego G. (FRSF)

Esp. Ing. Orué Matías (FRSF)

Dra. Papa Mara J. (FRVT)

Ing. Pisaco Juan P. (FRVT)

Ing. Portillo Rosana M.(FRSF)

Dr. Prevosto Leandro (FRVT)

Dr. Puccini Gabriel (FRRa)

Dr. Querini Pedro (FRRa)

Dr. Rocchi Ariel (FRRa)

Lic Rodríguez Georgina (FRSN)

Ing. Rodríguez Ma. Elvira (FRSF)

Dra. Roldán Ma. Luciana (FRSF)

Esp. Romero Omar M. (FRSF)

Ing. Ros Mario A. (FRRq)

Dr. Rullo Pablo (FRRo)

Esp. Ing. Russillo Sebastián (FRSF)

Mg. Salerno Juan (FRRo)

Ing. Sanseverinatti Carlos I.(FRSF)

Dr. Santini Leandro M. (FRSN)

Ing. Scardanzanc Luciano (FRSF)

Dr. Scenna Nicolás J. (FRRo)

Lic. Schiappa Pietrac José (FRSF)

Dra. Schierano Celeste (FRRa)

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Coordinadores de sala

Dra. Arias Ana M. (FRRo)

Esp. Ing. Giordani Claudio M. (FRRo)

Mg. Medin Cristian F. (FRRo)

Ing. Marino Edgardo (FRRo)

Dr. Francesconi Javier (FRRo)

Dra. Luisetti Julia (FRRo)

Esp. Ing. Dupuy Mabel (FRRo)

Dra. Balzarini Ma. Florencia (FRRo)

Dr. Rullo Pablo (FRRo)

Ing. Kraft Romina A. (FRRo)

Mg. Martinet Roxana (FRRo)

Esp. Ing. Nalli Yanina(FRRo)

Ing. Marchetti Pablo (FRSF)

Dr. Cabrera Santiago P. (FRSF)

Dr. Benavidez Edgardo (FRSN)

Áreas Temáticas en las que se presentaron trabajos

- Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
- Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
- Sistemas de información e informática
- Estructuras y construcciones civiles
- Materiales
- Energía
- Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
- Transportes y vías de comunicación
- Tecnologías de las organizaciones
- Análisis de señales, modelados y simulación
- Aplicaciones mecánicas y mecatrónica

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Información completa de la actividad

https://jit2024.frro.utn.edu.ar/

Mejores trabajos

Categoría “Trabajo de investigación”



Modelo matemático de una membrana para la purificación de una mezcla multicomponente de biogás
Rocío V. Asad, Facultad Regional Rosario

Evaluación y comparación de la calidad del aire en la ciudad de Rafaela en base a actualizaciones de la norma US-EPA 2024
Mariana M. Carrel, Martina D. Costanzo, Nain R. Schmidt y Ariana G. Castro, Facultad Regional Rafaela

Purificación de biogás mediante membranas poliméricas: análisis de parámetros operativos y consumo energético
Julia Méndez, Facultad Regional Rosario

Módulo de análisis estadísticos de parámetros meteorológicos
Lucas N. Vacchino, Facultad Regional Rosario

Integración de materiales innovadores en humedales construidos para tratamiento de efluentes: un enfoque desde la economía circular
María L. Martin, Marisol Farías y Estefanía S. Coman, Facultad Regional Rafaela

Evaluación de la calidad del agua subterránea para riego en Rafaela y alrededores
Marisol B. Farías y Marisa Servan, Facultad Regional Rafaela

Categoría “Trabajo en desarrollo”



Modelización del flujo en medios porosos: estudio del hormigón drenante mediante tomografía computarizada y simulación numérica directa
Milagros Rossler, Facultad Regional Santa Fe

Análisis del uso de agua industrial bajo el enfoque de Industria 4.0
Sheila Favole y Micaela Lozer, Facultad Regional Rafaela

Desarrollo y resultados preliminares de un paquete de optimización de la producción en Python
Araceli Sarina, Facultad Regional Santa Fe

Métodos de optimización de layout de parques eólicos: revisión bibliográfica
Constanza Morbidoni, Facultad Regional Rosario

Estudio de la hidratación del cemento mediante speckle dinámico: correlaciones con la cinética de reacción
Francisco Oliva, Dianela González y María Valentina De Nardo Vincens, Facultad Regional Santa Fe

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Trabajos distinguidos en la presentación oral



Resiliencia de redes de agua potable sectorizadas
Micaela Fernández, Facultad Regional Rafaela

Prestaciones de tableros de partículas de residuos de desmote de algodón y resina urea-formaldehído con adición de hidrófobos
Florencia A. Benitez, Emiliano Snaider, Luciano G. Massons, Valentín T. Mangoldt, Facultad Regional Santa Fe

Simulación de planta en ARDUINO para control con PLC en la enseñanza de la ingeniería
Agustín J. Goldaraz, Facultad Regional Santa Fe

Herramientas interactivas en entornos virtuales de aprendizaje: H5P
Victoria A. Hernández, Facultad Regional San Nicolás

Estudio de la corrosión en aceros inoxidables AISI 316L ensayado en cámara de niebla salina
Priscila Vallejos, Facultad Regional San Nicolás

Estudio de porosidad en fundición de Al-Si usando tomografía computada
Martín Felcaro, Facultad Regional Rafaela

Adaptación de la evaluación de un trabajo práctico de física eléctrica: de informe escrito a cuestionario en plataforma
Victoria A. Flores, Facultad Regional Santa Fe

Estudio del comportamiento de colectores solares ante la variación de sus parámetros fundamentales
Johann Schmidt y Nicolás Bon, Facultad Regional Santa Fe

Desarrollo de un algoritmo para recorrer un pórtico y hallar sus incógnitas
Iván Suligoy, Tiago Speranza y Macarena Caballero, Facultad Regional Reconquista

Resistencia al cizallamiento en líneas de encolado de madera laminada estructural
Andrés G. Rottet, Facultad Regional Venado Tuerto

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Índice

Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos

Modelo matemático de una membrana para la purificación de una mezcla multicomponente de biogás Pág.19
Membrane mathematical model for the purification of a multicomponent biogas mixture
Rocío Victoria Asad

Análisis de la calidad de la leche en el sector primario con una herramienta de ingeniería industrial Pág.25
Analysis of milk quality in the primary sector with an industrial engineering tool
Camila Fontana

Análisis del modelo matemático e-NRTL del ELV para el sistema reaccionante MEA-CO2-H2O Pág.30
Mathematical e-NRTL model analysis of VLE for the reactive system MEA-CO2-H2O
Daira Longo

Análisis comparativo del modelo eNRTL aplicado al equilibrio líquido-vapor de la mezcla CO2-NH3-H2O Pág.36
Comparative analysis of the eNRTL model applied to the liquid-vapor equilibrium of the CO2-NH3-H2O mixture
Gaspar Ariel Tosello

Predicción de valores de humedad, ceniza y acidez a partir de su color en mieles utilizando Redes Neuronales Artificiales Pág.42
Prediction of moisture, ash and acidity values from their color in honey using Artificial Neural Networks
Araceli Pierucci

Estimación del coeficiente de pérdida para el flujo dentro de codos mediante técnicas de CFD Pág.48
Estimation of the loss coefficient for flow inside elbows using CFD techniques
Daira Longo

Purificación de Biogás mediante membranas poliméricas: análisis de parámetros operativos y consumo energético Pág.54
Biogas purification using polymeric membranes: analysis of operating parameters and energy consumption
María Julia Mendez

Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería

Tu computadora ideal, contribución a las competencias sociales, políticas y actitudinales en carreras de ingeniería en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Venado Tuerto Pág.62
Your ideal computer, contribution to social, political and attitudinal competencies in engineering careers at the National Technological University
Lisbeth Abigail Pujol

Desarrollo y Simulación de un Sistema de Paletizado Automatizado para Educación Universitaria Pág.68
Development and Simulation of an Automated Palletizing System for University Education
Diego Butto, Julián Gervasoni

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Adaptación de la evaluación de un Trabajo Práctico de Física Eléctrica: de informe escrito a cuestionario en plataforma Pág.73
Adaptation of the Evaluation of an Electric Physics Practical Work: from Written Report to Platform-Based Questionnaire
Victoria Flores

Integración de recursos tecnológicos en la evaluación formativa a través de Edpuzzle Pág.79
Integration of technological resources in formative assessment through Edpuzzle
Cecilia Cardoso Dupuy

Simulación de planta en ARDUINO para control con PLC en la enseñanza de la ingeniería Pág.86
Arduino-based plant simulation for PLC control in engineering education
Agustín Goldaraz

Herramientas interactivas en entornos virtuales de aprendizaje: H5P Pág.91
Interactive tools in virtual learning environments: H5P
Victoria Agustina Hernandez

Análisis de señales, modelados y simulación

Modelización del Flujo en Medios Porosos: Estudio del Hormigón Drenante mediante Tomografía Computarizada y Simulación Numérica Directa Pág.99
Modeling Flow in Porous Media: A Study of Pervious Concrete Using Computed Tomography and Direct Numerical Simulation
Milagros Rossler

Propuesta, análisis y simulación de un sistema de llenado preciso para jugo con pulpa Pág.106
Proposal, analysis, and simulation of a precision filling system for pulped juice
Valentín Garrido, Elías Monzón, Gustavo Arnaudo, Fausto Balangione, Emmanuel Schierloh

Optimización de rutas para el transporte de leche bajo diferentes condiciones de caminos en la región Pampeana Pág.113
Route Optimization for Milk Transportation under Varying Road Conditions in the Pampas Region
Augusto López Airaudo, Santiago Gariboldi, Bianca Culasso

Desarrollo de un algoritmo para recorrer un pórtico y hallar sus incógnitas Pág.119
Structural frame pathfinding and unknowns identification algorithm development
Iván Suligoy, Tiago Speranza, Macarena Caballero

Resiliencia de redes de agua potable sectorizadas Pág.125
Resilience of sectorized potable water
Micaela Fernández

Aplicaciones mecánicas y mecatrónica

Desarrollo de una mesa vibratoria para análisis de modelos sismorresistentes Pág.133
Development of a vibrating table for analysis of earthquake resistant models
Andrés Mansilla, Paula Farandato

Energía

Optimización de sistemas de refrigeración por absorción de doble efecto H2O-LiBr Pág.138
Optimization of Double-Effect H2O-LiBr Absorption Refrigeration Systems
Tomás Giuntoli

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Reacondicionamiento de micro ohmímetro para uso educativo Pág.145
Reconditioning a Micro-Ohmmeter for Educational Purposes
Luciano Soto, Cristian Mancuello

Calentador solar de agua sanitaria con materiales de bajo costo Pág.151
Low-cost solar water heater for sanitary use
Gonzalo Nuñez, Federico Fontana, Nicolas Moschen

Influencia de la temperatura en el rendimiento de paneles fotovoltaicos en la generación de energía Pág.157
Influence of Temperature on the Performance of Photovoltaic Panels in Energy Generation
Andrés Gabriel López Nicola, Matías Osmar Corgnali Puente

Estudio del comportamiento de colectores solares ante la variación de sus parámetros fundamentales Pág.164
Study of the behavior of solar collectors when their fundamental parameters vary
Nicolas A. Bon, Johann M. Schmidt Waigel

Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en baterías en generación solar fotovoltaica..... Pág.172
Battery Energy Storage Systems in solar photovoltaic power generation
Cindy Touma

Comportamiento de la demanda eléctrica en el sector residencial de Santa Fe Pág.179
Behavior of electrical demand in the residential sector of Santa Fe
Kevin T. Basilio, Roberto J. Nagel

Aproximación de la Irradiación solar global captada mediante funciones polinómicas Pág.186
Approximation of the global solar irradiation captured using polynomial functions
Jose Ignacio Giménez, Agustin Nicolas Muñoz

Estudio de Factibilidad Técnica para la Conformación de una Multi-Microrred Eléctrica en la Ciudad de Rafaela Pág.192
Technical Feasibility Study for the Formation of an Electrical Multi-Microgrid in the City of Rafaela
Agustín Chiani

Estructura y construcciones civiles

Análisis numérico y experimental de vigas reticuladas con perfiles conformados en frío y nudos soldados Pág.199
Numerical and experimental analysis of truss beams with cold-formed sections and welded nodes
Maira Sosa, Julián Gelfuso

Retención de contaminantes del agua de lluvia en hormigón drenante Pág.206
Retention of stormwater pollutants in Pervious Concrete
Fernando L. Fogliatti, Rocío C. Goddio, Santiago A. Noguera Vivas

Criterios para la Aplicación Práctica del Método de los Factores de la Norma ISO 15686 para la Estimación de la Vida Útil en Edificaciones Patrimoniales Pág.213
Criteria for the Practical Application of the ISO 15686 Standard Factor Method for Estimating the Useful Life of Heritage Buildings
Catalina Cerutti, Augusto Baqué

Resistencia al cizallamiento en líneas de encolado de madera laminada estructural Pág.219
Shear resistance in structural laminated wood gluing lines
Andrés Germán Rottet

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Materiales

Análisis preliminar del comportamiento a flexión de paneles contralaminados de Pinus elliottii-taeda Pág.225
Preliminary analysis of the bending behavior of elliottii-taeda cross-laminated timber
Andrea D. Tosco

Estudio de porosidad en fundición de Al-Si usando tomografía computada Pág.232
Porosity study in Al-Si casting using computed tomography
Martín Felcaro

Estudio de corrosión en acero inoxidable AISI 316L ensayado en cámara de niebla salina Pág.239
Study of corrosion in AISI 316L stainless steel tested in a salt fog chamber
Priscila Vallejos

Análisis de porosidad en una componente de Al-Si inyectado usando tomografía computada Pág.245
Porosity analysis of injected Al-Si component using computed tomography
Boris Riva

Prestaciones de tableros de partículas de residuos de desmote de algodón y resina urea-formaldehído con adición de hidrófobos Pág.252
Performance of cotton gin waste and urea-formaldehyde resin particleboard with addition of hydrophobic agents
Florencia A. Benítez, Emiliano Snaider, Luciano G. Massons, Valentín T. Mangoldt

Influencia de variables dimensionales y térmicas en la determinación del coeficiente de conductividad térmica en probetas de poliestireno expandido y su aplicación en casos con temperaturas medias extremas Pág.259
Influence of dimensional and thermal variables in the determination of the coefficient of thermal conductivity in expanded polystyrene specimens and its application in cases with extreme average temperatures
Francisco Ulibarrie, Maira Sosa, Gonzalo Barrientos Santini

Estudio de la Hidratación del Cemento mediante Speckle Dinámico: Correlaciones con la Cinética de Reacción Pág.266
Cement Hydration Study through Dynamic Speckle: Correlations with Reaction Kinetics
Francisco Oliva, Dianela Gonzalez, María Valentina De Nardo Vincens

Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable

Análisis de materiales sustentables para estructura destinada a mitigar el estrés térmico en ganado bovino Pág.274
Analysis of sustainable materials for a structure intended to mitigate thermal stress in cattle
María V. Martinez

Diseño de máquina de ensayo de resistencia al impacto de granizo sobre paneles solares según IRAM 210013-8 ..... Pág.279
Design of a hail impact resistance testing machine on solar panels according to IRAM 210013-8
Osvaldo Bertschi, Ignacio Molina

Análisis de las variables influyentes para Jet Fires generados a partir de Metano y Propano Pág.286
Analysis of Influential Variables for Jet Fires Generated from Methane and Propane
Alamiro Allocca, Facundo Esci

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Evaluación de la calidad del agua subterránea para riego en Rafaela y alrededores Pág.292
Evaluation of the groundwater quality for irrigation in Rafaela and surrounding
Farías Marisol Belén, Servan Marisa

Métodos de Optimización de Layout de Parques Eólicos: Revisión Bibliográfica Pág.298
Optimization Methods for Wind Farm Layout: Bibliographic review
Constanza Morbidoni

Evaluación y comparación de la calidad del aire en la ciudad de Rafaela en base a actualizaciones de la norma US-EPA 2024 ..... Pág.305
Evaluation and comparison of air quality in the city of Rafaela based on updates from the US-EPA 2024 standard
Mariana Carrel, Martina Costanzo, Nain Schmidt, Ariana Castro

Integración de materiales innovadores en humedales construidos para tratamiento de efluentes: un enfoque desde la economía circular..... Pág.311
Constructed wetlands with innovative materials for dairy industry effluent treatment: a circular economy approach
María Lourdes Martin, Stefania Shaiel Comán

Modelo conceptual de colector eólico offgrid para calentar agua..... Pág.317
Conceptual model of off-grid wind collector for heating water
Walter R. Tonini, Ariel M. Rocchi

Sistemas de información e informática

Hoja electrónica para determinar solicitaciones de viento en estructura mitigadora del estrés calórico en ganado bovino..... Pág.324
Electronic spreadsheet to determine wind loads on a heat stress mitigating structure in cattle
Aldana Ortiz, Paula Farandato

Módulo de análisis estadísticos de parámetros meteorológicos Pág.329
Statistical analysis module for meteorological parameters
Lucas Nehuén Vacchino

Evaluación de la Madurez en Ciberseguridad: Un Enfoque para Pequeñas y Medianas Empresas Pág.336
Cybersecurity Maturity Assessment: An Approach for Small and Medium Enterprises
Jimena Denise Flecha Alfaro

Aplicación del software Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con la herramienta Open Foam Pág.342
Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) software with the Open Foam tool
Ligia Molina, Juan Cruz Schmit, Paula Farandato

Modelación del estacionamiento de la Facultad Regional Rafaela de la Universidad Tecnológica Nacional para someterla a cargas de viento..... Pág.348
Modeling of the Rafaela Regional Faculty parking to subject it to wind loads
Juan Cruz Schmit, Ligia Molina, Paula Farandato

Integración de BIM en el Diseño y Análisis de Estructuras Sismorresistentes Pág.353
Integration of BIM in the Design and Analysis of Seismic-resistant Structures
Luciana Ferrero

Desarrollo de un Prototipo de Sistema Recomendador para el Diseño de Objetos de Aprendizaje en Carreras de Ingeniería..... Pág.359
Development of a Prototype Recommender System for the Design of Learning Objects for Engineering Education
Pilar Novillo Saravia

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Herramienta para el control en tiempo real de procesos de manufactura aditiva **Pág.366**
Real-time productivity control tool for additive manufacturing processes
Ezequiel Agustín Robert

Desarrollo y Resultados Preliminares de un Paquete de Optimización de la Producción en Python **Pág.372**
Development and Preliminary Results of a Python-Based Production Optimization Package
Araceli Sarina

Tecnologías de las organizaciones

Análisis del uso de agua industrial bajo el enfoque de Industria 4.0 ..... **Pág.380**
Analysis of industrial water use under the Industry 4.0 approach
Sheila Favole, Micaela Lozer

Definición de información para desarrollo de pasaporte digital de productos lácteos **Pág.386**
Definition of information for the development of a digital passport for dairy products
Javier Andrés Benitez

Aplicación de una Metodología para Identificar Áreas Prioritarias en la Transformación Digital de PyMEs: Análisis Inicial **Pág.393**
Application of a Methodology to Identify Priority Areas in the Digi-tal Transformation of PyMEs: Initial Analysis
Bianca Arteta, Jesé Trulli

Embolsado y extracción de granos. Determinación del costo operativo utilizando costeo por absorción **Pág.400**
Bagging and extraction of grains. Determination of operating cost using absorption costing
Fabio Garcia, Mara Armoa

Transportes y vías de comunicación

Ruta Nacional 11: Un corredor estratégico de GNC para el transporte carretero argentino **Pág.408**
National Route 11: A strategic CNG corridor for Argentine road transport
Facundo Oostdyk, Ingrid Gerstner, Santiago Vallejos

Utilización de IA para medición de flujo de tránsito en áreas urbanas **Pág.415**
Use of AI to measure traffic flow in urban areas
Adrían Rodrigues Copque, Alex Andrada

Trabajos



Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alime
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

Modelo matemático de una membrana para la purificación de una mezcla multicomponente de biogás

Membrane mathematical model for the purification of a multicomponent biogas mixture

Presentación 18/10/2024

Rocío Victoria Asad

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina

E-mail de contacto: rocioasad@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se examina la influencia de diversas variables (puntos de discretización, presión, composición, fugacidad) para la purificación de una mezcla multicomponente de biogás, en base a un modelo de transporte solución-difusión a través de una membrana polimérica, implementado en GAMS (General Algebraic Modeling System), y del modelo de Peng-Robinson para estimar la fugacidad de los componentes en mezclas gaseosas (librería de GAMS). A partir de los resultados se concluye que, para lograr un modelo más riguroso, es decir, con mayor representatividad del fenómeno, se debería considerar la composición real del biogás, así como el comportamiento no ideal de la mezcla, entre otros factores. En este sentido, el modelo de propiedades termodinámicas con que se cuenta mostró resultados satisfactorios. Finalmente, se observó que utilizar 21 puntos discretos es ventajoso desde el punto de vista del tamaño del problema y su convergencia.

Palabras clave: Purificación de biogás; Separación con membranas; Modelado matemático; Comportamiento no ideal

Abstract

In this paper, the influence of several variables (discretization points, pressure, composition, fugacity) for the purification of a multicomponent biogas mixture is examined, based on a solution-diffusion transport model through a polymeric membrane, implemented in GAMS (General Algebraic Modeling System), and the Peng-Robinson model to estimate the fugacity components in gaseous mixtures (GAMS library). From the results, it is concluded that, in order to achieve a more rigorous model, that is, with greater phenomenon representativeness, the biogas real composition should be considered, as well as the non-ideal behavior of the mixture, among other factors. In this sense, the thermodynamic properties model available showed satisfactory results. Finally, it was observed that using 21 discrete points is advantageous from the point of view of the size of the problem and its convergence.

Keywords: Biogas purification; Membrane separation; Mathematical modelling; Non-ideal behavior

1. Introducción

Uno de los mayores problemas a nivel mundial actualmente es el gran uso de fuentes finitas de energía. Para lograr un futuro más sostenible, se exploran distintas fuentes renovables y energéticamente eficientes, entre ellas, el biogás. Este es un combustible de gran potencial que se obtiene mediante la fermentación de residuos orgánicos en un proceso de digestión anaeróbica.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

La composición del biogás depende de la fuente del material orgánico y de sus condiciones de almacenamiento, pero usualmente consiste de 55–60 vol% de metano (CH_4), 38–40 vol% de dióxido de carbono (CO_2), 1–2 vol% de vapor de agua (H_2O), y otros componentes minoritarios como ácido sulfhídrico (H_2S), y compuestos orgánicos volátiles, entre otros (Ramezani et al., 2023; Tomczak et al., 2024; Žák et al., 2018). Las impurezas resultan indeseables ya que generan efectos negativos en la producción del biogás y en la seguridad de la planta (Tomczak et al., 2024). Además, el CO_2 puede formar ácidos con el vapor de agua, corroyendo las tuberías y los equipos (Ramezani et al., 2023).

Entonces, es deseable la purificación de la mezcla, obteniendo un producto de mayor contenido de CH_4 (>95%), y menor de CO_2 (<2%), incrementando su poder calorífico, y asimilando sus propiedades a aquellas del gas natural, cumpliendo con los estándares establecidos para su inyección a la red (Tomczak et al., 2024).

Existen diversos métodos de separación para remover el CO_2 y el resto de los componentes del biogás, como, por ejemplo: absorción química, adsorción, destilación, destilación criogénica, y separación por membranas. Esta última presenta diversas ventajas, como evitar el uso de compuestos químicos, y ser simple de operar, energéticamente eficiente, de bajo costo, y capaz de utilizarse en operaciones continuas y discontinuas (Ramezani et al., 2023; Tomczak et al., 2024). Por otra parte, las membranas pueden ser de diversos materiales. Las poliméricas se usan principalmente en la separación de gases por ser económicas, fáciles de fabricar a gran escala y robustas (Da Conceicao et al., 2023).

Existen diversos mecanismos de transporte. En particular, el de solución-difusión consiste, primeramente, en la disolución o sorción del gas en el lado de alta presión del material, luego la difusión del gas absorbido a través de la membrana, y, por último, la desorción en el lado de baja presión (Da Conceicao et al., 2023). La selectividad y la permeabilidad de la membrana determinan la eficiencia de separación del proceso. Por otra parte, su rendimiento está influenciado, además, por las condiciones operativas. Taifan y Maravelias (2022) indican que una alta selectividad está asociada a una alta pureza, y una alta permeabilidad a una alta recuperación. Da Conceicao et al. (2023) afirman que la selectividad del componente a través de la membrana determina el costo energético (operativo), ya que al aumentar la misma se reduce la cantidad de gas que debe permear a través de la membrana para lograr la pureza determinada, por lo que también disminuye la compresión necesaria. Por otra parte, al incrementar la permeabilidad se reduce el área necesaria para la separación, por lo que este parámetro determina el costo de capital.

Según Da Conceicao et al. (2023), entre otros, una gran cantidad trabajos asumen diversas hipótesis simplificadoras en el modelo, tales como: 1) comportamiento ideal del gas, 2) condiciones isotérmicas, 3) permeanza constante, 4) caída de presión nula en el retenido y el permeado, y 5) flujo laminar, entre otros. Para mejorar la representación del fenómeno, deben considerarse otros efectos que se pueden observar durante el proceso de separación de gases con membranas. Por ejemplo, 1) comportamiento de gas real, 2) caída de presión a ambos lados de la membrana, 3) operación no isotérmica, 4) permeanza variable, y 5) propiedades no uniformes de la membrana.

En el presente trabajo se examina la influencia de diversas variables (intervalos de discretización, presión, composición, fugacidad) para la purificación de una mezcla de biogás multicomponente, en base a un modelo de transporte solución-difusión a través de una membrana polimérica.

2. Metodología

El modelo de transporte en una membrana de polisulfona para la separación de una mezcla ideal de CO_2 y CH_4 previamente implementado en GAMS - General Algebraic Modelling System (Asad, 2023) está basado en una discretización de 21 puntos según el método de diferencias finitas hacia atrás (Arias et al., 2016). En este trabajo se analiza la influencia de la variación de los puntos discretos en los resultados.

La segunda etapa del trabajo está orientada a mejoras en la rigurosidad del modelo desde el punto de vista fenomenológico. Primeramente, se evalúa el impacto de las impurezas en los requerimientos de separación, en relación con una mezcla binaria. Para ello se extiende el modelo para ser usado con una mezcla multicomponente (CH_4, CO_2, O_2, H_2O y H_2S) considerando una composición típica de biogás. Aquí, es clave definir una nueva estrategia de inicialización para asegurar su convergencia. Por último, y con el objeto de incorporar a futuro correlaciones que modelen la no-idealidad de la mezcla, se analiza el desempeño de un modelo de fugacidad de mezclas gaseosas. Específicamente, se emplea el modelo termodinámico de Peng-Robinson para mezclas genéricas de hasta 18 componentes, implementado en GAMS por integrantes del Centro como una librería. Se deben ingresar como parámetros las propiedades críticas de cada componente,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

coeficientes de interacción binaria, coeficientes de estimación de la capacidad calorífica a presión constante y el calor de formación de cada compuesto puro en el código fuente programado en C. Como resultado se obtienen la fugacidad de cada uno de los componentes y la densidad y entalpía de la mezcla. Las últimas, entre otras, son necesarias para incorporar ecuaciones de estimación del trabajo de compresión, el enfriamiento de la mezcla comprimida a la temperatura de operación y la caída de presión a ambos lados de la membrana. Se comparan los resultados con los obtenidos por simulación en Aspen Plus (validación del modelo) y se analiza la diferencia entre presión parcial y fugacidad para diferentes rangos de composición y presiones de operación. En este sentido, en los trabajos de Nemestóthy et al. (2018) y Ramezani et al. (2023) se reportan valores entre 4 y 16 bar. Por su parte, 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.

2.1. Descripción del modelo

En la Figura 1, se presenta el esquema de una membrana con flujo en contracorriente, dónde F es el caudal de alimentación, R el caudal de retenido, P es el caudal de permeado, Ph es la presión alta, Pl es la presión baja (1 bar), X la fracción molar de cada componente i en la mezcla, y j los puntos discretos. Se asume comportamiento ideal de la mezcla, distribución de flujo pistón, permeanza constante, caída de presión despreciable y condiciones isotérmicas, entre otras (Arias et al., 2023). El modelo de solución-difusión implementado, consta de balances de masa globales y por componentes en cada etapa que permiten describir la variación de la fuerza impulsora, siendo esta la diferencia entre las presiones parciales del retenido y el permeado para cada componente $\left(FI_i = p_{i,j}^R - p_{i,j}^P\right)$, a lo largo de la membrana. Además, se obtienen indicadores de desempeño, como la recuperación $\left(x_{CH_4}^R \cdot R / x_{CH_4}^F \cdot F\right)$ y la pureza de CH_4 en el retenido $\left(100 \cdot x_{CH_4}^R\right)$, y el stage–cut o fracción de permeado $(\theta = P/F)$, es decir, la fracción de alimentación que permea a través de la membrana.

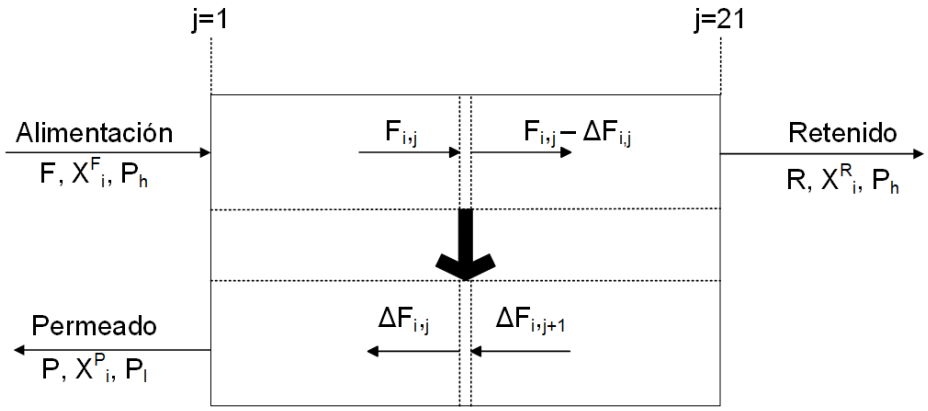


Figura 1. Diagrama de una membrana operando en contracorriente. Adaptado de Asad (2023).

El modelo matemático de la membrana para la purificación de una mezcla multicomponente (5), posee 874 variables y 1162 restricciones de igualdad y desigualdad. Es implementado en el programa GAMS y se utiliza CONOPT para su resolución ya que es un modelo no lineal (NLP).

3. Resultados

3.1. Análisis de la influencia de los puntos discretos

La membrana se alimenta con una mezcla de 2,97 kmol/h de CH_4 y 1,27 kmol/h de CO_2 a 4,05 bar. Se define $\theta = 42\%$ y se estima el área requerida (A) asumiendo que la permeanza de CO_2 es $Pza_{CO_2} = 103{,}4$ GPU y la selectividad $CO_2|CH_4$=39,3 (Asad, 2023). En la Tabla 1, se muestran los indicadores que resultan de variar los puntos discretos (J) entre 15 y 51. Al fijar θ queda definido el flujo de retenido en 2,46 kmol/h para todos los casos. Por otra parte, al aumentar la cantidad de puntos discretos de 15 a 51, la pureza y la recuperación de CH_4 se incrementan solo un 0,08% mientras que el área total de membrana lo hace en 0,26%, siendo despreciables las diferencias en comparación con el incremento en la cantidad de variables y ecuaciones del modelo (de 309 variables y 444 ecuaciones a 993 variables y 1452 ecuaciones).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 1. Variables de performance para distintas cantidades de puntos discretos.

Puntos discretos	Recuperación de CH_4 (%)	Pureza de CH_4 (%)	Área (m^2)
15	78,64	94,77	687,22
21*	78,61	94,73	688,14
25	78,60	94,72	688,44
31	78,59	94,71	688,70
41	78,58	94,70	688,92
51	78,58	94,69	689,02

* caso de referencia (Asad, 2023)

En la Figura 2 se muestra la variación de la presión parcial de CO_2 (p_{CO_2}) y de CH_4 (p_{CH_4}), es decir, la fuerza impulsora, a lo largo del área de membrana para 15, 21 (caso de referencia) y 51 puntos discretos. Como es de esperar, al aumentar los puntos discretos (J) la diferencia de área $\left(\Delta A = \frac{A}{J-1}\right)$ disminuye y las presiones parciales de ambos componentes siguen perfiles más suaves. Sin embargo, con una menor cantidad de puntos no hay cambios significativos, aun cuando por encima de los 500 m^2 los resultados presenten mayor dispersión.

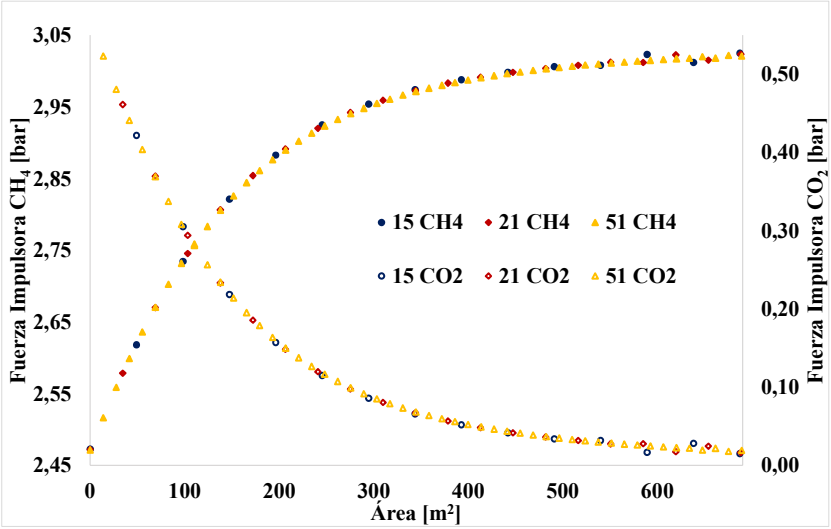


Figura 2. Fuerza impulsora (FI_i) a lo largo del área de membrana $\left(A_j,\ j = 1 \ldots J\right)$.

Por otro lado, se observa que si se libera θ y se fija el área (1000 m^2) las diferencias en los resultados siguen tendencias similares tanto en los indicadores de desempeño, como en el perfil interno de la membrana.

3.2. Influencia de la presencia de impurezas (O_2, H_2O y H_2S) en el biogás que alimenta la membrana

En la Tabla 2 se muestran los datos para este caso de estudio, tomados de Qi y Henson (2000) y de Žák et al. (2018). Dado que no se cuenta con información de permeanzas del O_2, H_2O y H_2S en la mezcla multicomponente y considerando que el H_2O y H_2S tienen alta permeabilidad y el O_2 baja, se asume que $\mathrm{Pza}_{H_2O} = \mathrm{Pza}_{H_2S} = \mathrm{Pza}_{CO_2}$ y $\mathrm{Pza}_{O_2} = \mathrm{Pza}_{CH_4}$.

Tabla 2. Datos de entrada para una mezcla multicomponente.

F (kmol/h)	P (bar)	X_i^F (%, base molar)					Pur. de CH_4
11,67	35	CH_4: 51	CO_2: 47,1	O_2: 1	H_2O: 0,8	H_2S: 0,1	75 %

Se analiza la influencia de la presencia de trazas de diversos componentes en la alimentación respecto al requerimiento del área de membrana. Específicamente, se necesitan 39,73 m^2 para lograr que el retenido tenga una pureza de CH_4 de 75%, lo

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

que representa un 4,40 % más que si se tratara de una mezcla binaria de biogás con el mismo contenido de metano. La recuperación también es algo menor, 92,34 % versus 92,66 %. Por lo tanto, es conveniente considerar la presencia de los componentes minoritarios para diseñar este tipo de sistemas de purificación de biogás.

3.3. Estimación de fugacidades para distintas condiciones de presión y composición

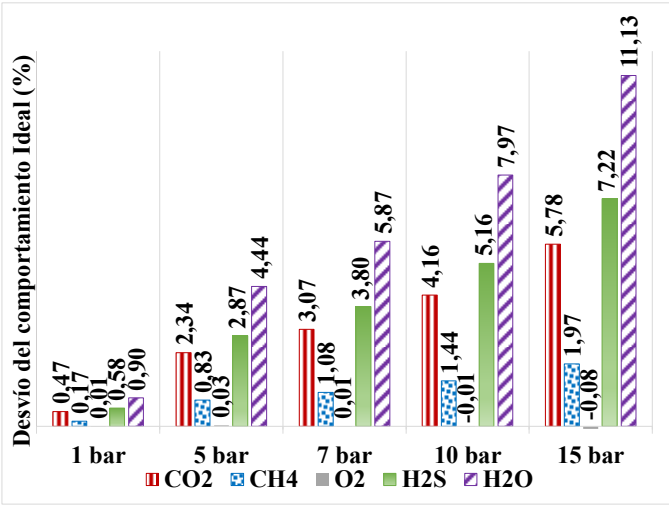
Para la composición y flujo de biogás indicados en la Tabla 2, diferentes presiones de operación (1-15 bar) y una fracción de vapor constante igual a 1, se determina la fugacidad de cada componente (f_i), la entalpía y la densidad la mezcla empleando el modelo de Peng-Robinson (librería de GAMS) y se comparan los resultados con los obtenidos por simulación en Aspen Plus (Tabla 3), observándose una excelente aproximación (diferencias menores al 0,03%). Si se toma una P=10 bar y las composiciones de permeado y retenido reportadas en Žák et al. (2018), esto es: $X^P_{CH_4}: 0{,}24 - X^P_{CO_2}: 0{,}7348 - X^P_{O_2}: 0{,}012 - X^P_{H_2S}: 0{,}0012 - X^P_{H_2O}: 0{,}012$ y $X^R_{CH_4}: 0{,}96 - X^R_{CO_2}: 0{,}0315 - X^R_{O_2}: 0{,}006 - X^R_{H_2S}: 0{,}0006 - X^R_{H_2O}: 0{,}0019$, las observaciones son similares. De esta manera, se puede concluir que el modelo de propiedades termodinámicas con que se cuenta es satisfactorio para la extensión del modelo de transporte.

Tabla 3. Comparación entre el modelo de Peng-Robinson (librería de GAMS) y Aspen Plus.

		Fugacidad (bar)					Entalpía (J/mol)	Densidad (mol/m^3)
		f_{CH_4}	f_{CO_2}	f_{O_2}	f_{H_2S}	f_{H_2O}		
1 bar	(1)	0,5092	0,4684	0,0100	0,0009	0,0083	-225312,7375	39,4296
306 K	(2)	=	=	=	=	=	-225312,7102	39,4299
5 bar	(1)	2,5292	2,2987	0,0500	0,0046	0,0401	-225416,2736	199,6739
306 K	(2)	2,5290	2,2981	=	=	=	-225416,1369	199,6808
7 bar	(1)	3,5320	3,1931	0,0700	0,0064	0,0554	-225238,6835	275,5510
312 K	(2)	3,5317	=	=	=	=	-225238,5161	275,5651
10 bar	(1)	5,0273	4,5106	0,1000	0,0090	0,0773	-225120,5657	390,3549
317 K	(2)	5,0267	4,5105	=	=	=	-225120,3546	390,3843
15 bar	(1)	7,5008	6,6520	0,1501	0,0132	0,1120	-224967,2106	579,3843
324 K	(2)	7,4996	6,6516	=	=	=	-224966,9511	579,4522

(1) Este trabajo – (2) Aspen Plus

Finalmente, en la Figura 3 se muestra el desvío del comportamiento ideal de cada sustancia, calculado como $100 \cdot \left(\frac{p_i - f_i}{p_i}\right)$ a partir de los valores de las simulaciones en Aspen Plus. Como es de esperar, a medida que aumenta la presión y la temperatura el desvío se hace mayor, especialmente para H_2S y H_2O, aun cuando son componentes minoritarios en la mezcla. Por otra parte, en el caso de P=10 bar se observó que, cuanto mayor es el contenido de estos componentes, mayor es el desvío del comportamiento ideal. Esto evidencia la necesidad de su representación fenomenológica en el modelo matemático.



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Figura 3. Desvío del comportamiento ideal.

4. Conclusiones

A partir de los resultados se observa que es conveniente considerar la presencia de los componentes minoritarios, así como comportamiento no ideal de la mezcla para diseñar este tipo de sistemas de purificación de biogás. Además, se concluye que adoptar una mayor cantidad de puntos discretos no presenta mejoras significativas y considerando que se pretende modelar la no idealidad de la mezcla, la caída de presión a ambos lados de la membrana y equipos auxiliares (compresores, enfriadores), utilizar 21 puntos es ventajoso desde el punto de vista del tamaño del problema y su convergencia.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo educativo de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) y el Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), a la Dra. Patricia Mores y al Dr. Juan Ignacio Manassaldi por su valioso aporte al presente trabajo.

Referencias bibliográficas

Arias, A. M., Mussati, M. C., Mores, P. L., Scenna, N. J., Caballero, J. A., Mussati, S. F. (2016). Optimization of multi-stage membrane systems for CO_2 capture from flue gas. International Journal of Greenhouse Gas Control, 53, 371-390. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.08.005

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. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103964

Asad, R. V. (2023). Análisis del impacto de variables de operación y diseño en el proceso de mejora de biogás a partir de una mezcla binaria. Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos JIT 2023, Rafaela, 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. https://doi.org/10.3390/membranes13070639

Nemestóthy, N., Bakonyi, P., Szentgyörgyi, E., Kumar, G., Nguyen, D. D., Chang, S. W., Kim, S.-H., Bélafi-Bakó, K. (2018). Evaluation of a membrane permeation system for biogas upgrading using model and real gaseous mixtures: The effect of operating conditions on separation behaviour, methane recovery and process stability. Journal of Cleaner Production, 185, 44-51. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.047

Qi, R., Henson, M. A. (2000). Membrane system design for multicomponent gas mixtures via mixed-integer nonlinear programming. Computers & Chemical Engineering, 24(12), 2719-2737. https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00625-6

Ramezani, R., Randon, A., Felice, L. D., Gallucci, F. (2023). Using a superstructure approach for techno-economic analysis of membrane processes. Chemical Engineering Research and Design, 199, 296-311. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.10.007

Taifan, G. S. P., Maravelias, C. T. (2022). Generalized optimization-based synthesis of membrane systems for multicomponent gas mixture separation. Chemical Engineering Science, 252, 117482. https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117482

Tomczak, W., Gryta, M., Daniluk, M., Žák, S. (2024). Biogas Upgrading Using a Single-Membrane System: A Review. Membranes, 14(4), 80. https://doi.org/10.3390/membranes14040080

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. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.024

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Análisis de la calidad de la leche en el sector primario con una herramienta de ingeniería industrial

Analysis of milk quality in the primary sector with an industrial engineering tool

Presentación 02/09/2024

Camila Fontana

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: camifontana39@gmail.com

Resumen

La inocuidad de los productos lácteos se debe garantizar a lo largo de toda la cadena agroalimentaria. Un sistema que contribuye a este objetivo es la trazabilidad, ya que permite seguir un producto desde su fabricación, transporte y distribución hasta el cliente final. Todas las etapas en el desarrollo de los lácteos son de suma importancia, y los tambos representan el primer eslabón de este circuito.

El objetivo principal de este proyecto es investigar los factores más importantes que influyen en la calidad de la leche en la producción primaria. Se busca aportar seguridad alimentaria, contribuyendo a la salud humana y a objetivos económicos mediante la incorporación de tecnologías avanzadas y el uso de guías de buenas prácticas. Para llevar a cabo esta investigación, se analizó el proceso productivo de un tambo tomado como caso de estudio, utilizando una herramienta denominada “Diagrama de Ishikawa” desarrollada a partir de las guías de buenas prácticas.

Los resultados preliminares indican que el control riguroso del proceso de obtención de la leche puede mejorar significativamente tanto la inocuidad como la calidad del producto. Se identificaron varios puntos críticos en el proceso de producción que, al ser optimizados y gestionados conforme a las guías de buenas prácticas, pueden contribuir a una mayor seguridad alimentaria y eficiencia económica. La implementación de estas mejoras no solo asegura un producto más seguro para el consumo humano, sino que también optimiza los recursos y reduce los costos asociados a la producción.

Palabras clave: Trazabilidad; lácteos; calidad; tambos; industria 4.0

Abstract

The safety of dairy products must be ensured throughout the entire agri-food chain. One system that contributes to this goal is traceability, as it allows tracking a product from its production, transportation, and distribution to the final customer. All stages in the development of dairy products are of utmost importance, and dairy farms represent the first link in this chain.

The main objective of this project is to investigate the most important factors that influence milk quality in primary production. It aims to contribute to food safety, human health, and economic goals through the incorporation of advanced technologies and the use of good practice guidelines. To carry out this research, the production process of a dairy farm taken as a case study was analyzed using a tool called the “Ishikawa Diagram” developed based on good practice guidelines.

Preliminary results indicate that rigorous control of the milk production process can significantly improve both the safety and quality of the product. Several critical points in the production process were identified, which, when optimized and managed according to good practice guidelines, can contribute to greater food safety and economic efficiency. Implementing these improvements not only ensures a safer product for human consumption but also optimizes resources and reduces production costs.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Keywords: Traceability; dairy; quality; dairy farms; industry 4.0

1. Introducción

Este estudio se comenzó debido a un proyecto de investigación y desarrollo (PID) que se está realizando la Universidad Tecnológica Nacional, titulado: "Proceso de trazabilidad de productos lácteos: Incorporación de la Industria 4.0 y de la transformación digital en pymes de distintos eslabones del sector". El objetivo principal es que se busca resolver problemas que se encuentran principalmente en el primer eslabón de la producción de lácteos. Los tambos, tienen escasez de tecnologías de procesos, que afectan a la competitividad, no cuentan con dispositivos que permitan detectar en forma temprana los niveles de, por ejemplo, cantidad de células somáticas en la leche, que es uno de los aspectos importantes para la calidad de la misma, los demás son la cantidad, sus componentes (grasa, proteína y sólidos) y los factores contaminantes (conteo celular somático, contaminación bacteriológica por prácticas inadecuadas, y presencia de residuos). A partir de lo mencionado, se reconoce que la calidad de la leche tiene un fuerte impacto la inocuidad y sanidad animal, mejora la eficiencia de producción y aumento de la rentabilidad y competitividad en los productores.

En este marco, se pretende aportar el análisis los factores más importantes que influyen en la calidad de la leche obtenida en tambos, los mismos se estudiaron a partir de visitas, búsquedas y exámenes del desarrollo de los procedimientos que se llevan adelante. Se trabajó con una herramienta denominada Diagrama de Ishikawa tomando como base 6 perspectivas de investigación, estas son: Genética, alimentación, salud, prácticas operativas, infraestructura, higiene, seguridad y medio ambiente.

2. Metodología

2.1. Presentación de los factores de calidad

El diagrama de Ishikawa, también denominado de causa-efecto, es un método grafico que refleja la relación entre una característica de calidad y los factores que posiblemente contribuyen a que exista. En el lado derecho se describe el objetivo principal "calidad de la leche" y en el lado izquierdo se especifican sus causas potenciales, de tal manera que se agrupan de acuerdo con sus similitudes. Es importante destacar que, el orden de prioridades del diagrama (Figura 1) es establecido tras analizar los motivos del incremento en la producción de leche de calidad; las investigaciones concluyen que el 60% del cambio se debió a la mejora genética, y el resto a mejoras debido a la nutrición, sanidad e instalaciones, entre otros.

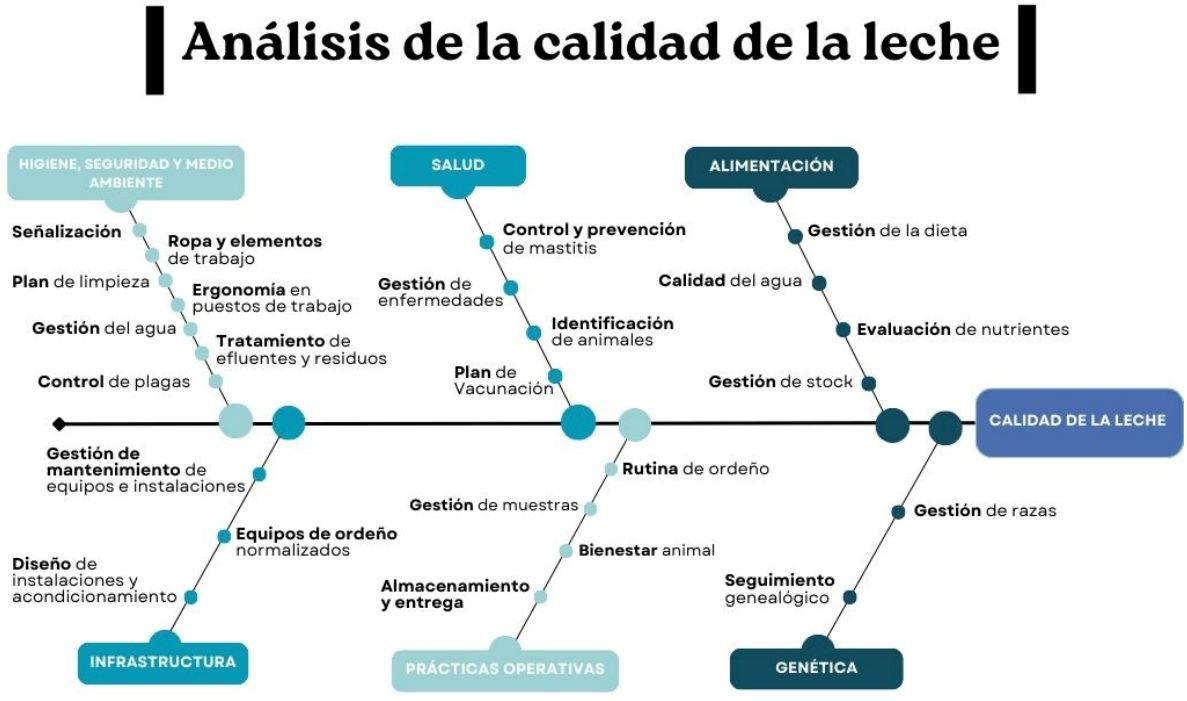


Figura 1. Diagrama de Ishikawa

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

2.2. Descripción de cada factor involucrado

A continuación, se describen los factores involucrados en el Diagrama de Ishikawa establecido en la Figura 1.

2.2.1. Genética

Gestión de razas: La selección genética en ganado lechero a nivel global ha resultado en aumentos considerables en la productividad. En contraste, la producción de leche en argentina se ha mantenido estable durante los últimos 20 años. La raza que se utiliza en la mayoría de los tambos es Holando argentino.

Seguimiento genealógico: Se deben realizar evaluaciones genómicas, así se identificarán las mejores hembras que nacen en su establecimiento. Llevar adelante registros de producción (controles lecheros) y registros genealógicos (identificación de padres y madres) y además tener información de los genotipos de los padres (esto en los últimos 15 años).

2.2.2. Alimentación

Gestión de la dieta: Las dietas deberán ser formuladas por un profesional responsable y con alimentos de calidad probada, de manera que respondan a los requerimientos de las diferentes categorías del rodeo.

Calidad del agua: Se debe contar con un acceso a suficiente cantidad de agua fresca de calidad, según sus requerimientos. Las instalaciones para el suministro de agua deben estar diseñadas y construidas de manera tal que permitan el adecuado acceso de los animales. Además, remitir muestras de agua para su análisis, al menos una vez al año y de ser necesario incorporar un sistema de cloración del agua.

Evaluación de los nutrientes: Los alimentos deberán ser evaluados (temperatura, pH, otros análisis específicos de laboratorio, presencia de mohos, olores extraños, entre otros), previo a su utilización. La alimentación debe asegurar un adecuado consumo de nutrientes y el acceso a la ración diaria para todos los animales del rodeo.

Gestión de stock: Se deberá contar con un archivo de la copia de factura, donde esté indicado el proveedor, la fecha, el alimento y la cantidad. Se deben llevar registros del suministro del alimento a los animales y del stock de estos. Los alimentos para el ganado deben ser almacenados fuera de la sala de ordeño, en condiciones adecuadas, en lugares limpios, secos y protegidos contra plagas y roedores. Se recomienda respetar las buenas prácticas de producción o elaboración de alimentos como granos y silos entre otros.

2.2.3. Practicas operativas

Rutina de ordeño: El proceso de ordeño es considerado una ‘‘rutina’’ y la misma está establecida en la “Guía de buenas prácticas para establecimientos lecheros” (Negri y Aimar, 2019, pág. 13), dado que se trata de un ciclo repetitivo. Su desvío de la norma ocasiona incidentes que predisponen de manera directa o indirecta a la infección glandular. Se deben utilizar manuales claros para llevarla a cabo, en carteles bien dispuestos, y las auditorías periódicas ayudan a disminuir o corregir los desvíos. En cada paso hay que tomar precauciones que, en general, son simples medidas sugeridas de tipo preventivo con costo bajo e incluso, o en muchos casos, nulo. Con esto se quiere marcar que los tamberos podrían con ‘‘conocimiento’’ evitar o al menos disminuir la incidencia del problema de mastitis en el tambo y mejorar así su volumen de producción.

Gestión de muestras: El operario a cargo de la obtención de la muestra de leche cruda deberá contar con una licencia que lo habilite a tales funciones. Para obtener esta licencia, el personal responsable de las mediciones de temperatura, volumen y de muestreo de la leche en el tambo deberá participar y aprobar, bajo condiciones preestablecidas, un curso de entrenamiento teórico-práctico. Por otro lado, el transportista deberá presentarse con uniforme, el cual deberá estar limpio, cuidando la buena presencia e higiene personal. El transportista deberá mantener la unidad de transporte en buen estado de mantenimiento e higiene.

Bienestar animal: Atender las necesidades del animal según su etapa de crecimiento y segmentarlas, las mismas son crianza, recría, vaca en lactancia y vaca seca. Cada etapa requiere un cuidado especial y esta detallado en “Buenas Prácticas Lecheras, guía para la implementación en la producción de leche bovina” (Red BPA, 2021, pág. 14)

2.2.4. Salud

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Control y prevención de mastitis: La mastitis es la enfermedad más frecuente de la vaca lechera. Es probablemente la más costosa de las enfermedades infecciosas endémicas que afecta al ganado lechero, ejerciendo un gran impacto en la producción, el bienestar animal y la calidad de la leche producida. Para ello existen pasos de Plan de control y prevención de mastitis, establecida por la "Guía de buenas prácticas para establecimientos lecheros" (Negri y Aimar, 2019, pág. 22)**,** cuyo objetivo es reducir al mínimo la posibilidad de que algún patógeno pueda aproximarse al canal del pezón.

Gestión de enfermedades: Es fundamental contar con un plan sanitario preventivo para los rodeos del establecimiento. (Normativas de las Resoluciones 150/2002 y 128/2012 del SENASA). Este plan, debe ser supervisado por un veterinario.

Identificación de animales: Todos los animales deben estar identificados de acuerdo con la normativa de SENASA, resolución N° 754/06.

Plan de vacunación: Las vacunaciones y controles reglamentarios deben realizarse con veterinario acreditado. Se debe establecer la programación estratégica de vacunaciones y además utilizar productos aprobados por SENASA. Almacenar los medicamentos en un lugar de acceso restringido, respetando las indicaciones de cada producto y que permita contener separadamente los productos utilizados para vacas en lactancia del resto de las categorías. Contar con un sistema de desecho para medicamentos vencidos.

2.2.5. Infraestructura

Gestión de mantenimiento: Se debe realizar control estático (recomendado en cada cambio de pezoneras) y control dinámico y establecerlo en el reporte en planilla "Guía de buenas prácticas para establecimientos lecheros" (Negri y Aimar, 2019, anexo 2, pág. 52). Además, un mantenimiento preventivo de la máquina de ordeño y recambio de pezoneras de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Los filtros deben ser de material apto para estar en contacto con alimentos y ser reemplazados según especificaciones del fabricante.

Equipos de orden normalizados: Los equipos de ordeño instalados y para instalar deben cumplir con la normativa vigente (IRAM, 2009). La leche debe ser enfriada a 3,5 - 4 °C en un tiempo no mayor de 2 hs. y almacenada en un tanque o cisterna de acero inoxidable de calidad sanitaria y aislación térmica (IRAM, 1989).

Diseño de instalaciones y acondicionamiento: El tambo debe disponer de iluminación adecuada lo que permitirá un buen flujo de animales y ver con claridad la zona de ubres y el piso debajo de estas. Debe contar con dispositivos de seguridad exigidos y descarga a tierra, tanto para seguridad de los operarios de tambo como para evitar el voltaje errático que les produce estrés a las vacas. Las instalaciones deben estar ubicadas, diseñadas y construidas de manera tal que: las paredes y los pisos puedan ser limpiados fácilmente. El sistema de drenaje sea efectivo, no debiendo encontrarse charcos en las instalaciones. Se cuente con la cartelería y señalización adecuada de las diferentes áreas de las instalaciones y de los circuitos de leche, agua y combustibles (gas y otros). Se eviten áreas donde los pájaros puedan anidar. Los callejones y accesos al tambo se mantengan en buen estado: superficie afirmada, ausencia de obstáculos y buen drenaje.

2.2.6. Higiene, seguridad y medio ambiente.

Señalización: Instalaciones de ordeño con señalización, el establecimiento debe contar con las medidas de seguridad exigidas por la ley y con un plan de acción para situaciones de emergencia con un directorio telefónico. En las instalaciones se debe disponer de matafuego ABC habilitado y botiquín.

Ropa y elementos de trabajo: Durante el ordeño utilizar la ropa adecuada (delantal, botas y gorro) y no comer, fumar, toser o salivar. En el caso de utilizar guantes se deben mantener en adecuadas condiciones de higiene. Se debe contar y utilizar los equipos de protección personal. Además, el personal debe estar capacitado con respecto a las medidas de higiene y seguridad y poder demostrarlo. El personal que realiza el ordeño debe tener la libreta sanitaria actualizada. En el establecimiento se deben cumplir las exigencias legales en cuanto a seguridad ocupacional.

Plan de limpieza: Deben utilizarse solamente productos de limpieza y desinfección aprobados por SENASA y deben mantenerse en su envase original y correctamente identificados. Además, se debe llevar adelante el plan de limpieza establecido por las "Guía de buenas prácticas para establecimientos lecheros" (Negri y Aimar, 2019, pág. 10).

Ergonomía en los puestos de trabajo: La fosa de ordeño debe ser ergonométrica y confortable para los operarios, con el fin de mantener la columna vertebral del operario recta durante el ordeño.

Gestión del agua: Se debe cuantificar los consumos de agua para poder realizar su correcta utilización, sin desperdicio. Su cuantificación permitirá planificar la reutilización de las fracciones de agua cuya calidad no es afectada durante su uso.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tratamiento de efluentes y residuos: Plan para minimizar la cantidad de residuos generados. Periódicamente trasladarlos a un relleno sanitario, centro de dispersión, basural o planta clasificadora de residuos. Poseer un sistema para la gestión de los efluentes, que disponga de las fosas necesarias para que los sólidos decanten y permita el recupero de las aguas en el predio hasta su destino final.

Control de plagas: Se debe contar con un programa para el control integrado de plagas y roedores en el establecimiento. Ubicar estaciones de roedores alrededor de las instalaciones y registrar el consumo del cebo y la ubicación de estos en un plano o cartilla. No se debe observar dentro o fuera del tambo excrementos ni cuevas de roedores o de cualquier otra plaga animal. Disponer de un plan de desinsectación para realizarse fuera de los horarios de ordeño y limpieza para combatir moscas, cucarachas y otros insectos.

3. Resultados

Este proyecto, que forma parte del PID iniciado en 2023, se encuentra en la fase de investigación, relevamiento de un caso específico y análisis del proceso productivo del tambo seleccionado como estudio. Durante las visitas al tambo de estudio, se han realizado charlas con los trabajadores y utilizado el Diagrama (Figura 1) para poder dar las explicaciones de una manera más sencilla y ordenada, destacando los puntos más importantes para obtener leche de calidad. El objetivo es contribuir al sector lácteo mediante la implementación de estrategias adecuadas, para posicionar a las empresas del sector y aumentar sus márgenes de rentabilidad.

4. Conclusiones

La implementación de un sistema de control para inspeccionar y gestionar la calidad de la leche cruda, utilizando el Diagrama de Ishikawa (Figura 1) desarrollado a partir de las guías de buenas prácticas, ha demostrado ser fundamental para asegurar la seguridad de los productos derivados. Este enfoque no solo mejora la coordinación y ejecución entre productores primarios, industrias y consumidores finales, sino que también debe ser gestionado por los diferentes agentes involucrados y contar con mecanismos de supervisión independientes para garantizar su correcto funcionamiento. La información recopilada a través de esta herramienta puede utilizarse para añadir características diferenciadoras al producto, generando así mayores beneficios y un mejor aprovechamiento de la materia prima. Los resultados obtenidos subrayan la importancia de aplicar metodologías de ingeniería industrial en el sector agroalimentario para alcanzar altos estándares de calidad y eficiencia.

Agradecimientos

Se agradece a Vanesa Bangert, MBA, Ing. Industrial, Esp. en HyST y diplomada en Transformación Digital e Industria 4.0, es profesional independiente, docente investigadora de la UTN-Santa Fe, integrante actual del Proyecto. Su ayuda en la redacción y corrección, así como su dedicación y apoyo, han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

Referencias Bibliográficas

Miembros de Red de buenas prácticas Agropecuarias. (2021). “Buenas Prácticas Lecheras, guía para la implementación en la producción de leche bovina”. Edición: INAES, SENASA, Dirección de Lechería, provincia de Santa Fe, Dirección nacional de lechería.

Negri, L., Aimar, M. (2019). “Guía de buenas prácticas para establecimientos lecheros”. Edición: INTA.

Covas, G. (2021). “Cría selectiva: Algunas reflexiones en bovinos lecheros” (2021), Boletín de producción animal (N°2) Edición: INTA, EEA, pág. 17-22.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

Análisis del modelo matemático e-NRTL del ELV para el sistema reaccionante MEA-CO_2-H_2O

Mathematical e-NRTL model analysis of VLE for the reactive system MEA-CO_2-H_2O

Presentación 18/10/2024

Daira Longo

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: dairalongo.99@gmail.com

Resumen

En este trabajo se lleva a cabo un análisis del modelo matemático e-NRTL aplicado al equilibrio líquido-vapor (ELV) del sistema reaccionante CO_2-H_2O-MEA. El modelo fue implementado en el software GAMS (General Algebraic Modelling System). Se estudió el comportamiento de la presión parcial de CO_2 y la composición de todas las especies en la fase líquida para un rango de carga de CO_2 entre 0 y 1 y tres temperaturas (313,15, 353,15, 393,15 K). Los resultados obtenidos fueron comparados con trabajos precedentes, que utilizan distintos modelos, y con datos experimentales. De los mismos, se pudo observar que no se presentan desviaciones significativas, con excepción de algún caso puntual, y, por lo tanto, el modelo resulta satisfactorio para abordar el modelado riguroso de columnas de absorción para la captación de CO_2.

Palabras clave: MEA; Absorción de CO_2; e-NRTL; ELV

Abstract

In this work, an analysis of the mathematical model e-NRTL applied to the vapor-liquid equilibrium (VLE) of the reacting system CO_2-H_2O-MEA is carried out. The model was implemented in the GAMS (General Algebraic Modeling System) software. The behavior of the CO_2 partial pressure and the mole fractions of all species in the liquid phase were studied as a function of CO_2 loading and at different temperatures. The results obtained were compared with previous works, using different models, and with experimental data. It was observed that there are no significant deviations, with the exception of some specific cases, and, therefore, the model is satisfactory to address the rigorous modelling of absorption columns for CO_2 capture.

Keywords: MEA; CO_2 absorption; e-NTRL; 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). Las soluciones acuosas de monoetanolamina (MEA) se emplean como solvente de referencia en muchos proyectos a diferentes escalas. El diseño de columnas de absorción/desorción requiere de modelos de transferencia de masa cuyas propiedades se estiman a partir de las composiciones en equilibrio. Modelos típicamente empleados para representar equilibrios de fases son, entre otros, el modelo simplificado de Kent-Eisenberg (SKEM) y el e-NRTL (electrolyte-Non Random Two Liquid). En el primero, semi-empírico, se asume comportamiento ideal de la fase líquida y se ajustan los parámetros a datos experimentales. Por el contrario, en los modelos e-NRTL se estiman los coeficientes de actividad (comportamiento no ideal) considerando tanto las interacciones ion-ion de largo alcance como las interacciones locales entre todas las especies en fase líquida. En general

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

se acepta que los modelos e-NRTL proporcionan resultados relativamente precisos si se ajustan los parámetros a datos experimentales dentro de un rango limitado de temperatura y concentración (Akula et al., 2023).

En el trabajo de Mores et al. (2018), que aborda el diseño del proceso de absorción química con aminas mediante programación matemática, emplean el modelo SKEM para describir el equilibrio de fases y el equilibrio químico en el sistema. En el trabajo de Drewry y Rochelle (2024), en base a un modelo e-NRTL, se desarrolla un modelo simplificado con el objetivo de obtener los datos de equilibrio en la etapa de lavado de gases para minimizar las emisiones de amina a la atmósfera y a su vez minimizar las pérdidas de solvente. Los autores mencionan que los modelos rigurosos disponibles requieren de una gran cantidad de información que dificulta su empleo para modelar esta etapa del proceso. Los trabajos de Austgen et al. (1989) y Hessen et al. (2010), entre otros más actuales, utilizan modelos e-NRTL para representar el equilibrio de fases de sistemas CO_2-H_2O-alcalonamina. Hessen et al. (2010) plantean un modelo e-NRTL refinado en el que los parámetros de interacción se regresionan a la presión parcial de CO_2, al ELV, a la disminución del punto de congelación y al exceso de entalpía. Los autores concluyen que, si bien el modelo es capaz de representar bien estos sistemas, la mayor complejidad de las ecuaciones hace que la implementación sea engorrosa.
En este trabajo, a partir de la implementación previa del modelo e-NRTL en GAMS, se comparan los resultados tanto con datos experimentales como con otros modelos con el fin de verificar su aplicabilidad para el diseño de equipos de absorción.

2. Metodología

Se aplicó el modelo e-NRTL reportado originalmente en Austgen et al. (1989), a una mezcla de monoetanolamina, dióxido de carbono y agua para analizar el efecto de la temperatura y la composición aparente de la mezcla ternaria en la concentración de las especies en la fase líquida y la presión parcial de CO_2 cuando la mezcla alcanza el equilibrio entre fases.

2.1 Descripción general del modelo

En este modelo se representan en simultáneo el equilibrio químico y el equilibrio líquido-vapor para la mezcla mencionada anteriormente. La composición de la mezcla en el equilibrio se determina a partir de la resolución simultánea de balances de masa y de carga, de expresiones de la constante de equilibrio y expresiones del modelo e-NRTL. Por otro lado, para modelar la no idealidad de la mezcla gaseosa se emplea la ecuación de estado de Redlich Kwong.

A partir de las reacciones de equilibrio, expresadas en las Ecuaciones (1) a (7), se puede observar que en la fase líquida hay 9 especies (i) en equilibrio, 3 moleculares (H_2O, CO_2, MEA) y 6 iónicas $(H_3O^+, OH^-, HCO_3^-, CO_3^{2-}, MEACOO^-, MEAH^+)$. A su vez, los compuestos moleculares se dividen en solventes (H_2O, MEA) y gases disueltos (CO_2).

$$2H_2O \overset{K1}{\leftrightarrow} H_3O^+ + OH^- \quad (1)$$

$$2H_2O + CO_2 \overset{K2}{\leftrightarrow} H_3O^+ + HCO_3^- \quad (2)$$

$$H_2O + HCO_3^- \overset{K3}{\leftrightarrow} H_3O^+ + CO_3^{2-} \quad (3)$$

$$2MEA + CO_2 \overset{K4}{\leftrightarrow} MEACOO^- + MEAH^+ \quad (4)$$

$$MEACOO^- + H_2O \overset{K5}{\leftrightarrow} MEA + HCO_3^- \quad (5)$$

$$MEAH^+ + H_2O \overset{K6}{\leftrightarrow} MEA + H_3O^+ \quad (6)$$

$$CO_2 + OH^- \overset{K7}{\leftrightarrow} HCO_3^- \quad (7)$$

Los balances de masa y de carga se muestran en las Ecuaciones (8) a (10).

$$x^0_{MEA} = x_{MEA} + x_{MEAH^+} + x_{MEACOO^-} \quad (8)$$

$$\alpha \cdot x^0_{MEA} = x_{CO_2} + x_{HCO_3^-} + x_{CO_3^{-2}} + x_{MEACOO^-} \quad (9)$$

$$x_{MEAH^+} + x_{H_3O^+} = x_{OH^-} + x_{HCO_3^-} + 2x_{CO_3^{-2}} + x_{MEACOO^-} \quad (10)$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Cada reacción química se caracteriza mediante una constante de equilibrio (K_r) la cual es función tanto de la fracción molar (x_i) y el coeficiente de actividad (γ_i) de cada una de las especies, Ecuación (11), como de la temperatura (T), Ecuación (12).

$$K_r = \prod_i (x_i \gamma_i)^{v_{i\,r}} \tag{11}$$

$$\ln K_r = C_{1\,r} + \frac{C_{2\,r}}{T} + C_{3\,r} \ln(T) + C_{4\,r} T \tag{12}$$

Donde v_{ir} es el coeficiente estequiométrico de la especie en la reacción (r).

Por otro lado, el equilibrio líquido-vapor se establece a partir de la igualdad de fugacidades, ya sea para las moléculas de los solventes como para los gases disueltos.

Los coeficientes de actividad de las especies en la fase líquida se calculan a partir del modelo e-NRTL mediante las Ecuaciones (13) a (15) según corresponda.

Para especies iónicas:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^{PDH} + \ln \gamma_i^{Born} + \ln \gamma_i^{lc} - \ln \gamma_i^{lc,\infty,w} \tag{13}$$

Para solventes:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^{PDH} + \ln \gamma_i^{lc} \tag{14}$$

Para gases disueltos:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^{PDH} + \ln \gamma_i^{lc} - \ln \gamma_i^{lc,\infty,S} \tag{13}$$

Donde (γ_i^{PDH}) y (γ_i^{Born}) son los coeficientes de actividad basados en el modelo asimétrico de Pitzer-Debye-Hückel (PDH) y Born, respectivamente, y se utilizan para representar la contribución de las interacciones ión-ión de largo alcance. El coeficiente de actividad del modelo simétrico Non-Random Two Liquid (NRTL) (γ_i^{lc}) se utiliza para representar las interacciones locales. Luego, el modelo se normaliza mediante coeficientes de actividad de dilución infinita, ($\gamma_i^{lc,\infty,w}$) y ($\gamma_i^{lc,\infty,S}$), para obtener un modelo asimétrico.

Los parámetros de ajuste, así como las constantes de diversas restricciones, por ejemplo, de las constantes de equilibrio de cada reacción con la temperatura, se obtuvieron de Austgen et al. (1989) y de la base de datos de Aspen Plus.

2.2 Implementación.

El modelo NLP (non-linear-programming) se implementó en el software GAMS (General Algebraic Modeling System). Cuenta con 131 variables y 130 ecuaciones y se empleó CONOPT para su resolución.

2.3 Validación del modelo.

Se compararon los resultados del modelo implementado con datos de la literatura, tanto experimentales como de modelos matemáticos. Es relevante mencionar aquí que el modelo se resuelve en modo simulación y no es objetivo del trabajo ajustar los parámetros del mismo para que ajusten mejor a los datos reportados en otras fuentes.

Se varió la carga de CO_2 (α) entre 0 y 1 asumiendo diferentes temperaturas (313,15, 353,15 y 393,15 K), las cuales se encuentran dentro del rango operativo de columnas de absorción/desorción química de CO_2 con soluciones acuosas de MEA ($\approx 15\%\ y\ 30\%$).

3. Resultados

3.1. Análisis de Resultados

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

En esta sección, se muestran los resultados que se obtienen al aplicar el modelo matemático e-NRTL y su comparación con trabajos precedentes. En las Figura 1 se representan los valores de presiones parciales de CO_2 en función de α para diferentes temperaturas y composiciones de solvente fresco ($\approx 15\%$ y $\approx 30\%$). Se puede observar una aproximación aceptable de los resultados del modelo implementado en este trabajo con los reportados en los trabajos de Austgen et al. (1989), Mores y Scenna (2009) y Hessen et al. (2010), así como con la compilación de datos experimentales. Las tendencias generales indican que a mayor temperatura y/o concentración de MEA, mayor es la presión parcial de CO_2 para todo el rango de α analizado.

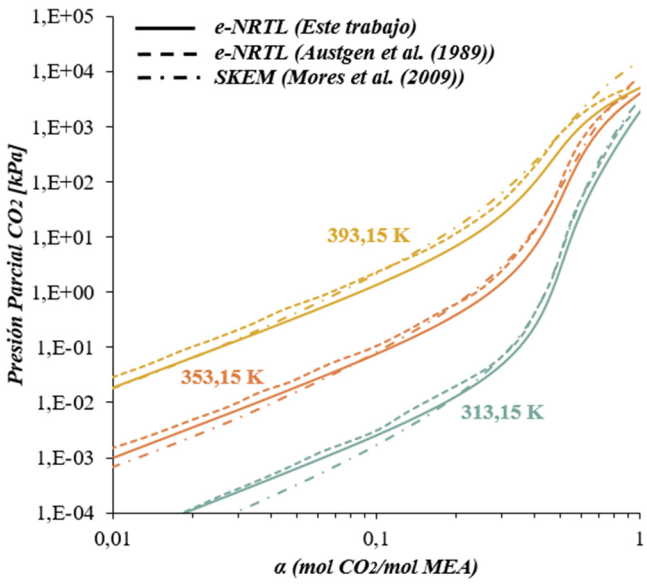


Figura 1a. $\approx 15\%\ MEA$.

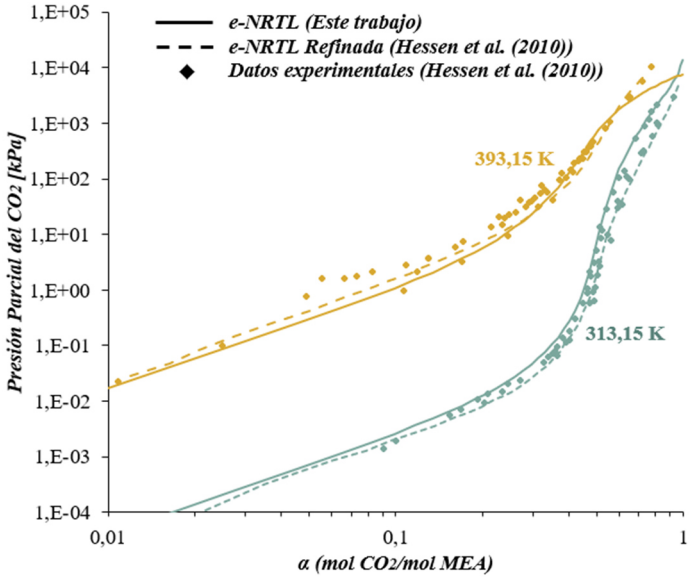


Figura 1b. $\approx 30\%\ MEA$.

Figura 1. Variación de la presión parcial de CO_2 con α a distintas temperaturas.

La Figura 2 muestran las fracciones molares de todas las especies presentes en la fase líquida en función de la carga de CO_2. En general, la comparación con otros modelos y datos experimentales resulta satisfactoria para todas las especies en el rango de α analizado.

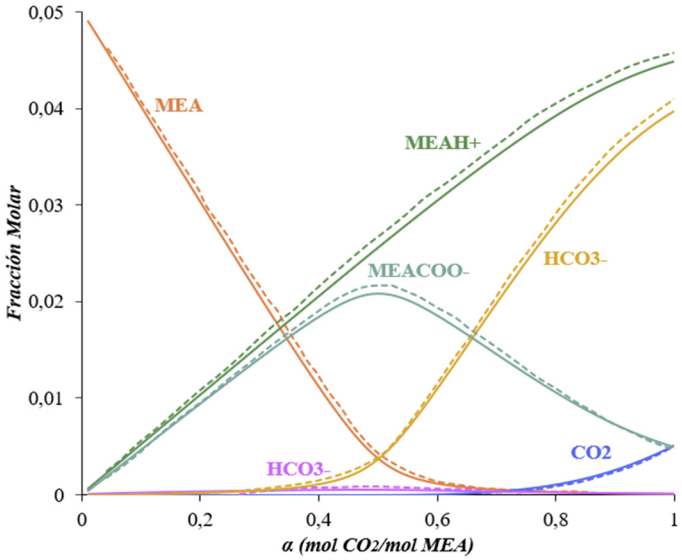


Figura 2a. 313,15 K.

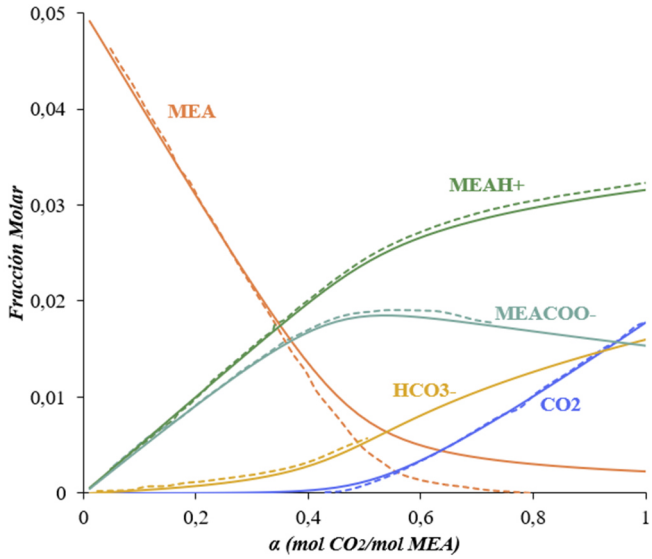
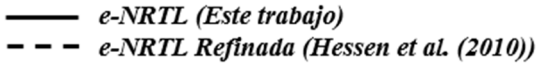


Figura 2b. 393,15 K.



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Figura 2. Variación de la composición de la fase líquida con la carga de CO_2 ($\approx 15\%\ MEA$).

La desviación con los datos experimentales (Figura 3) puede deberse a factores propios del experimento y las condiciones en las que se llevó a cabo, siendo común a ambos modelos. Por otro lado, analizando la desviación con el modelo e-NRTL Refinado, podemos observar una discrepancia de las fracciones molares del anión carbonato y del CO_2 molecular para un determinado α. Esta diferencia, puede deberse a que, como se mencionó anteriormente, este modelo realiza un ajuste de sus parámetros mediante regresión, mientras que en este trabajo se usan los parámetros disponibles en la bibliografía.

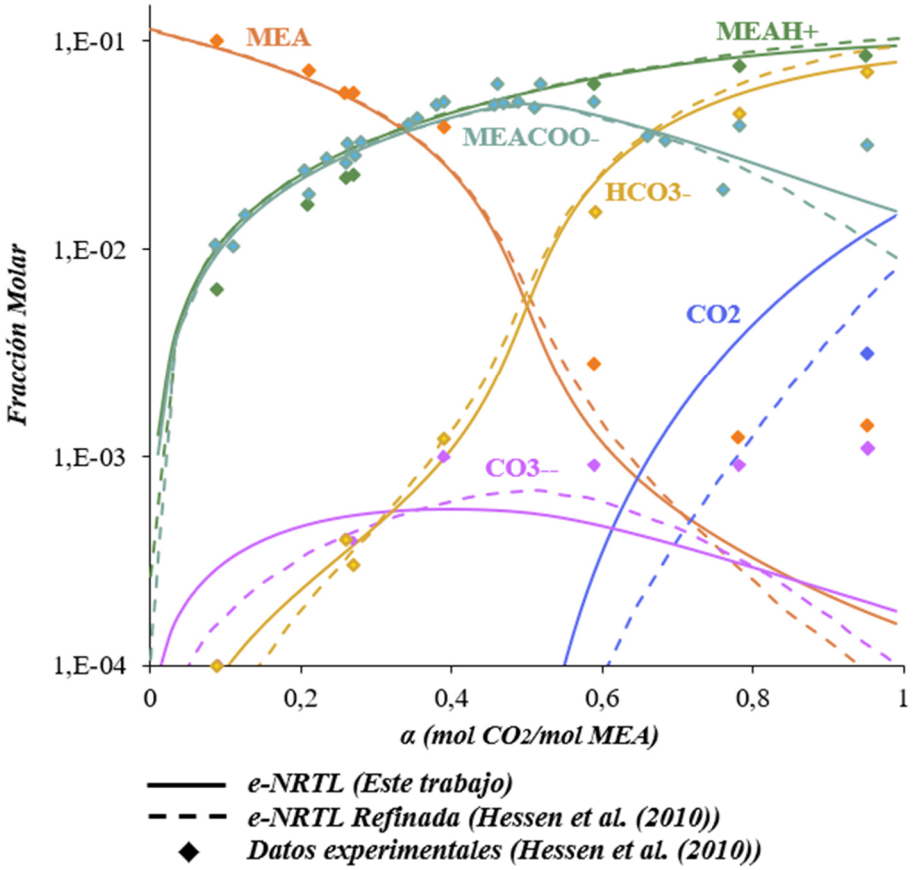


Figura 3. Variación de la composición de la fase líquida con la carga de CO_2 a 313,15 K ($\approx 30\%\ MEA$).

Si bien se analizaron los datos de equilibrio obtenidos para un rango de carga de CO_2 entre 0 y 1, los valores típicos de operación de columnas de absorción se encuentran entre 0,15 y 0,55. Por otro lado, a medida que aumenta la temperatura disminuye la transferencia de materia y, por ende, la absorción de CO_2 en el solvente. Debido a la naturaleza exotérmica de las reacciones que se producen en la columna y con el objetivo de evitar temperaturas elevadas, una refrigeración intermedia resulta beneficiosa Pettone et al. (2018).

4. Conclusiones

El modelo e-NRTL implementado en GAMS para la mezcla ternaria CO_2-H_2O-MEA se ajusta de manera aceptable tanto a datos experimentales como a modelos de complejidad similar en el rango de temperaturas analizado. De esta manera, se puede considerar su uso para la estimación de propiedades termodinámicas y de transporte que se requieren en el diseño de equipos absorción para la captura de CO_2.

Agradecimientos

Se desea agradecer el apoyo educativo de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario y el Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), y a la doctora Patricia Mores por su valioso aporte al presente trabajo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Referencias bibliográficas

Austgen, D. M., Rochelle, G. T., Peng, X., Chen, C.C. (1989). Modelo of vapor-liquid equilibria for aqueous acid gas-alkanolamine systems using the electrolyte-NRTL equation. Industrial & Engineering Chemistry Research, 28, 1060-1073.Akula, P., Lee, A., Eslick, J., Bhattacharyya, D., & Miller, D. C. (2023). A modified electrolyte non-random two-liquid model with analytical expression for excess enthalpy: Application to the MEA-HO-CO system. AIChE Journal, 69(1), e17935.

Hessen, E. T., Haug-Warberg, T., Svendsen, H. F. (2010). The refined e-NRTL model applied to CO2-H2O-alkanolamine systems. Chemical Engineering Science, 65, 3638-3648.

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.

Drewry, B., Rochelle, G. (2024). Simple model for wáter wash performance in amine scrubbing for CO_2 capture. Carbon Capture Science & Technology, 11, 100186.

Pettone, G., Soria, A. J., Mussati, S. F., Mores, P. L. (2018). Modelado y Optimización de una Columna de Absorción Reactiva de CO_2 con Refrigeración Intermedia. Revista Tecnología Y Ciencia, 30, 123-132.

Mores, P., Scenna, N. (2009). Absorción química de CO2: Modelo matemático del equilibrio L-V para el Sistema reaccionante MEA-CO2-H2O. II Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial (págs. 265-268). Rosario: E.M. Mancinelli, E.A.Santillan Marcus, D.A. Tarzia.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

Análisis comparativo del modelo eNRTL aplicado al equilibrio líquido-vapor de la mezcla CO_2-NH_3-H_2O

Comparative analysis of the eNRTL model applied to the liquid-vapor equilibrium of the CO2-NH3-H2O mixture

Presentación 18/10/2024

Gaspar Ariel Tosello

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: tosellogaspar@gmail.com

Resumen

Algunos procesos basados en el amoniaco representan una alternativa potencial para la captura del CO2 proveniente de plantas de energía a base de combustibles fósiles. Para evaluar cuantitativamente estos procesos, es de gran importancia contar modelos termodinámicos que describan a las sustancias intervinientes. Para esto, en este trabajo se presenta un análisis comparativo del modelo Non-Random Two-liquid para electrolitos (eNRTL) aplicado al equilibrio líquido-vapor de una mezcla de dióxido de carbono, agua y amoniaco (CO_2, H_2O y NH_3). El modelo matemático se implementó en el software de modelado algebraico GAMS y los resultados obtenidos fueron comparados con datos experimentales y con los correspondientes a la aplicación del modelo de Pitzer. Los resultados mostraron una correcta representación de los datos experimentales.

Palabras clave: Equilibrio líquido-vapor; Modelado matemático; eNRTL; Dióxido de carbono

Abstract

Some ammonia-based processes represent a potential alternative for capturing CO_2 from fossil fuel power plants. To quantitatively evaluate these processes, it is crucial to have thermodynamic models that describe the substances involved. In this work, a comparative analysis of the Non-Random Two-liquid model for electrolytes (eNRTL) is presented, applied to the liquid-vapor equilibrium of a mixture of carbon dioxide, water, and ammonia (CO_2, H_2O, and NH_3). The mathematical model was implemented in the algebraic modeling software GAMS, and the results obtained were compared with experimental data as well as with those corresponding to the application of the Pitzer model. The results showed a correct representation of the experimental data.

Keywords: Liquid-vapor equilibrium; Mathematical model; eNRTL; Carbon dioxide

1. Introducción

Con el objetivo de mitigar las emisiones de CO_2 de las plantas de energía a base de combustibles fósiles, se han propuesto diversas formas de captura de CO_2, por ejemplo, la captura post-combustión (PCC), la captura pre-combustión y la combustión con oxicombustible, entre otras formas. Actualmente, la PCC se considera una de las opciones más viables a

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

corto plazo debido a su adaptación sencilla a las plantas de energía existentes. En general, los procesos de PCC capturan el CO_2 mediante una solución acuosa de monoetanolamina (MEA) o una mezcla de aminas teniendo como desventaja su gran consumo de energía. (Xu et al., 2014)
Como una alternativa potencial, se han estudiado ampliamente procesos basados en amoníaco debido a su alta capacidad de captura de CO_2, ausencia de degradación, bajo potencial de corrosión, baja energía de regeneración y la posibilidad de capturar CO_2, SO_2 y NOX simultáneamente. Las potenciales ventajas de un menor costo energético hacen que el amoníaco sea considerado una alternativa atractiva a las aminas tradicionales para la captura de CO_2 post-combustión en plantas de energía. (Xu et al., 2014)
Para evaluar cuantitativamente estos procesos, es de gran importancia desarrollar modelos termodinámicos válidos y confiables para describir el equilibrio del sistema NH_3–CO_2–H_2O. Al tener la mezcla gran aplicación industrial se dispone de numerosos datos experimentales publicados (Pexton y Badger ,1938; Göpert y Maurer ,1988; Müller et al. ,1988; Lichfers and Rumpf ,2004; Kurz et al., 1994). Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo corresponde a la implementación de un modelo matemático para la representación del equilibrio liquido-vapor de la mezcla CO_2, H_2O y NH_3 a partir del modelo de actividad conocido como Non-Random Two-liquid para electrolitos (eNRTL).

El trabajo se desarrolla de la siguiente manera: en principio una descripción del modelo utilizado con sus ecuaciones, teniendo en cuenta los componentes y fases de la mezcla. Posteriormente se detallan los pasos para la obtención de datos a través del modelo mencionado, para finalmente comparar mediante gráficas los resultados obtenidos, llegando así a la conclusión.

2. Metodología

2.1 Descripción del modelo de equilibrio líquido-vapor

En el modelo se representan los equilibrios químicos correspondientes a las reacciones químicas en simultáneo con el equilibrio líquido vapor. Las sustancias involucradas se agrupan en compuestos moleculares y compuestos iónicos, siendo moleculares el solvente (agua) y gases disueltos (NH_3, CO_2) y los iónicos corresponden a los cationes y aniones. En la Figura 1 se muestra la distribución de las sustancias en las fases existentes. Los compuestos moleculares están presentes tanto en fase líquida (L) como en vapor (V), mientras que los iónicos se limitan a la fase líquida.

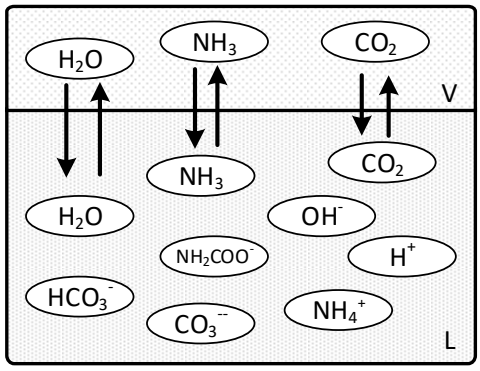


Figura 1. Especies involucradas en el equilibrio líquido vapor

En la fase líquida se consideran cinco reacciones de equilibrio (R1 a R5) y se representan matemáticamente a través de su constante de equilibrio.

$$H_2O \overset{k_1}{\rightleftharpoons} H^+ + OH^- \quad \text{(R1)}$$

$$NH_3 + H_2O \overset{k_2}{\rightleftharpoons} NH_4^+ + OH^- \quad \text{(R2)}$$

$$CO_2 + H_2O \overset{k_3}{\rightleftharpoons} HCO_3^- + H^+ \quad \text{(R3)}$$

$$HCO_3^- \overset{k4}{\rightleftharpoons} CO_3^{2-} + H^+ \quad \text{(R4)}$$

$$NH_3 + HCO_3^- \overset{k5}{\rightleftharpoons} NH_2COO^- + H_2O \quad \text{(R5)}$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

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 (1) mientras que para los gases disueltos se calcula a partir de la ley de Henry (Ecuación 2).

$$\phi_w^v y_w P = x_w \gamma_w \phi_w^0 P_w^0 \exp\left[\frac{v_w^0\left(P - P_w^0\right)}{RT}\right] \quad (1)$$

$$\phi_i^v y_i P = x_i \gamma_i H_i^{P_w^0} \exp\left(\frac{\overline{v}_{iw}^{\infty}\left(P - P_w^0\right)}{RT}\right) \quad i = NH_3; CO_2 \quad (2)$$

Los coeficientes de actividad de los compuestos en fase líquida (γi), necesarios para las reacciones de equilibrio y para el equilibrio líquido vapor, se obtienen a partir del modelo eNRTL propuesto por Chen y Evans (1986):

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^{PDH} + \ln \gamma_i^{lc} \quad (3)$$

El primer sumando de la Ec. (3) 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 cubica de estado de Redlich-Kwong.
Finalmente, el modelo matemático se completa con su correspondiente balance de materia y de cargas iónicas.

2.2. Descripción del procedimiento para la comparación de los modelos y datos experimentales

Para realizar la comparación entre el modelo desarrollado y los datos experimentales se utilizaron los datos publicados por Xu et al. (2014). Para esto, se fijaron primero las temperaturas y molalidades de NH_3 para cada caso y se corrió un rango de valores de molalidades de CO_2, obteniendo así las respectivas presiones parciales. El rango de molalidades del CO_2 corresponde al publicado por los autores (Xu et al., 2014).
Una vez procesada la información se graficó la presión parcial tanto del CO_2 como del NH_3 en función de la molalidad de CO_2 a diferentes temperaturas (293.15K y 373.15K) y molalidades de NH_3.
Por último, para evaluar composiciones del líquido y comparar con datos experimentales publicados (Lichfers y Rumpf, 2004) se realizó un análisis a la temperatura de 333.15 K y molalidad de NH_3 de 3.25 m.

3. Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 2, 3 y 4. En todos los casos la línea continua representa los resultados obtenidos con el modelo eNRTL en GAMS en este trabajo, mientras que la línea de trazo indica los obtenidos a partir del modelo de Pitzer por Xu et al. (2014). En la Figura 2 se incluyen datos experimentales publicados por Pexton y Badger (1938). Por otro lado, en la Figura 3 se muestran los datos experimentales obtenidos por Göpert y Maurer (1988) y Müller et al. (1988).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

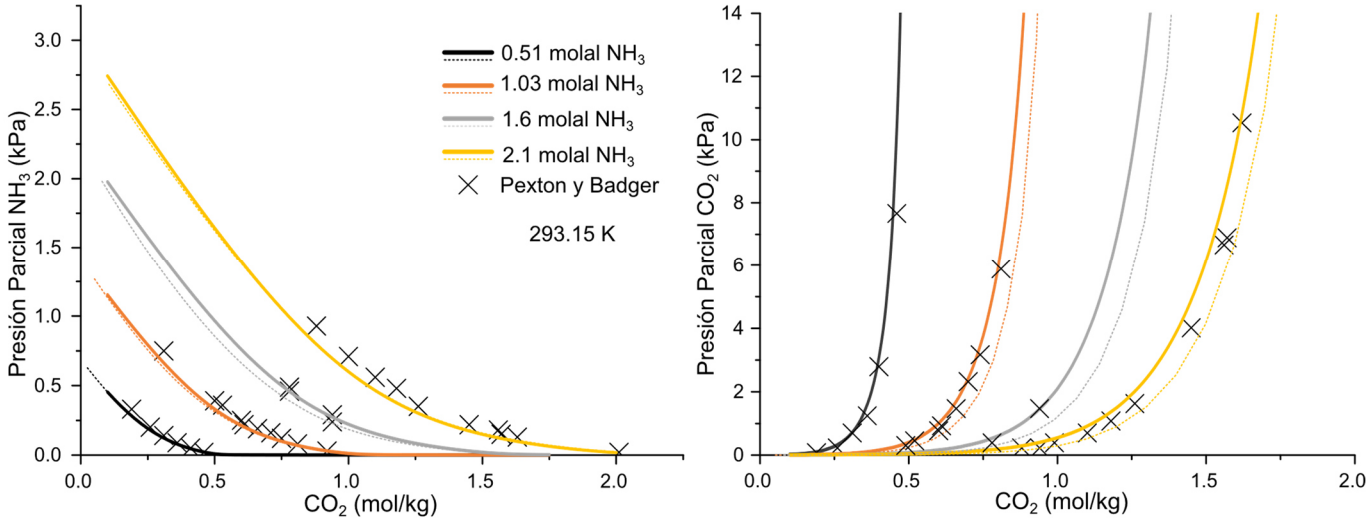


Figura 2. Comparación de presiones parciales calculadas y medidas de CO_2 y NH_3 a 293.15K

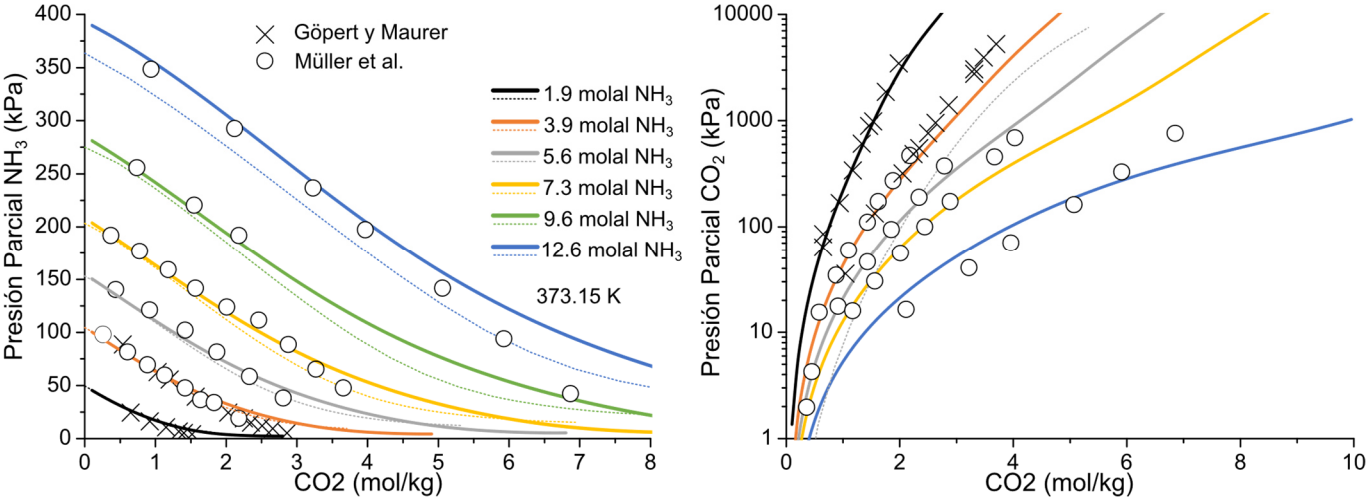


Figura 3. Comparación de presiones parciales calculadas y medidas de CO_2 y NH_3 a 373.15K

Los valores obtenidos (línea continua) resultan similares tanto a los datos experimentales como al modelo basado en Pitzer, con desvíos más considerables a mayor temperatura. En casos de bajas molaridades de NH_3 el modelo eNRTL se ajusta con precisión a los datos experimentales y al modelo comparado.

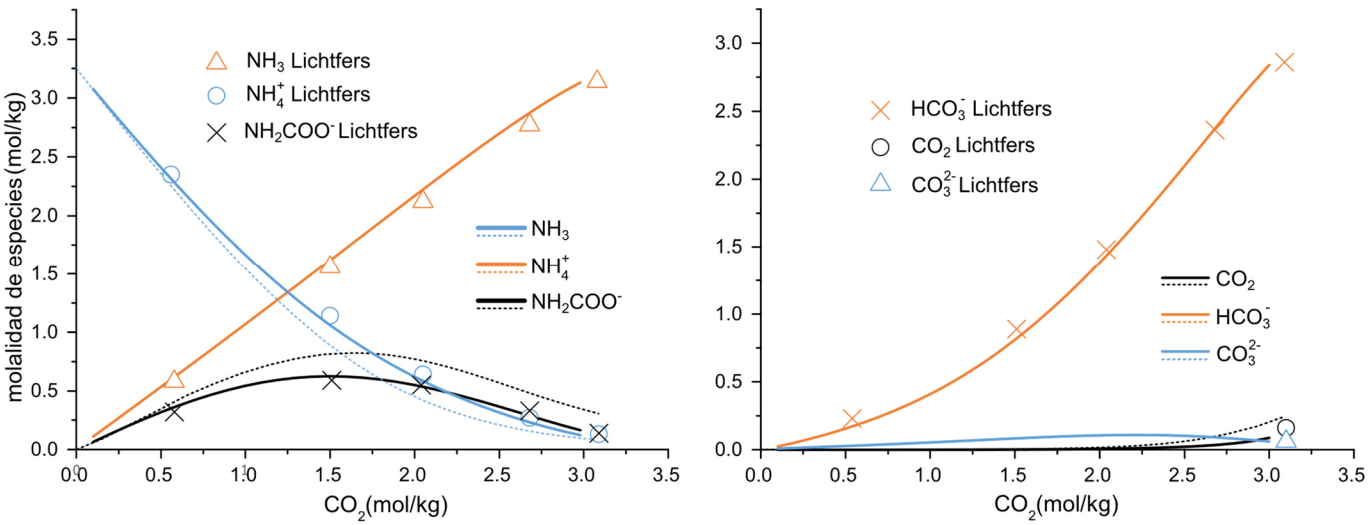


Figura 4. Comparación de las molaridades calculadas y experimentales de especies en fase líquida

En el caso de temperatura 333.15K y molalidad de NH_3 3.25 m (Figura 4), se observa un mejor ajuste a los datos experimentales, en comparación al modelo propuesto por Xu et al. (2014).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

4. Conclusiones

Se desarrolló un modelo matemático para estimar el equilibrio líquido vapor de una mezcla de CO_2, H_2O y NH_3. El mismo fue desarrollado en GAMS y se basa en el modelo eNRTL.
Los resultados obtenidos fueron satisfactorios y se observó una correcta representación de los datos experimentales. La representatividad resultó similar a la de otro modelo publicado basado en el modelo de Pitzer (Xu et al., 2014).
Como trabajo futuro se analizará el proceso de captura de CO_2 mediante una solución de amoniaco y se le agregará al modelo la precipitación de sales.

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.

Nomenclatura

y_i	*Fracción molar de la especie en vapor*
y_w	*Fracción molar del agua en fase vapor*
x_i	*Fracción molar de la especie en líquido*
H_i	*Constante de Henry para el gas i*
P	*Presión (kPa)*
P_w^0	*Presión de vapor de agua*
γ_i	*coeficiente de actividad del compuesto i*
y_w	*Coeficiente de actividad del agua*
ϕ_w^v	*Coeficiente de fugacidad del agua en fase vapor*
ϕ_w^0	*Coeficiente de fugacidad del agua en condiciones de saturación*
ϕ_i^v	*Coeficiente de fugacidad del compuesto i en la mezcla de vapor*
v_w^0	*Volumen molar de la sustancia pura como líquido saturado*
$\underline{v}_{iw}^{\infty}$	*Volumen molar parcial a dilución infinita del gas i en solvente agua*
T	*Temperatura*
R	*Constante de gases*

Referencias bibliográficas

Göppert, U., Maurer, G., (1988). “Vapor–liquid equilibria in aqueous solutions of ammo-nia and carbon dioxide at temperatures between 333 and 393 K and pressures up to 7 MPa”. Fluid Phase Equilibr. 41, 153–185.
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
Lichtfers, U., Rumpf, B., (2004). “Thermodynamic properties of complexfluid mixtures, an infrared spectroscopic investigation of the species distribution in the system NH_3+CO_2+H_2O”, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 5,92–119.
Müller, G., Bender, E., Maurer, G., (1988). “Vapor–liquid-equilibrium in the ternarysystem ammonia–carbon dioxide–water at high water contents in the range 373 K to 473 K”. Ber. Bunsen-Ges. Phys. Chem. 92, 148–160.
Pexton, S., Badger, E.H.M., (1938). “The examination of aqueous solutions containingonly NH3 and CO_2”. J. Soc. Chem. Ind. 57, 107–110.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

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.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

Predicción de valores de humedad, ceniza y acidez a partir de su color en mieles utilizando Redes Neuronales Artificiales

Prediction of moisture, ash and acidity values from their color in honey using Artificial Neural Networks

Presentación 18/10/2024

Araceli Pierucci

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: aracelipierucci@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo, a partir de los datos obtenidos de análisis realizados sobre muestras de mieles, procedentes de la región pampeana Argentina, se entrenaron modelos de Redes Neuronales Artificiales con el fin de que estas sean capaces de predecir sus propiedades fisicoquímicas (acidez, humedad y cenizas) utilizando como dato de entrada la medición del color de la muestra a analizar. Para el desarrollo de las redes neuronales se emplearon las bibliotecas TensorFlow y Keras. Cada red neuronal planteada en el presente trabajo cuenta con dos capas ocultas de 3 nodos cada una. Los resultados obtenidos presentan un buen ajuste de los datos para predecir los parámetros entrenados, siendo el error absoluto medio del set de prueba igual a 0.0163 para acidez, 0.0017 para cenizas y 0.0134 para humedad.

Palabras clave: Mieles; Redes neuronales artificiales; Color;

Abstract

In the present work, based on the data obtained from analyses carried out on honey samples from the Pampas region of Argentina, Artificial Neural Network were trained to be able to predict honey's physicochemical properties (acidity, humidity and ash) using the color measurement of the sample to be analyzed as input data. The Tensorflow and Keras libraries were used to develop the neural networks. Each neural network proposed in this work has two hidden layers of 3 nodes each. The results obtained present a good fit of the data to predict the trained parameters, with the mean absolute error of the test set being 0.0163 for acidity, 0.0017 for ash and 0.0134 for moisture.

Keywords: Honey; Artificial Neural Networks; Color

1. Introducción

1.1. *Consideraciones Generales*

La miel es una sustancia dulce natural producida por las abejas *Apis mellifera* a partir del néctar o de secreciones de partes vivas de las plantas. Esta compuesta por diferentes azúcares, así como otros componentes como humedad, ácidos orgánicos, enzimas y sustancias sólidas derivadas de la recolección de miel. La miel es considerada un producto saludable, con altas propiedades nutricionales y es rica en muchos compuestos biológicamente activos como vitaminas, flavonoides, aminoácidos y ácidos grasos. La miel es muy popular entre los consumidores y suele ser consumida sola o como ingrediente de productos dulces (Teye et al., 2024).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

La miel tiene una amplia gama de colores desde el blanco agua hasta el ámbar oscuro. El color de la miel depende de varios factores, siendo el contenido mineral uno importante. Las mieles de color claro suelen tener un bajo contenido de cenizas. Por el contrario, las mieles de color oscuro suelen tener un mayor contenido de cenizas (Gomes et al., 2010). Por lo tanto, el color es una característica importante en el control de calidad de la miel. Los parámetros de calidad de la miel normalmente se miden utilizando técnicas analíticas convencionales. Sin embargo, la aplicación de estas técnicas en la industria de la miel tiene algunas desventajas, como su naturaleza destructiva, el coste de implementación y el requisito de tiempo. Para la autenticación de alimentos y la caracterización de la miel en particular, la introducción de métodos alternativos a los procedimientos convencionales que apuntan a la medición objetiva de la miel de una manera consistente y rentable es de gran importancia para la industria de la miel (Shafiee et al., 2013). En este sentido, se han llevado a cabo varios estudios para desarrollar técnicas no destructivas utilizando un conjunto de datos de calibración obtenidos por métodos analíticos para varios productos agrícolas. Entre estos enfoques, la visión artificial y las redes neuronales artificiales (RNA) se pueden destacar por tener una buena capacidad de evaluación del color de los alimentos, así como de caracterización de los alimentos para aquellas propiedades asociadas con color. Muchos grupos de investigación han utilizado la visión artificial para el análisis del color de los alimentos (Shafiee et al., 2014).

Las redes neuronales artificiales son unas estructuras relativamente simples. Incluye una percepción simple, que utiliza funciones matemáticas para encontrar la suma ponderada de las entradas y genera sus resultados. Una estructura típica de RNA se muestra en la Figura 1, que a su vez representa el tipo de red empleada en el presente trabajo. Los nodos en el gráfico se denominan neuronas. Hay cuatro capas en este gráfico. La primera es la capa de entrada, la segunda y la tercera capa son capas ocultas y la cuarta capa es de salida.

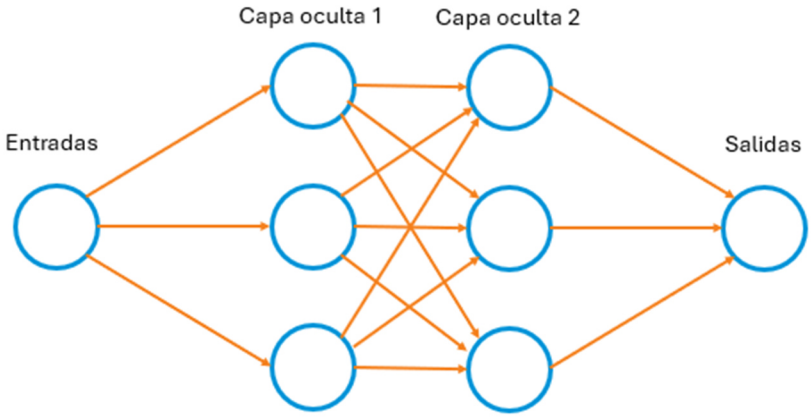


Figura 1. Ejemplo de estructura de RNA.

El objetivo de esta investigación fue desarrollar y evaluar la eficacia de la implementación de redes neuronales artificiales para la predicción de los parámetros de humedad, cenizas y acidez a partir de datos de mediciones de coloración de mieles. Para ello, se utilizaron las bibliotecas de TensorFlow y Keras para desarrollar RNA para cada parámetro a determinar. Cada red cuenta con una capa de entrada y una de salida, de un nodo cada una, y con dos capas ocultas densamente conectadas de tres nodos cada una.

2. Metodología

2.1. Muestras de Miel

Se utilizaron como base de datos para el entrenamiento de la red neuronal artificial los resultados de análisis doscientas cincuenta y cinco muestras de mieles de distintos orígenes dentro de la región pampeana Argentina. Los datos se obtuvieron de muestras recibidas y analizadas en la última década dentro del grupo de trabajo (CIDTA). Estos datos fueron obtenidos siguiendo los lineamientos expuestos en la Guía para la caracterización de mieles argentinas del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, de la Presidencia de la Nación (Gurini, 2019).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Los datos empleados corresponden a valores de color expresados en mm, de humedad en % de humedad de la muestra, de cenizas en: gramos de cenizas cada 100 gramos de muestra y de acidez expresados en meq/Kg.

2.2. Tratamiento y Análisis de Datos

Los datos empleados en este trabajo antes de ser insertos a la red neuronal fueron tratados y analizados con las librerías Pandas y Seaborn. En la Figura 2 se pueden observar los gráficos de pares entre los datos de color y acidez (a), color y cenizas (b) y color y humedad (c). Se aprecia cierta semejanza en la a distribución de datos en los tres casos, lo cual nos permite predecir que el comportamiento de los distintos paquetes de datos tendrá una tendencia similar entre sí, por eso se decidió trabajar con redes del mismo tamaño en esta etapa temprana del trabajo.

Como tratamiento de datos también se realizó la partición de estos en tres sets: de entrenamiento, de validación y de prueba, siendo sus porcentajes 75%, 20% y 10% respectivamente.

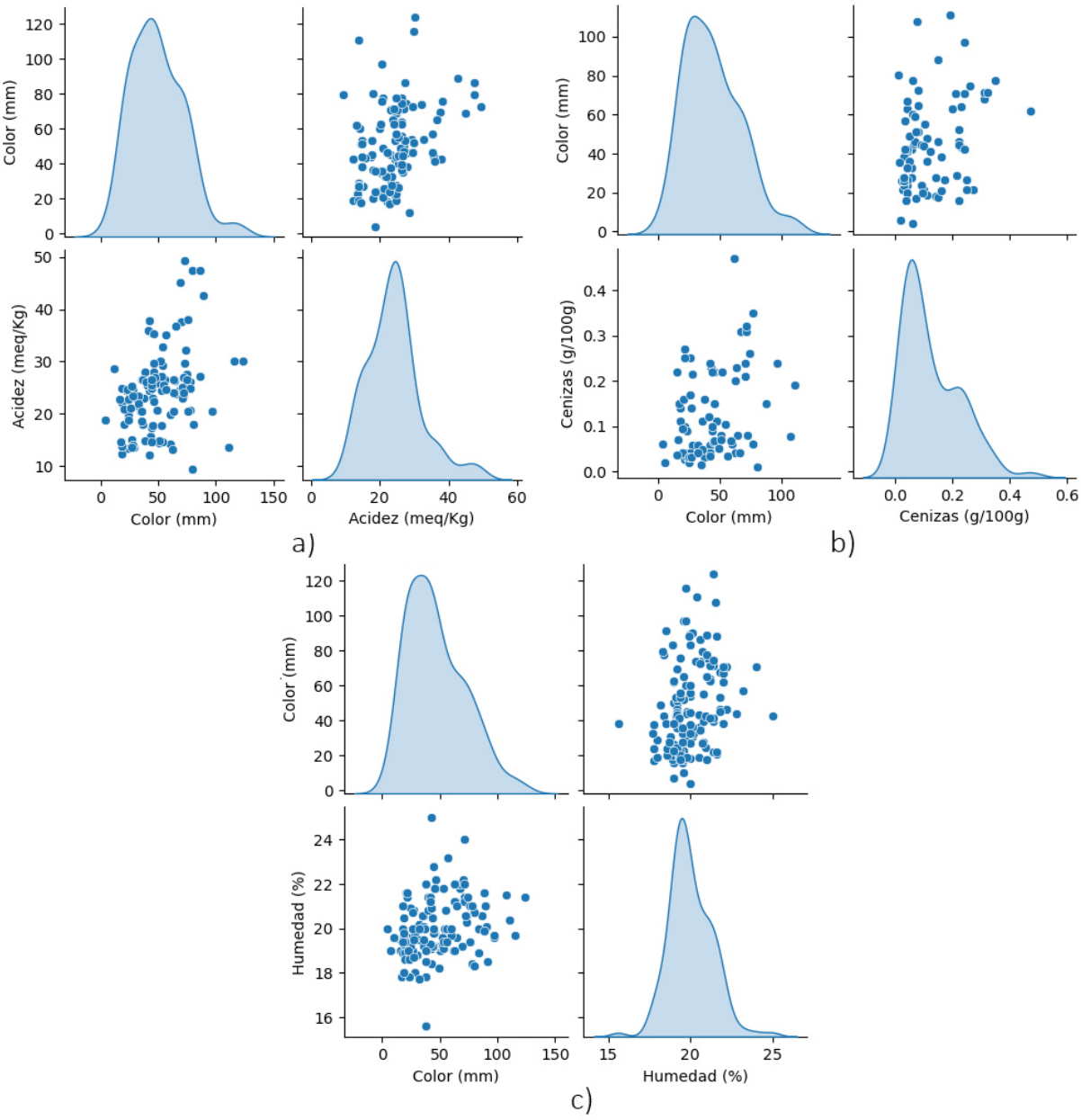


Figura 2. Gráfico de pares de color y acidez (a), color y cenizas (b) y color y humedad (c).

2.3. Creación del Modelo e Implementación de la Red Neuronal

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Para el entrenamiento de las redes se emplearon como datos de entrada los datos normalizados de entrenamiento y de validación previamente mencionados. Para el desarrollo del modelo se planteó un modelo secuencial con dos capas ocultas densamente conectadas y una capa de salida que devuelve un único valor continuo. Durante el desarrollo se probaron distintos arreglos de nodos por capa, entre 1 y 10 nodos por capa oculta. El arreglo de 3 nodos fue, en los tres casos, el que mostró un mejor ajuste con menor cantidad de neuronas, razón por la cual se decidió realizar el entrenamiento final con ese arreglo.

Una vez entrenada las redes, se realizaron pruebas en cada una de ellas con sus correspondientes sets de prueba para predecir datos de salida. Estas predicciones fueron luego comparadas con los resultados esperados para comprobar la eficacia de la red.

3. Resultados que se esperan alcanzar

3.1. Resultados Parciales

La Tabla 1 muestra los resultados al realizar la evaluación de los modelos de RNA de dos capas ocultas de tres nodos cada una sobre los sets de prueba de cada parámetro a estudiar. Se puede apreciar que los valores de la función de perdida, del error absoluto medio y del error cuadrado medio son bajos, por lo cual se puede suponer que la red esta bien entrenada y dará predicciones acertadas.

Tabla 1. Resultados de evaluar las RNA implementadas

Parámetro	Función de pérdida	Error absoluto medio	Error cuadrado medio
Acidez (meq/Kg)	4.0814e-04	0.0163	4.0814e-04
Ceniza (g/100g)	2.9016e-06	0.0017	2.9016e-06
Humedad (%)	1.939e-04	0.0134	1.9390e-04

Para poder corroborar el entrenamiento de la red y la veracidad de las predicciones se realizaron los gráficos de la Figura 3 donde se encuentran representados los resultados de las predicciones y los datos verdaderos, tanto de los sets de prueba y de validación para visualizar el comportamiento de las predicciones obtenidas.

3.2. Siguientes pasos:

Siendo este un trabajo aun en desarrollo se propone como siguientes pasos encontrar si existe un mejor arreglo en cantidad de capas y nodos que permita una mejor performance de la red neuronal. Así mismo, se plantea como posible desarrollo realizar una red neuronal única que permita la predicción de los tres parámetros en simultaneo, en vez de tres redes individuales.

4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos de la evaluación de los datos del set de prueba y lo que se puede observar en las graficas de las predicciones se puede concluir que la implementación de redes neuronales artificiales de dos capas ocultas de 3 nodos cada una cumple la función de predecir de forma eficiente los valores esperados en mieles de los parámetros acidez, cenizas y humedad a partir del valor de color.
Siendo este un trabajo en progreso y existiendo ,como ya se ha mencionado previamente en el mismo, la importancia del desarrollo y uso de métodos alternativos a los procedimientos convencionales- como los propuestos en este trabajo- destinados a la medición objetiva de la miel de manera consistente y rentable debido a su gran importancia para la industria apícola, se plantea seguir en futuras investigaciones en búsqueda de mejores arreglos para la predicción de parámetros de las mieles y de creación de redes más complejas que predigan más de un parámetro en simultaneo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

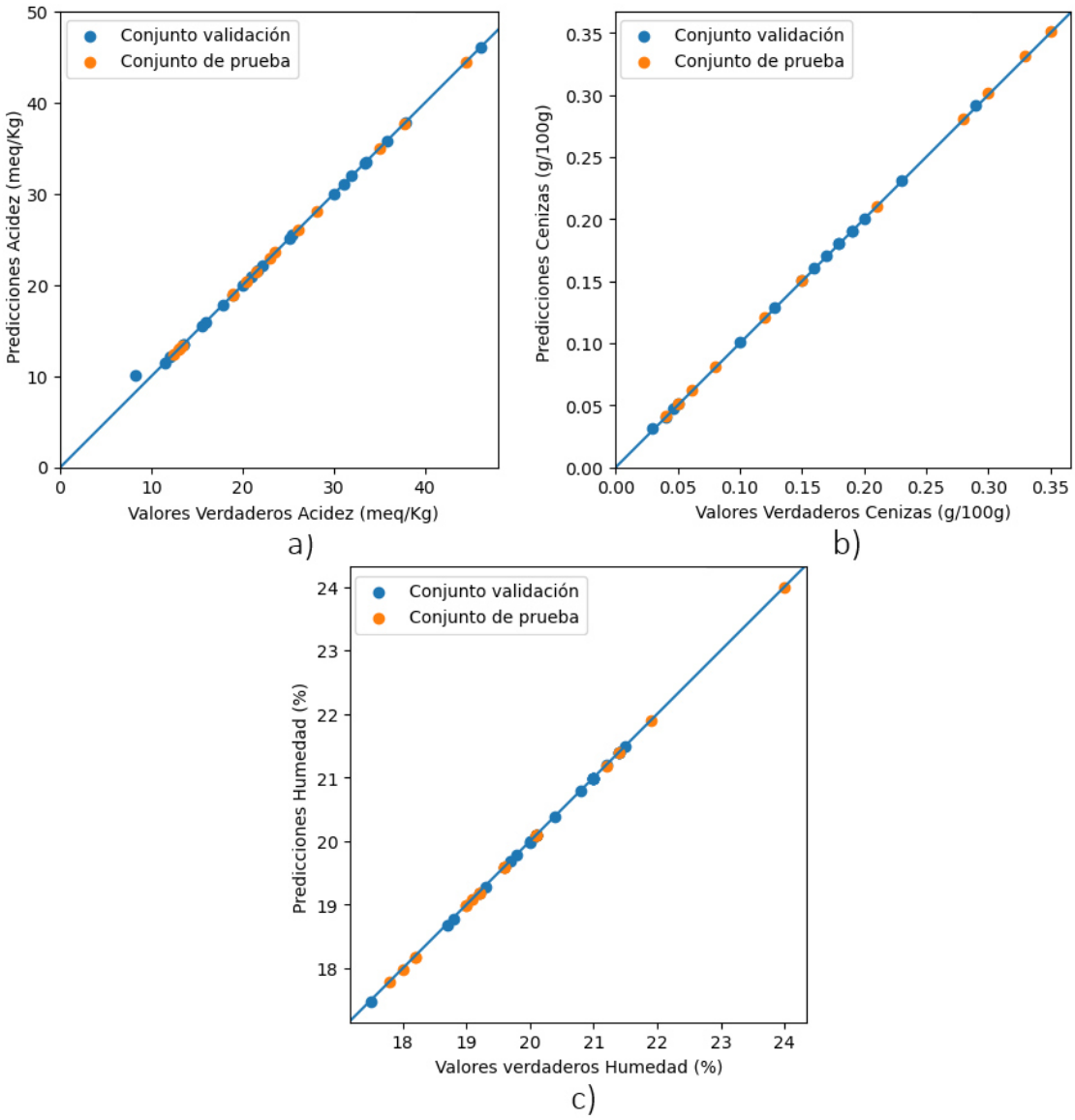


Figura 3. Gráfico de predicciones de set de validación y prueba de a) acidez, b) cenizas y c) humedad.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto EC8763TC: “Aplicación de herramientas de inteligencia artificial para analizar calidad de mieles”, en el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA), de la UTN-Rosario. Agradezco al Ing. Jesus Lione por la recopilación de los datos muestrales y al Dr. Javier Francesconi por el tiempo dedicado en la revisión y confección del presente trabajo.

Referencias bibliográficas

Gomes, S., Dias, L. G., Moreira, L. L., Rodrigues, P., & Estevinho, L. (2010). Physicochemical, microbiological and antimicrobial properties of comercial honeys from Portugal. Food and Chemical Toxicology, 48(2), 544–548.

Gurini, L. (2019). Guía para la caracterización de mieles argentinas. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Presidencia de la Nación.

Shafiee, S., Minaei, S., Moghaddam-Charkari, N., Barzegar, M. (2014). Honey characterization using computer vision system and artificial neural networks. Food Chemistry,159,143-150.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Shafiee, S., Minaei, S., Moghaddam-Charkari, N., Ghasemi-Varnamkhasti, M., & Barzegar, M. (2013). Potential application of machine vision to honey characterization. Trends in Food Science & Technology, 30, 174–177.

Teye, E., Amuah, C., Lamptey, F., Obeng, F., Nyorkeh,R. (2024). Artificial intelligence for honey integrity in Ghana: A feasibility study on the use of smartphone images coupled with multivariate algorithms. Smart Agricultural Technology.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alimentos
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

Estimación del coeficiente de pérdida para el flujo dentro de codos mediante técnicas de CFD

Estimation of the loss coefficient for flow inside elbows using CFD techniques

Presentación 18/10/2024

Daira Longo

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Depto. de Ing. Química, Cátedra de Fenómenos de Transporte, Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: dairalongo.99@gmail.com

Resumen

Para el diseño y funcionamiento de sistemas de tuberías, es fundamental conocer la pérdida de carga que se produce tanto, en tramos rectos, como en accesorios. Es por ello que, en el presente trabajo, se aplican técnicas de mecánica computacional (CFD) para simular la circulación de fluidos en un codo de 90° y cuantificar la pérdida de carga en el accesorio. Las simulaciones se realizan mediante el modelo de turbulencia "k-ω". Se realiza un estudio paramétrico variando el número de Reynolds en el rango de $10^4 - 10^6$ para tres diferentes relaciones de diámetros, entre el diámetro del tubo y el diámetro de la curva. El coeficiente de pérdida del accesorio se determina aplicando la metodogía desarrollada en el curso de Fenómenos de Transporte.

Palabras clave: CFD; Turbulencia; Coeficiente de Pérdida; Caída de Presión

Abstract

For the design and operation of piping systems, it is essential to know the head loss that occurs both in straight sections and in fittings. For this reason, in the present work, computational mechanics techniques (CFD) are applied to simulate the fluid flow in a 90° bend and to quantify the head loss in the fitting. The simulations are performed using the "k-ω" turbulence model. A parametric study is performed by varying the Reynolds number in the range of $10^4 - 10^6$ for three different diameter ratios, between the pipe diameter and the bend diameter. The loss coefficient of the fitting is determined by applying the methodology developed in the Transport Phenomena course.

Keywords: CFD; Turbulence; Loss coefficient; Pressure drop

1. Introducción

El transporte de fluidos representa una de las operaciones unitarias de mayor presencia a nivel industrial. En las carreras de ingeniería esta temática se suele abordar en las disciplinas de Mecánica de Fluidos, Operaciones Unitarias o Fenómenos de Transporte. Los accesorios, como los codos, son piezas fundamentales en el diseño y funcionamiento de sistemas de tuberías. Estos accesorios, introducen pérdidas de presión que pueden ser evaluadas a través del coeficiente de pérdida (K). El mismo depende de diversos factores, como el ángulo de curvatura (θ_b), la relación entre el radio de la curva (r_c) y el diámetro de la tubería (D) y el número de Reynolds (Re).

Si bien se puede encontrar una considerable cantidad de trabajos relativos a la circulación de fluidos en secciones curvas de tuberías, como codos o serpentines, existe una gran discrepancia entre los valores experimentales informados. Esta discordancia entre los valores reportados de los coeficientes de pérdida de carga se debe principalmente al desconocimiento de uno o más parámetros que pueden afectar la caída de presión haciendo que estos valores sean poco confiables (Gajbhiye

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

et al. (2020)). Por otro lado, las inconsistencias en los valores experimentales informados también pueden ocurrir debido a un flujo descontrolado en las secciones de entrada y salida del codo o curva analizada. Además, la precisión inadecuada en la medición de la caída de presión da como resultado predicciones incorrectas del coeficiente de pérdida de carga. Es por ello que, como se menciona en el trabajo de Crawford et al. (2007), realizar experimentos de alta fidelidad para predecir con precisión las caídas de presión en los accesorios de las tuberías suele ser complicado y costoso.

Sin embargo, en los últimos años, con el auge e incremento de las capacidades de cálculo de las computadoras modernas junto al desarrollo de algoritmos numéricos eficientes, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha convertido en un candidato potencial para las predicciones de caída de presión y visualización del flujo a través de redes de tuberías. Como se menciona en el trabajo de Fletcher et al. (2022), la técnica CFD se ha utilizado como una herramienta útil para la predicción hidrodinámica, el diseño, la ampliación y la optimización de varios equipos de ingeniería química. Las técnicas de CFD permiten resolver las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando el Promediado de los Esfuerzos de Reynolds (RANS) para la consideración de la turbulencia en el modelo. En el trabajo de Smyk et al. (2024) realizan la simulación del flujo en un codo para diferentes números de Reynolds en el software ANSYS Fluent 2019. La CFD facilita principalmente la evaluación previa de los procesos químicos a través de los siguientes cinco pasos: (I) estimación de los parámetros de diseño de ingeniería, (II) comprensión de los fenómenos de transporte de los procesos de ingeniería química en consideración, (III) desarrollo de la relación entre la mecánica de fluidos y los objetivos de diseño del sistema en consideración, (IV) optimización del diseño y ampliación del sistema en consideración y (V) evaluación de la seguridad del escenario del peor caso postulado, que podría involucrarse mientras el equipo está en funcionamiento. Por lo tanto, la inclusión de cursos básicos y avanzados sore CFD en el plan de estudios de ingeniería química se considera de suma importancia en los últimos tiempos.

El objetivo del presente trabajo consiste en evaluar la capacidad de las herramientas de CFD para predecir el coeficiente o longitud equivalente para un codo de 90°, comparando con los valores usuales publicados en la bibliografía general. Dicho trabajo, representa el punto de partida para la preparación de material y trabajo práctico en la asignatura de Fenómenos de Transporte, el cual permite al alumno vincular los balances microscópicos de cantidad de movimiento con la aplicación de balances macroscópicos para la predicción del factor de fricción y su comparación con ecuaciones empíricas basadas en datos experimentales. Es por ello, que la utilización de herramientas de modelado y resolución numérica de balances microscópicos enriquece el aprendizaje, ya que las mismas permiten visualizar y simular de manera práctica los conceptos teóricos abordados en la materia.

2. Metodología

2.1 Conceptos preliminares

Para la determinación de la potencia necesaria de una bomba a instalar en un sistema de tuberías se utiliza la ecuación de Bernoulli, que representa un balance de energía mecánica del sistema (Bird et al. (2002)). La ecuación de Bernoulli generalizada, Ecuación (1), incorpora tanto las pérdidas de energía mecánica en tramos rectos como en accesorios o singularidades presentes en la tubería.

$$(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}\rho\alpha(\langle v_2\rangle^2 - \langle v_1\rangle^2) + \rho g(z_2 - z_1) - \widetilde{W}_m + \underbrace{\sum_i (\tilde{E}_v^{TR})_i}_{\substack{Suma\ sobre\ todas\\ las\ secciones\ de\\ tramos\ rectos}} + \underbrace{\sum_i (\tilde{E}_v^{AC})_i}_{\substack{Suma\ sobre\ todos\\ los\ accesorios}} \quad (1)$$

En esta ecuación, P_i es la presión en un punto determinado, $\langle v_i\rangle$ es la velocidad media del fluido en un punto determinado, z_i es la altura en un punto determinado respecto al eje de referencia, $\widetilde{W}_m$ es el trabajo que ingresa o sale del sistema, ρ es la densidad del fluido y α es un factor de corrección de la energía cinética. Por otro lado, $\tilde{E}_v^{TR}$ representa la energía mecánica por unidad de volumen que se transforma en energía interna, asociada a las pérdidas de presión en tramos rectos. Estas pérdidas se estiman mediante la ecuación de Darcy-Weisbach o la ecuación de Fanning, Ecuación (2). Esta última es la que usualmente se utiliza en el ámbito la ingeniería química. La sustitución en el balance de energía permite entonces calcular la caída de presión.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

$$\tilde{E}_v^{TR} = \underbrace{f_D\left(\frac{L}{D}\right)\frac{1}{2}\rho\langle v\rangle^2}_{Darcy-Weisbach} = \underbrace{2f_F\left(\frac{L}{D}\right)\rho\langle v\rangle^2}_{Fanning} \quad (2)$$

Las pérdidas por fricción en elementos de tubería, $\tilde{E}_v^{AC}$, vienen expresadas por las Ecuaciones (3) y (4). Al considerar dichas pérdidas, como expansiones, contracciones, codos y válvulas, existen dos métodos de uso común, el de la longitud equivalente y el de la altura o carga de velocidad, también conocido como coeficiente de pérdida. El método de longitud equivalente determina las pérdidas en un elemento de tubería como la longitud de una tubería recta que tendría la misma pérdida. Para flujos turbulentos, la longitud equivalente generalmente se informa como un número de diámetros de tubería del mismo tamaño que la conexión del ajuste; L_{eq}/D se da como una cantidad fija, independiente de D. Este enfoque tiende a ser más preciso para un solo tamaño de ajuste y pierde precisión con la desviación de este tamaño. Para flujos laminares, las correlaciones L_{eq}/D normalmente tienen una dependencia del tamaño a través de un término de número de Reynolds.

$$\tilde{E}_v^{AC} = \underbrace{f_D\left(\frac{L_{eq}}{D}\right)\frac{1}{2}\rho\langle v\rangle^2}_{Darcy-Weisbach} = \underbrace{2f_F\left(\frac{L_{eq}}{D}\right)\rho\langle v\rangle^2}_{Fanning} \quad (3)$$

$$\tilde{E}_v^{AC} = K\frac{1}{2}\rho\langle v\rangle^2 \quad (4)$$

En la Ecuación (3), f_D y f_F son los factores de fricción referidos a la ecuación de Darcy y Fanning, según corresponda.

El otro método caracteriza cada accesorio mediante una constante (K) denominada coeficiente de pérdida o carga de velocidad, como se observa en la Ecuación (4). El término $\langle v\rangle^2/2g$ tiene dimensiones de longitud y comúnmente se llama altura de velocidad. El uso de la altura de velocidad para escalar las caídas de presión tiene una amplia aplicación en la mecánica de fluidos. El análisis de las ecuaciones de Navier-Stokes sugiere que cuando los términos inerciales dominan los términos viscosos, se espera que los gradientes de presión sean proporcionales a $\rho\langle v\rangle^2$. La relación entre los factores de fricción, de Darcy y Fanning, con la constante se muestra en la Ecuación (5). La Ecuación (6) muestra la relación del coeficiente de perdida con la caída de presión.

$$L_{eq} = \frac{2\,D\,(P_2 - P_1)}{f_D\rho\langle v\rangle^2} = \frac{D\,(P_2 - P_1)}{2f_F\rho\langle v\rangle^2} \quad (5)$$

$$K = \frac{2\,(P_2 - P_1)}{\rho\langle v\rangle^2} \quad (6)$$

Finalmente, la relación entre el coeficiente de perdida, los factores de fricción según Darcy y Fanning y la longitud equivalente se dan en la Ecuación (7).

$$K = f_D\left(\frac{Leq}{D}\right) = 4f_F\left(\frac{Leq}{D}\right) \quad (7)$$

En la Figura 1 puede observarse un esquema del accesorio y sus parámetros geométricos.

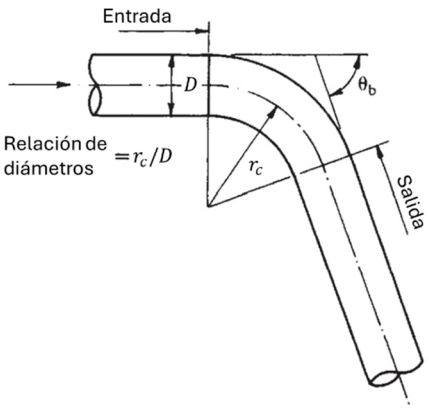


Figura 1. Diagrama de un codo de ángulo θ_b y sus parámetros geométricos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

2.2. Correlaciones empíricas para estimar la pérdida de carga en secciones curvas

En particular, en el transporte de fluidos a través de secciones curvas o serpentines, se produce una circulación secundaria perpendicular al flujo principal denominada efecto Dean. Esta circulación aumenta la fricción en relación con el flujo en tuberías rectas y desestabiliza el flujo laminar.

Miller (1990) presenta un par de curvas basada en datos experimentales para relaciones $r_c/D = 1$ y $r_c/D = 2\ a\ 3$. Las curvas se reproducen en la Figura 3.

A partir de soluciones numéricas, dos Santos et al. (2014) proponen la siguiente correlación hallada mediante un ajuste de datos obtenidos para un codo con una relación $r_c/D = 1.5$, Ecuación (8).

$$K = \frac{264.56}{126.23 + Re^{0.7345}} + 0.079 \tag{8}$$

2.3. Simulación del flujo mediante CFD

La simulación del flujo a través del codo se realizó mediante el software COMSOL Multiphysics 6.2. La misma se llevó a cabo en estado estacionario y, como se mencionó con anterioridad, resolviendo las ecuaciones RANS aplicando el modelo de turbulencia *k-ω*. Las condiciones de contorno de entrada y salida fueron la velocidad promedio y una presión de 1 atm. La Figura 2 muestra un esquema del modelo donde puede visualizarse la malla utilizada, siendo el número de celdas del mismo igual a 98240. Los parámetros de la simulación se muestran en la Tabla 1, utilizando agua como fluido. Se realizaron varias corridas variando tanto el número de Reynolds (Re) como la relación r_c/D.

Tabla 1. Parámetros de simulación.

D [m]	0.05	Diámetro de la tubería
r_c [m]	0.05-0.1-0.15	Radio de curvatura
L_{in} [m]	0.07	Longitud de entrada
L_{out} [m]	0.35	Longitud de salida
ρ [kg/m3]	965.35	Densidad
μ [Pa.s]	3.15E-4	Viscosidad dinámica

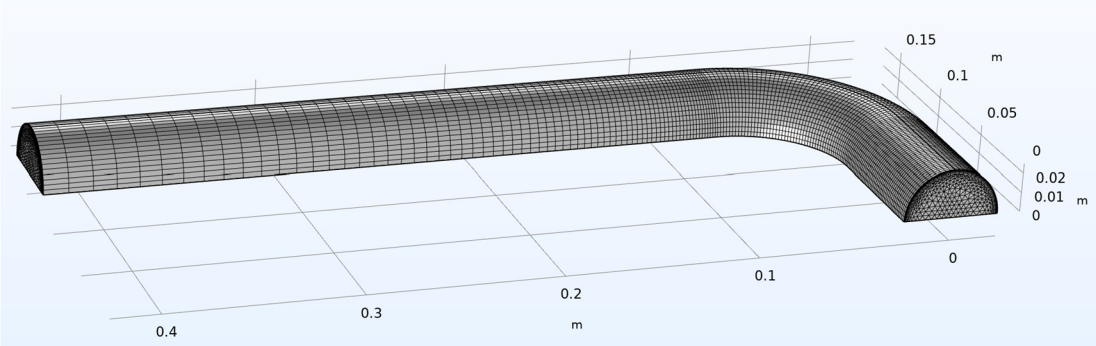


Figura 2. Esquema del modelo con detalle de la malla utilizada.

2.4. Obtención del coeficiente de pérdida

A partir de la correlación de Blasius para tuberías lisas, Ecuación (9), se estimó el factor de fricción para poder determinar mediante Fanning, Ecuación (2), la caída de presión correspondiente a los tramos rectos de entrada (ΔP_{in}) y de salida (ΔP_{out}) del sistema.

$$f_F = \frac{0.07191}{Re^{0.25}} \tag{9}$$

Del modelo, se obtuvo la caída de presión entre los puntos de entrada y salida del sistema (ΔP_{sist}). Permitiendo calcular la caída de presión en el codo (ΔP_{codo}) como se expresa en la Ecuación (10).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

$$\Delta P_{codo} = \Delta P_{sist} - \Delta P_{in} - \Delta P_{out} \quad (10)$$

Finalmente, es posible calcular el coeficiente de pérdida mediante la Ecuación (6).

3. Resultados

La Figura 3 resume los resultados obtenidos mostrando gran discrepancia entre los valores reportados en bibliografía. Al igual que Miller (1990), los valores obtenidos para relaciones de radio de curvatura y diámetro de tubería de 2 a 3 predicen resultados casi idénticos. Sin embargo, los valores de la simulación se encuentran por debajo de la curva reportada en la gráfica original de Miller (1990). Para una relación $r_c/D = 1$, los valores numéricos se acercan a la curva de datos experimental, pero presentan una gran desviación para altos valores de Reynolds.

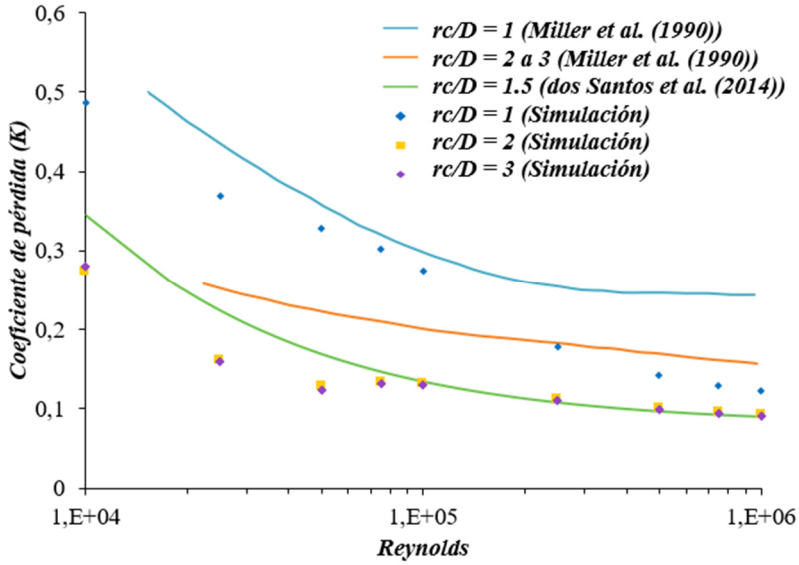


Figura 3. Valor del coeficiente de pérdida reportado por distintas fuentes, y su comparación con los datos hallados mediante simulación.

Se puede apreciar que todos los valores obtenidos se encuentran en el rango de los valores de bibliografía mostrando una dependencia decreciente del valor del coeficiente de pérdida a medida que aumenta el número de Reynolds. Perry (1997) sugiere un valor constante de 0.45 para codos de gran curvatura, valor conservador para estimar la perdida de carga asociada al codo.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos aplicando las técnicas de CFD para determinar el coeficiente de pérdida de un codo a 90° se encuentran dentro de los rangos reportados en trabajos precedentes, mostrando una disminución del coeficiente a medida que el número de Reynolds aumenta. La experimentación numérica permite integrar los conceptos de balances microscópicos, resolución de la ecuación de Navier-Stokes con un modelo RANS, con los balances macroscópicos para la determinación de la perdida de carga.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Tecnológica Nacional y al departamento de Ingeniería Química de la Facultad Regional Rosario por el apoyo educativo recibido, y al doctor Javier Francesconi por su valioso aporte al presente trabajo.

Referencias bibliográficas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. (2002). Transport Phenomena, 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons Ltd.
Perry, R.H. (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th Edition. New York: McGraw-Hill.
Miller, D.S. (1990). Internal flow systems, second edition. Cranfield, Bedford: BHRA.
Crawford, N.M., Cunningham, G., Spence, S.W.T. (2007). An experimental investigation into the pressure drop for turbulent flow in 90° elbow bends. Proc Inst Mech Eng E-J Process Mech Eng., 221, 77-88.
Fletcher, D.F. (2022). The future of computational fluid dynamics (CFD) simulation in the chemical process industries. Chemical Engineering Research and Design, 187, 299–305.
Gajbhiye B.D., Kulkarni H.A., Tiwari S.S., Mathpati C.S. (2020). Teaching turbulent flow throughpipe fittings using computational fluid dynamics approach. Engineering Reports, 2, e12093.
Smyk, E., Stopel, M., Szyca, M. (2024) Simulation of Flow and Pressure Loss in the Example of the Elbow. Water 2024, 16(13), 1875.
dos Santos, A., Andrade, C., Zaparoli, E. (2014). CFD Prediction of the Round Elbow Fitting Loss Coefficient. World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 88, International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 8(4), 743 - 747.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Ingeniería de procesos, biotecnología y tecnología de alime
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

Purificación de Biogás mediante membranas poliméricas: análisis de parámetros operativos y consumo energético

Biogas purification using polymeric membranes: analysis of operating parameters and energy consumption

Presentación 18/10/2024

María Julia Mendez

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: mariajuliamendezf@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta la aplicación en GAMS de un modelo matemático para la purificación de biogás utilizando membranas poliméricas, enfocándose en la optimización del proceso para maximizar la pureza de metano obtenida. Se analiza el comportamiento del sistema mediante un modelo matemático basado en el mecanismo de solución-difusión, evaluando cómo diversos parámetros operativos influyen en la eficiencia de separación y recuperación de gases. Los resultados obtenidos muestran que la pureza del metano en el producto final está estrechamente ligada a los parámetros operativos del proceso, como el área de membrana y los requerimientos energéticos de compresión. Si bien un aumento en la pureza del metano mejora la calidad del producto, también conlleva un incremento en los costos asociados a la operación de las membranas y a la compresión de los gases, lo que sugiere la necesidad de optimizar estos parámetros para lograr un balance entre pureza y eficiencia energética.

Palabras clave: purificación de biogás; membranas poliméricas; modelado matemático

Abstract

This work presents the application in GAMS of a mathematical model for biogas purification using polymeric membranes, focusing on the optimization of the process to maximize the purity of methane obtained. The behavior of the system is analyzed using a mathematical model based on the solution-diffusion mechanism, evaluating how various operating parameters influence the separation efficiency and gas recovery. The results obtained show that the purity of methane in the final product is closely linked to the operating parameters of the process, such as membrane area and compression energy requirements. While an increase in methane purity improves product quality, it also leads to an increase in the costs associated with membrane operation and gas compression, suggesting the need to optimize these parameters to achieve a balance between purity and energy efficiency.

Keywords: biogas purification; polymeric membranes; mathematical modeling

1. Introducción

1.1. *Consideraciones Generales*

La creciente exigencia a nivel global de transitar hacia fuentes de energías limpias y sostenibles junto con la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, impulsaron el desarrollo de tecnologías innovadoras para la valorización de biogás en conjunto con la captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CO_2). En este contexto, la purificación de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

biogás se ha convertido en un área de investigación de gran relevancia, ya que permite no solo obtener un combustible renovable de alta calidad, sino también capturar CO_2 para su posterior almacenamiento o reutilización. El biogás, una mezcla gaseosa producida a partir de la biodegradación anaeróbica de materia orgánica, es una fuente de energía renovable con un gran potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, su composición variable y la presencia de dióxido de carbono junto con otras impurezas limitan su utilización directa como combustible, haciendo necesaria su purificación.

La purificación del biogás mediante membranas poliméricas se presenta como una tecnología prometedora para eliminar el CO_2 y enriquecer la corriente de salida en metano (CH_4), el principal componente energético del biogás. Esta tecnología se destaca por su simplicidad operativa, bajo costo de mantenimiento, modularidad y baja huella de carbono (Werkneh, 2022). Sin embargo, la complejidad de las mezclas de biogás, que suelen contener múltiples componentes como metano, dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, exige el desarrollo de modelos matemáticos precisos para simular y optimizar estos procesos.

En el trabajo presentado por (Nemestóthy et al., 2018), evalúan experimentalmente un sistema de purificación de biogás basado en un módulo de membrana de poliamida, utilizando mezclas hipotéticas y reales. Los autores presentan resultados que muestran la influencia significativa de la relación entre la presión de permeado y la alimentación (P_H/P_L) y la del flujo de retenido y el de alimentación (R/F) en la recuperación y pureza de metano. La baja performance en la purificación de la mezcla de gas real es atribuida principalmente a la separación inadecuada entre N_2 y CH_4.

Por su parte (Samei & Raisi, 2022), simulan en Aspen Plus/Aspen Custom Modeler diferentes configuraciones de membranas poliméricas para la separación de una mezcla binaria de CO_2-CH_4, concluyendo que los arreglos de múltiples etapas ofrecen mejores resultados en términos de recuperación y pureza de metano, que aquellas que consisten en una sola etapa. Empleando la misma herramienta de simulación, (Spitzer et al., 2019) investigan la influencia de la selectividad CO_2/CH_4 en el rendimiento de plantas móviles de biogás, limitando el sistema a dos módulos conectados en serie con recirculación de permeado hallando que, al aumentar la selectividad, mejora la recuperación y pureza de metano obtenida acercándose al de plantas estacionarias a pesar de las limitaciones de diseño.

El objetivo principal de este trabajo es aplicar un modelo matemático del proceso de purificación de biogás en el entorno de programación GAMS (General Algebraic Modeling System). Se adopta una mezcla multicomponente, y membranas poliméricas para el análisis de performance del proceso.

2. Metodología

2.1 Descripción del modelo

En la revisión bibliográfica se identificaron diversas configuraciones utilizadas para la purificación de biogás mediante tecnología de membranas, cada una con sus particularidades en cuanto al diseño y operación del sistema (Nemestóthy et al., 2018; Samei & Raisi, 2022; Spitzer et al., 2019). Para el presente trabajo, se adopta un sistema constituido por tres membranas poliméricas, cuya disposición y flujo se ilustran en la Figura 1. Este arreglo es similar al reportado por (Ramezani et al., 2023), donde se utilizan dos membranas para el enriquecimiento de una mezcla binaria de CO_2 y CH_4.

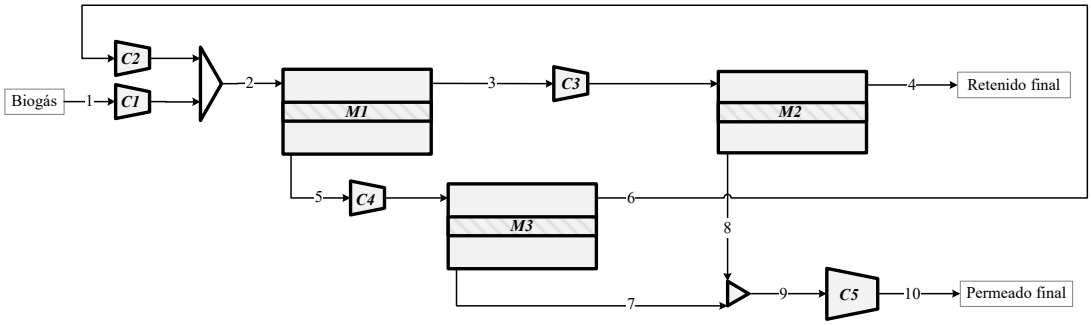


Figura 1. Sistema de tres membranas con recirculación de retenido de la membrana 3 a la 1.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Las alimentaciones a cada membrana (2, 3, 5) y la alimentación fresca (1) son previamente comprimidas mediante compresores designados como C_i, con el fin de aumentar la presión de entrada hasta la presión operativa (P_H) y mejorar la eficiencia de separación. Cada membrana genera dos corrientes: una de retenido (concentrada en los componentes menos permeables, como el metano y el nitrógeno) y otra de permeado (concentrada en los más permeables, como el CO_2 y el vapor de agua).

La configuración adoptada se basa en un acoplamiento en serie/cascada con recirculación para maximizar la pureza de CH_4 en el retenido final (4) y la eficiencia del proceso. Específicamente, el retenido (3) de la primera membrana (M_1), alimenta a la segunda (M_2) mientras que el permeado (5) de M_1 abastece la tercera (M_3). Los permeados (7 y 8) de M_2 y M_3 se mezclan (9) y se comprimen en C_5 hasta 13.8 MPa para el posterior transporte/almacenamiento y/o uso de la corriente enriquecida en CO_2

2.2. Modelo matemático

En los diversos estudios revisados sobre la purificación de biogás mediante membranas poliméricas, el modelo matemático más aceptado para describir el transporte de gases a través de la membrana se basa en el mecanismo de solución-difusión (Roozitalab et al., 2023). Este modelo NLP, adaptado de (Arias et al., 2023), que contiene 3241 variables y 3622 ecuaciones, asume que las membranas son no porosas y describe el mecanismo de permeación de gases de manera macroscópica, utilizando la Ecuación (1) basada en la Ley de Fick:

$$J_i = \frac{Q_i}{\delta} \cdot (p_{i(0)} - p_{i\,(\delta)})$$

(1)

Donde J_i es el flujo de la especie i a través de la membrana (mol/m^2/s); Q_i es la permeabilidad de cada sustancia en la membrana (mol m/m^2/s/Pa); δ es el espesor efectivo de la membrana (m); $p_{i(0)}$ es la presión parcial de la especie i en la corriente de alimentación (Pa) y $p_{i(\delta)}$ es la presión parcial de la especie i en la corriente de permeado (Pa). Se asume además que la permeabilidad es constante durante todo el proceso, que la caída de presión tras membrana es despreciable y que las mismas operan en condiciones isotérmicas. Por otro lado, un parámetro característico en este proceso, que mide la capacidad de una membrana para separar dos gases específicos, es la selectividad (α). Ésta se define, mediante la Ecuación (2), como el cociente de las permeabilidades de dos especies distintas.

$$\alpha_{i,j} = \frac{Q_i}{Q_j} \qquad (2)$$

Adicionalmente, el modelo matemático incluye los balances de masa global y por componente, considerando un flujo en contracorriente, representados por las Ecuaciones (3) y (4). Asimismo, se han incorporado los balances de masa y energía para cada equipo representado en el esquema.

Balance de masa global: $F = R + P$ (3)

Donde F, R y P representan las corrientes de alimentación, retenido y permeado, respectivamente, y x la fracción molar de cada componente i.

Balance de masa por componentes: $F\,x_{(F,i)} = R\,x_{(R,i)} + P\,x_{(P,i)}$ (4)

Los indicadores de performance del proceso son la recuperación y pureza de metano en el retenido final (4) y la recuperación de CO_2 en el permeado final (10), que denotaremos de aquí en adelante como RCH_4, PCH_4 y PCO_2, respectivamente.

Por lo tanto, el problema de optimización se enfoca en maximizar la pureza del metano, lo cual se representa mediante la siguiente expresión:

Max $PCH_4 = x_{(R,CH4)}$ (5)

Sujeto a:

$h_j(\bar{x}) = 0, \quad j=1,\ldots,J$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

$g_k(\bar{x}) \leq 0, \qquad k=1,\ldots,K$

Dónde $\bar{x}$ representa el vector de variables continuas tales como área de membrana, composición, flujos, presión, temperatura, que son simultáneamente optimizadas.

$h_j(\bar{x})$ se refiere a restricciones de igualdad y $g_k(\bar{x})$ es un conjunto de restricciones de desigualdad definidas para circunscribir una región de operación viable.

2.3. Caso de estudio

En este caso de estudio, se aborda el proceso de purificación de biogás utilizando membranas poliméricas para la separación de una mezcla multicomponente de gases. El objetivo es analizar la performance del proceso cuando se maximiza la pureza CH_4 en el retenido final y obteniendo, a su vez, una corriente rica en CO_2 para su posterior transporte, uso y/o almacenamiento.

Los datos de entrada al modelo se presentan en la Tabla 1. La alimentación fresca (250 Nm^3/h) incluye 39% de CO_2, 2,5% de N_2, 57,4% de CH_4 y 1,1% de trazas de sustancias desconocidas, cuya composición porcentual representa condiciones de biogás de vertedero de una planta ubicada en Hungría (Nemestóthy et al., 2018). En este trabajo se asume que el 1,1% es vapor de agua.

Se han elegido valores de selectividad y permeabilidad, característicos de membranas comerciales con capacidad adecuada para diferenciar entre las distintas especies presentes en la mezcla (Nemestóthy et al., 2018; Spitzer et al., 2019). El N_2 permea a una velocidad similar a la del CH_4 (Nemestóthy et al., 2018) así como lo hacen el CO_2 y el H_2O (Arias et al., 2023). De esta manera, se asume que las permeanzas de N_2 y H_2O son el 95% de las permeanzas de CH_4 y CO_2, respectivamente.

Las condiciones de operación, como presiones y temperaturas, también desempeñan un papel importante en el comportamiento de separación. En este estudio, se seleccionaron presiones máximas de operación, de alimentación y permeado halladas en distintos trabajos consultados (Nemestóthy et al., 2018; Spitzer et al., 2019), asegurando un adecuado gradiente de presión como fuerza impulsora para la separación. Asimismo, se ha asumido una temperatura constante de operación para simplificar el análisis.

Tabla 1. Datos de entrada al modelo.

Parámetro	Valor	Unidad
Flujo de biogás	250	Nm^3/h
Temperatura	303	K
Presión máxima de operación (P_H)	10	bar
Presión baja	1	bar
Permeanza de CO_2	83,2	GPU
Selectividad CO_2/CH_4	37.8	-
Eficiencia compresores	85	%
Recuperación de CO_2	90-98	%

3. Resultados

La resolución del modelo implica la optimización simultánea de todas las variables (presiones, composiciones, flujos y áreas) que maximizan la pureza de metano en el retenido para niveles de recuperación de CO_2 definidos paramétricamente entre 90 y 98%. .

En la Figura 2 se presentan las variables óptimas para el caso en el que la recuperación de CO_2 es 98 %. En este caso se alcanza el máximo nivel de pureza de CH_4, esto es 94,4% (nivel que se encuentra dentro de los rangos establecidos para su inyección en la red de gas (Roozitalab et al., 2023)), recuperándose un 84,6% del mismo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

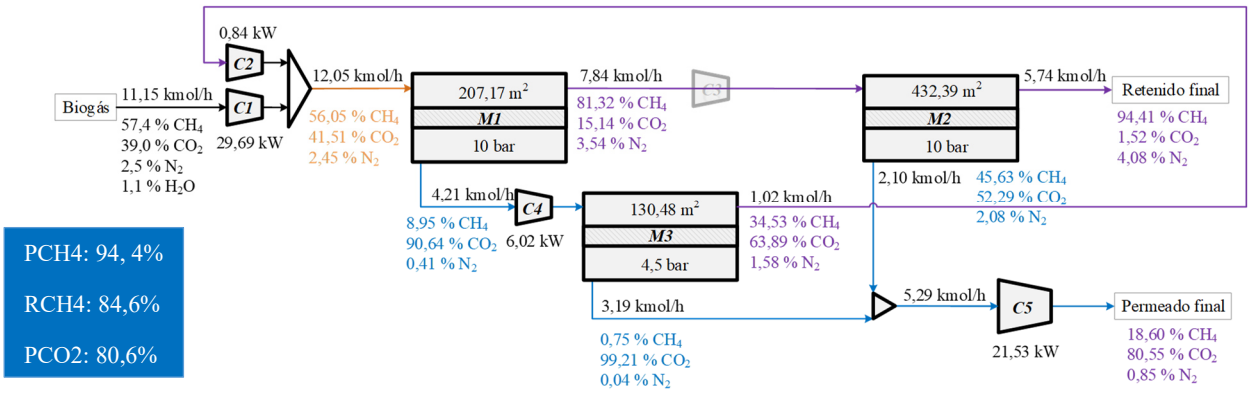


Figura 2. Condiciones óptimas del proceso para una recuperación de CO_2 de 98%.

Se observa que tanto M_1 como M_2 operan a la presión máxima establecida (10 bar), mientras que M_3 trabaja a una presión inferior, lo que se traduce a un trabajo de compresión en el sistema de separación (35,7 kW) que es 65,9 % mayor al requerido para la compresión y bombeo final del permeado enriquecido en CO_2 (21,5 kW). Este último alcanza una pureza de 80,6%. El área total óptima de membrana es 770 m^2, lo que resulta consistente con los 700-800 m^2 definidos en (Spitzer et al., 2019) para obtener purezas de alrededor del 98 % con una selectividad hipotética de 50 (mayor a la empleada en este trabajo).

En la Figura 3, se muestra la relación entre las áreas de membranas y las variables de performance de la separación. Como es de esperar, a medida que aumenta la recuperación de CO_2 (90 a 98%) disminuye su pureza (90,6 a 80,6%), se incrementa PCH_4 (89,6 a 94,1%) y se reduce RCH_4 (93,4 a 84,6%). Se observa que cuanto mayor es la pureza de metano (o la recuperación de CO_2) mayores son los requerimientos del área total de membranas (80%). Es importante destacar que el nivel de metano en el permeado final asciende de 9% a 18,6% y si bien el objetivo es maximizar su pureza en el retenido, estas pérdidas deben también minimizarse, siendo los requisitos finales del proceso determinantes en este balance.

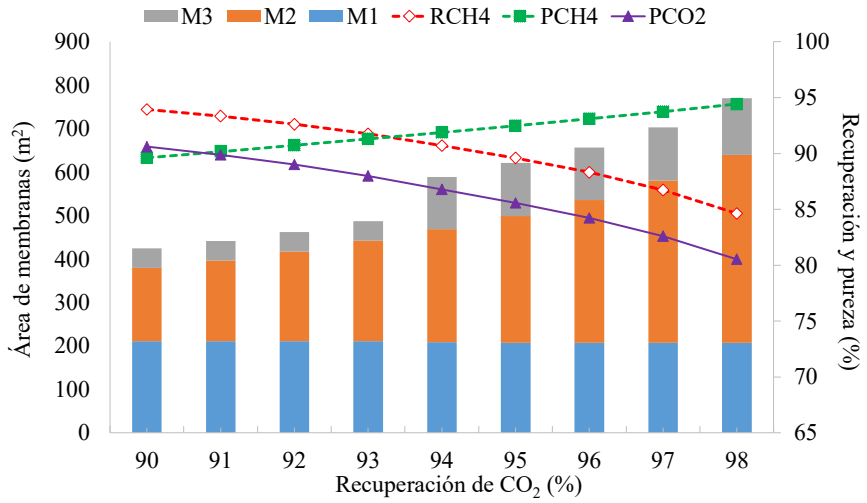


Figura 3. Relación entre las áreas de membranas y las variables de performance del proceso.

Finalmente, la Figura 4 muestra la relación entre el trabajo de compresión en el sistema de separación (W_{SS}) y el de bombeo y compresión del permeado final (W_{BCF}) para cada nivel de recuperación de CO_2. También se muestra la presión de operación de M_3, ya que M_1 y M_2 trabajan siempre a la presión máxima (10 bar). W_{BCF} se incrementa con el aumento de RCO_2 debido al mayor caudal de gas que debe ser comprimido y es, en todos los casos, mucho menor que W_{SS}. Para aumentar la pureza de metano, las membranas 1 y 2 trabajan a la mayor presión admisible, por lo que se requiere cada vez mayor área, relaciones R/F elevadas (alrededor del 65% en M1 y 85% en M_2) y un trabajo de compresión de la alimentación fresca constante (29,7 kW). Por otra parte, el menor aumento de área en M_3 para RCO_2 entre 90 y 93% (Fig. 3) está relacionado con una presión de operación máxima y un trabajo de compresión (C_4) de alrededor de 11,2 kW (W_{C2}=0). Esta tendencia se invierte para RCO_2 entre 94 y 98%, donde la suma del trabajo de los compresores C_2 y C_4 ronda los 6,3 kW

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

(P_H se reduce un poco más de la mitad y el área aumenta alrededor de 2,5 veces). M_3 mantiene aproximadamente constante la relación R/F (23,8 % en promedio) y la composición de CO_2 en el permeado (99,3%).

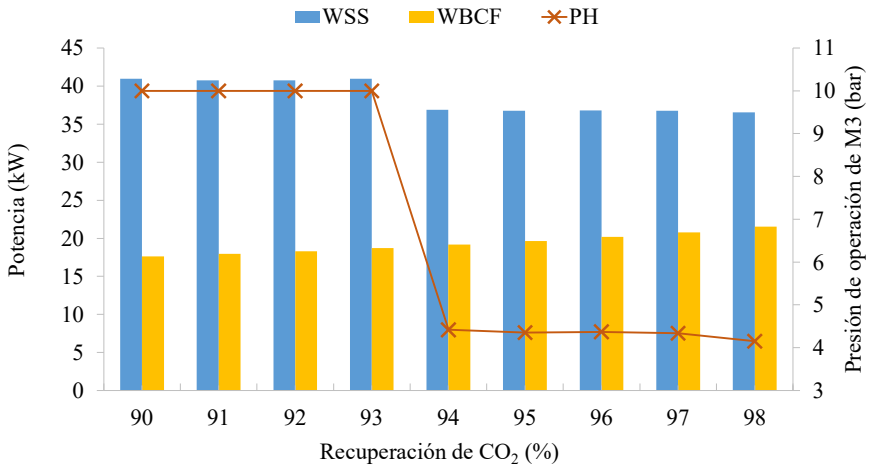


Figura 4. Requerimientos de potencia y presión.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que en el proceso de purificación de biogás mediante membranas existe una clara interdependencia entre la pureza del metano en el producto final, la recuperación de los componentes, el área de membrana requerida, las presiones operativas y los requerimientos energéticos del sistema. A medida que se incrementa la pureza de metano en el retenido, es necesario una mayor área total de membranas, lo que a su vez reduce la recuperación de metano y aumenta la de dióxido de carbono. Se debe resaltar que el presente modelo no considera todas las posibles variaciones respecto a modificaciones en las propiedades de membrana, composiciones diversas de alimentación, etc. Estos factores, así como otras opciones de configuración, deben ser analizados en conjunto con los costos asociados y los requerimientos del proceso para tener una visión integral del sistema.

Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Rosario, al Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI) y a la Dra. Patricia Mores por su contribución en este trabajo.

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. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103964

Nemestóthy, N., Bakonyi, P., Szentgyörgyi, E., Kumar, G., Nguyen, D. D., Chang, S. W., Kim, S.-H., & Bélafi-Bakó, K. (2018). Evaluation of a membrane permeation system for biogas upgrading using model and real gaseous mixtures: The effect of operating conditions on separation behaviour, methane recovery and process stability. Journal of Cleaner Production, 185, 44-51. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.047

Ramezani, R., Randon, A., Felice, L. D., & Gallucci, F. (2023). Using a superstructure approach for techno-economic analysis of membrane processes. Chemical Engineering Research and Design, 199, 296-311. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.10.007

Roozitalab, A., Hamidavi, F., & Kargari, A. (2023). A review of membrane material for biogas and natural gas upgrading. Gas Science and Engineering, 114, 204969. https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.204969

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Samei, M., & Raisi, A. (2022). Multi-stage gas separation process for separation of carbon dioxide from methane: Modeling, simulation, and economic analysis. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 170, 108676. https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108676

Spitzer, S., Miltner, M., & Harasek, M. (2019). Investigation on the influence of membrane selectivity on the performance of mobile biogas upgrading plants by process simulation. Journal of Cleaner Production, 231, 43-53. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.105

Werkneh, A. A. (2022). Biogas impurities: Environmental and health implications, removal technologies and future perspectives. Heliyon, 8(10), e10929. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10929

Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Venado Tuerto

Tu computadora ideal, contribución a las competencias sociales, políticas y actitudinales en carreras de ingeniería en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Venado Tuerto

Your ideal computer, contribution to social, political and attitudinal competencies in engineering careers at the National Technological University

Presentación 18/10/2024

Lisbeth Abigail Pujol

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Venado Tuerto, Sistema de información de Ciencia y Tecnología (SICyT), Venado Tuerto), Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: lpujol@frvt.utn.edu.ar

Luca Alarcón

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Venado Tuerto, Sistema de información de Ciencia y Tecnología (SICyT), Venado Tuerto), Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: lalarcon@frvt.utn.edu.ar

Resumen

En este estudio se presenta el desarrollo de una experiencia educativa en la que los estudiantes de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Venado Tuerto, han de seleccionar su computadora ideal. A través de esta actividad, los alumnos han de utilizar diversas herramientas digitales para crear una página web, y se evaluarán competencias sociales, políticas y actitudinales en el contexto de la carrera de Ingeniería Electromecánica.
La iniciativa forma parte del proyecto de investigación y desarrollo PID TEAIBFE0008198TC, cuyo objetivo es diseñar y validar metodologías e instrumentos de evaluación que promuevan el desarrollo integral de las competencias genéricas en los estudiantes. La propuesta educativa resulta fundamental para integrar habilidades técnicas y sociales en la formación de futuros ingenieros.
Los resultados del estudio enfatizan la necesidad de incorporar competencias sociales y éticas en los programas de ingeniería, destacando la relevancia de una educación integral que trascienda las meramente técnicas. Las conclusiones sugieren que una evaluación continua debe considerar tanto las habilidades técnicas como las competencias interpersonales para preparar a los ingenieros frente a los desafíos globales contemporáneos.

Palabras clave: Evaluación de competencias; Educación en ingeniería; Metodologías de evaluación.

Abstract

This study presents the development of an educational experience in which students from the National Technological University, Regional Faculty of Venado Tuerto, have to select their ideal computer. Through this activity, students must use

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

various digital tools to create a website, and social, political and attitudinal competencies will be evaluated in the context of the Electromechanical Engineering career.
The initiative is part of the research and development project PID TEAIBFE0008198TC, whose objective is to design and validate methodologies and evaluation instruments that promote the comprehensive development of generic competencies in students. The educational proposal is essential to integrate technical and social skills in the training of future engineers.
The results of the study emphasize the need to incorporate social and ethical competencies in engineering programs, highlighting the relevance of a comprehensive education that transcends merely technical ones. The findings suggest that continuous assessment should consider both technical skills and interpersonal competencies to prepare engineers for contemporary global challenges.

Keywords: Competency assessment; Engineering education; Evaluation methodologies.

1. Introducción

1.1. *Consideraciones Generales*

Este estudio se enfoca en el desarrollo y evaluación de competencias en programas de ingeniería de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), abordando tanto las competencias tecnológicas como las sociales y actitudinales. Se parte de la premisa de que estas competencias son cruciales para formar profesionales capaces de gestionar proyectos complejos, colaborar en equipos multidisciplinarios y actuar con un fuerte compromiso social. Para alcanzar este objetivo, se propone una metodología que incluye la aplicación de herramientas pedagógicas innovadoras, como las Webquests, con el fin de mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje y contribuir al desarrollo integral de los estudiantes. Este enfoque busca preparar a los futuros ingenieros no solo para un desempeño técnico eficiente, sino también para ejercer su profesión de manera ética y socialmente responsable.

En las últimas décadas, la educación en ingeniería ha experimentado una evolución significativa, pasando de un enfoque tradicional de transmisión de conocimientos a uno centrado en la formación por competencias. Este cambio responde a la creciente necesidad de preparar ingenieros no solo con conocimientos técnicos sólidos, sino también con competencias sociales, políticas y actitudinales. Estas competencias son esenciales para enfrentar los desafíos de un mundo globalizado y en constante cambio (CONFEDI, 2014). En este sentido, la UTN ha liderado la implementación de metodologías e instrumentos innovadores para evaluar estas competencias, reconociendo que el saber hacer no se limita a habilidades técnicas, sino que también abarca aspectos éticos, de responsabilidad social y de aprendizaje continuo.

1.2. Formato General

En algún punto de su carrera, todo estudiante de ingeniería se enfrenta a la necesidad de adquirir una computadora, lo que genera múltiples dudas y factores que influyen en la decisión, tanto de manera directa como indirecta. Sin embargo, ¿qué es lo realmente crucial al elegir una computadora cuando se busca una opción económica, duradera y el mercado está repleto de ofertas tentadoras?

En la asignatura de Programación en Computación, se han desarrollado temas relacionados con los componentes de una computadora y sus interrelaciones. No obstante, estos conocimientos aún no son suficientes para tomar una decisión de la compra. Por esta razón, se plantean como objetivos:

- Establecer directrices claras para la adquisición de una computadora.
- Fomentar el trabajo en equipos de hasta tres estudiantes, donde uno asumirá el rol de coordinador.
- Abordar la gran cuestión: ¿Cuáles son los aspectos esenciales que se deben considerar al comprar la primera computadora?

2. Metodología

2.1 La Tarea

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El resultado de esta actividad ha de ser una página web creada en Wix, que ha de mostrar los componentes de hardware que debe incluir una computadora, los requisitos necesarios para los diferentes softwares y los precios actuales del mercado. La página ha de presentar tanto computadoras personales o portátiles de características mínimas, como aquellas de alto rendimiento y durabilidad a largo plazo.

Para lograr una evaluación exhaustiva, se dividirá el contenido en secciones claves que aborden los siguientes aspectos:

1. Componentes de hardware: Se presentará una explicación detallada de los principales componentes de una computadora, como el procesador (CPU), memoria RAM, almacenamiento (HDD vs SSD), tarjeta gráfica (GPU), entre otros. Esta sección estará orientada a ofrecer una guía clara sobre qué buscar en cada componente según el uso esperado de la computadora.
2. Requisitos de software: Se incluirán tablas comparativas que muestren los requerimientos mínimos y recomendados para ejecutar diversos tipos de software, como entornos de desarrollo, programas de diseño gráfico, edición de video, y simulación de ingeniería. De esta manera, los estudiantes podrán correlacionar los componentes de hardware con las demandas específicas de los programas que utilizarán en su carrera.
3. Precios actuales del mercado: Esta sección se ha de actualizar constantemente con la información de precios de tiendas de hardware y sitios de comercio electrónico, permitiendo comparar distintas configuraciones y sus costos. Además, se evaluarán marcas y modelos que ofrezcan la mejor relación calidad-precio, con un enfoque especial en la durabilidad a largo plazo.
4. Computadoras de rendimiento básico y alto rendimiento: Se dividirán las opciones en dos categorías principales:
    - Computadoras de características mínimas: Para aquellos que necesitan una opción asequible y funcional, se analizarán equipos que puedan cumplir con las exigencias básicas del plan de estudios de ingeniería.
    - Computadoras de alto rendimiento: Para estudiantes que busquen equipos más potentes que ofrezcan mayor durabilidad y un rendimiento superior en tareas más exigentes, se proporcionarán recomendaciones de hardware de gama alta.
5. Sostenibilidad y reciclaje de computadoras: Se incluirá una breve sección sobre la importancia de la sostenibilidad en la compra de tecnología, incentivando a los estudiantes a considerar opciones como computadoras reacondicionadas o componentes de bajo consumo energético, así como pautas para el correcto reciclaje de equipos obsoletos.

El propósito de esta actividad no solamente promueve guiar a los estudiantes en la elección de una computadora adecuada para sus necesidades académicas y profesionales, sino también fomentar el trabajo en equipo y el uso de herramientas tecnológicas modernas, como la creación de páginas web mediante plataformas de fácil acceso como Wix.

2.2. El proceso

Para completar la tarea, los estudiantes deben seguir los siguientes pasos:

1. Formar un equipo de trabajo: Es fundamental organizar equipos de hasta tres estudiantes, donde se definirá un coordinador que liderará el desarrollo del proyecto.
2. Definir roles dentro del equipo: Una vez formado el equipo, cada miembro debe asumir un rol específico, que puede incluir investigación, recopilación de datos o diseño de la página web.
3. Revisar los componentes de una computadora: Investigar y revisar detalladamente los componentes esenciales que debe tener una computadora para cumplir con las necesidades académicas y profesionales. Esto incluye aspectos como el procesador, memoria RAM, almacenamiento, tarjeta gráfica, entre otros.
4. Listar los softwares necesarios: Elaborar una lista de los softwares que se utilizarán a lo largo de la carrera. Para este paso, se recomienda consultar a los docentes de las diferentes materias o al Departamento de carrera para obtener información precisa.
5. Consultar los requisitos de software: Visitar las páginas web oficiales de los softwares identificados y determinar los requisitos mínimos y recomendados de hardware que cada uno necesita para su correcto funcionamiento.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

6. Familiarizarse con la herramienta Wix: Explorar la plataforma Wix para aprender a editar formatos, personalizar la página web y utilizar sus herramientas de diseño. Es importante que todos los miembros del equipo comprendan cómo operar la plataforma.
7. Desarrollar la página web: Con toda la información recopilada, el equipo debe crear una página web en la que se presenten propuestas de computadoras de escritorio y notebooks, tanto de características mínimas como de alto rendimiento. Se deben incluir justificaciones claras para cada recomendación de hardware.
8. Socialización de la web: Finalmente, los estudiantes deberán presentar su página web ante sus compañeros y docentes, justificando sus elecciones de computadoras basadas en los requisitos de software y componentes de hardware investigados.

2.3. Recursos

A continuación, se enumeran las direcciones web y recursos bibliográficos que serán de gran utilidad para realizar la actividad:

- Para la compra de una computadora portátil, se puede visitar el sitio web www.circuitcity.com.
- Al decidir sobre una computadora, es importante consultar la página de la facultad, donde se encuentran los nombres de los softwares a utilizar y sus requerimientos en www.frvt.utn.edu.ar.
- En www.wix.com se puede acceder a un software gratuito para la creación de páginas web.
- Para obtener información acerca de los componentes de la computadora y los precios de los mismos, se recomienda visitar www.accesomedia.com.
- Un recurso valioso es el apunte de cátedra generado conjuntamente con los compañeros, donde se encuentran direcciones como www.intel.com, www.asus.com, o bien www.envidia.com, entre otras, que serán de gran aporte para la actividad.

2.4. Evaluación

Los alumnos serán evaluados según su producto final, la página web. A continuación, se presenta la rúbrica que será utilizada como instrumento para la evaluación y posterior calificación:

Criterio/evaluación	Incompleto 1	Bueno 2	Muy Bueno 3	Excelente 4	Nota
Producto final, la página web	Descripción de las características de la página creada, refleja un desarrollo incompleto de la tarea. (1)	Descripción de las características de la página creada, refleja un desarrollo adecuado de la tarea. (5)	Descripción de las características de la página creada, refleja dominio de la tarea. (7)	Descripción de las características de la página creada, refleja un elevado dominio de la tarea. (10)	10
Las computadoras seleccionadas responden a los requerimientos de los softwares	Reflejan un dominio incompleto los requerimientos de los softwares. (1)	Reflejan un dominio adecuado los requerimientos de los softwares. (5)	Reflejan dominio más que adecuado de los requerimientos de los softwares (7).	Reflejan un elevado dominio de los requerimientos de los softwares. (10)	10

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Uso de los recursos de Wix	Reflejan un uso incompleto de los recursos de Wix (1)	Reflejan un uso adecuado de los recursos de Wix. (5)	Reflejan dominio de los recursos de Wix (15)	Reflejan un elevado dominio de los recursos de Wix. (20)	20
Demuestra su autoaprendizaje a través del impacto visual, navegabilidad	No demuestra un autoaprendizaje a través del impacto visual, navegabilidad (1)	Demuestra un bajo autoaprendizaje a través del impacto visual, navegabilidad (5)	Demuestra un autoaprendizaje a través del impacto visual, navegabilidad (15)	Demuestra un alto autoaprendizaje a través del impacto visual, navegabilidad (20).	20
Trabajo en equipo, durante la socialización de la web a los compañeros y docentes.	No se evidencia un trabajo en equipo (1).	Se evidencia un adecuado trabajo en equipo. (5)	Se evidencia el dominio del trabajo en equipo. (15)	Se evidencia un elevado dominio del trabajo en equipo. (20).	20
Comunicación efectiva	Se evidencia débil comunicación. (1)	Se evidencia adecuada Comunicación. (5)	Se evidencia el dominio de la comunicación. (15)	Se evidencia un amplio dominio la comunicación. (20)	20
Total					
Autoevaluación					
Coevaluación					

Tabla 1. Rúbrica de evaluación.

3. Resultados

Los estudiantes al realizar esta actividad han aprendido a utilizar las herramientas del software Wix para crear páginas web, lo que les ha permitido fortalecer su trabajo en equipo y mejorar su capacidad para colaborar en proyectos grupales. A través de esta propuesta, han experimentado el aprendizaje autónomo, desarrollando habilidades de investigación y análisis crítico al seleccionar los componentes adecuados de una computadora y los softwares requeridos para su carrera.

Además, los estudiantes han puesto en práctica la comunicación efectiva, tanto escrita como oral, a través de la presentación de su página web y su exposición oral al socializar sus trabajos con compañeros y docentes. Esta experiencia les ha enseñado la importancia de articular sus ideas de manera clara y persuasiva, así como a recibir y dar retroalimentación constructiva.

El proceso de creación de la página web también ha fomentado la creatividad, permitiéndoles explorar diferentes diseños y enfoques para presentar la información de manera atractiva y accesible. Al enfrentarse a desafíos técnicos y conceptuales, los estudiantes han aprendido a ser proactivos en la búsqueda de soluciones, lo que contribuye a su formación integral como futuros profesionales en ingeniería.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

En resumen, esta actividad no solo ha proporcionado conocimientos técnicos sobre la selección de computadoras y el uso de herramientas digitales, sino que también ha desarrollado competencias blandas esenciales, como el trabajo en equipo, la comunicación, la creatividad y la resolución de problemas.

4. Conclusiones

La compra de una computadora requiere un tiempo para que la persona reflexione sobre sus necesidades, revise las ofertas del mercado y tome decisiones informadas. Es importante recordar que las tecnologías cambian a ritmos vertiginosos, pero la computadora seguirá siendo útil si permite realizar las actividades cotidianas sin que el usuario sienta que está perdiendo tiempo frente a la pantalla.

A través de este proceso, los estudiantes han aprendido a crear páginas web, lo que les ha permitido fortalecer su trabajo en equipo y mejorar sus habilidades de colaboración. Además, han experimentado el aprendizaje autónomo, adquiriendo conocimientos sobre la investigación de componentes de hardware y la evaluación de software. Este enfoque les ha brindado la oportunidad de desarrollar un pensamiento crítico al seleccionar la computadora más adecuada para sus necesidades académicas y profesionales.

Asimismo, los estudiantes han puesto en práctica la comunicación efectiva a través de la presentación de su página web y su exposición oral al socializar sus trabajos con compañeros y docentes. Esta experiencia no solo les ha enseñado a articular sus ideas de manera clara y persuasiva, sino que también les ha permitido recibir retroalimentación constructiva, lo que es esencial para su crecimiento académico y profesional.

En resumen, esta actividad ha proporcionado a los estudiantes no solo conocimientos técnicos sobre la selección de computadoras y el uso de herramientas digitales, sino también competencias blandas valiosas, como el trabajo en equipo, la comunicación, el aprendizaje autónomo y el pensamiento crítico. Estas habilidades son fundamentales para su desarrollo integral como futuros ingenieros.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo provisto por los docentes de la Cátedra Programación en Computación de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional de Venado Tuerto (UTN-FRVT) y a los investigadores del PID TEAIBFE0008198TC. Su colaboración ha sido fundamental para el desarrollo de esta actividad, permitiendo a los estudiantes adquirir habilidades esenciales y conocimientos técnicos en la creación de páginas web y la selección adecuada de computadoras.

Referencias bibliográficas

Roig-Vila, R., Flores-Lueg, C., Álvarez-Teruel, J. D., Blasco-Mira, J. E., Grau-Company, S., Lledó-Carreras, A., López-Meneses, E., Lorenzo, G., Martínez-Almira, M. M., Mengual, A. S., Mulero, J., Perandones-González, T. M., Segura, L., Suárez-Guerrero, C., & Tortosa-Ybañez, M. T. (2015). La WebQuest: Una herramienta disponible en la Web 2.0 que permite renovar las prácticas docentes. *Investigación y propuestas innovadoras de redes UA para la mejora docente*, 942-957. Recuperado el 1 de agosto de 2024.

CONFEDI. (2014). *Libro blanco de la ingeniería*. Consejo Federal de Decanos de Ingeniería.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Desarrollo y Simulación de un Sistema de Paletizado Automatizado para Educación Universitaria

Development and Simulation of an Automated Palletizing System for University Education

Presentación: 18/10/2024

Diego Butto

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
E-mail de contacto: diegbutto@gmail.com

Julián Gervasoni

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina
E-mail de contacto: juliangervasoni2011@hotmail.com

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) en el marco del proyecto “Desarrollo y Simulación de un Sistema de Paletizado Automatizado para Educación Universitaria.”.

Resumen

En este estudio abordamos el desarrollo de una formación para la mejor utilización de un robot manipulador equipado con una cinta transportadora con un sistema actuador de ventosa que simula el proceso de paletizado de cajas. El objetivo principal es crear una herramienta educativa que facilite la enseñanza práctica de la automatización industrial en el ámbito universitario y hacerlo extensivo hacia la comunidad toda. La simulación permite a los estudiantes experimentar con tecnologías actuales, entender los principios de la robótica, automatización y la motivación a seguir profundizando estas capacidades.

Palabras clave: Automatización Educativa, Tecnología de Automatización, Educación en Ingeniería, Integración de Sistemas.

Abstract

In this study we address the development of training for the best use of a manipulator robot equipped with a conveyor belt with a suction cup actuator system that simulates the box palletizing process. The main objective is to create an educational tool that facilitates the practical teaching of industrial automation in the university environment and extend it to the entire community. Simulation allows students to experiment with current technologies, understand the principles of robotics, automation and the motivation to continue deepening these capabilities.

Keywords: Educational Automation, Automation Technology, Engineering Education, Systems Integration.

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 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).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

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".
Desde este puesto de vista es que nos interesa desarrollar un proceso de paletizado para el manejo, distribución y almacenamiento de productos. Automatizar este proceso con robots manipuladores permite cumplir los objetivos citados anteriormente.
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".
Entonces, cumpliendo los objetivos y tratando de formar a docentes y alumnos con el desarrollo de un sistema práctico que simula el paletizado de cajas utilizando un robot manipulador marca (ABB IRB120) con una cinta transportadora, un sistema de ventosa neumática por vacío y facilidades que simulan la paquetería y paletizado.

2. Objetivo

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, los siguientes hitos:

1. **Diseñar y Construir un Prototipo Funcional:** Desarrollar un sistema que simule de manera efectiva el proceso de paletizado, incorporando un robot manipulador ABB IRB120, una cinta transportadora y un sistema de ventosa neumática.
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.
3. **Integrar la Cinta Transportadora y el Sistema de Ventosa neumática:** Asegurar el funcionamiento sin problemas de la cinta y el sistema de ventosa para facilitar el movimiento y manejo de las cajas dentro de la simulación.
4. **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 de trabajo de alumnos.

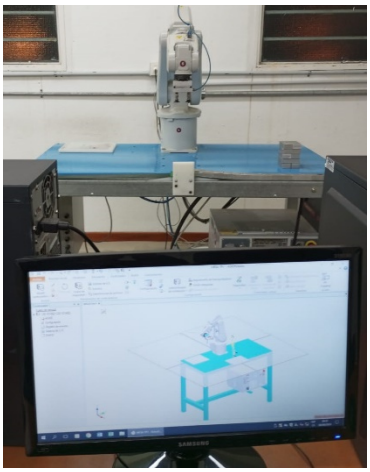


Figura 1. Visualización del equipamiento físico y su respectivo homólogo en el simulador.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025



Figura 2. Mesa donde se realiza la simulación de paletizado.

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.

3. Desarrollo

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 solo 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 de paletizado. Este robot fue equipado con un sistema de ventosa neumáticas para sujetar y colocar las cajas (bloques de aluminio) de manera segura. La cinta transportadora es utilizada para trasladar las cajas desde el área de simulación productiva hasta el punto de carga, y luego el manipulador toma sujetando el paquete y llevándolo a la estación de paletizado. Se utilizó un motor paso a paso para accionar la cinta, y la correa se desliza sobre una guía metálica; en un extremo posee el rodillo impulsor y en el otro un rodillo de guía para asegurar un movimiento suave de las cajas. El sistema de ventosa es utilizado para sujetar las cajas durante el traslado. 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 incluye secuencias de movimientos para recoger las cajas de la cinta transportadora, trasladarlas a la posición de paletizado y colocarlas en la ubicación correcta. Las pruebas exhaustivas del sistema completo se realizaron para verificar su funcionamiento. Durante las pruebas, se realizaron ajustes y calibraciones para mejorar la precisión del robot y el rendimiento de la cintra transportadora. 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.
En nuestro desarrollo para mantenerlo en el tiempo, el mayor obstáculo es como realizar la transferencia a diferentes alumnos líderes que se mantengan en los proyectos de investigación con la utilización de estas tecnologías. Si bien no es un inconveniente mayor, si hay que plantearlo con la incorporación de nuevos alumnos avanzados con una inducción básica para que dominen los trabajos prácticos existentes y creen nuevos año a año.
El proceso se desarrolla en pc simulando todo el desarrollo y luego se prueba en tiempo real sobre la maqueta y en todas las velocidades del manipulador para demostrar la robustez y solidez del desarrollo en todas sus etapas y la precisión de este. Como se muestra en las Figura 3.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025



Figura 3. Muestra de un punto intermedio de la simulación.

La programación se realizó utilizando el manual del operador robot studio (AB, 2011) y el programa RobotStudio el cual permite controlar el manipulador para realizar los distintos proyectos que se deseen realizar. El objetivo principal de este software es gestionar el movimiento del robot para cargar y descargar piezas en un entorno de paletización. La programación define varias posiciones y procedimientos como se puede visualizar en las figuras 4 y 5.

```
MODULE MainModule
TASK PERS tooldata tool2:=[TRUE,[[0,0,88],[1,0,0,0]],[1,[0,0,25],[1,0,0,0],0,0,0]];
CONST robtarget precarga:=[[553.69,-0.73,57.21],[0.00197836,-0.707878,0.706294,-0.0073086],[0,-1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget predescarga:=[[-28.21,-458.79,265.42],[0.00410881,-0.0236719,-0.999605,0.0145667],[-2,-1,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget CargaPalet1:=[[-80.08,-531.50,249.97],[0.0034545,0.707048,0.707149,0.0034526],[0,-1,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget CargaPalet1girado:=[[-80.08,-531.50,249.99],[0.00490723,-0.00103088,0.999987,1.4128E-05],[-1,0,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
 VAR num caja:=0;
 VAR num capa:=0;
 VAR num altura:=0;


 PROC main()
paletizado;
 ENDPROC
 PROC paletizado()
contadordecajas;
marchacinta;
carga;
succionON;
posicioncarga;
descarga;
succionOFF;
 movej predescarga ,v5000,fine,tool2;

 ENDPROC
PROC marchacinta ()
 setdo q2,1;
 setdo q1,1;
 WaitTime 1;
 setdo q1,0;
ENDPROC
```

Figura 4. Primera parte el código.

```
PROC succionON ()
 setdo q0,1;
 WaitTime 0.5;
ENDPROC
PROC succionOFF ()
 setdo q0,0;
 WaitTime 0.5;
ENDPROC
PROC carga ()
 movej precarga ,v5000,fine,tool2;
 movej Offs (precarga,0,0,-43.94), v5000,fine,tool2;
ENDPROC
PROC posicioncarga ()
 movej precarga ,v5000,fine,tool2;
 movej predescarga ,v5000,fine,tool2;
ENDPROC
PROC descarga ()
   IF capa=1 then
          altura:=0;
          descargaimpar;
      ENDIF
      IF capa=3 then
          altura:=40;
          descargaimpar;
      ENDIF
      IF capa=2 then
          altura:=20;
          descargapar;
      ENDIF
      IF capa=4 then
          altura:=60;
```

Figura 5. Segunda parte del código.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El código define posiciones clave (`robtarget`) que define puntos específicos que nos permite realizar ciertos movimientos tantos en ese punto como en otro lugar con la función offset, que especifican dónde el robot debe moverse para cargar y descargar piezas. Además, se configura la herramienta utilizada por el robot con `tooldata` que en este caso es la ventosa neumática. Las variables como `caja`, `capa` y `altura` determinan la posición y el estado durante el proceso.
El procedimiento `main()` gestiona el flujo del robot, comenzando con un contador de cajas, el cual al pasar por un punto incrementa una unidad; por otro lado contamos con la marcha de cinta que realiza el encendido y movimiento de las piezas al punto de carga. Otras funciones importantes son las de succión donde uno activa las señales digitales para dar energía a la electroválvula y la otra des energiza el sistema permitiendo a la ventosa actuar de forma eficiente.
Al finalizar el trabajo practico a los alumnos se les pide por grupo de nomas de 3 personas la modificación de varios parámetros de ubicación, punto de carga y cantidad de objetos, a fin que identifique los bloques de programación, los interprete, los comprenda para fijar los conceptos básicos del manejo de la simulación en pc, la transferencia del programa al manipulador y la ejecución del manipulador y actuadores en modo manual de operación y posterior puesta en automático a velocidades de trabajo.
Este modo de evaluación en función de la asistencia en mayor o menor grado por parte de los docentes nos evidencia si los alumnos han fijado bien los conceptos caso contrario se vuelve a pedir nuevas modificaciones sobre el mismo trabajo practico hasta llegar a la interpretación de los conceptos sin la necesidad de la asistencia del docente.
Al final del curso también se realiza una pequeña encuesta con preguntas direccionadas a los temas conceptuales de la formación y una segunda parte orientada a la satisfacción o no del desempeño del docente en claridad de los conceptos, asistencia al alumno y predisposición a la información del curso. Estas encuestas se evalúan con el fin de mejorar las capacitaciones del año siguiente.
Finalizando el desarrollo hemos obtenidos una maqueta que simula un prototipo funcional, programación del robot e integrando el sistema, al mismo tiempo que se desarrolló toda la documentación teórica tanto para el docente como para el alumno. De esta forma, cumpliendo con los objetivos propuestos y motivando al aprendizaje de estas competencias.

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, sino que también refuerza la comprensión de los conceptos teóricos de la automatización y la robótica. Promoviendo un aprendizaje más efectivo y aplicado. Este enfoque educativo y práctico contribuye significativamente a la formación de futuros profesionales en el campo de la automatización industrial. Tal como lo citan estos autores en sus respectivas biografías (Martinez & Rodriguez Pesce, 2017) (Santillán Mariño, Montalvo Jaramillo, & López Ortiz, 2017).
La concreción de este trabajo da pie para desarrollar varios proyectos más, los cuales se desarrollan para sumar más trabajos prácticos, donde el brazo manipulador se integra con diferentes actuadores, con el fin de representar, simular la mayor cantidad de alternativas diferentes para situaciones reales de la industria.
Haciendo fuerte hincapié en cumplir con los objetivos propuestos y motivando al aprendizaje de estas competencias.

Referencias bibliográficas

Llopis, R. S., Romero Pérez, J. A., & Ariño Latorre, C. V. (2010). Automatización Industrial. Castelló de la Plana: Col·lecció Sapientia, 31.
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.
AB, A. (2011). Manual del operador robot studio. Obtenido de https://library.e.abb.com/public/6aeb483836740e11c1257b4b0052375b/3HAC032104-005_revE_es.pdf
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.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Adaptación de la evaluación de un Trabajo Práctico de Física Eléctrica: de informe escrito a cuestionario en plataforma

Adaptation of the Evaluation of an Electric Physics Practical Work: from Written Report to Platform-Based Questionnaire

Presentación 18/10/2024

Victoria Flores

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: vflores@frsf.utn.edu.ar

Resumen

Se presenta la adaptación de un Trabajo Práctico en la asignatura Física II de la Facultad Regional Santa Fe de la UTN, orientado a mejorar la objetividad y estandarización de las evaluaciones mediante el uso de software específico. El estudio analiza el comportamiento del campo eléctrico en una distribución lineal de carga finita, permitiendo a los estudiantes interactuar con el software, y luego contestar un cuestionario de opción múltiple asociado al experimento. La metodología incluye la creación de un banco de preguntas interactivas, evaluaciones automatizadas y material de apoyo. Los resultados muestran que las distribuciones obtenidas son coherentes con las expectativas iniciales. Se describe en este trabajo el uso y la configuración del software para el fenómeno estudiado, las etapas del desarrollo del trabajo práctico, los problemas surgidos en la implementación y las soluciones obtenidas.

Palabras clave: Evaluación formativa; Campo Eléctrico; Software educativo; Trabajo Práctico; Enseñanza de la Física.

Abstract

This paper presents the adaptation of a Practical Work in the subject Physics II at the Santa Fe Regional Faculty of UTN, aimed at improving the objectivity and standardization of evaluations through the use of specific software. The study analyzes the behavior of the electric field in a finite linear charge distribution, allowing students to interact with the software and then answer a multiple-choice questionnaire associated with the experiment. The methodology includes the creation of an interactive question bank, automated assessments, and support material. The results show that the obtained distributions are consistent with the initial expectations. This work describes the use and configuration of the software for the studied phenomenon, the stages of the development of the practical work, the problems encountered during implementation, and the solutions obtained for each case.

Keywords: Formative Assessment; Electric Field; Educational Software; Practical Work; Physics Education

1. Introducción

En la actualidad, las planificaciones de cátedra para la asignatura Física II en la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional (FRSF-UTN) facilitan a los estudiantes la posibilidad de obtener una Aprobación Directa mediante la acumulación de méritos a lo largo del año académico. Al cumplir con los requisitos establecidos para esta modalidad, los estudiantes pueden aprobar el curso sin necesidad de presentar el examen final globalizador. En caso contrario, si no se alcanzan los criterios necesarios para la Aprobación Directa, los estudiantes deben optar por la modalidad de Aprobación de Cursado para acceder al examen final.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Para acceder a cualquiera de estas modalidades de aprobación, los estudiantes deben cumplir con diferentes tareas asignadas durante el cursado, entre ellas se incluyen Evaluaciones de Seguimiento (ES), Trabajos Prácticos de Laboratorio (TP) y Exámenes Parciales (EP). La calificación requerida para la Aprobación Directa es superior a la necesaria para la Aprobación de Cursado, dado que esta última opción no exime al estudiante del examen final globalizador. Dichas evaluaciones cumplen una función formativa y sumativa, y permiten un análisis integral del desempeño del estudiante a lo largo del curso.

Los instrumentos de evaluación son herramientas que se utilizan para recopilar datos sobre el rendimiento de los alumnos. Estos formatos de registro, diseñados con características específicas basadas en criterios e indicadores, tienen como objetivo principal evaluar el proceso de aprendizaje y describir los objetivos evaluativos mediante indicadores precisos (Mereño Almaguer, Lorente Rodríguez y Maribona, 2011). La evaluación continua de estos instrumentos, basados en competencias, exige una formación constante y la revisión de nuevas contribuciones, incluyendo metodologías activas y el desarrollo de competencias en el uso de herramientas informáticas. El reto consiste en transformar la evaluación para que los estudiantes se desempeñen como actores principales en su propio proceso educativo, siendo el docente un acompañante en este proceso. Esto también implica fomentar el autoaprendizaje y la investigación, así como la implementación de tareas encomendadas al estudiante para su desarrollo independiente.

Este documento expone la adaptación de un TP en los cursos de Física II de la FRSF-UTN, con el objetivo estandarizar las evaluaciones, así como analizar estadísticamente la efectividad de las herramientas de evaluación aplicadas. En un contexto de transición hacia metodologías de enseñanza basadas en competencias, conforme a las directrices del Ministerio de Educación y los lineamientos del CONFEDI (2018), se busca optimizar la calidad de la evaluación formativa y el aprendizaje de los estudiantes. La implementación de cuestionarios interactivos y herramientas tecnológicas tiene como meta ofrecer una evaluación más precisa y coherente con los objetivos pedagógicos y los estándares de calidad educativa (ISO 21001:2018). Este enfoque no solo pretende estandarizar y objetivar la evaluación, sino también alinear los procesos evaluativos con las mejores prácticas educativas actuales.

2. Metodología

2.1 Revisión de material y propuesta

La planificación de cátedra de la asignatura Física II requiere para el acceso al parcial, la confección de nueve TPs, donde se desarrollan informes sobre las actividades de laboratorio respectivas, tras aprobar el 75% de los informes de actividades, siendo la nota mínima de 75% para la aprobación directa y del 60% para la aprobación del cursado. Y teniendo una segunda instancia de corrección por cada trabajo entregado

El tercer TP de la planificación se desarrolla con el uso de un software especializado (figura 1), disponible en https://fiq.unl.edu.ar/galileo/software.htm , diseñado para analizar el comportamiento del campo eléctrico en una distribución lineal de carga finita. Los objetivos principales del uso de este software son:

- Estudio del Campo y Potencial Eléctrico: Analizar el campo y el potencial eléctrico de un hilo recto de longitud finita, no conductor, situado en el vacío y sin la presencia de materiales conductores o dieléctricos, con una densidad lineal homogénea de carga (λ C/m).
- Simulación por computadora: Permitir a los estudiantes experimentar con diferentes configuraciones del sistema a través de simulaciones por ordenador.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

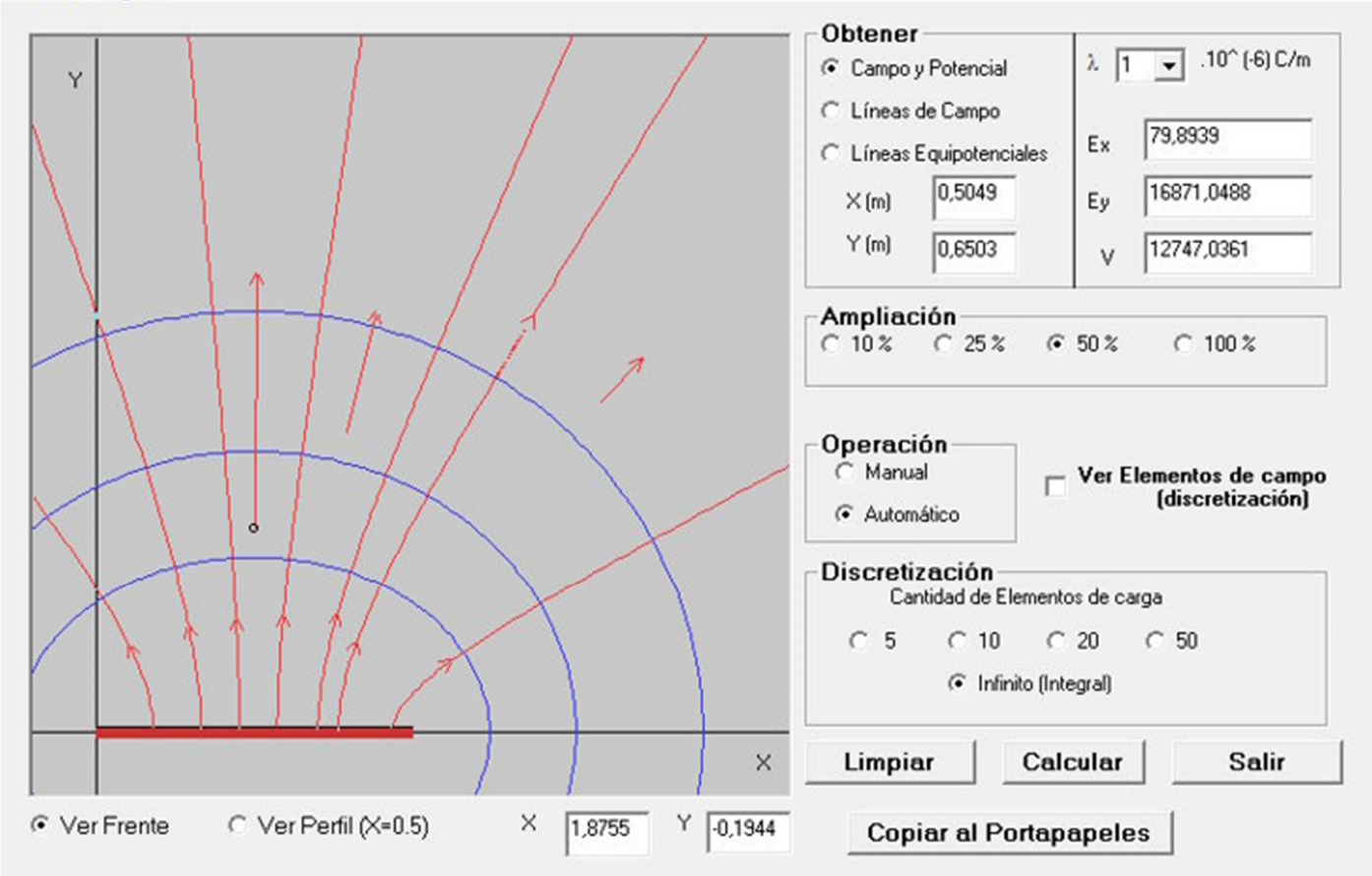


Figura 1. Interfaz software, línea de carga, líneas de campo y líneas equipotenciales.

Para mejorar la interacción y el aprendizaje, se ha desarrollado una alternativa a la confección de un informe, una actividad interactiva dentro del Campus Virtual. Esta actividad incluye preguntas de opción múltiple, que los estudiantes deben responder utilizando el software ELQ. La propuesta se desarrolló bajo los siguientes criterios:

- Creación de Preguntas: Se diseñaron preguntas que cubrieron los temas del trabajo de laboratorio, con el objetivo de fomentar el uso del software específico para su resolución. Estas preguntas fueron estructuradas en un formato de opción múltiple
- Definición de plazos de presentación y criterios de corrección: Los estudiantes dispusieron de un plazo de 15 días para completar el cuestionario. Tras el cierre del plazo, se proporcionó la corrección de las respuestas, ofreciendo así una retroalimentación inmediata. Además, se estableció una instancia de recuperación para aquellos estudiantes que necesitaron más tiempo para revisar y mejorar su desempeño.
- Creación de material de Apoyo: Como soporte a los estudiantes, se preparó y distribuyó previamente un archivo con instrucciones sobre el uso del software. Además, se desarrolló un video explicativo que abordó aspectos clave del funcionamiento del software y su aplicación práctica en el cuestionario.
- Variedad y Adaptabilidad: El banco de preguntas fue diseñado con una amplia variabilidad, garantizando que cada estudiante enfrentara un conjunto diverso de preguntas. Se utilizó la función de “comodín” del Campus Virtual para generar ejercicios adicionales, asegurando así una cobertura completa de las actividades prácticas.
- Generación de Preguntas: Se desarrollaron preguntas específicas para cada una de las cuatro actividades del trabajo práctico, garantizando que los estudiantes puedan aplicar el software en contextos diversos y relevantes.

2.2. Método de trabajo

Para la creación del banco de preguntas se formó un grupo de trabajo compuesto por los docentes auxiliares (ayudantes alumnos y graduados). El grupo tuvo como objetivo el desarrollo y estructuración de un repositorio de preguntas que sirviera como herramienta para la evaluación y el aprendizaje de los temas tratados en las actividades originales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- Formación del Grupo de Trabajo: Se conformó un equipo de trabajo integrado por los docentes de la catedra. Este equipo fue responsable de diseñar y organizar el contenido del repositorio de preguntas.
- Creación del Repositorio de Preguntas: Se diseñó un repositorio que incluye preguntas organizadas en torno a los ejes temáticos de las actividades del curso. Las preguntas están estructuradas en categorías y subtemas relevantes para asegurar una cobertura completa de los contenidos (Campo eléctrico, Potencial eléctrico, Líneas de campo equipotenciales, conclusiones)
- Desarrollo de las Preguntas:
    - Teoría y Conceptos Básicos: Se formularon preguntas sobre teoría fundamental, definiciones, y unidades de medida.
    - Leyes y Fórmulas: Se incluyeron preguntas relacionadas con las leyes que rigen el comportamiento de los fenómenos, así como con el desarrollo y la aplicación de fórmulas.
    - Interpretación Gráfica y Cálculos: Se crearon preguntas para evaluar la capacidad de los alumnos en la interpretación gráfica de datos y en la realización de cálculos asociados.
    - Temas Específicos: Se desarrollaron preguntas sobre conceptos específicos como el campo y el potencial eléctrico, abordando tanto puntos cercanos como lejanos, así como la observación de líneas de campo desde diferentes posiciones (frontal y lateral).
- Objetivo de las Preguntas: Las preguntas fueron diseñadas para guiar a los alumnos hacia conclusiones parciales y una comprensión profunda de cada tema. El propósito es facilitar el aprendizaje progresivo y la autoevaluación de los estudiantes a lo largo del curso.

Con el objetivo de orientar y facilitar la comprensión de la actividad y el programa, se llevaron a cabo las siguientes acciones:

Reformulación de la Guía: Se revisó y reformuló la guía original para convertirla en un instructivo sobre el software a utilizar. Este instructivo incluye:

- Instrucciones de descarga
- Instrucciones de uso: Pasos sobre cómo acceder, utilizar y navegar por el software.
- Características del Software: Descripción de las funcionalidades clave y cómo estas pueden facilitar el aprendizaje y la resolución de preguntas.
- Orientación General: Información sobre cómo el software se integra con la actividad y cómo puede ser utilizado para mejorar la comprensión de los temas tratados.

Creación de un Video Explicativo: Se produjo un video que complementa el instructivo escrito. El video incluye:

- Demostración Práctica: Un recorrido visual por el software, mostrando su uso y principales características.
- Guía de Preguntas: Se plantean posibles dudas al momento de la realización de la actividad, cómo abordarlas y qué se espera en las respuestas.
- Consejos de Estrategia: Recomendaciones sobre cómo enfrentarse a las preguntas del cuestionario, qué aspectos considerar y cómo maximizar el aprendizaje a partir del material disponible.

Caracterización de las Preguntas: Se elaboró una sección específica en el video y en el instructivo que detalla:

- Tipo de Preguntas: Explicación del tipo de preguntas que los estudiantes encontrarán (De investigación, interacción con el software, etc.).
- Formato del Cuestionario: Información sobre la estructura del cuestionario, el tiempo asignado y las estrategias para responder eficazmente.

Se realiza una prueba piloto, en ella se hará un estudio estadístico de la media, mediana y desviación estándar para analizar el desempeño del cuestionario, Se espera que exista tanto un valor medio y una dispersión razonable de los niveles registrados (Montgomery, 2004). Una tendencia del valor medio elevado o una concentración de valores, puede significar inconvenientes en el desarrollo de las preguntas del cuestionario.

3. Resultados

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Para este trabajo, se compilan los resultados de evaluación de 280 alumnos, correspondientes a 5 comisiones. Los niveles alcanzados se ordenan y grafican en histograma (Figura 2) y en una distribución (Figura 3)

Tabla 1. Estadísticos.

Estadisticos	Valores
Valor medio	66.2
Mediana	67.0
Desviación estándar	12.4

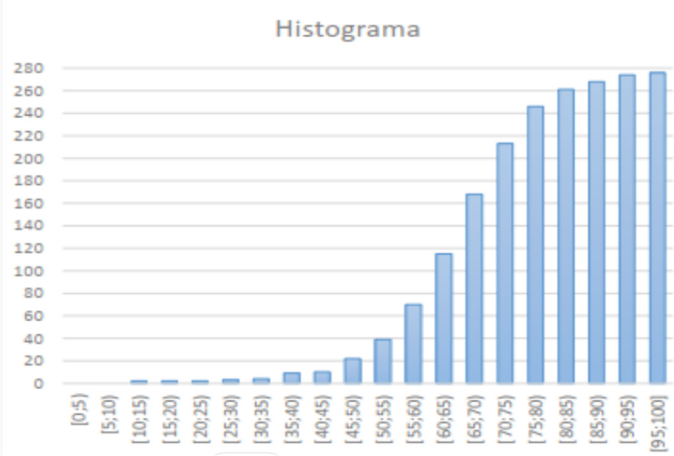


Figura 2. Histograma.

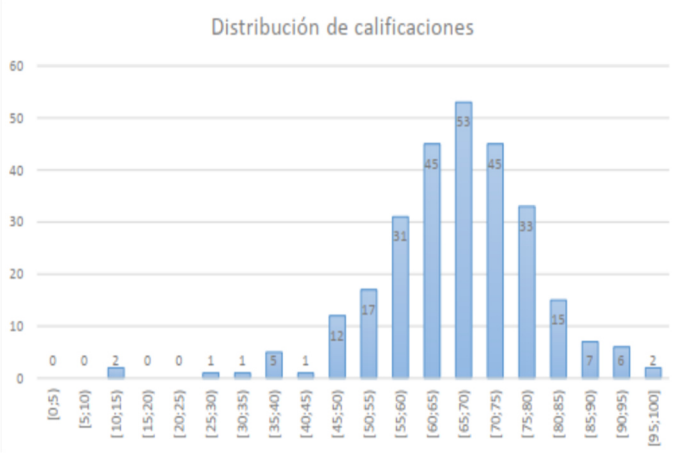


Figura 3. Distribución de calificaciones.

Con un valor medio de 66.2 y una mediana de 67.0, se observa que, en promedio, los alumnos están alcanzando un nivel de rendimiento que se encuentra por debajo del umbral de aprobación directa de 75%. La mediana indica que el 50% no está en condiciones de la aprobación directa pero si de aprobar el cursado
La desviación estándar de 12.4 indica una variabilidad moderada en las calificaciones.
Se identificaron aspectos relevantes que necesitan revisión futura para optimizar las siguientes instancias de evaluación. En primer lugar, se detectaron dos preguntas con errores de un total de 211, una de las cuales correspondía a una pregunta de alta participación, abarcando una sexta parte del conjunto de preguntas. Además, se halló un error de configuración en una de las 25 secciones del cuestionario. Estos inconvenientes generaron cierta preocupación en el cuerpo estudiantil respecto al impacto

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

4. Conclusiones

Las distribuciones obtenidas son acordes a los resultados esperados, lo que confirma la validez del enfoque y la metodología empleada. Durante el análisis se identificaron correcciones menores, así como la necesidad de mejorar la redacción de los enunciados para una mejor comprensión por parte de los participantes, también se observó la necesidad de ampliar las explicaciones de los procedimientos para una mayor claridad y precisión en la resolución de la actividad. En consecuencia, se tomó la decisión de ajustar los niveles de aprobación, disminuyéndolos en 10 puntos para reflejar una evaluación más equitativa.

La experiencia resultó enriquecedora para alumnos y profesores, contribuyó a un aprendizaje más profundo y una mejora continua en la evaluación. Este enfoque promovió una comprensión más efectiva de los contenidos y permitió ajustes en las metodologías de enseñanza, contribuyendo así a un proceso educativo más dinámico y eficiente.

Agradecimientos

Agradezco a Rodrigo Agosta por su guía y contribución en la tarea; a Ignacio Sansevenatti por su ayuda en la carga de preguntas y opiniones sobre el trabajo; y a Matías Orúe por brindarme un espacio adecuado para trabajar y su orientación en la confección del trabajo.

Referencias bibliográficas

Confedi. (2018). Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la república argentina “Libro Rojo de confedi”. Córdoba: Universidad FASTA Ediciones.

Mereño Almaguer, Y., Lorente Rodriguez, A. E., & Maribona, M. G. (2011). Propuesta de instrumentos de evaluación para entornos virtuales de aprendizaje: una experiencia en la universidad de las ciencias informáticas. Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales, 8(15), 1-8.

Mertler, C. A. (2001). Designing scoring rubrics for your classroom. Practical Assessment, Research,and Evaluation: Vol. 7, Article 25..

Montgomery, D. C. (2004). Diseño y análisis de experimentos. (Segunda ed.). Mexico D.F.: Editorial Limusa.

Agosta Rodrigo, G. F. (2023). Análisis estadístico para la valoración de rubricas de evaluación, aplicadas a trabajos prácticos de laboratorio de física en carreras de ingeniería. Estudio preliminar.

Ausubel, D. (1963). The psychology of meaningful verbal learning. Nueva York: Grune & Stratton.

Jorge Mamprín, H. K. (20-24 de Septiembre de 1999). SIMULANDO CAMPOS Y POTENCIALES EN DOS Y TRES DIMENSIONES PARA EL. Memorias de la Décimo Primera Reunión Nacional de Educación en Física, 53-59. Obtenido de https://fiq.unl.edu.ar/galileo/download/documentos/elg.pdf

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	San Nicolás

Integración de recursos tecnológicos en la evaluación formativa a través de Edpuzzle

Integration of technological resources in formative assessment through Edpuzzle

Presentación 18/10/2024

Cecilia Cardoso Dupuy

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Grupo Ingeniería & Educación, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina.

E-mail de contacto: ccardosodupuy@frsn.utn.edu.ar

Resumen

La integración de recursos tecnológicos en la evaluación formativa no solo enriquece el proceso de evaluación, sino que también proporciona la oportunidad de obtener datos adicionales valiosos sobre el aprendizaje de los estudiantes. En este trabajo se utiliza la plataforma Edpuzzle, que facilita la creación de recursos didácticos personalizados a través de videos interactivos que incluyen preguntas, audios e imágenes. La metodología empleada consistió en diseñar un recurso tecnológico para ser utilizado en la evaluación formativa de los estudiantes de la cátedra de Análisis Numérico en la Facultad Regional San Nicolás, durante el aprendizaje de los métodos para resolver numéricamente una integral definida. El objetivo del trabajo es mostrar el proceso de desarrollo y el recurso tecnológico creado. En una segunda etapa, se prevé implementar el recurso diseñado en el proceso de evaluación continua y analizar su influencia sobre el nivel de comprensión alcanzado por los estudiantes.

Palabras clave: Recursos tecnológicos, Edpuzzle, Evaluación formativa, Análisis Numérico, Integración numérica.

Abstract

Integrating technological resources into formative assessment not only enriches the assessment process, but also provides the opportunity to obtain valuable additional data about student learning. In this work, the Edpuzzle platform is used, which facilitates the creation of personalized teaching resources through interactive videos that include questions, audio, and images. The methodology involved designing a technological resource to be used in the formative assessment of students in the Numerical Analysis course at the Facultad Regional San Nicolás, during the learning of the methods that allow numerically solving a defined integral. The aim of this work is to present the development process and the technological resource created. In a second phase, the designed resource is expected to be implemented in the continuous assessment process and its influence on the level of understanding achieved by the students will be analyzed.

Keywords: technological resources, Edpuzzle, formative assessment, Numerical Analysis, numerical integration.

1. Introducción

La evaluación es un pilar fundamental para garantizar la calidad de la formación educativa. A través de ella, se puede determinar, por ejemplo, el nivel de comprensión alcanzado por los estudiantes, el grado de desarrollo de ciertas habilidades u obtener información sobre la efectividad de las estrategias de enseñanza utilizadas por los docentes. La evaluación no solo mide el aprendizaje, sino que también actúa como una herramienta esencial para mejorar el proceso educativo (Didier, 2018).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Un gran desafío que se presenta en la actualidad, debido a los cambios y transformaciones constantes que ocurren en la educación, es repensar la evaluación como un sistema que trascienda las cuestiones conceptuales o las puntuaciones obtenidas por los estudiantes. En este contexto, la incorporación de recursos tecnológicos constituye un aliado poderoso (Leyva López et al, 2018). No obstante, a pesar de las ventajas que ofrecen, su uso en la evaluación de los estudiantes sigue siendo limitado debido a que las estrategias evaluativas tradicionales continúan siendo predominantes.

Diversos autores destacan que el uso de recursos tecnológicos, en los distintos tipos de evaluación, es de gran importancia, ya que enriquece el proceso evaluativo y proporciona datos relevantes sobre diversos aspectos implicados en este proceso, Además, incrementa la motivación de los estudiantes al proporcionar experiencias de evaluación más dinámicas e interactivas y genera cambios significativos en los roles tanto de los alumnos como de los docentes (Rodríguez Wong et al., 2022).

El objetivo principal de este trabajo es presentar el proceso de elaboración y el recurso tecnológico desarrollado con Edpuzzle para ser empleado durante el proceso de evaluación formativa de los estudiantes de la cátedra de Análisis Numérico de la Facultad Regional San Nicolás.

2. Metodología

2.1 Evaluación formativa de los aprendizajes mediante Edpuzzle

La evaluación formativa es un enfoque educativo que mejora continuamente el proceso de aprendizaje, permitiendo a los docentes conocer cómo están aprendiendo los estudiantes. Esto les ayuda a adaptar las estrategias y recursos para maximizar el logro académico, identificando y abordando sus necesidades de manera constante (Valenzuela et al., 2021). Se implementa a lo largo del proceso educativo, proporcionando retroalimentación que permite proponer medidas individuales para guiar a estudiantes y docentes hacia la mejora de resultados y el desarrollo de habilidades (Cabrera, 2023).

La plataforma educativa Edpuzzle facilita a los docentes la organización de contenido de manera didáctica y efectiva, permitiendo enriquecer videos con audios, imágenes, comentarios y preguntas estratégicas. Su uso tiene un impacto positivo en el logro académico en cursos de evaluación y medición, destacando su efectividad en la mejora de la comprensión y retención de contenidos (Sulak et al., 2022). Edpuzzle también permite adaptar los videos a las necesidades específicas de los estudiantes, creando un entorno de aprendizaje más personalizado (Rodríguez Palacios, 2020). Esto fomenta un aprendizaje más autónomo y significativo al permitir que los estudiantes avancen a su propio ritmo.

Además, Edpuzzle es una herramienta valiosa para los docentes, ya que les permite supervisar y evaluar el progreso de los estudiantes durante el aprendizaje. Al observar cómo interactúan con el contenido, se pueden identificar áreas de dificultad y ajustar las estrategias de enseñanza en consecuencia. Esta forma de evaluación formativa facilita la detección y corrección inmediata de errores, haciendo que la enseñanza sea más atractiva y efectiva (Sulak et al., 2022).

2.2. Recurso tecnológico diseñado

Para evaluar a los alumnos durante el proceso de aprendizaje de los métodos que permiten resolver numéricamente una integral definida, se confeccionó un video, intervenido con preguntas cerradas.

El video elaborado está constituido por diez actividades donde el estudiante, a partir de la información proporcionada por las gráficas, tablas o animaciones, debe seleccionar la opción correcta. Cabe destacar que, cada una de las situaciones propuestas fueron seleccionadas teniendo en cuenta las cuestiones conceptuales que se quieren destacar o profundizar en el tema. A modo de ejemplo, en la Figura 1, se muestra una de esas situaciones.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

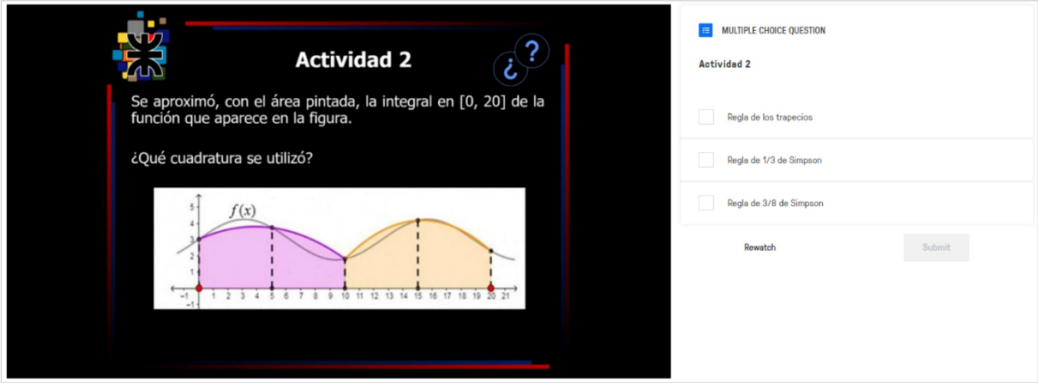


Figura 1. Actividad propuesta en la evaluación formativa.

2.3. Proceso de elaboración e información brindada por el recurso tecnológico

Para poder utilizar Edpuzzle, es necesario estar asociado a una institución educativa, lo que significa que sólo aquellos con autorización pueden obtener una cuenta de profesor. Este requisito garantiza que la plataforma se utilice en un entorno educativo controlado, protegiendo tanto el contenido como la privacidad de los estudiantes.

Una vez que se accede a la cuenta de Edpuzzle, se selecciona **Añadir contenido** en la parte superior derecha de la página. Como se muestra en la Figura 2, el siguiente paso es elegir entre **Explorar nuevo contenido** o **Subir video**, dependiendo si se desea trabajar con un video existente en YouTube, en Edpuzzle o uno que ya se tenga en la computadora.

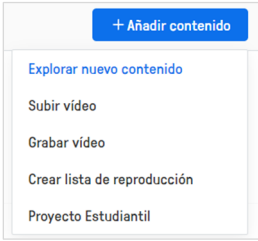


Figura 2. Subida de video.

Una vez que se ha seleccionado y subido el video a la plataforma, se procede a realizar todas las modificaciones correspondientes. Para ello, se hace clic en la opción **Editar** que se encuentra en la parte superior derecha de la ventana.

Algunas de las opciones disponibles en esta sección, serán las herramientas para recortar el video, añadir una voz en off y/o incorporar preguntas, comentarios y notas. En el caso del video de integración numérica, tal como se observa en la Figura 3, se incluyeron preguntas de opción múltiple para evaluar el grado de comprensión de los conceptos que se hallan involucrados en el tema.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

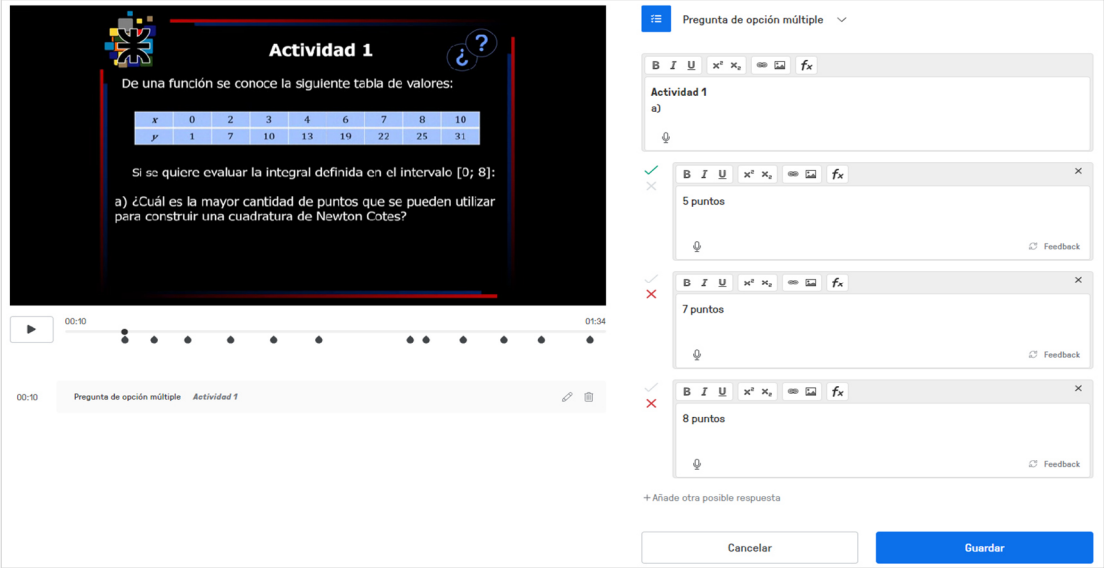


Figura 3. Video con intervenciones.

Es importante mencionar que Edpuzzle cuenta con un generador de preguntas que puede ayudar a los docentes a crear evaluaciones rápidamente. Sin embargo, este generador sólo ofrece preguntas preexistentes, es decir, preguntas que han sido creadas por otros usuarios y que están disponibles en videos públicos. Esto puede ser útil como punto de partida, pero es recomendable que los docentes personalicen las preguntas para alinearlas mejor con sus objetivos educativos específicos.

Un aspecto para destacar de la plataforma es la posibilidad de incluir retroalimentación junto con las respuestas. Esto es crucial para evitar que se generen malentendidos o confusión entre los estudiantes al seleccionar una opción incorrecta.

Edpuzzle ofrece también configuraciones que permiten controlar el flujo de visualización del video. Como se muestra en la Figura 4, se puede impedir que los alumnos se salten partes del video, lo cual es útil para asegurarse de que revisen todo el contenido antes de responder a las preguntas. Asimismo, se puede configurar para que los estudiantes solo puedan completar la actividad una vez y durante un tiempo predeterminado, lo que resulta particularmente práctico para aplicar en exámenes o evaluaciones formales.

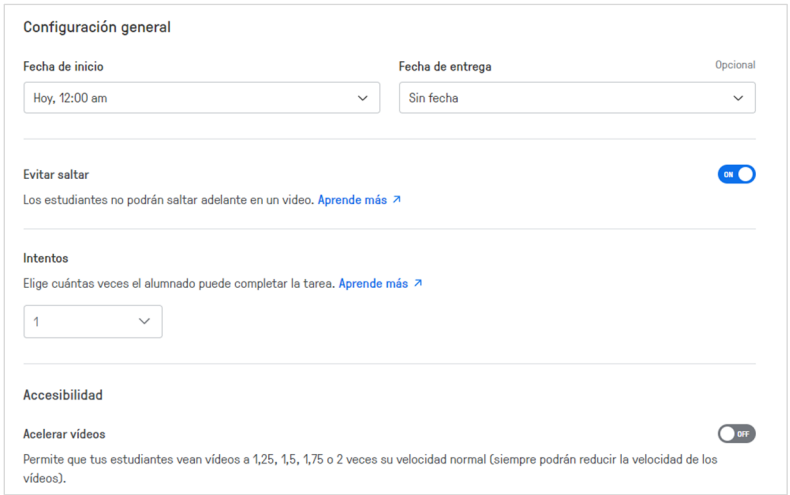


Figura 4. Configuración general de Edpuzzle.

Una vez que se implementa el instrumento de evaluación, en el caso de las preguntas de opción múltiple, la plataforma facilita enormemente el proceso de corrección ya que se realiza de forma automática basándose en las respuestas seleccionadas. En cambio, si las preguntas son abiertas, aunque la plataforma permite incluir una respuesta correcta como referencia, la corrección debe ser realizada manualmente por el docente. Este proceso, aunque más laborioso, ofrece la oportunidad de proporcionar una retroalimentación más detallada y personalizada, ayudando a los estudiantes a entender mejor sus errores y a mejorar en futuros ejercicios.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Edpuzzle genera un informe detallado indicando la nota obtenida por el estudiante, la cantidad de intentos permitidos, la fecha que vio por última vez el video y la fecha de entrega de la instancia evaluativa. A modo de ejemplo, en la Figura 5, se muestra un posible informe generado por la plataforma.

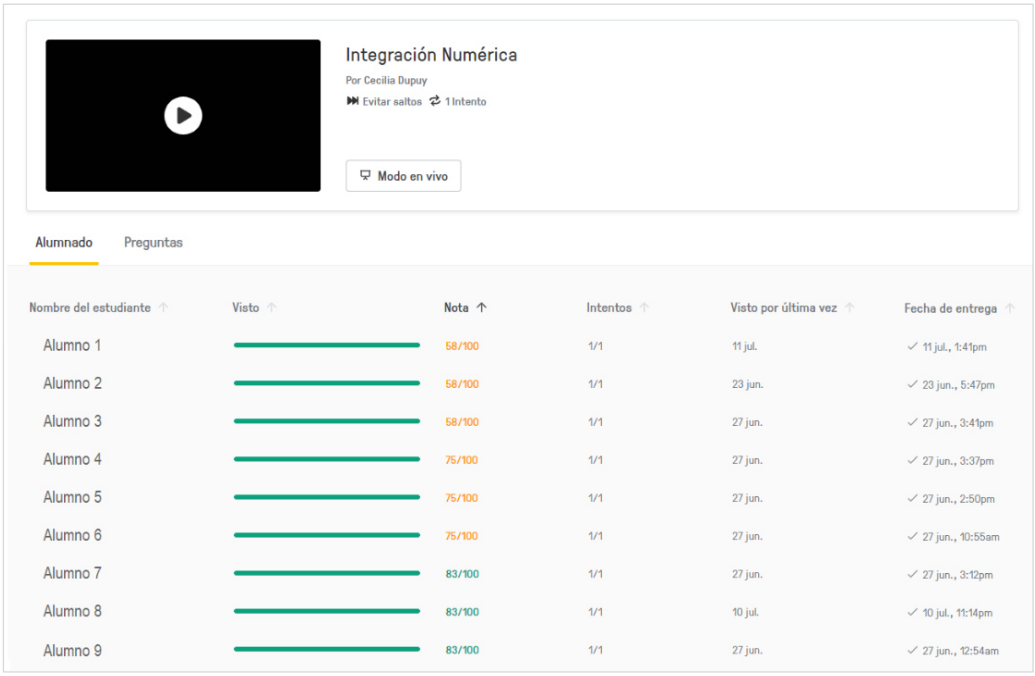


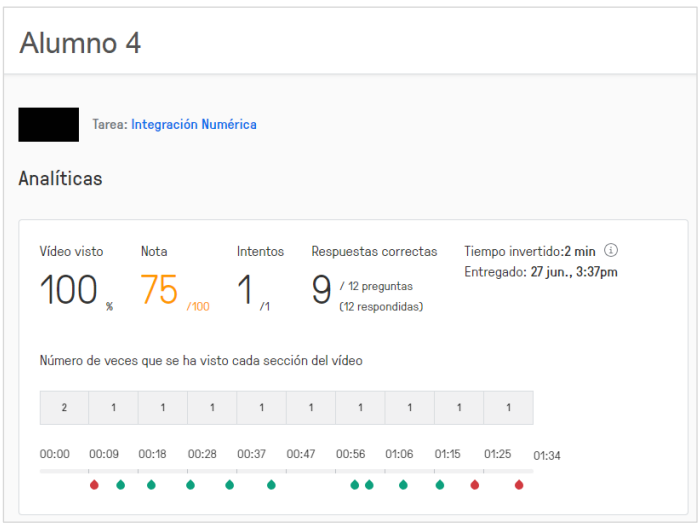
Figura 5. Informe elaborado por Edpuzzle.

Como se puede observar, al lado de los nombres de los estudiantes aparece una barra cuyo color indica en qué porcentaje el video fue visto por el alumno. La Tabla 1 muestra, según el color de la barra, el porcentaje de visualización.

Tabla 1. Porcentaje de visualización según el color de la barra.

Color	Porcentaje de visualización
Rojo	[0 , 50 [
Amarillo	[50 , 80 [
Verde	[80 , 100]

Si se desea obtener más información de un alumno en particular, sólo basta con seleccionarlo y, de esta forma, aparecerá el informe que se presenta en la Figura 6. Así, será posible conocer el número de veces que observó cada una de las partes del video, el tiempo empleado y la cantidad de preguntas que respondió bien o mal.



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Figura 6. Informe de un alumno en particular.

También es posible obtener un resumen general de las respuestas dadas por los estudiantes y así tener una visión detallada de la dificultad que tuvieron los alumnos al completar el video. Esto permite identificar preguntas que podrían haber sido especialmente desafiantes o conceptos que necesitan ser reforzados. Para ello, es necesario hacer clic en la opción Preguntas.

Los recursos diseñados con Edpuzzle pueden ser integrados a plataformas estudiantiles utilizadas, por ejemplo, Moodle. La elección de la plataforma determina el proceso a seguir, ya que cada una tiene sus propias características y requerimientos técnicos. No obstante, Edpuzzle proporciona guías detalladas que facilitan la integración del contenido en diversas plataformas, asegurando que los videos modificados se suban correctamente y mantengan su interactividad.

Para que los estudiantes puedan acceder al recuro, sólo tienen que ingresar a la sección correspondiente en la plataforma educativa. No es necesario que inicien sesión en Edpuzzle, ya que sus datos se integran automáticamente al sistema. Al reproducir el video, se aplican las configuraciones previamente establecidas.

3. Conclusiones

La incorporación de recursos tecnológicos, como los generados a través de la plataforma Edpuzzle, representa un avance significativo en la evaluación formativa. Como se ha demostrado en este trabajo, es posible desarrollar herramientas de evaluación que se ajusten a las necesidades individuales de los estudiantes, permitiéndoles avanzar a su propio ritmo y recibir retroalimentación inmediata sobre sus respuestas. Esto no solo facilita la comprensión de conceptos complejos, sino que también incrementa la motivación de los estudiantes al crear entornos de aprendizaje más dinámicos.

Además, la capacidad de generar informes detallados sobre el desempeño de los estudiantes ofrece a los docentes una herramienta valiosa para identificar rápidamente errores comunes y dificultades recurrentes. Esta información permite ajustar las estrategias de enseñanza de manera oportuna, garantizando que todos los estudiantes alcancen los objetivos de aprendizaje establecidos.

En vista de lo anterior, es fundamental que los docentes continúen explorando e incorporando estas innovaciones para mejorar continuamente la experiencia educativa y los resultados de aprendizaje. Solo así se podrá contribuir a una formación más adecuada para los estudiantes, que les permita enfrentar los desafíos que se le presenten con una base sólida de conocimientos y habilidades.

En una segunda etapa, se prevé implementar el recurso diseñado en el proceso de evaluación continua y analizar su influencia sobre el nivel de comprensión alcanzado por los estudiantes.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a la Lic. Lorena Laugero, quien me proporcionó la idea para este informe y ofreció su invaluable ayuda en la presentación final. Su orientación y apoyo fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas

Cabrera, R. (28 de julio de 2023). La evaluación formativa como aprendizaje de calidad. Red Educa. https://www.rededuca.net/blog/educacion-y-docencia/evaluacion-formativa-aprendizaje-calidad.
Didier, S. (2018). Las TIC y el Docente de Educación Superior. XX Encuentro Internacional Virtual Educa Argentina 2018. https://encuentros.virtualeduca.red/storage/ponencias/argentina2018/sYKjxv9QomyeZ6PXKgdPBfu33d6neyNDRyGUdyfJ.pdf.
Leyva López, H., Pérez Vera, M. & Pérez Vera, S. (2018). Google Forms en la evaluación diagnóstica como apoyo en las actividades docentes. Caso con estudiantes de la Licenciatura en Turismo. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo, 9 (17). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498160178004.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Rodríguez Palacios, E. (1 de septiembre de 2020). Dominio de herramientas digitales, clave para una mejor docencia. Vida Universitaria. https://vidauniversitaria.uanl.mx/expertos/dominio-de-herramientas-digitales-clave-para-una-mejor-docencia/

Rodríguez Wong, C., Proaño Cobos, M., Albán Guijarro, M. & Segarra Mendoza, R. (2022). Las TIC como herramientas de evaluación de contenidos curriculares para los institutos superiores técnicos y tecnológicos. Revista Minerva, 3 (5). https://revistas.ug.edu.ec/index.php/minerva/article/view/1732.

Sulak, S., Akdogdu, E., Demir, M.C., & Aksu-Dünya, B. (2022). Impact of Edpuzzle Use on the Assessment and Measurement Course Achievement. HAYEF: Journal of Education, 19 (1), 52 – 60. https://www.hayefjournal.org/en/impact-of-edpuzzle-use-on-the-assessment-and-measurement-course-achievement-16999.

Valenzuela, P., Gatica, F., Cayumán, C., & Henríquez, C. (2021). Evaluación formativa: Una oportunidad para transformar la educación en tiempos de pandemia. Reflexión a partir de los resultados del estudio cualitativo sobre perspectivas docentes en torno a la evaluación formativa. Laboratorio Latinoamericano de Evaluación de la Calidad de la Educación (LLECE), OREALC/UNESCO Santiago. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378045#:~:text=La%20evaluaci%C3%B3n%20formativa%20refiere%20al,el%20logro%20de%20los%20estudiantes

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Simulación de planta en ARDUINO para control con PLC en la enseñanza de la ingeniería

Arduino-based plant simulation for PLC control in engineering education

Presentación 18/10/2024

Agustín Goldaraz

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: agusgoldaraz@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta la simulación de sistemas físicos reales utilizando modelos matemáticos en un Arduino. El control del proceso se logra mediante un PLC que envía señales de comando a las entradas digitales del Arduino y recibe la respuesta de la planta desde sus salidas. Este sistema es una herramienta didáctica para enseñar modelado matemático, control de procesos con lazos retroalimentados, y programación de sistemas de control. En particular, se aborda la simulación de un sistema de control basado en la función de transferencia para el llenado y vaciado de un tanque de agua, obteniendo curvas representativas para diferentes escenarios. También se simula la interacción en tiempo real del tanque con los comandos de entrada del PLC y se muestra de que forma reacciona el tanque a los diferentes comandos. Además, este enfoque puede extenderse a otros fenómenos físicos.

Palabras clave: Función Transferencia; Programación PLC; Simulación, Sistemas de control

Abstract

This work presents the simulation of real physical systems using mathematical models on an Arduino. The process control is achieved through a PLC that sends command signals to the Arduino's digital inputs and receives the plant's response from its outputs. This system is a teaching tool for demonstrating mathematical modeling, process control with feedback loops, and control systems programming. Specifically, it addresses the simulation of a control system based on the transfer function for filling and emptying a water tank, obtaining representative curves for different scenarios. It also simulates the real-time interaction of the tank with the PLC's input commands and shows how the tank reacts to various commands. Additionally, this approach can be extended to other physical phenomena.

Keywords: Transfer Function; PLC Programming; Simulation, Control Systems.

1. Introducción

Para representar ciertas plantas de diferentes sistemas de control en la enseñanza de la ingeniería, de forma didáctica y sin la necesidad de crear costosas maquetas, se planteó el diseño de plantas digitales que simulan los mismos efectos que en la vida real mediante gráficos didácticos. Para dicha propuesta, se empleó el kit didáctico "Equipamiento didáctico para la introducción a la digitalización de procesos en vías a la Industria 4.0" (Quispe & Zaghis, 2022) realizado por el laboratorio de investigación por la enseñanza en la ingeniería (GIEDI), que consta de una valija en cuyo interior se encuentra un PLC, la misma se muestra en la Figura 1. El trabajo consta de la realización de diversas plantas físicas simuladas mediante modelos matemáticos, a través de la valija PLC y utilizando un Arduino UNO para simular la planta, aprovechando la compilación de datos de este en el software Microsoft Excel por medio de Data Streamer.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025



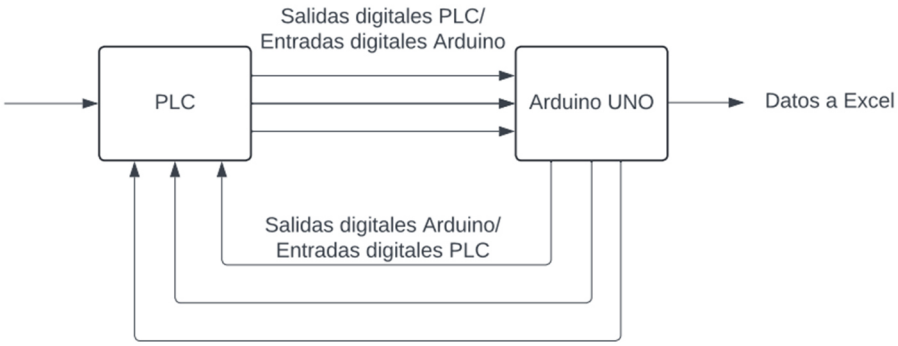
Figura 1. Modelo 3D del Equipo Valija PLC.

La problemática principal se encuentra en que realizar maquetas de sistemas físicos representa complejidades tanto de diseño, como de almacenamiento. Además, existen grandes limitaciones por los costos de adquisición de componentes, servicios relacionados a la ejecución y costos de mantenimiento y operación.

Este trabajo presenta el proceso de investigación y selección de los sistemas más apropiados para la aplicación de un Arduino como simulador de una planta. Por ende, en el desarrollo de este trabajo se empleó un Arduino UNO al cual se le integró por programación la función transferencia de una planta de forma que pueda relacionarse de forma directa con la valija PLC mediante sus entradas y salidas. De esta forma, al interactuar con los comandos de entradas del PLC, como pueden ser interruptores o pulsadores, se manda una señal a las entradas del Arduino y este las interprete en base a su programación y mande señales de salida de acuerdo con el sistema físico que se desea simular.

2. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se utilizó como controlador del sistema la valija con PLC, que cuenta con 7 entradas digitales, 3 entradas analógicas y 4 salidas digitales. Para la implementación inicial, se emplearon solamente 3 entradas digitales y 3 salidas digitales y como planta para desarrollar la simulación un Arduino UNO, del cual se utilizaron 3 entradas digitales y 3 salidas digitales, ambos se representan en la Figura 2. Además, se incorporó una computadora conectada al Arduino UNO con el fin de poder ilustrar la simulación utilizando el complemento de Microsoft Excel llamado Data Streamer, donde se recopilan los datos provenientes del Arduino en forma continua y se los emplea para graficar tanto el fenómeno físico que se está simulando como la curva de respuesta transitoria del sistema.



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Figura 2. Modelo de conexión entre PLC y Arduino.

Para ello se propuso programar el Arduino UNO de forma que pueda realizar el modelo matemático con la función de transferencia de una planta teórica modelada siguiendo las metodologías expuestas por OGATA (Ogata, 2010). El programa debe simular la planta, exportando indicadores de su estado de forma continua a una planilla de Excel. Estos datos provenientes de la simulación se representan gráficamente en un tablero de control. Además, el Arduino UNO debe interactuar con la valija PLC, representando un sistema de lazo cerrado. De esta forma, se recibirán señales como entradas digitales de la misma y se mandarán señales como salidas digitales, haciendo que de esta forma el sistema se pueda retroalimentar.

Mediante esta metodología, es posible analizar los procesos típicos empleados en los modelos teóricos de plantas: sistemas térmicos de calentamiento o enfriamiento, sistemas de nivel de líquido como puede ser el llenado y vaciado de tanques, sistemas eléctricos o sistemas mecánicos.

De esta forma, mientras el PLC cumple la función de análisis, comparación con referencia y procesamiento de la señal retroalimentada (control, en el diagrama de bloques de lazo cerrado), el Arduino alojará las funciones transferencia correspondientes a los actuadores y a la planta como se indica en la Figura 3.

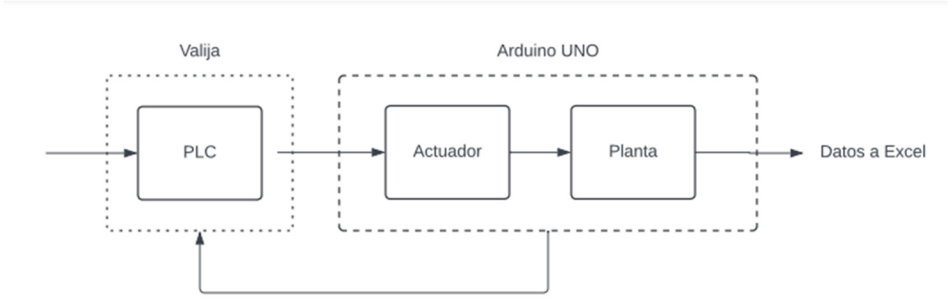
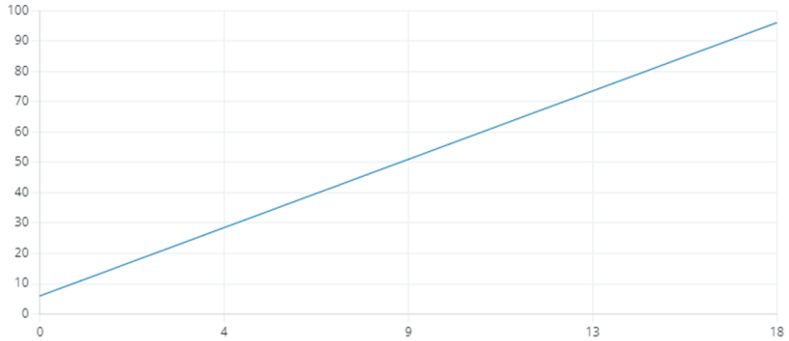


Figura 3. Modelo disposición teórica de los elementos.

3. Resultados

Para simplificar el proceso se seleccionó como modelo inicial un sistema hidráulico de forma que simule la carga y descarga de un tanque de agua. Para el resto de los sistemas mencionados anteriormente, es posible realizar un procedimiento análogo.

Durante el desarrollo del modelo matemático del mismo, se consideró un caudal de entrada constante de forma que la carga del tanque esté representada por una función del tipo lineal, la misma se representa en la Figura 4. Por otra parte, la descarga de este es gobernada por una curva de respuesta transitoria de tipo escalón de primer orden como se indica en la Figura 5.



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Figura 4. Curva que representa la carga del tanque.

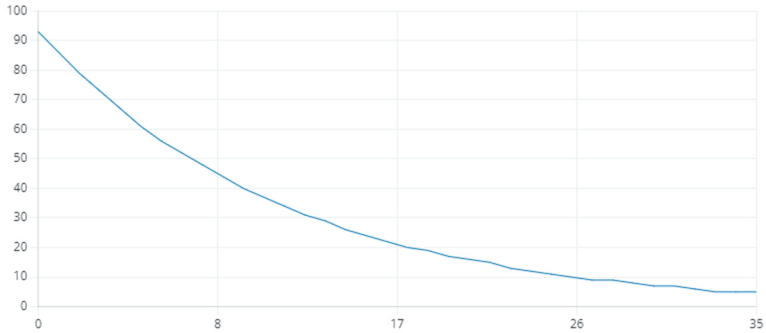


Figura 5. Curva que representa la descarga del tanque.

El Arduino UNO envía a Microsoft Excel los valores de las curvas obtenidos en varios puntos con el paso del tiempo. Esto es posible por medio de Data Streamer, el cual recopila esos valores en una plantilla personalizada de forma continua. Esto permite realizar diferentes gráficos para representar la simulación de la planta elegida.

Para el caso del sistema de carga y descarga del tanque, se utilizaron valores límites porcentuales, donde el nivel de agua del tanque simulado varía de 0 al 100% como se puede observar en la Figura 6. Además, al interaccionar con las entradas de la valija PLC se pueden tener diferentes variaciones de las curvas representadas en las Figuras 4 y 5, dependiendo de las diferentes acciones que se les atribuya a dichas entradas. Por ejemplo, la Figura 4 representa la curva que simula el sistema cuando la valija PLC recibe la acción de una entrada definida como “carga”, lo que se traduce a la simulación de un aumento del nivel de líquido del tanque.

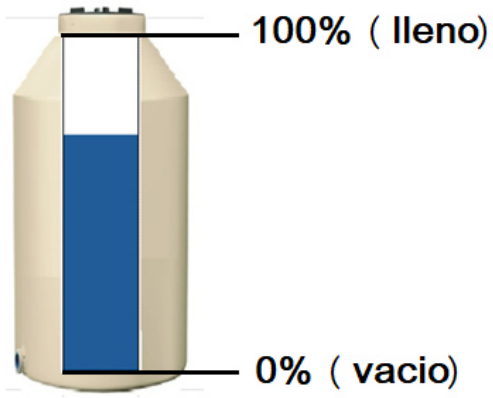


Figura 6. Representación del modelo del tanque de agua en Microsoft Excel.

4. Comentarios:

A lo largo del desarrollo, no fue posible enviar una señal continua del nivel del líquido en el tanque. Para comunicar ese dato, es necesario que la planta emita una señal compatible con las entradas analógicas del PLC. El Arduino UNO solo proporciona salidas/entradas digitales, y salidas PWM.

Se sugirió la posibilidad de convertir una salida PWM en una señal analógica continua, empleando un accesorio externo, capaz de “integrar” la señal de pulsos. Este nuevo desarrollo, ampliaría las posibilidades de la simulación, favoreciendo los procesos de enseñanza que utilicen esta herramienta didáctica.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

5. Conclusiones

Se han logrado avances importantes, que permiten concluir la factibilidad del uso de un Arduino como planta simulada de modelos físicos reales. De esta forma se pueden representar diversos fenómenos físicos, junto con gráficas que describan sus comportamientos para las enseñanzas didácticas en el ámbito de la ingeniería.

Los resultados obtenidos pueden trasladarse a otros modelos de plantas (sistemas térmicos, mecánicos, eléctricos, etc.) y abren la puerta a diversas aplicaciones de simulaciones que puedan programarse para representar efectos físicos, funciones matemáticas complejas, entre otras.

Se detectó la necesidad de convertir la salida PWM del Arduino en una señal analógica, para ingresarla como entrada analógica al PLC, para ello se requiere desarrollar un integrador de señal y así poder ampliar sustancialmente las posibilidades didácticas.

Referencias bibliográficas

Arduino. (n.d.). Arduino IDE. Obtenido de https://www.arduino.cc/en/software
Giné, A. (2019). Automatismos industriales: tipos y características. Obtenido de Escula de Postgrado Industrial: https://postgradoindustrial.com/automatismos-industriales-tipos/
Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Tokio: Pearson.
Perera, A. (2022). LOGO! de SIEMENS, qué es? Es realmente un PLC? Obtenido de Electricidad, Automatización y Domótica al alcance de todos: https://automatismosmundo.com/logo-de-siemens-que-es-es-realmente-un-plc/
Quispe, N. J., & Zaghis, S. (2022). Equipamiento didáctico para la introducción a la digitalización de procesos, en vías a la Industria 4.0. Santa Fe.
Schneider Electric. (2017). Zelio Logic: Samrt Relay, User Manual. París: Schneider Electric Publishing.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tecnolo

JIT 24 ROSARIO

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Tecnología educativa y enseñanza de la ingeniería
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	San Nicolás

PRESENTACION ORAL

Herramientas interactivas en entornos virtuales de aprendizaje: H5P

Interactive tools in virtual learning environments: H5P

Presentación 18/10/2024

Victoria Agustina Hernandez

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Grupo Ingeniería & Educación, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina.

E-mail de contacto: vhernandez@frsn.utn.edu.ar

Resumen

El avance de la tecnología y los recursos disponibles han modificado la forma de estudiar de los jóvenes. Los apuntes impresos, las fotocopias, prácticamente no circulan. Los apuntes ahora son electrónicos, y se almacenan y comparten en “La Nube”.
Pero los estudiantes, que han perdido el poder de concentración, requieren otro tipo de materiales y actividades. Trabajar con recursos estáticos ya no es más atractivo.
En particular, las aulas virtuales ofrecen más recursos de los utilizados, dado que en general son un mero repositorio de archivos de lectura lineal, guías de práctica y links a videos de YouTube. En Moodle se pueden utilizar, por ejemplo, las herramientas H5P, para transformar los espacios de las cátedras en un entorno de aprendizaje más dinámico e interactivo.
En este trabajo se muestran algunas actividades que se están diseñando para el aula de Cálculo Numérico de Ingeniería Eléctrica de la Facultad Regional San Nicolás, con el objetivo de implementarlas el año entrante.

Palabras clave: Moodle; H5P; aprendizaje activo; métodos numéricos; ecuaciones diferenciales

Abstract

Advances in technology and available resources have changed the way young people study. Printed notes, photocopies, are practically no longer in circulation. Lecture notes are now electronic, and they are storage in “The Cloud”.
But students, who have lost the power of concentration, require other kinds of materials and activities. It is no more attractive for them to work with static material.
In particular, virtual spaces in learning environments offer more resources than the ones used, as they are practically a mere repository of linear reading files, practice guides and links to YouTube videos. In Moodle, for example, H5P tools can be used to transform the virtual space associated to the courses into a more dynamic and interactive learning environment.
This paper shows some activities that are being designed for the virtual space of the course of Cálculo Numérico in Electrical Engineering at Facultad Regional San Nicolás, with the aim of implementing them next year.

Keywords: Moodle; H5P; Active learning; numerical methods, differential equations

1. Introducción

La forma en la que estudian los jóvenes de hoy ya no es la misma, debido al avance de la tecnología y los recursos disponibles. Los apuntes impresos, las fotocopias, ya casi no se ven. Los materiales de estudio ahora son electrónicos, en general archivos PDF, y circulan por WhatsApp, mail, carpetas compartidas… tal vez en un pendrive, y esto ya casi suena obsoleto.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

La suspensión de actividades en 2020 hizo que los docentes apelaran a recursos ya existentes, pero poco utilizados. Así, empezó a popularizarse el uso de espacios compartidos en la nube, Teams, y sin duda, las aulas virtuales. Y todo vino para quedarse. Hoy la mayoría de las cátedras en la Facultad Regional San Nicolás tiene un espacio en el Campus Virtual, que los docentes en general utilizan para poner a disposición sus apuntes, guías de práctica, grabaciones de clases, y administrar la entrega de trabajos prácticos y tareas.
Sin embargo, falta acción. La generación de los jóvenes de hoy ha crecido en un mundo hiperconectado, donde la tecnología juega un papel central en sus vidas cotidianas, aunque de una manera muy especial. Son nativos digitales, acostumbrados a acceder a la información instantáneamente y a través de múltiples dispositivos. Valoran la inmediatez y la interacción, y suelen preferir formatos visuales y dinámicos para aprender y comunicarse. Mientras tanto, se enfrentan a desafíos como la sobrecarga de información y la disminución de la capacidad de concentración.
Debido a estas características de los estudiantes, se debe buscar la forma de comprometerlos en su aprendizaje con experiencias que los involucren. Los entornos virtuales de aprendizaje ofrecen hoy muchos más recursos que la función de ser un mero repositorio de archivos, guías de práctica y links a videos de YouTube. En particular, en Moodle se pueden utilizar, por ejemplo, las herramientas H5P, incluyendo de esta manera contenido dinámico e interactivo en los espacios virtuales de las cátedras
En este trabajo se describen las herramientas H5P y se muestran algunos de los objetos que se están desarrollando para la asignatura Cálculo Numérico de segundo año de Ingeniería Eléctrica de la Facultad Regional San Nicolás, para el tema Métodos Numéricos para Ecuaciones Diferenciales Ordinarias.

2. ¿Qué es H5P?

Antes de hablar sobre H5P, se da la siguiente definición: un contenido, inmerso en una plataforma virtual, es interactivo cuando el usuario tiene la posibilidad de interaccionar con el recurso o actividad publicada en la plataforma virtual. Al generar contenidos interactivos se incluyen elementos que invitan al estudiante a relacionarse con el material, estableciendo una comunicación recurso-estudiante.
H5P es una plataforma que permite crear, compartir y reutilizar contenido interactivo en línea. Fue desarrollada por el MIT (Massachusetts Institute of Technology), y es un marco de código abierto. Su nombre, H5P, proviene de "HTML5 Package," ya que está basado en la tecnología HTML5, lo que garantiza su compatibilidad con la mayoría de los navegadores modernos.
Entre las características de los recursos generados en esta plataforma, se pueden destacar:

- Interactividad: se pueden generar actividades altamente interactivas, como juegos, videos interactivos, líneas de tiempo, entre otras.
- Adaptabilidad: debido a su base en HTML5, todas las actividades generadas con H5P se adaptan para mostrarse correctamente en diferentes dispositivos, como Tablets, Smartphones, computadoras.
- Facilidad de uso: Se generan contenidos en una interfaz intuitiva, sin necesidad de recurrir a conocimientos avanzados de programación. Las actividades se generan a partir de formularios predefinidos.
- Reusabilidad: Los contenidos generados con H5P son fáciles de compartir y reutilizar, permitiendo a los docentes compartir recursos entre sí o adaptar alguno ya existente a sus necesidades.

Los archivos generados en esta plataforma pueden ser ubicados en cualquier sistema que admita H5P, como Drupal, Joomla, WordPress o el propio Moodle.
H5P ofrece una amplia gama de contenidos interactivos, entre ellos juegos, presentaciones con controles interactivos, videos con intervenciones para interactuar, grabador de audio, dictados, crucigramas y muchos más. Algunos ejemplos específicos incluyen preguntas de opción múltiple, arrastrar y soltar, y presentaciones con controles interactivos. Una experiencia interesante se realizó en un curso de inglés en una universidad de Paraguay como relatan Canese et al. (2020). Se puede encontrar más información sobre las herramientas disponibles en el sitio oficial, https://H5P.org

2.1. *H5P en Moodle*

Mediante la instalación del plugin correspondiente, tarea que le corresponde al administrador de la plataforma, es posible utilizar las herramientas H5P en las aulas de Moodle. Y se puede configurar de manera que toda nueva herramienta que aparezca en el sitio oficial, se incorpore automáticamente en Moodle para que pueda ser seleccionada.
En este entorno virtual de aprendizaje, este tipo de recursos se agrega como una actividad. Allí se hace la configuración general, pero se debe ir al banco de contenidos para crear la herramienta. Una vez generada, se debe seleccionar la misma para ser incorporada a la actividad. También, las herramientas pueden ser generadas fuera de la plataforma, como un archivo de extensión .h5p, y luego ser insertadas en el banco de contenido, para luego poder seleccionarlas y utilizarlas en el aula virtual. Esta forma de trabajo todavía no ha sido utilizada en esta experiencia que se está realizando.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

3. Diseño de herramientas

3.1. Selección del tema para intervenir con actividades interactivas

Se realizó este trabajo en el marco de la asignatura Cálculo Numérico, de Ingeniería Eléctrica, en la Facultad Regional San Nicolás.
Se eligió la unidad de Métodos Numéricos para Ecuaciones Diferenciales, por distintas razones. En primer lugar, es un tema que requiere de un diagnóstico y/o repaso inicial sobre el tema Ecuaciones Diferenciales, ya que el tema fue visto a principio de año en una materia que se cursa en paralelo (Análisis Matemático II), y tal vez no todos los estudiantes la cursan. Además, hay una variedad de métodos y propiedades para analizar, y es bueno reforzar con actividades de repaso clase a clase. Por último, es aconsejable hacer un repaso general de conceptos como la convergencia, estabilidad, orden de precisión de un método, con ejemplos de soluciones e imágenes.

3.2. Selección de actividades

Es preciso aclarar que debido a la forma en cómo se comporta H5P en Moodle, para la configuración disponible en el CVG de la FRSN, la mayoría de los tipos de contenido les permite intentos ilimitados a los estudiantes. Por lo tanto, en este caso no es aconsejable utilizar la herramienta para implementar evaluaciones sumativas o trabajos prácticos importantes, ya que el estudiante contará con múltiples intentos para hacerlo. Debido a esto, se realizaron sólo actividades de tipo diagnóstico, y para reforzar conocimientos, a modo de repaso, para incluir a medida que se van dando los temas.
H5P ofrece una amplia gama de contenidos interactivos, entre ellos distintos tipos de juegos, presentaciones con controles interactivos, videos con intervenciones para interactuar, herramientas para audio y muchos más.
En particular, para trabajar con el tema seleccionado, métodos numéricos para ecuaciones diferenciales ordinarias, se seleccionaron las herramientas: emparejamiento de imágenes, video interactivo, arrastrar palabras, crucigrama.
Se debe ir al banco de contenido de Moodle, para crear las herramientas. Una vez que estamos en el banco de contenido, si ya se tiene la herramienta diseñada en un archivo con extensión .h5p, se debe seleccionar el botón **Subir**, para insertarla en nuestro banco de contenido. Se debe tener en cuenta que la plataforma tiene restricciones en cuanto al tamaño máximo de archivos a subir, en este caso como se ve en la Figura 1, es de 5 MB, pero en general, ocupan poco espacio. En caso contrario, se crea aquí, como se indica en la siguiente sección.



Figura 1. Cómo agregar recursos al banco de contenido

3.3. Actividades diseñadas

3.3.1. Emparejamiento de imágenes

Esta herramienta interactiva se utiliza para establecer correspondencias. En este caso, se eligieron tres imágenes correspondientes a la solución de un problema de valor inicial con diferentes métodos, y se pide que se asocie cada imagen con el nombre del método aplicado, donde se debe tener en cuenta la precisión de dichos métodos.
Se detalla en este caso el diseño de la herramienta. Dentro del banco de contenido, se elige el tipo de herramienta que se quiere diseñar desde la lista que se despliega al hacer click en el botón añadir, como muestra la Figura 2. En este caso, se selecciona **Drag and Drop**.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

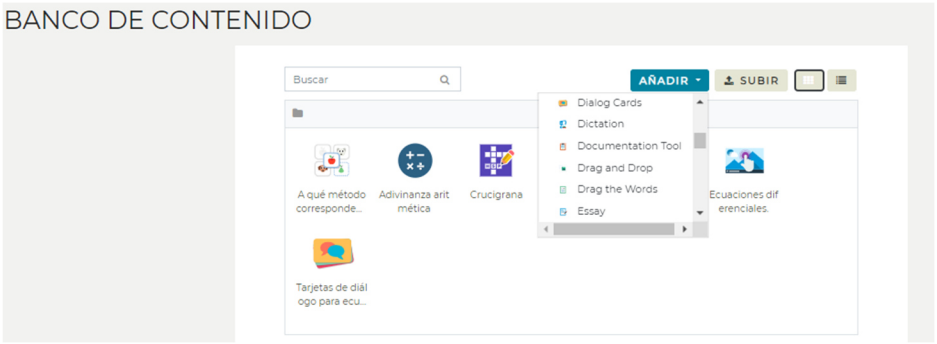


Figura 2. Selección de un tipo de herramienta para diseñar

Una vez que se seleccionó la opción, aparece la ventana de configuración de la herramienta elegida, como se muestra en la Figura 3. Se deben ingresar allí las imágenes de a pares. Y se pueden cargar textos alternativos, para cada imagen.

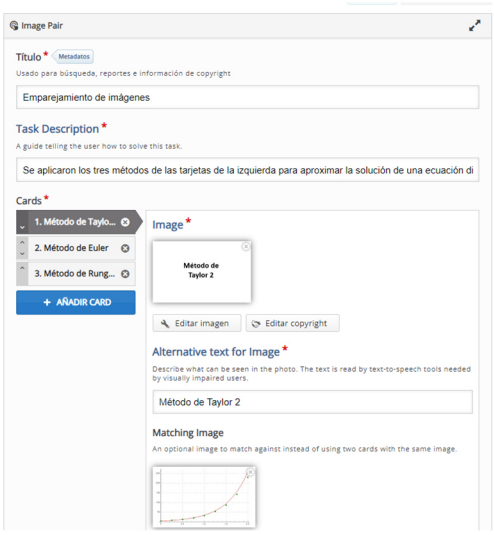
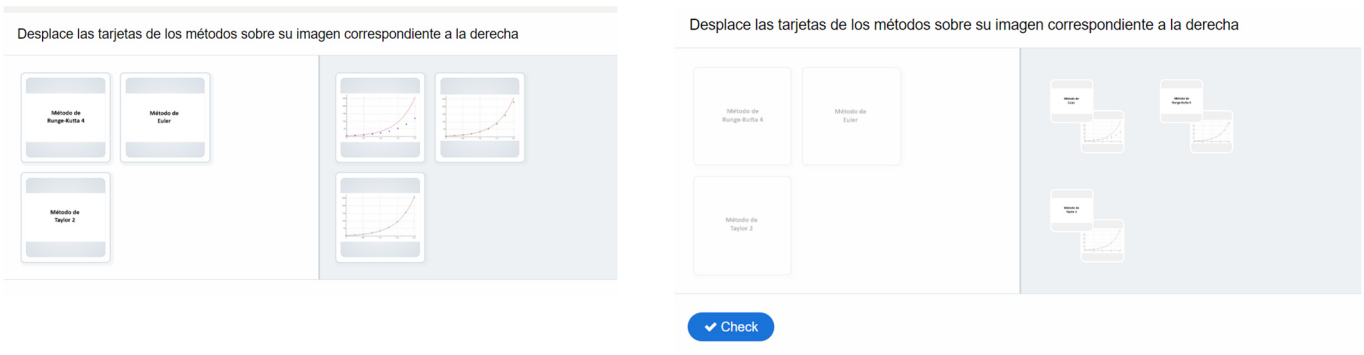


Figura 3. Diseño de la herramienta emparejar imágenes

Una vez cargados todos los pares, se hace click en el botón **Guardar**. Ya está generada la herramienta, pero todavía no fue insertada en el aula. Esto se agrega como cualquier otro recurso, seleccionando Actividad de H5P en el menú para añadir actividades o recursos, y dentro del selector de archivos se busca el archivo en el banco de contenidos.
Cuando los alumnos ingresan a la actividad, se muestra como en la Figura 4(a). Aparecen las primeras imágenes de cada par a la izquierda, y las segundas a la derecha, y se deben arrastrar las de la izquierda hacia la derecha, estableciendo la correspondencia que se supone correcta.



(a) (b)

Figura 4. Cómo ven la herramienta los alumnos

Una vez que los estudiantes finalizan la actividad, aparece el botón **Check**, para verificar la resolución. Al hacer click en el mismo, se presenta la corrección como se muestra en la Figura 5(a), donde podrán ver cuántas acertaron, además podrán ver

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

la solución correcta con el botón **Show Solution**, o rehacer el ejercicio, tantas veces como quieran, con el botón **Retry**. A su vez, el docente puede revisar los intentos realizados por los estudiantes, como se muestra en la Figura 5(b).



Figura 5. (a) Corrección para el alumno. (b) Cómo el docente ve los intentos que se hicieron.

3.3.2. Crucigrama

En este caso, se propone un crucigrama para repasar conceptos generales sobre ecuaciones diferenciales y métodos estudiados.

Para diseñar el crucigrama, se escriben las palabras y las referencias. En la Figura 6 se muestra el crucigrama generado, se acomodaron las referencias en la imagen para visualizarlas en su totalidad.

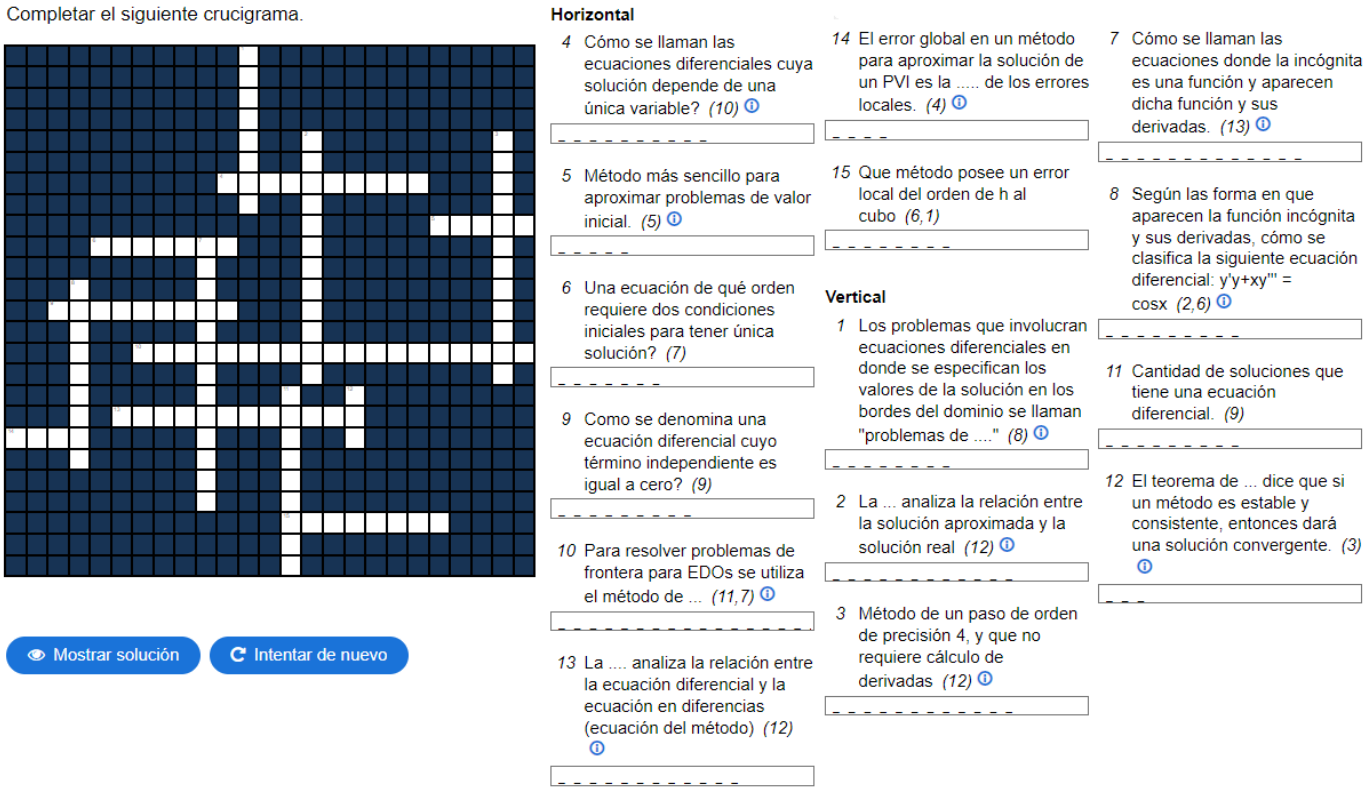


Figura 6. Un crucigrama generado con H5P

Se pueden agregar tantas palabras como se desee, y en la configuración del crucigrama se puede elegir fijar las palabras en la rejilla o dejarlas libres (esta última opción es más sencilla), también se puede seleccionar la cantidad de palabras a mostrar, y se elegirán en forma aleatoria. Si no se indica nada en este caso, se muestran todas las ingresadas. También se pueden configurar el fondo y los colores de las celdas y rejilla.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

3.3.3. Intervención de videos

En este caso se tomó un video de la introducción de la unidad, donde se repasan los conceptos básicos de ecuaciones diferenciales, y se intervino con preguntas para que el estudiante vaya contestando a medida que lo va siguiendo. En la Figura 7 se muestra una imagen del video, en el momento en que aparece la primera pregunta. Se visualiza en la línea de tiempo del video los momentos de intervención, con un pequeño círculo.

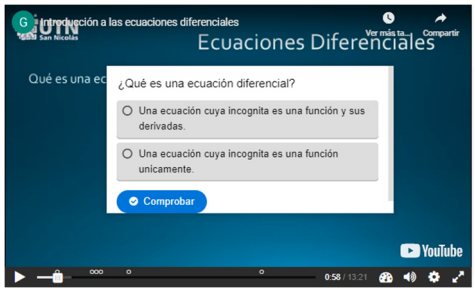


Figura 7. Video intervenido con H5P

Una vez que se selecciona la opción y se hace click en el botón para comprobar la respuesta, si la respuesta fue correcta lo muestra y permite continuar, como muestra la Figura 8(a). En cambio, si la respuesta fue incorrecta, lo indica en rojo, y permite volver a responder, ver la respuesta correcta o continuar, como indica la figura 8(b).



(a) (b)

Figura 8. Cómo ven los alumnos la comprobación de la respuesta en el video intervenido

4. Conclusiones

En general, podemos decir que con H5P se generan recursos amigables, fáciles de crear y de usar, que brindan un aspecto diferente a las aulas virtuales, probablemente estimulando la autonomía en los estudiantes, ya que se sienten atraídos para "jugar", por decirlo de alguna manera, sin penalidades y sin límite, favoreciendo la repetición de conceptos y propiedades para un mejor aprendizaje.

Como las herramientas desarrolladas son aplicaciones "responsive", como se dice habitualmente, o equivalentemente adaptables, los usuarios pueden experimentar el mismo contenido en computadoras, teléfonos y Tablets. Por otro lado, su facilidad de uso y flexibilidad hacen que sea un recurso valioso para profesores que buscan innovar en sus métodos de enseñanza.

Este desarrollo continúa en etapa de diseño, por lo que no fue todavía utilizado por los estudiantes. Se espera avanzar sobre otros temas de la asignatura para presentar en el año entrante distintas herramientas en las distintas unidades de la materia. Cuando se implementen, se realizarán encuestas para recabar la opinión de los alumnos respecto del uso de las mismas.

Agradecimientos

Un agradecimiento a la Lic. Georgina Rodríguez, directora de la beca, por guiarme en el estudio de estas herramientas y a la Lic. Lorena Laugero, por los ejercicios sugeridos.

Referencias bibliográficas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Canese, Caballero, V., Castillo Alvarenga, M. (2020). El uso de la herramienta H5P para la creación de lecciones interactivas de idiomas: opciones, posibilidades, limitaciones y dificultades. Revista Paraguaya de Educación a Distancia, FACEN-UNA, Vol. 1 (2)

Análisis de señales, modelados y simulación



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Análisis de señales, modelados y simulación
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Modelización del Flujo en Medios Porosos: Estudio del Hormigón Drenante mediante Tomografía Computarizada y Simulación Numérica Directa

Modeling Flow in Porous Media: A Study of Pervious Concrete Using Computed Tomography and Direct Numerical Simulation

Presentación 18/10/2024

Milagros Rossler

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería (GIMNI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: mili.rossler@gmail.com

Resumen

En esta investigación se aborda el análisis del flujo en medios porosos mediante simulación numérica directa, empleando como modelo de estudio una probeta de hormigón drenante, un material con estructura porosa compleja. Dicha simulación permite calcular el flujo dentro de los conductos irregulares del material, requiriendo una malla adecuada y condiciones de contorno consistentes para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes. La metodología incluye el procesamiento de tomografías en formato STL para generar una malla completa del dominio e identificar las fronteras. Luego, se aplica el método de volúmenes finitos para obtener el campo de flujo en la red de poros. Los resultados se comparan con trabajos relacionados, caracterizando las propiedades hidráulicas del hormigón drenante en el caso saturado. Este procedimiento es motivado por el uso creciente del hormigón drenante en aplicaciones de infraestructura urbana y contribuye a futuras investigaciones en materiales porosos, mejorando su diseño y rendimiento en condiciones reales.

Palabras clave: Hormigón Drenante; Simulación Numérica Directa; Medios Porosos; Flujo Saturado

Abstract

This research analyzes flow in porous media using direct numerical simulation, by modeling a pervious concrete specimen, a material with a complex porous structure. The simulation calculates the flow within the material's irregular conduits, requiring an appropriate mesh and consistent boundary conditions to solve the Navier-Stokes equations. The methodology includes processing tomography data in STL format to generate a complete domain mesh and to identify boundaries. The finite volume method is then applied to obtain the flow field in the pore network. The results are compared with physical tests, characterizing the hydraulic properties of saturated pervious concrete. This approach is driven by the increasing use of pervious concrete in urban infrastructure applications and contributes to future research on porous materials, enhancing their design and performance under real conditions.

Keywords: Pervious Concrete; Direct Numerical Simulation; Porous Media; Saturated Flow

1. Introducción

El hormigón drenante, también conocido como hormigón permeable, es ampliamente utilizado en ingeniería civil para pavimentos permeables y sistemas de gestión de aguas pluviales. Este material se caracteriza por su estructura porosa,

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

compuesta por una red de poros interconectados dentro del esqueleto de agregados. Su capacidad para facilitar la infiltración del agua y mitigar el impacto ambiental lo posiciona como una elección primordial en proyectos que requieren manejo sostenible del agua, gestión eficiente de inundaciones y mejoras en la infraestructura urbana e industrial para control de escorrentías.

La investigación sobre el hormigón drenante se centra principalmente en la caracterización de parámetros macroscópicos como las propiedades hidráulicas, incluyendo la porosidad (Zhang et al., 2017). Estudios recientes han utilizado tecnologías avanzadas de procesamiento de imágenes, como la tomografía computada de rayos X (XRCT, por las siglas en inglés), para realizar análisis microscópicos detallados de materiales porosos (Shan et al., 2022). Estas técnicas permiten la reconstrucción tridimensional precisa de la estructura original del hormigón poroso a partir de secciones discretizadas obtenidas de imágenes de tomografía de una probeta específica de hormigón drenante. Este enfoque facilita la evaluación meticulosa de la distribución y conectividad de los poros, aspectos fundamentales para comprender y modelar el comportamiento hidráulico del material en diversas condiciones de carga y saturación, lo cual es crucial para reproducir con precisión el flujo hidráulico a través del mismo.

Este trabajo tiene como objetivo principal proporcionar una metodología precisa para el estudio del flujo de agua en hormigones permeables mediante el uso de técnicas avanzadas de tomografía computarizada y modelado numérico. La caracterización detallada de la estructura porosa y la conectividad de los poros, derivada de las imágenes de tomografía, permitirá desarrollar modelos que reproduzcan fielmente el comportamiento hidráulico del material bajo condición saturada. Estos modelos son fundamentales para optimizar el diseño de componentes en obras civiles y para avanzar en la comprensión y aplicación de prácticas sostenibles de gestión del agua en entornos urbanos.

2. Metodología

2.1 Características y propiedades de la probeta

La probeta de hormigón drenante utilizada en esta investigación presenta una dosificación, para 1 m³ de material, que incluye un contenido de cemento de 362 kg y un contenido de agua de 127 kg, obteniendo una relación agua/cemento de 0,35. Además, se incorporan 1567 kg de agregado grueso. A su vez, presenta un peso unitario (PUV) de 2056 kg/m³, un volumen de vacíos teórico del 20% y una permeabilidad medida en 1,31 cm/s (Aguirre y Argento, 2021). El conocimiento de la permeabilidad de la probeta permite correlacionar los resultados obtenidos con futuros estudios de modelización numérica, facilitando la comprensión y predicción del comportamiento del hormigón drenante.

2.2 Procesamiento del STL

El primer paso consiste en el tratamiento del archivo STL obtenido a partir de la tomografía de la probeta de hormigón. Se utiliza la herramienta Meshmixer (Meshmixer, 2023) para corregir posibles errores y asegurar la integridad del modelo. Posteriormente, se seleccionan tres muestras prismáticas en diferentes zonas de la probeta y a diferentes alturas para evaluar la distribución de permeabilidad en relación con la porosidad, como se observa en la Figura 1. Dado que el hormigón drenante exhibe una estructura porosa compleja y heterogénea, este diseño de muestreo es crucial para capturar variaciones estructurales significativas a lo largo de la probeta.

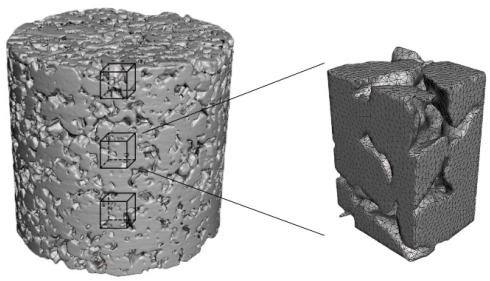


Figura 1. Extracción de prismas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Este informe se enfoca en un análisis detallado de la sección central de la probeta, con el objetivo de comprender los procedimientos utilizados y el comportamiento hidráulico del fluido al atravesar el hormigón permeable, cuyas propiedades dependen de la geometría compleja de sus poros.

2.2 Mallado del Poro

El siguiente paso en el proceso es el mallado de las porciones previamente seleccionadas, utilizando el software Salome (Salome, 2023). Primero, se prepara el modelo para el mallado, que es crucial para la simulación del flujo subsiguiente. Debido a la complejidad inherente del archivo STL, se realizan análisis y reparaciones adicionales para optimizar la geometría y asegurar un mallado preciso. Se invierte la estructura para que los poros se constituyan correctamente en el dominio de cálculo, con lo cual se emplea un prisma elemental para cortar ambos sólidos y obtener la estructura porosa.

El dominio se discretiza definiendo las superficies y asignando las correspondientes condiciones de borde: Entrada, Salida, Pared del poro y Pared cortada, como se ilustra en la Figura 2. Es esencial distinguir entre estas dos últimas condiciones. La Pared del poro presenta una velocidad nula, que impide el flujo tangencial y a través de esta superficie. En contraste, la Pared cortada se trata como una superficie de simetría, lo que permite un flujo paralelo a la cara sin restricciones y nulo en dirección normal a esta, simulando una extensión del dominio que no obstaculiza el flujo de fluido. Considerar ambas condiciones es fundamental para evitar perturbaciones en el modelo y asegurar la precisión en la simulación del comportamiento del flujo.

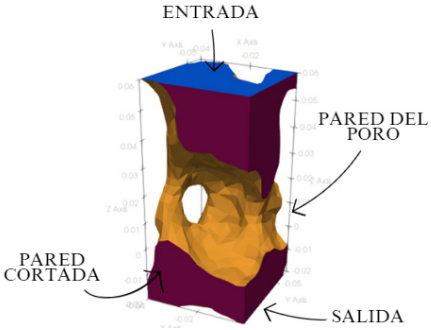


Figura 2. Estructura del poro integrada en el dominio de cálculo, con las fronteras definidas.

Para el mallado del poro, se emplea el generador de mallas tridimensionales NETGEN, una herramienta que se especializa en la creación de mallas tetraédricas, permitiendo una discretización precisa de geometrías complejas, ya que utiliza algoritmos avanzados para generar elementos con buena calidad y distribución uniforme, lo que es crucial para obtener resultados numéricos precisos y estables para estructuras irregulares, como las presentes en el hormigón drenante. Además, se realizan ajustes manuales en los nodos para simplificar y asegurar la integridad del mallado, especialmente en áreas de secciones truncadas o de geometría intrincada.

Lograr obtener una malla consistente fue el mayor desafío de toda la investigación, debido a la compleja geometría del poro. Por este motivo, se analizaron partes pequeñas de la probeta, ya que en muchos casos fue necesario realizar correcciones manuales en los nodos de la misma. Además, se consideró el costo computacional y el tiempo de procesamiento.

2.3 Modelado numérico

Para llevar a cabo la simulación del flujo de infiltración en la red de poros seccionada, se emplea el método de volúmenes finitos utilizando el software Code Saturne (Code Saturne, 2023). Este método permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles en un dominio tridimensional complejo.

La ecuación de Navier-Stokes para un flujo incompresible, utilizadas para describir el comportamiento del flujo newtoniano dentro del material poroso.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla)\,\bar{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2 \bar{u} \qquad (1)$$

donde $\bar{u}$ representa el vector de velocidad, p es la presión, ρ es la densidad y μ corresponde a la viscosidad dinámica del fluido.

Además, se considera la ecuación de continuidad.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

Debido a que el fluido es agua, su densidad es ρ = 1000 kg/m^3, con una viscosidad dinámica μ = 0.001 Pa·s. Para asegurar un flujo laminar se propone una condición de borde en la entrada del fluido, perpendicular a la cara, a velocidad de 0.01 m/s, garantizando un bajo número de Reynolds, mientras que la condición de salida es libre. Respecto de las presiones se considera que el mismo está sometido a presión atmosférica p = 101325.0 Pa.

La ecuación de Navier-Stokes se resuelve iterativamente hasta alcanzar la convergencia, obteniéndose los campos de velocidad y presión, para el caso estacionario. Estos resultados permiten evaluar con precisión la distribución del flujo y la conectividad de los poros, proporcionando una comprensión detallada del comportamiento hidráulico del hormigón drenante.

3. Resultados

3.1. Análisis del Comportamiento del Modelo Numérico en Función de la Refinamiento de la Malla

Inicialmente, se evaluó la variación del comportamiento del modelo numérico en función de la cantidad de elementos que lo componen, generando dos modelos con diferentes grados de refinamiento. En la Figura 3 se aprecia a la izquierda la Malla 1, la cual contiene 1.815.163 elementos de tamaño característico de 0,0007m, mientras que, a la derecha, se encuentra la Malla 2 con 3.579.636 elementos de tamaño característico de 0.0004m, con lo cual se aplica un refinamiento casi 50% mayor, duplicando el número de elementos en la Malla 2. Al analizar gráficamente la magnitud de la velocidad, se observó que la malla más gruesa presentaba un comportamiento anómalo, donde una única región mostraba una concentración de velocidades elevadas del orden de 50 m/s, indicando que la resolución no tiene validez, lo cual se corresponde con la falta de convergencia del método numérico. En contraste, la malla refinada mostró un comportamiento coherente, especialmente en las zonas de reducción de sección, como se aprecia en la Figura 3, donde las velocidades incrementaron conforme a los principios fundamentales de la hidráulica. Este comportamiento se alinea con la expectativa teórica de que la velocidad del flujo aumenta en secciones más estrechas, debido a la conservación del caudal.

La comparación de estos resultados permite concluir la importancia de utilizar mallas refinadas y que estas sean válidas para obtener un modelo numérico que refleje de manera precisa el comportamiento real del flujo en un material permeable como el hormigón drenante. El refinamiento de la malla asegura una mejor resolución de las variaciones de velocidad y otros parámetros hidráulicos, lo que es esencial para la modelización precisa y la predicción del comportamiento del flujo en medios porosos.

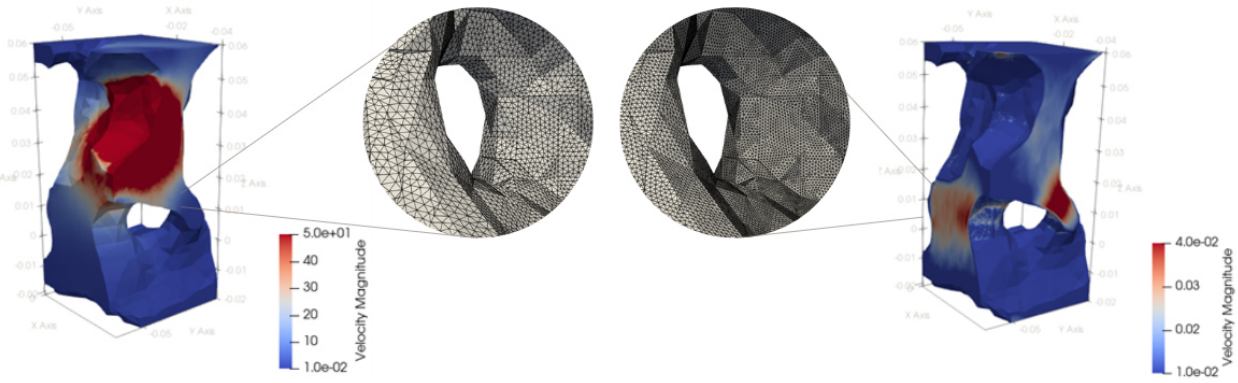


Figura 3. Comportamiento del fluido según la malla, análisis de velocidad en m/s y grilla de elementos. A la izquierda Malla 1 y a la derecha Malla 2.

En base a lo mencionado anteriormente, los resultados expuestos a continuación son obtenidos de la Malla 2.

3.2 Campo de presiones

En primer lugar, debido a la variabilidad de la sección transversal del poro en intervalos cortos de longitud, el flujo experimenta distorsiones significativas. Estas irregularidades geométricas generan perturbaciones en la estructura del flujo, impidiendo que se desarrolle plenamente. En base al concepto de capa límite, para que el flujo pueda establecerse

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

completamente como flujo laminar desarrollado, es necesario que exista una longitud suficiente que permita a las fuerzas viscosas disipar las perturbaciones iniciales y estabilizar el perfil de velocidad. En poros con variaciones rápidas y significativas en la sección, esta longitud de desarrollo no se alcanza, lo que resulta en un flujo que no cumple estrictamente con las condiciones de flujo laminar desarrollado. Como consecuencia, se generan zonas de recirculación y fluctuaciones en la presión que no se observarían en un tubo cilíndrico de sección constante.

La segunda observación importante, se relaciona con la presencia de zonas donde se producen altas presiones. En ciertas áreas del poro, especialmente en aquellos puntos donde existen fuertes cambios de sección o geometrías angulosas, el líquido tiende a quedar confinado, generando estas regiones. Estas zonas pueden ser consideradas como trampas de fluido, donde el líquido queda temporalmente "encapsulado" debido a la complejidad geométrica. Este fenómeno es especialmente notable en áreas de cambios bruscos de sección, donde el gradiente de presión local se intensifica, y el flujo se ve forzado a ajustarse a la nueva geometría, generando picos en sectores de escasa sección, visibles en la Figura 4. Estas concentraciones de presión son indicativas de esfuerzos adicionales que el fluido debe superar para continuar su movimiento a través del poro.

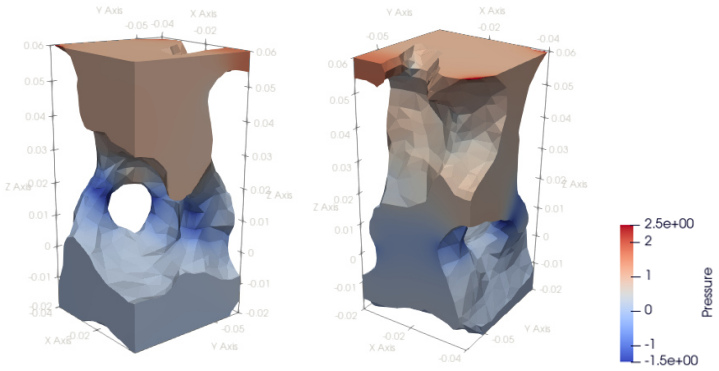


Figura 4. Distribución de presiones en Pa para la Malla 2.

3.3 Campo de velocidades

Al analizar la velocidad del agua en el poro, las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad nos indican que, para mantener el caudal constante, la velocidad del fluido aumenta cuando la sección del poro se reduce. Inicialmente, la velocidad de entrada es de 0,01 m/s, pero debido a la compleja geometría del poro, en áreas donde la sección se reduce drásticamente, la velocidad puede alcanzar hasta 0,05 m/s para compensar la disminución del área transversal. Aunque el número de Reynolds asociado con las velocidades y dimensiones mencionadas sugiere un régimen laminar, las variaciones bruscas de la sección y los aumentos significativos de velocidad pueden provocar fluctuaciones que acerquen localmente el flujo a un régimen de transición o incluso turbulento. Aun así, es probable que el flujo general en el poro permanezca laminar, aunque con posibles distorsiones que deben ser analizadas en detalle.

En la sección transversal del poro, representada en la Figura 5, se observa el desarrollo del perfil de velocidades. Debido a la viscosidad del agua y a la condición de $\vec{u} = 0$ en las zonas correspondientes a la matriz sólida, la velocidad máxima se desplaza ligeramente del centro del poro y disminuye gradualmente hacia las paredes, donde las fuerzas viscosas frenan el fluido. En contraste, en las zonas cercanas a la pared cortada, donde se impone una condición de simetría, el flujo se mantiene paralelo, evitando que las velocidades se anulen. Además, se observan distorsiones en el perfil de velocidad debido a la variabilidad de las secciones del poro, lo que modifica la distribución esperada y evidencia la complejidad del flujo en estas estructuras.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

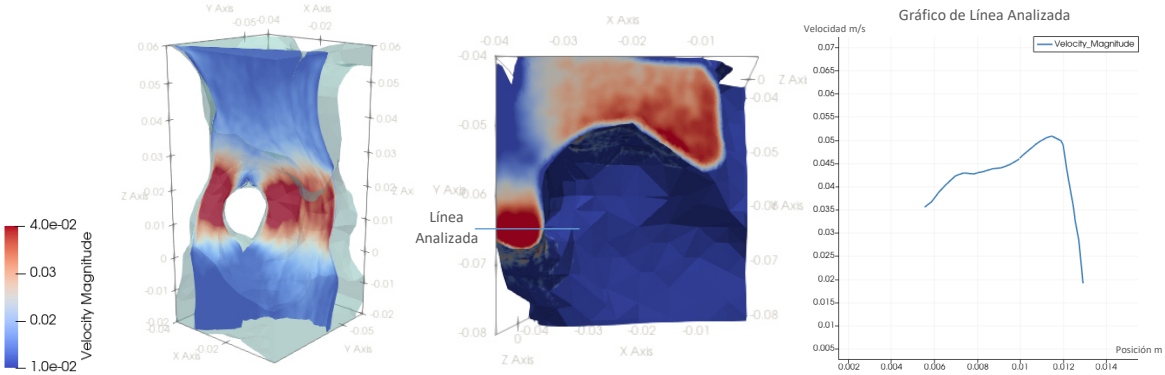


Figura 5. Campo de velocidades en m/s de la Malla 2. A la izquierda líneas de corriente en el dominio de cálculo. En el centro y a la derecha distribución de velocidades en la sección transversal.

3.4 Evaluación de la fidelidad del modelo a través de comparaciones con estudios relacionados

En esta sección, se evaluará la coherencia de los resultados obtenidos en esta investigación comparándolos con dos trabajos relacionados. En el trabajo de Pieralisi et al. (2017), se concluye que en el material "sintético", para un Δp no definido, las velocidades varían en un orden de magnitud de 0,099 m/s a 1,385 m/s. De esta manera, los resultados obtenidos en esta investigación se encuentran dentro del margen esperado. En el trabajo de Martins Filho et al. (2021), se analiza la velocidad “bulk” en un permeámetro versus el gradiente hidráulico. Se observa que la velocidad varía entre 0.5 y 3 cm/s. Considerando una porosidad del 20%, es posible calcular la velocidad media del flujo en los poros. En nuestro caso, se determina que el gradiente hidráulico es de 15 Pa, lo que equivale a una columna de agua de 1.5 mm. Tras este análisis, se estima que la velocidad oscila entre 0.5 y 1 cm/s. En este contexto, se calculan velocidades mínimas y máximas de 0.025 y 0.05 m/s, respectivamente, con lo cual se observa una correcta correlación de resultados. Es importante destacar que el gradiente hidráulico aplicado en estos modelos se encuentra alejado de las zonas de determinaciones experimentales, lo que sugiere que sería conveniente aumentarlo para futuras verificaciones

4. Conclusiones

Esta investigación se centra en la generación de modelos precisos para analizar la estructura porosa del hormigón drenante, destacando la importancia del refinamiento de la malla para garantizar la fidelidad en la simulación del comportamiento del fluido. La metodología empleada, que incluye la obtención de modelos STL a partir de tomografía computarizada, permite una representación precisa del material a nivel microscópico. El proceso de mallado es crítico para capturar las características intrincadas del flujo en el material poroso, permitiendo una discretización adecuada que refleje la complejidad del medio, junto con la asignación de condiciones de contorno. Estos procesos aseguran que la simulación refleje fielmente la realidad.

Este enfoque metodológico no solo facilitará análisis de dominios de mayor tamaño en investigaciones futuras, sino que también contribuirá a la optimización de hormigones drenantes en la gestión de aguas pluviales y la sostenibilidad urbana. Además, esta secuencia de pasos proporciona una base sólida para futuros estudios que aborden el modelado de fluidos con sedimentos, filtrado de contaminantes y otras aplicaciones relacionadas, fortaleciendo así la conexión entre la investigación y la práctica en el ámbito de la ingeniería civil.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a las Becas de Investigación UTN 2024-I-C-10015 por su apoyo en el proyecto de dinámica de fluidos computacional. También quiero agradecer al CIMEC por brindar los recursos necesarios para realizar las simulaciones numéricas. Un agradecimiento especial a mi directora, Laura Battaglia, por su invaluable orientación y apoyo a lo largo de este estudio.

Referencias bibliográficas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Aguirre, D., Argento, R. (2021). Hormigón drenante como regulador de excedentes pluviales. PFC - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe.
Zhang, L., Wang, X., Liu, Y., & Zhou, J. (2017). Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging. Construction and Building Materials, 134, 74-84.
Shan, Y., Li, H., Zhao, Q., & Zhang, Z. (2022). Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. Construction and Building Materials, 310, 125-136.
Pieralisi, R., Cavalaro, S.H.P., & Aguado, A. (2017). Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete. Cement and Concrete Research, 103, 40-50.
Martins Filho, S.T., Pieralisi, R., & Lofrano, F.C. (2021). Framework to characterize nonlinear flow through pervious concrete. Cement and Concrete Research, 142, 106633.
Meshmixer. (2023). Meshmixer User Manual. Retrieved from http://www.meshmixer.com.
Salome. (2023). Salome Platform User's Guide. Retrieved from https://www.salome-platform.org.
Code Saturne. (2023). Code Saturne Documentation. Retrieved from https://www.code-saturne.org.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Sistema de llenado preciso.	
Área prioritaria:	Análisis de señales, modelados y simulación
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Propuesta, análisis y simulación de un sistema de llenado preciso para jugo con pulpa

Proposal, analysis, and simulation of a precision filling system for pulped juice

Presentación //2024

Valentín Garrido

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

Email: vgarrido.utn@gmail.com

Elías Monzón

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

Email: eliasmon75@gmail.com

Gustavo Arnaudo

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

Email: garnaudo@frsf.utn.edu.ar

Fausto Balangione

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

Email: faustobalangione@gmail.com

Emmanuel Schierloh

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

Email: eschierloh@frsf.utn.edu.ar

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y simulación de un sistema de llenado preciso para jugo con pulpa, con un enfoque en la optimización mediante simulaciones detalladas en Octave y OpenModelica. El estudio se centra en el comportamiento dinámico de la válvula y en las funciones de transferencia que rigen el sistema, con el objetivo de minimizar las variaciones en el llenado y garantizar la homogeneidad del producto. La investigación destaca cómo las simulaciones permiten validar y perfeccionar el modelo matemático propuesto, ofreciendo un enfoque innovador que mejora la eficiencia, precisión y sostenibilidad del proceso de envasado en la industria alimentaria. Además, se subraya que una simulación exacta y precisa contribuye a un significativo ahorro económico, al optimizar el uso de recursos y reducir el desperdicio.

Palabras clave: Simulación; jugo con pulpa; válvula de control; funciones de transferencia.

Abstract

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

This work presents the design and simulation of a precision filling system for juice with pulp, focusing on optimization through detailed simulations in Octave and OpenModelica. The study examines the dynamic behavior of the valve and the transfer functions governing the system, aiming to minimize filling variations and ensure product homogeneity. The research emphasizes how simulations enable the validation and refinement of the proposed mathematical model, providing an innovative approach that enhances the efficiency, precision, and sustainability of the filling process in the food industry. Furthermore, it highlights that an accurate and precise simulation contributes to significant economic savings by optimizing resource use and reducing waste.

Keywords: Simulation; pulped juice; control valve; transfer functions.

1. Introducción

La precisión en el llenado de jugos con pulpa es un gran desafío en la industria alimentaria, donde mantener la consistencia y la calidad del producto final es esencial para satisfacer las expectativas del mercado y cumplir con las normativas. Este trabajo en desarrollo explora un enfoque avanzado para el llenado preciso de jugo con pulpa, haciendo uso intensivo de simulaciones para ajustar y validar el sistema propuesto. Se ha centrado particularmente en la válvula de control, una pieza clave cuyo comportamiento dinámico fue modelado y simulado utilizando Octave y OpenModelica. Este estudio busca contribuir al campo del control de procesos mediante la optimización del sistema de llenado, asegurando la homogeneidad del producto y la eficiencia del proceso. En este contexto, se revisaron trabajos previos que abordan la dinámica de fluidos en sistemas de llenado automatizados, destacando la relevancia de la simulación como herramienta de validación en la ingeniería de procesos industriales. (Smith, J. & Jones, A. , 2020)

El punto de partida de este proyecto fue identificar y abordar una necesidad concreta dentro del sector de la industria alimenticia: la implementación de un **sistema eficiente y preciso de control y envasad**o para una planta productora de jugo con pulpa. Los objetivos incluyen asegurar precisión en el llenado, repetitividad del proceso, optimización del tiempo y recursos. Este proyecto se centra en crear un sistema funcional para el envasado de jugo en tambores de 200 litros, explicando minuciosamente el proceso y los pasos seguidos en su desarrollo.

2. Metodología

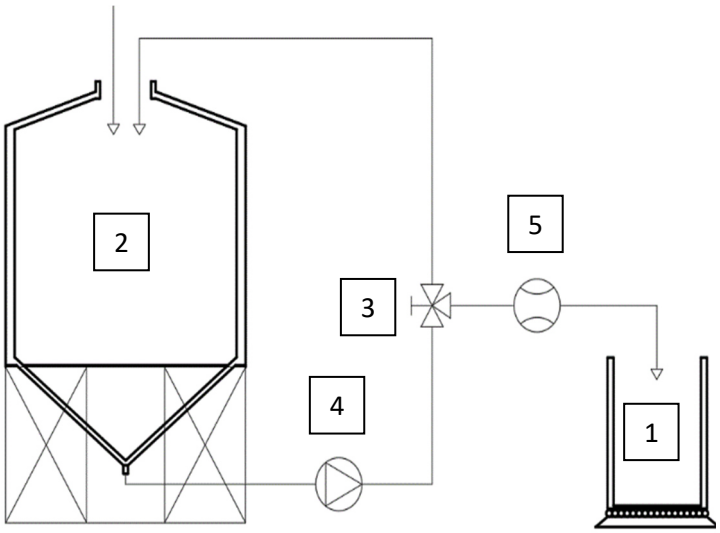
En este estudio, se desarrolló un modelado exhaustivo de las características dinámicas del sistema de llenado, con especial énfasis en la válvula de control ya juega un papel muy importante en la precisión del proceso. Las simulaciones se realizaron en Octave y OpenModelica, con el propósito de ajustar los parámetros del sistema y minimizar los errores en el proceso de llenado. Inicialmente, se caracterizó el comportamiento del jugo con pulpa, considerando su naturaleza no lineal debido a la presencia de partículas sólidas. Posteriormente, se desarrolló un modelo matemático del sistema que integró las funciones de transferencia de la válvula, lo que permitió optimizar el rendimiento del sistema en términos de precisión y consistencia.

Durante el desarrollo del proyecto, se establecieron una serie de principios fundamentales que guiaron cada etapa del proceso. Estos pilares son: **Modelado de planta**, **Dimensionamiento**, **Selección de elementos**, **Diagrama de bloques**, **Selección de control**, **Modelado físico/matemático** y **Simulaciones**.

2.1. Modelado de planta:

El modelado de la planta resultó fundamental para identificar y conectar de manera efectiva los componentes del sistema, asegurando así un funcionamiento óptimo y la integridad del proceso de llenado. Este proceso incluyó un análisis exhaustivo de las necesidades operativas, lo que permitió definir los elementos clave de la planta, como el sistema de **by-pass**, que mejora la flexibilidad y protección del sistema, optimizando el proceso de llenado y asegurando la homogeneidad del producto.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025



Los componentes clave incluyen:

1. **Tambor de plástico**: Contenedor para el almacenamiento y distribución del jugo con pulpa.
2. **Pulmón**: Almacén intermedio que abastece el resto de la planta.
3. **Electroválvula 3V/2P**: Regula la circulación del jugo en el sistema.
4. **Bomba centrífuga**: Asegura la circulación adecuada del jugo en el sistema.
5. **Caudalímetro electromagnético**: Mide con precisión el caudal de jugo hacia el tambor.
6. **Sistema by-pass**: Mejora la gestión del flujo, protegiendo la bomba y permitiendo mantenimiento sin interrupciones.

Figura 1: Diagrama P&ID del sistema de llenado.

2.2. Dimensionamiento:

El análisis de dimensionamiento garantiza que el sistema de llenado opere con eficiencia y precisión. Se ha determinado una capacidad máxima de producción de 4000 litros por hora de jugo con pulpa, estableciendo un límite físico que permite manejar una carga significativa de producción continua. Para cumplir con los requisitos de envasado, el sistema debe ser capaz de llenar un tambor de 200 litros cada 3 minutos. Esto exigió seleccionar una bomba que suministrara un caudal de llenado superior, permitiendo un margen de tiempo adecuado. Se optó por una bomba con capacidad aproximada de 200 litros por minuto. Este dimensionamiento no solo asegura un flujo constante y preciso, sino que también proporciona un margen adecuado para el reemplazo de bidones por parte del personal, sin interrumpir el proceso de producción. Este enfoque garantiza la adaptabilidad del sistema a las demandas variables de producción.

2.3. Selección de elementos.

La selección de los componentes se llevó a cabo bajo criterios rigurosos para garantizar la durabilidad y eficiencia del sistema. Todos los elementos, fabricados con materiales aptos para la industria alimentaria, fueron escogidos por su capacidad para cumplir con las exigencias del proceso de envasado. Con las especificaciones definidas en el dimensionamiento de nuestra planta, se identificaron los componentes que podrían materializar nuestra propuesta de planta.

- **Bomba centrífuga Czerweny ZETA-5T**: Potencia de 1,1 kW.
- **Válvula de bola de tres vías Siemens 599-10365**: Tamaño de 1 1/2".
- **Caudalímetro electromagnético Siemens MAG 3100**: Presión nominal máxima de 1450 psi.
- **Tambor plástico 200L GELHORN Art 39-1200**: Capacidad de 200 litros.
- **Tanque plástico 1000L REIMER T1000**: Capacidad de 1000 litros

2.4. Diagrama de bloques.

El diagrama de bloques proporciona una representación visual detallada de la interconexión entre los diferentes componentes del sistema. Este diagrama facilita la comprensión del flujo de datos y la integración de cada elemento, permitiendo una visión clara de cómo cada componente contribuye al funcionamiento general del sistema. La representación gráfica incluye conexiones entre la bomba, la válvula de control, el caudalímetro y los tanques, asegurando que se pueda seguir el proceso de llenado de manera eficiente y sin errores.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

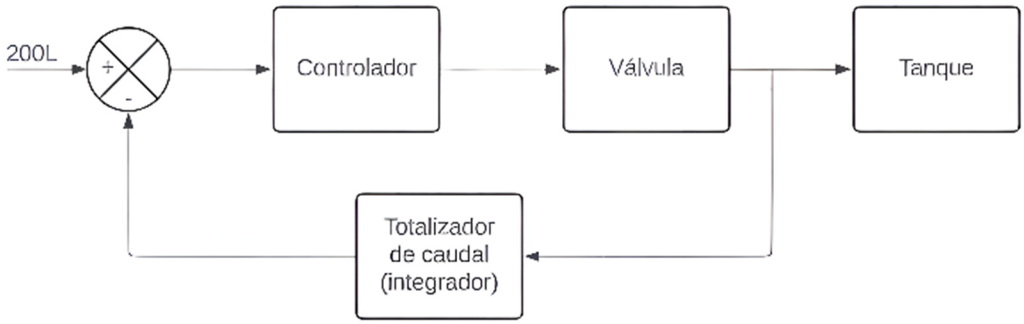


Figura 2: Diagrama de bloque de nuestro sistema.

2.5. Selección de control:

Se decidió implementar un PLC con control PID debido a sus ventajas significativas en términos de precisión de llenado, manejo de perturbaciones y flexibilidad en la automatización del proceso. El modelo seleccionado, Eaton EC4P, es conocido por su robustez y capacidad de integración en sistemas industriales complejos.

2.6. Modelado físico/matemático:

Previo al desarrollo matemático y la simulación, es importante entender la física subyacente del sistema, especialmente los principios de funcionamiento de las válvulas y su interacción con el proceso. En este proyecto, optamos por utilizar una electroválvula de tipo bola de 3 vías, que es la más adecuada para el sistema que vamos a controlar.

El **coeficiente de válvula "Cv"** es un parámetro crítico que indica el nivel de restricción que presenta la válvula al ser atravesada por un fluido. Este coeficiente se determina experimentalmente para cada tipo y tamaño de válvula y es fundamental para comprender cómo varía el caudal en función de la apertura de la válvula, como se observa en la Figura 3.

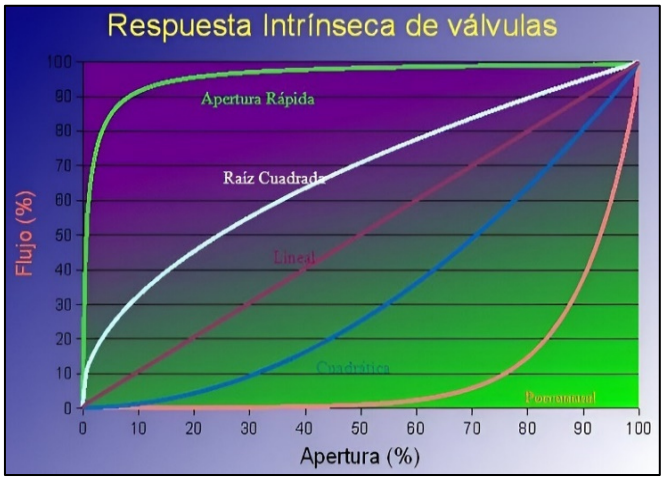


Figura 3: Diagrama de curvas características.

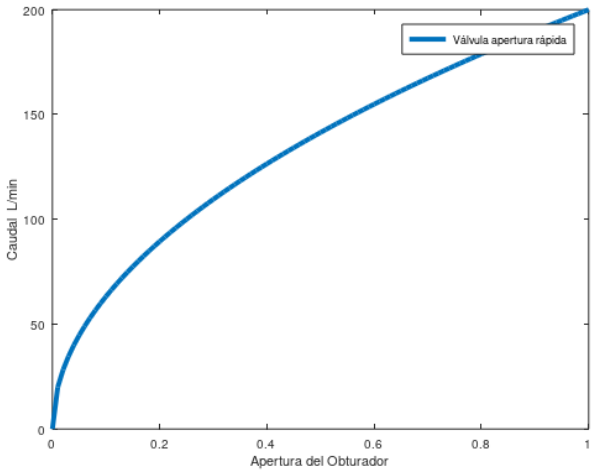


Figura 4: Caudal vs. apertura modelado en octave.

Con esta información, se procedió a simular el comportamiento del caudal de salida de la válvula utilizando Octave. La simulación permitió observar la relación dinámica entre el caudal y la apertura de la válvula. Los resultados confirmaron que el caudal presenta una relación cuadrática con la apertura de la válvula (ver Figura 4), la cual se debe tener en cuenta para un control preciso en el sistema de llenado.

Posteriormente, se desarrolló una función de transferencia que describe la relación entre la apertura de la válvula y el volumen acumulado en el tanque. Se aplicó la Transformada de Laplace para analizar esta relación en el dominio de la frecuencia y que mediante la utilización de OpenModelica se modeló el sistema en lazo cerrado, implementando un controlador PID para ajustar la apertura de la válvula con precisión. El objetivo fue alcanzar un volumen de 200 litros en el tanque en aproximadamente 65 segundos. La configuración del controlador PID se optimizó para asegurar que el sistema lograra un llenado exacto y consistente, minimizando el error y garantizando la homogeneidad del producto.

2.7. Simulaciones:

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones validaron de manera robusta el modelo matemático propuesto, demostrando que el sistema es capaz de mantener un llenado preciso y consistente del jugo con pulpa. En particular, la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

simulación en lazo cerrado reveló que, con el ajuste adecuado del controlador PID, se alcanza el volumen deseado de 200 litros en el tanque en aproximadamente 65 segundos. El controlador PID ajusta de manera continua y precisa la apertura de la válvula, logrando un llenado controlado y minimizando las desviaciones respecto al objetivo, lo que asegura la homogeneidad del producto final y la eficiencia del proceso.

- **Simulaciones en OpenModelica:**

En la simulación realizada en OpenModelica, se configuró un sistema de control en lazo cerrado con un bloque PID. Este bloque ajusta la salida en función del error entre la señal de referencia (el volumen deseado de 200 litros) y la salida real del sistema. La simulación en OpenModelica demostró la efectividad del modelo matemático y del controlador PID, alcanzando el volumen deseado en un tiempo óptimo y evidenciando la capacidad del sistema para mantener un llenado preciso y eficiente.

Se incorporó un bloque límite para reflejar las restricciones físicas del sistema. Este bloque asegura que la salida del controlador PID se mantenga dentro del rango operativo de la válvula, evitando señales fuera de los valores físicos válidos. Sin él, el controlador podría generar aperturas de válvula irreales hasta incluso negativas, afectando la precisión del caudal y la estabilidad del sistema.

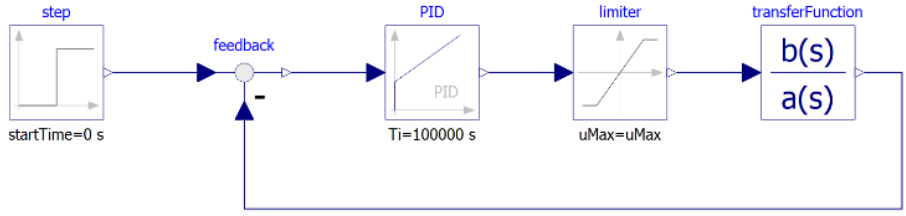


Figura 5: Diagrama de bloque en Open Modélica.

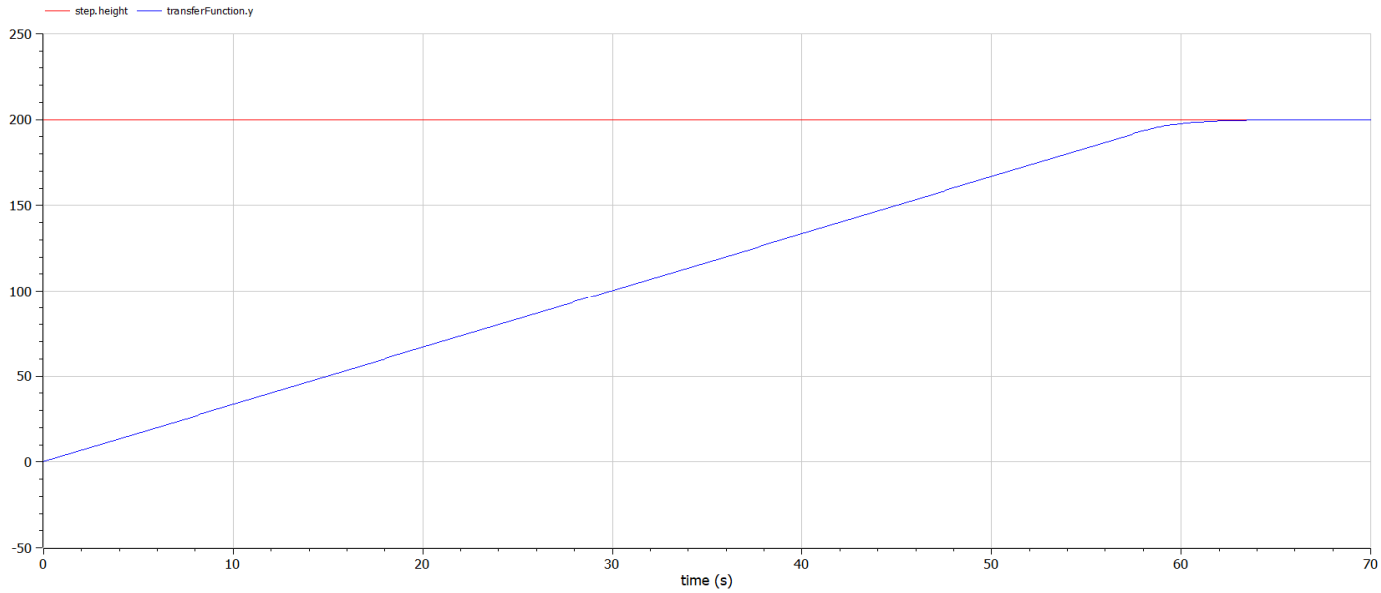


Figura 6: Gráfico de simulación a lazo cerrado en OpenModelica.

- **Código en Octave:**

Debido a ciertas limitaciones observadas en la simulación en OpenModelica, se optó por complementar el análisis utilizando un código en Octave. Este enfoque permitió incorporar la función característica completa de la válvula mediante operaciones simples, evitando las simplificaciones necesarias al utilizar la función de transferencia. Además, se tuvo en cuenta el tiempo de apertura recomendado por el fabricante, y se logró una simulación más precisa del recorrido del émbolo de la válvula. Esta simulación proporciona una interpretación más fiel del comportamiento físico del sistema y garantiza que el modelo respete de manera más rigurosa las restricciones del mundo real.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

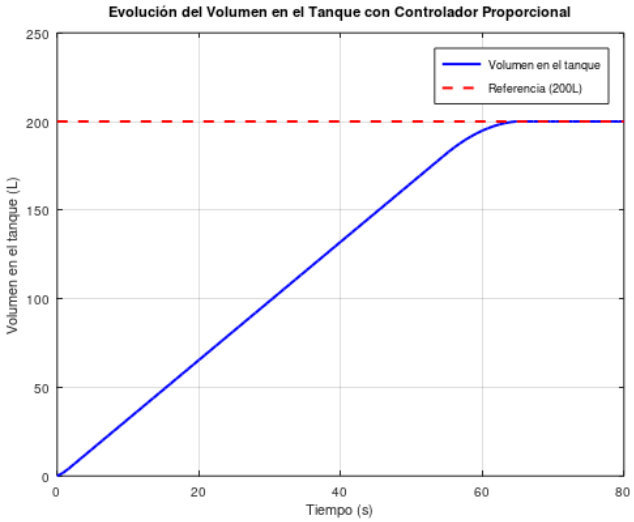


Figura 7: Gráfica de volumen en tanque vs tiempo.

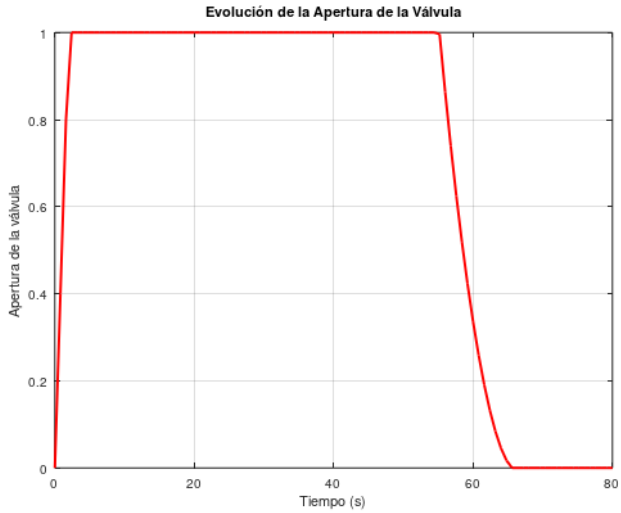


Figura 8: Gráfica apertura de válvula vs tiempo.

3. Resultados

Las simulaciones realizadas en este trabajo validaron de manera sólida el modelo matemático propuesto, confirmando que el sistema de llenado es capaz de mantener un control preciso y consistente del jugo con pulpa. En la simulación en lazo cerrado, el sistema alcanzó el volumen objetivo de 200 litros en el tanque en aproximadamente 65 segundos, demostrando la eficacia del controlador PID para ajustar la apertura de la válvula y minimizar las desviaciones respecto al objetivo.
Este desempeño no solo asegura la homogeneidad del producto final, sino que también optimiza la eficiencia del proceso al reducir el desperdicio y garantizar un uso óptimo de los recursos. Además, se anticipa que la implementación de este sistema en un entorno real mejorará significativamente la eficiencia operativa, proporcionando un control más preciso y replicable del llenado.

A pesar de los resultados prometedores obtenidos, este estudio enfrentó varios desafíos técnicos. Entre ellos, las limitaciones inherentes a las simplificaciones necesarias en los modelos matemáticos, debido a la no linealidad de la válvula de bola, y en las simulaciones en OpenModelica, que obligaron a realizar ajustes mediante el uso de Octave para reflejar con mayor precisión la realidad operativa. Además, la complejidad del comportamiento no lineal del jugo con pulpa y la variabilidad en las condiciones de operación presentan desafíos adicionales para la implementación práctica. Estos aspectos subrayan la necesidad de un ajuste continuo del sistema y futuras investigaciones para perfeccionar el modelo y abordar las limitaciones identificadas.

4. Conclusiones

Este estudio pone de manifiesto la importancia de la simulación y el análisis de señales para el desarrollo y optimización de sistemas de control, proporcionando una base sólida para la innovación y mejora continua en diversas industrias. Los resultados obtenidos hasta la fecha indican que el modelo propuesto puede ofrecer mejoras sustanciales en la precisión y eficiencia de procesos complejos. A medida que avanzamos hacia la implementación práctica, estas simulaciones servirán como herramientas esenciales para ajustar y perfeccionar los sistemas, promoviendo la innovación en el control de procesos industriales de manera general.

Un aspecto significativo del estudio ha sido el exhaustivo análisis físico de los componentes del sistema, especialmente el comportamiento dinámico de las válvulas de control. Este análisis detallado ha permitido modelar con precisión las funciones de transferencia y optimizar la respuesta del sistema, reflejando de manera más fiel las condiciones operativas reales. La integración de esta comprensión física en las diferentes simulaciones ha sido clave para mejorar la exactitud y relevancia de los modelos desarrollados. El uso avanzado de Octave para simular el comportamiento del sistema ha sido fundamental para abordar la complejidad de las relaciones no lineales y refinar el modelo. Este enfoque ha posibilitado

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

simulaciones más precisas y detalladas, incorporando aspectos complejos que otros métodos podrían simplificar. La capacidad que Octave nos da para manejar estos detalles nos permite un control más fino y una mayor eficiencia.

Además, una de las contribuciones más significativas de este trabajo es la profunda comprensión y modelado del comportamiento dinámico de las válvulas de control, que ha permitido realizar simulaciones más precisas y realistas. Este enfoque no solo asegura que los modelos desarrollados reflejen con exactitud las condiciones operativas, sino que también ofrece la capacidad de identificar y mitigar ineficiencias potenciales. En consecuencia, la implementación de simulaciones detalladas y precisas puede traducirse en ahorros económicos tangibles al optimizar recursos y reducir el desperdicio. En resumen, los resultados obtenidos demuestran que el sistema diseñado no solo es viable y efectivo, sino que también tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia operativa en diversas industrias, contribuyendo de manera tangible a la innovación en el control de procesos y generando beneficios económicos sustanciales.

Agradecimientos

Agradecemos al Ing. Esp. Matías Órue y al Ing. Esp. Rodrigo Agosta, profesores de la cátedra de Electrónica y Sistemas de Control en la carrera de Ingeniería Mecánica, por su valiosa guía y apoyo durante el desarrollo de esta investigación. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para el avance y la calidad del trabajo realizado.

Referencias bibliográficas

Ogata, K. (2010). Modern control engineering (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
Smith, J. & Jones, A. (2020). Advancements in control and automation for liquid filling systems. London, UK: Journal of Food Engineering.
Siemens AG. (2023). Technical manual on valves and flow meters. Munich, Germany: Siemens.
Czerweny S.A. (2023). Catalog of centrifugal pumps. Buenos Aires, Argentina: Czerweny.
NOVUS Automation. (2023). Flow meters and control systems: An overview. São Paulo, Brazil: NOVUS.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Análisis de señales, modelados y simulación
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Facultad Regional Rafaela

Optimización de rutas para el transporte de leche bajo diferentes condiciones de caminos en la región Pampeana

Route Optimization for Milk Transportation under Varying Road Conditions in the Pampas Region

Presentación 18/10/2024

Augusto López Airaudo

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: augustolopezairaudo@gmail.com

Santiago Gariboldi

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: santigariboldi@gmail.com

Bianca Culasso

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: biancaculasso@hotmail.com

Resumen

Este trabajo presenta una metodología para la optimización de los recorridos para la recolección de leche en tambos y su transporte a plantas de procesamiento, utilizando un algoritmo metaheurístico denominado recocido simulado. La investigación aborda las ineficiencias del método empírico empleado actualmente por la industria en la asignación de rutas, que resultan en una capacidad ociosa significativa de los camiones y en recorridos más largos de lo necesario. El estudio se basa en un caso práctico con 400 tambos, 3 plantas y 55 camiones. Con el método propuesto se mejora la capacidad ocupada por tanque, logrando una reducción en la distancia recorrida y reduciendo la cantidad de camiones necesarios a 41.

Palabras clave: Recolección de Leche; Problema de Enrutamiento de Vehículos; Huella de Carbono; Recocido Simulado

Abstract

This work presents a methodology for optimizing milk collection routes from dairy farms and its transportation to processing plants, using a metaheuristic algorithm known as simulated annealing. The research addresses inefficiencies in the empirical method currently employed by the industry for route assignment, which results in significant truck idle capacity and longer-than-necessary routes. The study is based on a practical case involving 400 dairy farms, 3 plants, and 55 trucks. By improving the occupied capacity per tank, the methodology reduces the distance traveled and lowers the number of trucks required to 41.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Keywords: Milk Recollection; Vehicle Routing Problem; Carbon Footprint; Simulated Annealing

1. Introducción

Actualmente, la logística juega un rol significativo en el éxito de las organizaciones, si bien no añade valor directo a los productos, es esencial en la cadena de valor. Optimizarla mediante herramientas tecnológicas permite la mejora de procesos, reducción de costos y de la huella de carbono asociada, un factor cada vez más importante en un entorno de creciente concientización ambiental.

En Argentina, la industria láctea cuenta con 685 plantas industriales, donde se procesan 25,8 millones de litros de leche al día generados en más de 9.000 tambos (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2019), siendo un pilar de la industria nacional. Sin embargo, el potencial del sector se ve afectado por la ineficiencia en la logística de la materia prima. La misma enfrenta diversas dificultades, destacándose la considerable extensión de los recorridos, tanto en términos de distancia como de tiempo. Esta situación provoca un uso ineficiente de los camiones, que operan con una capacidad ociosa del 30% en promedio. Tanto los recorridos largos como la subutilización de los camiones contribuyen directamente al aumento de la huella de carbono. Además, la ineficiencia del proceso se agrava por recorridos gestionados de manera independiente por transportistas tercerizados, basados en tambos preestablecidos, lo que limita la flexibilidad y la optimización de las rutas. Para abordar esta problemática, es necesario un cambio de paradigma con enfoque en una gestión coordinada y colaborativa de los camiones, la cual ya se está adoptado en otros países (Paredes-Belmar, 2016, 2022). La incertidumbre en la planificación de rutas y la gestión de una flota afecta directamente la eficiencia de los recorridos, la calidad de la leche y los costos operativos, repercutiendo en el producto final.

Algunos autores (Paredes-Belmar, et al., 2022) han abordado el problema del enrutamiento de vehículos (VRP) con Programación Lineal de Enteros Mixtos y tres etapas de iteración local debido a la complejidad del problema. El presente trabajo amplía una optimización que involucra 10 camiones y una planta (Gariboldi, et al.,2023). En esta nueva investigación se propone una metodología para optimizar la recolección de leche en un área de 10.350 kilómetros cuadrados y su posterior transporte en caminos pavimentados y no pavimentados a las plantas de procesamiento, utilizando un algoritmo metaheurístico denominado recocido simulado (Kirkpatrick, et al., 1983). Este algoritmo se emplea para resolver problemas de optimización, tanto combinatorios como continuos, y es especialmente útil cuando la búsqueda de una solución exacta puede ser computacionalmente costosa o impracticable, permitiendo encontrar soluciones de alta calidad en un tiempo razonable.

2. Metodología

2.1. Caso de estudio

El caso de estudio consta de cuatrocientos tambos (indicados en color azul), tres plantas industriales (indicadas en color rojo), y un estacionamiento (indicado en color verde) como se muestra en la Figura 1. Se modelan 55 camiones, cada uno de los cuales comenzará y finalizará su recorrido en el estacionamiento. En el trayecto deben recolectar la leche de todos los tambos asignados en cada solución y, finalmente, trasladarla a las plantas para su procesamiento.

La cantidad de tambos que visita cada camión dependerá de la capacidad de producción diaria del mismo, con una media de 2600 litros comprendida entre valores mínimos y máximos de 595 litros y 11.916 litros, respectivamente. Se cuenta con una flota heterogénea de camiones con sus capacidades detalladas en la Tabla 1 y una capacidad efectiva fijada en el 97,3% del total, para contemplar las posibles desviaciones diarias en la producción de los tambos.

Tabla 1. Distribución y capacidad de la flota

Cantidad de Camiones	Capacidad (lt)	Capacidad Efectiva (lt)
27	30.000	29.190
19	28.000	27.244

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

9	18.000	17.514

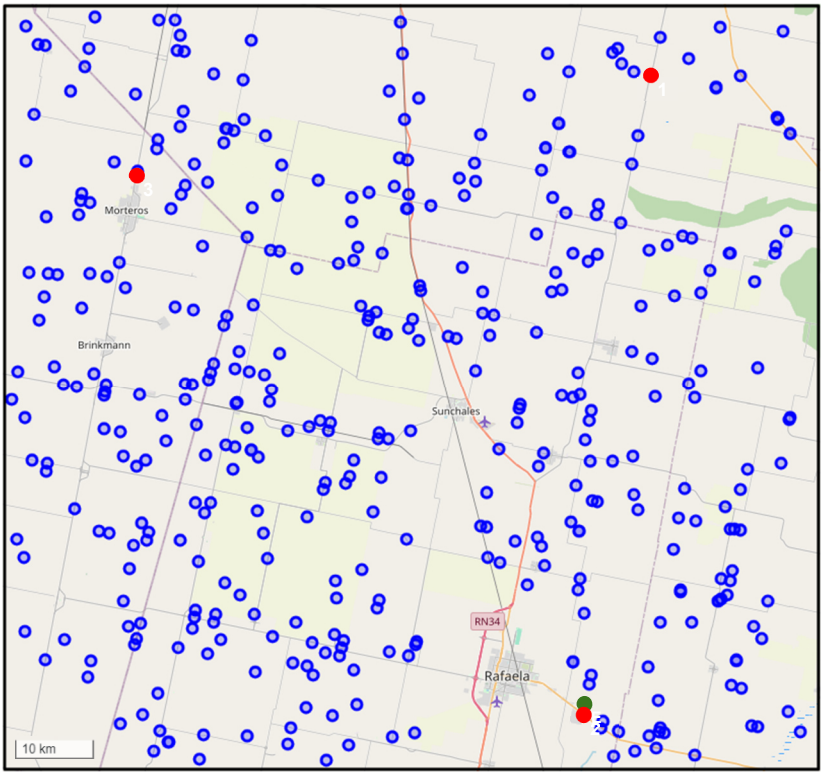


Figura 1. Caso de Estudio

Las tres plantas modeladas cuentan con distintos requerimientos productivos detallados en la Tabla 2. Se puede observar que la planta N° 2 tiene las propiedades de una planta central, siendo la que más litros puede procesar. En contraste, las otras dos plantas tienen un rango característico de las plantas monoproducto. Es importante señalar que el diseño del caso de estudio se basa en una simplificación que toma como referencia un relevamiento de la situación actual de las empresas de la región centro de Santa Fe. El modelo propuesto, por lo tanto, integra los aspectos principales identificados en este contexto.

Tabla 2. Requerimientos productivos de las plantas

Numero de Planta	Límite Inferior (lt)	Límite Superior (lt)
1	70.000	85.000
2	0	1.000.000
3	100.000	140.000

2.2. Formulación del problema

El problema de optimización consiste en minimizar la función objetivo (FO) que se define en la Ecuación (1) como la suma total de la distancia ponderada que recorre cada camión (C) en su recorrido (r_i) que se mide en kilómetros y se denota como Q_{KM}. Para la evaluación de cada recorrido (i) se le asigna una ponderación de 1 a la distancia de los caminos pavimentados y de 2 a la distancia de los no pavimentados, permitiendo priorizar la selección de caminos pavimentados.

$$FO = \sum_{i=1}^{N_c} Q_{KM}(r_i) \quad (1)$$

La función objetivo es una medida simplificada del esfuerzo logístico necesario para la recolección de la leche. Las variables de decisión del problema se establecen mediante un vector de números enteros (r_i) para indicar los tambos a recolectar que son asignados a cada camión para los cincuenta y cinco camiones en total (N_C) y su planta de descarga. Los recorridos propuestos deben cumplir con la condición de que la suma total de litros recolectado por cada camión no exceda

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

la capacidad de sus tanques. Para un mayor detalle en el modelado de las variables y restricciones ver el trabajo previo (Gariboldi, et al.,2023). Para modelar el problema, se establecen cincuenta y cinco vectores cada uno de los cuales representa un recorrido que determina el orden en que deben ser visitados los tambos para cada camión. En cada iteración este orden será modificado (perturbado) para obtener una nueva solución, donde la asignación de los tambos y la planta de descarga de cada camión podrá ser reasignada. Esta distribución será evaluada de acuerdo a la Ecuación (1), siempre que dicha solución no exceda la capacidad de los tanques. Asimismo, la cantidad de leche entregada en cada planta manufacturera debe estar dentro de los límites establecidos, asegurando que no se supere la capacidad máxima permitida y que se cumpla con la cantidad mínima requerida para cada planta recolectando la totalidad de litros disponibles.

2.3. Recocido Simulado

El problema de enrutamiento de vehículos es un desafío complejo que requiere un algoritmo metaheurístico para encontrar soluciones cercanas al óptimo global. En el presente trabajo se implementa el algoritmo estocástico conocido como recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983) utilizando el software Matlab. Este método comienza con una solución inicial y busca mejorarla explorando soluciones cercanas de menor costo. El recocido simulado permite, bajo ciertas condiciones, aceptar soluciones de mayor costo que podrían no ser beneficiosas inicialmente. Esta estrategia permite evitar quedar atrapado en soluciones óptimas locales. Este proceso se rige por un parámetro llamado temperatura, que disminuye gradualmente a lo largo de las iteraciones. Al principio, la temperatura es alta, lo que facilita la aceptación de soluciones de mayor costo, pero a medida que avanza el proceso y la temperatura baja, el criterio se vuelve más estricto. Este enfoque emplea la probabilidad de Boltzmann, que se utiliza para determinar cuándo aceptar una solución menos favorable, ayudando al algoritmo a explorar diferentes configuraciones en busca de las rutas más eficientes. Para la exploración del espacio solución, los métodos de perturbación modifican aleatoriamente el orden y cantidad de tambos que se asignan a cada camión y la planta de descarga del mismo.

3. Resultados

Para ejemplificar las ventajas del método propuesto frente a la metodología actual de asignación de recorridos, se generaron 55 clusters que fueron definidos de acuerdo a la forma que tradicionalmente lo realizan las empresas lácteas, es decir, basándose en la experiencia previa o en la intuición. La resolución del modelo propuesto utilizando la metodología empírica determina un valor de FO=14.790 km y 102 litros recolectado por kilómetro recorrido. Por otro lado, el resultado de la aplicación de la metodología propuesta utilizando el algoritmo de recocido simulado obtiene FO=10.202 km y 145,7 litros de leche por kilómetro recorrido. La solución expuesta se obtuvo en, aproximadamente, 5 horas de búsqueda, soluciones similares se encontraron con un tiempo de cómputo de media hora en una PC de escritorio con un procesador i7.

En la Figura 2 se muestran diez grupos de tambos obtenidos con la resolución empírica a la izquierda y otros diez obtenidos de la solución optimizada a la derecha, donde cada uno de estos grupos es asignado a un camión para su recolección. En la comparación se pueden observar como el recocido simulado muestra su potencial mediante soluciones no convencionales, agrupando en subgrupos durante la recolección los cuales no son necesariamente próximos, pero no representan una adición de kilómetros.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

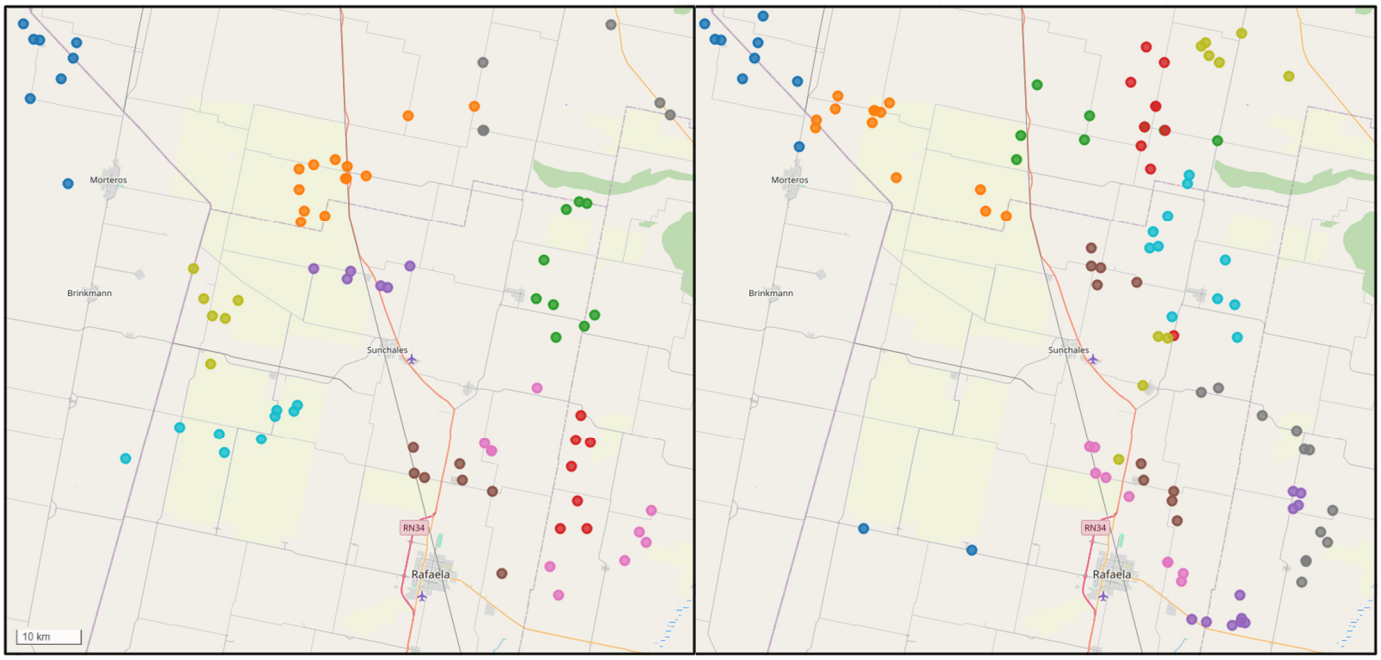


Figura 2. Asignación empírica (izquierda) y optimizada (derecha) de tambos

El procedimiento de optimización obtenido permite operar con 14 camiones menos para recolectar la misma cantidad de leche. La distancia total recorrida (no ponderada) por los camiones mediante el método empírico fue de 11799 km mientras que, el modelo de optimización metaheurístico provee una distancia total recorrida de 7992 km.

El análisis comparativo arroja resultados significativos en términos de eficiencia de rutas. En la metodología empírica, se recorre una media de 215 km por camión. Por otro lado, utilizando el recocido simulado se obtiene una media de 195 km por camión, esto representa una disminución de más de 3800 km en la distancia total recorrida. Se puede observar en la Figura 3, la comparación de recorridos similares de la solución empírica y la optimizada respectivamente, logrando una reducción de kilómetros al no recolectar tambos agrupados por cercanía exclusivamente.

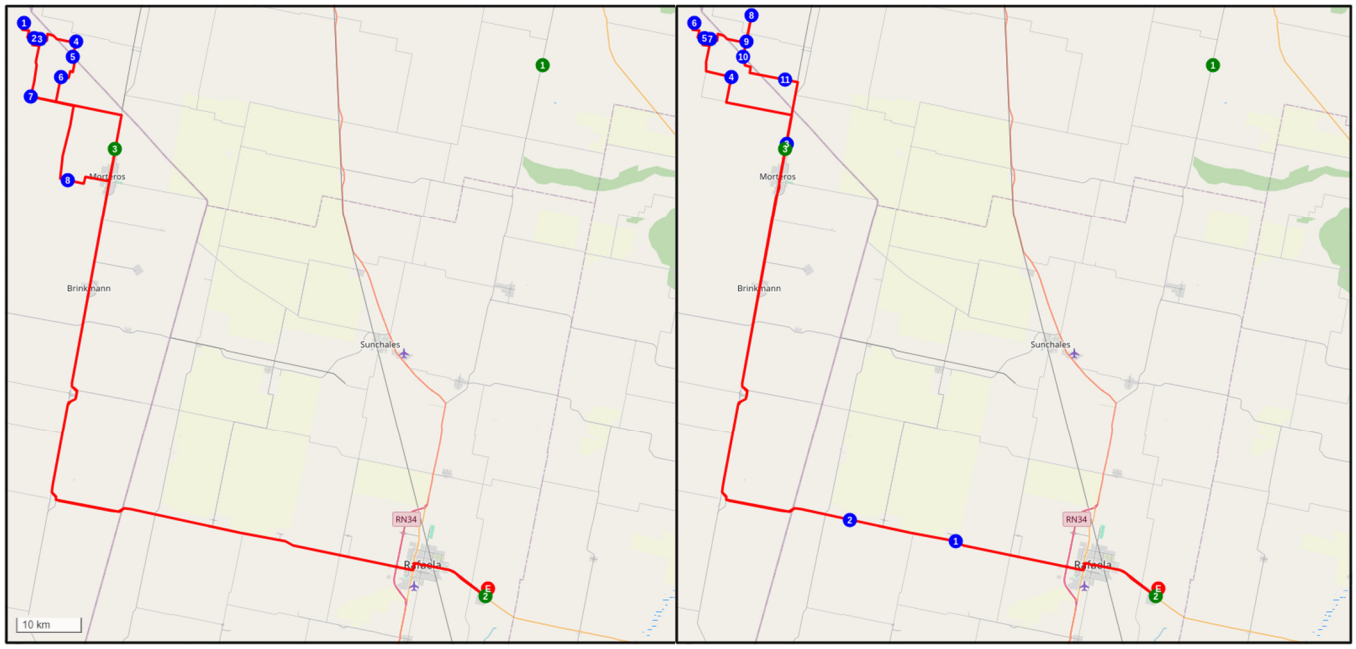


Figura 3. Recorrido empírico (izquierda) y optimizado (derecha)

El análisis del tiempo de recolección muestra que, en la estrategia empírica, el tiempo promedio es de 5,8 horas. En comparación, el recocido simulado presenta un tiempo promedio ligeramente superior de 6,3 horas. Este incremento en el tiempo de recolección se debe a la disminución de camiones requeridos en la solución optimizada, siendo esperable al operar con 14 camiones menos que la solución empírica.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

4. Conclusiones

Con la aplicación de la metodología propuesta en el presente trabajo se ha obtenido una mejora del 31% en comparación con la asignación empírica de recorridos, según la función objetivo. Esta mejora se debe a que catorce camiones que en la asignación empírica estaban en uso, ya no se utilizan para la recolección optimizada, lo que ha llevado a una ocupación promedio de llenado de los tanques del 92,52% en los 41 camiones en servicio. Como resultado, la capacidad ociosa se ha reducido significativamente, pasando de un 30,54% a un 7,48%.

La optimización permite reducir significativamente la distancia recorrida, obteniendo una disminución del 32,3 % respecto a la solución empírica. Esta reducción no solo implica una considerable disminución de los costos operativos, sino también un menor desgaste de los vehículos, lo que puede prolongar su vida útil y reducir gastos en mantenimiento. Además, al optimizar la capacidad y reducir las distancias recorridas el proceso logístico es más efectivo y económico.

Por último, es importante mencionar que a nivel nacional se ha registrado un promedio de 92 kilómetros recorridos por cada mil litros recolectados, según datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2019). Esto indica que el diseño del modelo se encuentra en el mismo orden de magnitud y proporciona una base sólida para realizar comparaciones fiables.

En trabajos futuros se expandirá sobre la huella de carbono al incluirla dentro de la función objetivo, considerando que la carga transportada por los camiones en cada kilómetro recorrido influye directamente en el consumo de combustible. Nuevas investigaciones han encontrado la posibilidad de reducir la huella de carbono, a costa de recorrer distancias mayores (López-Castro, et al, 2023).

Agradecimientos

Agradecemos a las empresas de la región y su personal que nos abrieron sus puertas y nos facilitaron información clave para el armado del modelo. Este trabajo se realizó bajo la dirección de los investigadores Gabriel Puccini y Carlos Bonetti en el marco del proyecto “Diseño de recorridos óptimos para el transporte de leche en condiciones de incertidumbre” (Código SCyT: ASECRA0008637).

Referencias bibliográficas

Gariboldi, S., López Airaudo, A. y Culasso, B. (2023). Optimización de Recorridos para el Transporte de Leche utilizando Recocido Simulado. *Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos (JIT)*

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. y Vecchi, M. (1983). “Optimization by simulated annealing.” Science, 220(4598), 671-680. https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671

López-Castro, L. F., Solano-Charris, E. L. y Pagès-Bernaus, A. (2023). “Environmental approach for the design of raw milk collection routes with a heterogeneous fleet.” Computers and Electronics in Agriculture, 211, 107995. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107995

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2019). Estado de situación de la industria láctea argentina: Para la definición de políticas públicas 2016-2018. Recuperado 15 de junio de 2023. https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_lecheria/industria/estado/estado.pdf

Paredes-Belmar, G., Montero, E. y Leonardini, O. (2022). “A milk transportation problem with milk collection centers and vehicle routing.” Isa Transactions, 122, 294-311. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.04.020

Paredes-Belmar, G., Marianov, V., Bronfman, A., Obreque, C. y Lüer-Villagra, A. (2016). “A milk collection problem with blending.” Transportation Research Part E-logistics and Transportation Review, 94, 26-43. https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.07.006

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Análisis de señales, modelados y simulación
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Reconquista

Desarrollo de un algoritmo para recorrer un pórtico y hallar sus incógnitas

Structural frame pathfinding and unknowns identification algorithm development

Presentación 18/10/2024

Iván Suligoy

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Diseño Mecánico (GRUDIM), Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: ivan-sul7890@hotmail.com

Tiago Speranza

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Diseño Mecánico (GRUDIM), Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: donsperanza32@gmail.com

Macarena Caballero

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Grupo de Diseño Mecánico (GRUDIM), Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: macarenacaballer0402@gmail.com

Resumen

Este trabajo aborda la simplificación de las incógnitas características del análisis del comportamiento estable y dinámico de entramados planos mediante un recorrido característico. Se introduce el análisis de un pórtico de ejemplo y se presenta las aproximaciones del algoritmo que realiza este recorrido en lenguaje *Wolfram*, donde quedan expuestas las razones por las cuales el algoritmo fue migrado a C#. Posteriormente se detalla la teoría de grafos, su aplicación, y el concepto de recorrido hamiltoniano, otorgando la posibilidad de adaptar el pórtico como un grafo. Este enfoque demuestra la eficiencia y optimización de C# respecto de *Wolfram*, justificando su aplicación para el análisis estructural.

Palabras clave: Pórtico; Recorrido; Grafo; Algoritmo; Programación.

Abstract

The current project simplifies and reduces the number of stable and dynamic unknowns of a frame structure via its characteristic path. Using an arbitrary frame structure as an example, the pathfinding algorithm is presented first in the *Wolfram* language, exposing the reasons of why the algorithm was migrated to C#. Then, the Graph theory, its applications, and the concept of hamiltonian path are explained, thus, giving the possibility of studying the frame structure as a graph. The latter concept demonstrates the efficiency and optimization of C# in comparison to *Wolfram*, justifying its usage on structural analysis.

Keywords: Structure; Pathing; Graph; Algorithm; Programming.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

1. Introducción

Un pórtico es una estructura compuesta por elementos rígidos, generalmente vigas y columnas, que se unen en nodos formando un marco que soporta diversas cargas. Es fundamental determinar el comportamiento dinámico (encontrar sus frecuencias naturales) y la estabilidad de la estructura bajo diferentes condiciones de carga. En la Figura 1 se muestra un pórtico plano cerrado, la nomenclatura utilizada es: Bn para el número de barra y Nn para el número de nodo. La estructura presenta empotramientos al suelo por medio de las barras B_{10} y B_{11}.

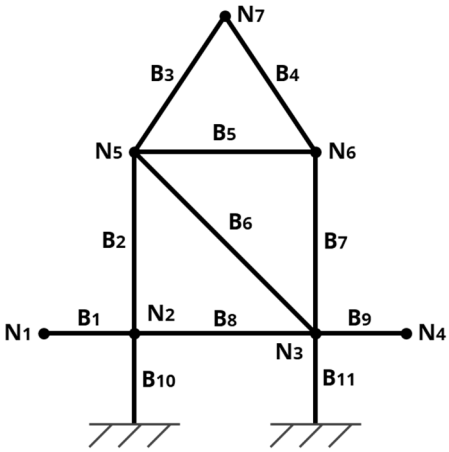


Figura 1. Pórtico genérico al que se hará referencia a lo largo del documento.

Para el estudio del comportamiento de la estructura es necesario aplicar las fórmulas propias de la estabilidad, comenzando por un estudio energético para determinar el desplazamiento transversal $v_j(x_j)$ y el desplazamiento axial $u_j(x_j)$ de cada barra j en un sistema local de coordenadas x_j. A partir de las derivadas sucesivas de estos desplazamientos se desprenden las diferentes variables que puede tener una barra, a saber:

- A partir de las ecuaciones de compatibilidad geométrica: Desplazamiento Transversal, Desplazamiento Axial y Giro.
- A partir de las ecuaciones de equilibrio: Momento, Esfuerzo de corte y Esfuerzo Normal.

Por lo tanto, el comportamiento de cada barra del pórtico queda completamente definido por estas variables que deben ser calculadas, sin embargo, algunas de estas pueden ser nulas. Volviendo al ejemplo de la Fig. 1, las barras B10 y B11 presentan vínculos de empotramiento y por lo tanto no posee desplazamiento transversal, ni desplazamiento axial, ni giro.

2. Metodología

2.1 Recorrido

La identificación de incógnitas nulas es sencilla para barras con vínculos, pero se complejiza cuando se tiene que estudiar el resto de las barras de la estructura, requiriendo analizar las incógnitas de las barras aledañas a cada barra en la que se quiera definir sus incógnitas. No obstante, un estudio llevado a cabo por el Dr. Héctor Martín en sus tesis “Utilización de series de potencias para la resolución económica de elásticas, frecuencias y teoría de segundo orden de entramados de barras, en el contexto de la ingeniería estructural” (Martín, 2017) y otros trabajos (Martín et al., 2013) (Martín, 2012) nos permitió simplificar esta problemática mediante un recorrido de las barras del pórtico, tratando de abarcar la mayor cantidad posible de ellas. En síntesis, al comenzar desde un nodo con un vínculo que posee condiciones de borde definidas, se reducen las incógnitas necesarias, las cuales se trasladan a las siguientes barras que conforman el recorrido. Si bien existe la posibilidad de que algunas barras queden fuera del recorrido y sus incógnitas no puedan ser determinadas, este método nos permite reducir de manera significativa las incógnitas presentes en el problema original.

Si bien el método consiste en iniciar el análisis por un vínculo, la elección de un buen camino que abarque la mayor cantidad de barras posible es esencial para optimizar dicho análisis. La solución que buscamos es la identificación de un recorrido eficiente que simplifique el proceso de cálculo y mejore la precisión de los resultados obtenidos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

2.2 Primera aproximación

El primer algoritmo, realizado en *Wolfram Mathematica*, contaba con una interfaz gráfica limitada en interactividad, puesto que para representar un pórtico se debe ingresar cada dato en una serie de matrices en lugar de dibujar el entramado propuesto. En total se operaba con cuatro matrices: Nodos, Barras, Vínculos y Vínculos Inclinados. Las dos primeras poseían tantas filas como cantidad de los elementos respectivos que tuviera la estructura, seguido de varias columnas donde se designaban la numeración de estos y sus respectivos datos para ubicarlos en el sistema global. Además, la matriz Barras contaba con columnas extras donde se indicaban características físicas de la barra (área, momento de inercia, módulo de Young y densidad). Por otro lado, las restantes poseían datos sobre el tipo de vinculo que se encontraba en un determinado nodo y el ángulo que formaba la vertical del vínculo respecto a la vertical global.

Luego de completar dichas tablas, el algoritmo marca las barras que, saliendo de un vínculo, tienen en su extremo un nodo simple al que acceden sólo dos barras. Posteriormente enumera los nodos y las barras en forma correlativa según cómo se trace el recorrido; siendo el nodo vinculado inicial y su barra el número uno.

Al llegar al nodo final de cada barra elige una de las salientes a este y verifica si no están marcadas, en caso de que haya más de una que cumpla con esta condición, se elige al azar para continuar el camino y marcar a las demás como fuera del recorrido. Si ninguna cumple con dicha condición, el algoritmo verifica si todas las barras del entramado se encuentran marcadas y si no es el caso significa que no se halló el recorrido óptimo por lo que procede a desarmar todas las barras no vinculadas, es decir, borra la enumeración y el camino para elegir uno nuevo al azar. Este proceso termina una vez que el camino elegido permita marcar todas las barras de la estructura, ya sean parte o no del camino recorrido.

Mathematica es un software de lenguaje simbólico, esto quiere decir que se pueden definir operaciones computacionalmente complejas (integrales, derivadas, series, etc.) con los mismos símbolos matemáticos que corresponde a esas operaciones, esto simplifica la legibilidad pero tiene la característica de que dichas operaciones están definidas en función de otras operaciones, que a su vez están definidas con otras operaciones y así sucesivamente, resultando en tiempos de espera no despreciables que aumentan exponencialmente a medida que se utilizan más de estas operaciones. Este es un factor que impide la portabilidad de algo programado en *Mathematica* a un ejecutable independiente del entorno de programación *Wolfram*.

Es por ello por lo que, tras evaluar opciones, decidimos migrar el programa al lenguaje C# que ofrece una mayor eficiencia y capacidad para manejar la complejidad del proyecto, permitiéndonos superar las restricciones mencionadas y mejorar significativamente el rendimiento y la fluidez tanto de la interactividad en la armado del pórtico como del desarrollo del algoritmo que realiza el recorrido.

2.3 Teoría de grafos

Además de optar por otro lenguaje de programación, también se le dio otro enfoque al pórtico en estudio. Si se ignoran momentáneamente las características de cada barra (longitud, área, densidad, etc.) y se deja únicamente la relación que existe entre las barras y los nodos, se obtiene un diagrama simplificado. Este diagrama se denomina grafo y existe una rama entera de las matemáticas que se encarga de estudiarlos y hacer operaciones sobre estos, la teoría de Grafos. El problema más célebre de este campo es el de los Puentes de Königsberg, resuelto por Leonhard Euler en 1736.

Un grafo está compuesto por nodos (vértices) y por conexiones entre ellos (aristas); el uso más habitual de un grafo es para el análisis de datos del mundo real, que va desde las relaciones que puede tener una persona con las demás dentro de una red social, hasta la visualización de los sistemas del subterráneo en las ciudades más grandes, en ambos ejemplos se tienen en cuenta las conexiones (“me gustas” o rutas) que tienen los diferentes nodos (personas o ciudades) entre sí. Estas herramientas nos permiten trabajar al pórtico como un grafo, operando con las barras como las aristas y a los nodos donde se inicia o termina una barra como vértices.

Dentro de las operaciones que existen en la Teoría de Grafos existe el concepto de recorrido, que es exactamente lo que necesitamos: una secuencia barra a barra para reducir la cantidad de incógnitas a calcular. Dentro de los posibles caminos que existen está el denominado camino hamiltoniano, que tiene como objetivo recorrer todos los nodos del grafo. Éste se utiliza, por ejemplo, para encontrar una ruta que permita visitar todas las capitales de cada provincia, pero para nuestro caso al recorrer cada nodo del pórtico una sola vez se garantiza que se abarque la mayor cantidad de barras posible, logrando así el recorrido más eficiente para reducir el número de variables.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Otro motivo más por el que se decidió tomar este enfoque teórico es que las operaciones sobre grafos son computacionalmente sencillas de implementar aprovechando la facilidad que brinda el lenguaje C# para trabajar con listas.

2.4 *Algoritmo de recorrido*

Para explicar el recorrido que realiza el algoritmo del programa, vamos a utilizar el pórtico de la Fig. 1, representado ahora como un grafo, denotando en celeste los vínculos de tercer grado (empotramientos) como se ve en la Fig. 2.1. También el subgrafo en la Fig. 2.2 que es la forma en la que el algoritmo interpreta el pórtico para su análisis.

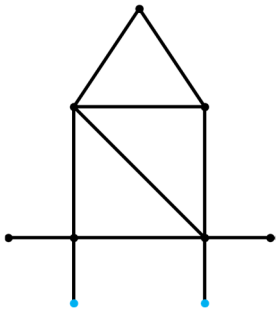


Figura 2.1. Grafo equivalente al pórtico descrito en la Fig. 1

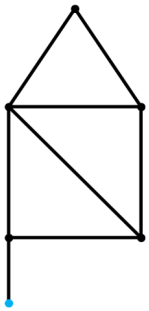


Figura 2.2. Subgrafo con el que trabaja el algoritmo.

El algoritmo comienza accediendo a tres listas que contienen información sobre los nodos, vínculos y la matriz topológica que indica cómo están conectadas las barras que conforman el pórtico, estos datos se ingresan en otra parte de la interfaz del programa. El algoritmo tiene como objetivo recorrer el pórtico barra a barra iniciando desde un nodo con vínculo, mientras que realiza la operación de marcar las barras adyacentes a las barras troncales, y finaliza una vez se haya encontrado un camino que marque todas las barras restantes fuera del camino, sin dejar ninguna barra sin marcar. A continuación, se explica la secuencia de pasos que realiza el algoritmo de recorrido:

- Paso 1: Se definen las funciones recurrentes, entre ellas:
  - BarrasMarcadas(): determina la cantidad de barras que tienen el estado “marcado” dentro de la lista de barras.
  - Inicializar(): Realiza múltiples operaciones, siendo en orden:
    - Establece a todas las barras como no ordenadas (que no pertenecen al recorrido troncal), no identificadas (que no han sido marcadas) y sin número (esto último para generar una nueva numeración de la barra en base al recorrido final).
    - Señala como identificadas a todas las barras que tengan algún vínculo (esto para no volverlas a marcar durante el recorrido).
    - Selecciona aleatoriamente un nodo con un vínculo para establecerlo como nodo de inicio o nodo actual, así mismo se establece la barra que contenga este nodo como barra inicial o barra actual;
    - Marca esa primera barra como troncal, como identificada y se le asigna como barra número 1.
- Paso 2: Se definen nuevas listas llamadas NodosD, BarrasD y NodosV como copias de las listas originales que incluyen los nodos, barras y vínculos respectivamente. El objetivo de crear estas copias es poder trabajar sobre estos datos sin correr el riesgo de que se modifiquen los valores reales del pórtico. También se crea una lista vacía llamada BarrasT como una lista donde se incluirán barras de manera temporal para realizar pasos intermedios.
- Paso 3: Se hace una pasada por todas las barras que contengan vínculos y se ponen en valor 0 las variables que correspondan a cada caso.
- Paso 4: Se invoca a la función Inicializar().
- Paso 5: Se hace el recorrido general, en primer lugar, se revisa si la lista BarrasT está vacía y si la variables binaria bypass está en estado falso (que indica que se ha llamado o no al la función Inicializar por lo menos una vez), si BarrasT está vacía y bypass está en condición verdadero, quiere decir que no se ha inicializado las barras, se llama a la función Inicializar. Si BarrasT no está vacía o bypass no es verdadero, se procede al resto del bucle:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- Se limpia la lista de BarrasT, para esta parte del algoritmo se toma como una lista de barras disponibles para operar;
- Se define una barra y un nodo actual en base a las barras disponibles;
- Se hace una pasada por cada barra adyacente al nodo actual, para cada una de estas: se las identifica (marcar), se la añade a la lista de barras disponibles y se definen las variables que deben estar en 0 (actuando como una barra doblemente empotrada);
- Se incrementa el número de barra para enumerar la siguiente;
- Se elige una nueva barra actual de manera aleatoria teniendo en cuenta las barras disponibles, a esta nueva barra se le asigna su número y se hacen 0 las variables correspondientes.

- Paso 6: Se compara la cantidad de barras marcadas con el total de barras, si estos números no coinciden quiere decir que el recorrido fracasó porque se han dejado barras sin marcar, en ese caso se vuelve a repetir desde el paso 5 hasta que esta condición se cumpla y todas las barras estén marcadas.
- Paso 7: Por último, se enumeran todas las barras no troncales, continuando la numeración después de la última barra troncal.

Tomando como ejemplo el pórtico descrito anteriormente, se aplica el algoritmo de recorrido ilustrando paso por paso en las Figs. 3.1 hasta la Fig. 3.6 inclusive. Como referencia, los puntos negros son nodos comunes; los puntos celestes son vínculos de tercer grado; el punto rojo es el nodo actual para cada iteración; las líneas en negro son barras no marcadas; las líneas en verde son barras marcadas; las líneas naranjas son barras almacenadas en la lista BarrasT y las líneas rojas son las barras troncales, del recorrido.

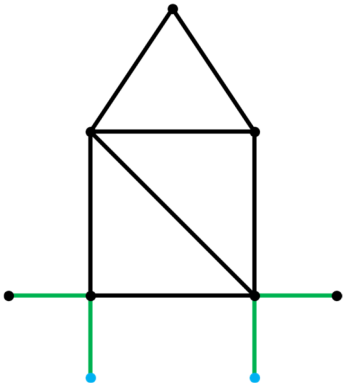


Figura 3.1: Identificación de barras con vínculos.

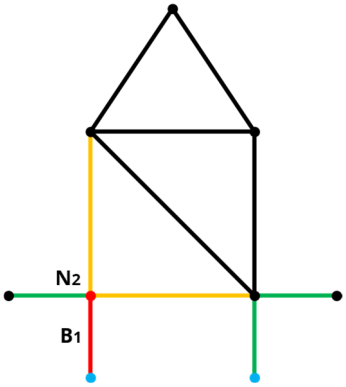


Figura 3.2: Selección de un vínculo como nodo inicial (N1). El siguiente nodo es marcado como actual (N2).

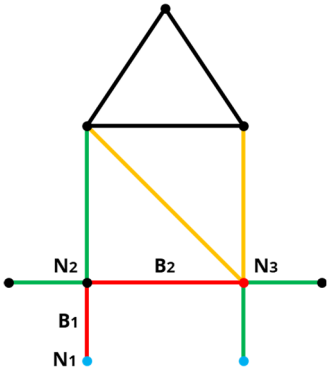


Figura 3.3: Selección de una barra disponible como troncal (B2), nuevo nodo actual (N3). Se marcan las barras disponibles anteriores.

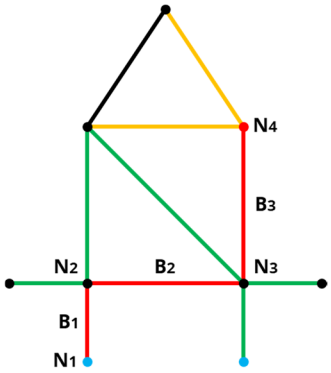


Figura 3.4: Se vuelve a iterar realizando las operaciones anteriores.

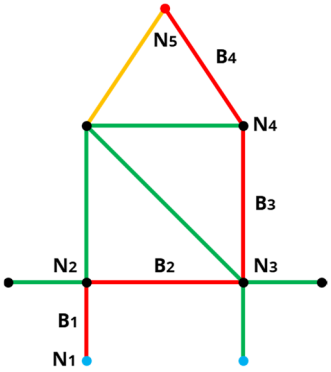


Figura 3.5: Se vuelve a iterar realizando las operaciones anteriores.

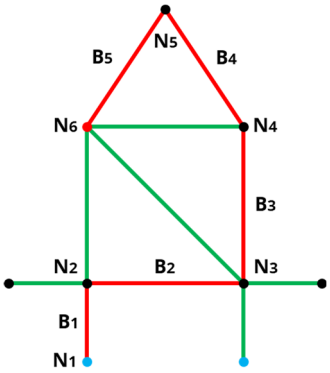


Figura 3.6: Finalización del recorrido, todas las barras están marcadas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Una vez finalizado este algoritmo, el programa deriva el control a la parte gráfica donde se toma en cuenta las barras marcadas como troncales y la nueva numeración para mostrar al usuario cómo quedó el recorrido final.

3. Resultados

La implementación del algoritmo de recorrido es solamente parte del objetivo del programa descrito al principio. El programa general está en un estado avanzado, contando actualmente con las siguientes características:

- Interfaz para crear un pórtico a partir de nodos y barras entre nodos ingresado por el usuario;
- Interfaz para guardar y cargar pórticos como un archivo .txt;
- Interfaz para editar un pórtico cargado;
- Interfaz para definir parámetros de cada vínculo/barra (módulo de Young, área, densidad, etc.);
- Interfaz para visualizar el pórtico construido y el recorrido encontrado por el algoritmo.

Sin embargo, todavía faltaría implementar la siguiente característica para que el programa cumpla con el objetivo principal:

- Cálculo del valor de las incógnitas no nulas, hasta ahora el programa puede identificar qué incógnitas son nulas para cada barra, pero falta que se realice el cálculo teniendo como base los parámetros de cada barra y la interacción de esta con las adyacentes para determinar las incógnitas que tienen un valor no nulo.

4. Conclusión

La utilización inicial de *Wolfram Mathematica* permitió avances significativos, pero hizo que surgieran limitaciones como la interactividad de la interfaz gráfica, la complejidad de los códigos necesarios y la poca portabilidad del programa, lo cual resultó en tiempos de respuesta excesivamente largos y frecuentes atascamientos durante las pruebas de simulación.

El uso de la Teoría de Grafos y las herramientas que brinda C# han permitido una solución más eficiente para optimizar el recorrido del pórtico. La programación orientada a objetos de C# simplificó el manejo de datos con listas en lugar de matrices complejas, y el algoritmo de recorrido hamiltoniano redujo las incógnitas necesarias para el futuro cálculo de incógnitas.

El estado actual del programa sienta las bases para futuras mejoras, permitiendo avanzar hacia un sistema capaz de calcular todos los parámetros de una estructura reticulada.

Referencias bibliográficas

Martin, H.D. (2017). Utilización de series de potencias para la resolución económica de elásticas, frecuencias y teoría de segundo orden de entramados de barras, en el contexto de la ingeniería estructural. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires.
Martín, H. D, Filipich, C. P, De Rosa, M. A. y Maurizi, M. J. (2013). Study of natural vibrations in frames with internal articulated bars, using series of powers. 16th International Conference of the Teaching of Mathematical Modelling and Applications ICTMA 16, Blumenau (SC). Brasil.
Martín, H. D. (2012). Sistematización analítico-numérica para la resolución estática, dinámica y de estabilidad de entramados estructurales en el contexto de las ingenierías aeronáutica, mecánica y civil. II Jornadas de intercambio y difusión de los resultados de investigación de los doctorandos en ingeniería de la UTN. Programa: Estructuras civiles. Facultad Regional Córdoba de la UTN.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Análisis de señales, modelados y simulación
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Resiliencia de redes de agua potable sectorizadas

Resilience of sectorized potable water

Presentación 18/10/2024

Micaela Fernández

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: micaela.fernandez@frra.utn.edu.ar

Resumen

Este estudio aborda la sectorización de redes de distribución de agua, con un enfoque en la evaluación de su resiliencia frente a fallas y perturbaciones. Se utiliza una metodología en dos etapas en una red académica: primero, se maximiza la modularidad topológica para identificar las comunidades dentro de la red; luego, se optimiza la ubicación de dispositivos de aislamiento, minimizando las conexiones entre comunidades y asegurando el cumplimiento de las condiciones hidráulicas. Del conjunto de soluciones, dos se seleccionaron para evaluar su comportamiento: la primera mostró una rápida disminución de la resiliencia ante perturbaciones menores, mientras que la segunda mantuvo una mayor estabilidad frente a incrementos significativos en la demanda. Los resultados subrayan la importancia de combinar técnicas de teoría de grafos con optimización hidráulica para diseñar sistemas de distribución de agua más robustos y eficientes, esenciales para afrontar desafíos como el crecimiento demográfico y la expansión de la red.

Palabras clave: Resiliencia; Optimización Metaheurística; Sectorización, Recocido Simulado

Abstract

This study addresses the sectorization of water distribution networks, focusing on assessing their resilience to failures and disturbances. A two-step methodology is proposed: first, topological modularity is maximized to identify community structures within the network; then, the placement of isolation devices is optimized to minimize inter-community connections while ensuring hydraulic conditions are met. From a set of solutions, two sectorization schemes were evaluated for resilience: the first exhibited a rapid decline in resilience under minor disturbances, while the second maintained greater stability in the face of significant demand increases. The results highlight the importance of combining graph theory techniques with hydraulic optimization to design more robust and efficient water distribution systems, which are crucial for addressing challenges such as population growth and network expansion.

.

Keywords: Resilience; Metaheuristic Optimization; Sectorization, Simulated Annealing

1. Introducción

Las redes complejas, que forman la base de sistemas tecnológicos, de información y sociales, han llevado a los investigadores a explorar la dinámica detrás de su formación y crecimiento. Este interés ha dado lugar a esfuerzos significativos para comprender la vulnerabilidad estructural y la resiliencia de estas redes frente a perturbaciones, fallos aleatorios y ataques dirigidos. Ante el creciente nivel de complejidad e interdependencia en las redes de infraestructura, numerosos estudios han evaluado su seguridad y susceptibilidad al daño. Ejemplos de estas redes incluyen carreteras urbanas, redes ferroviarias, redes eléctricas, gasoductos, redes de distribución de agua y cadenas de suministro (Yazdany y Jeffrey, 2011).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Los sistemas de distribución de agua WDNs, por sus siglas en ingles Water Distribution Netwoks, están diseñados para suministrar a los consumidores la cantidad de agua requerida al menor costo económico. Estos sistemas se modelan matemáticamente como un grafo, donde las tuberías se representan como *enlaces*, y los depósitos, tanques, puntos de demanda e intersecciones como *nodos*. La complejidad e incertidumbre en la operación de las WDNs surgen de factores como la diversidad en los tamaños y materiales de las tuberías, las configuraciones de conectividad, la ubicación de válvulas y estaciones de bombeo, la capacidad de los tanques, la configuración de válvulas de control, la programación de las bombas, y la naturaleza incierta de la demanda de agua.

En Argentina, la mayoría de las redes de distribución de agua fueron diseñadas en el siglo XIX para satisfacer demandas específicas. Hoy en día, estas redes enfrentan problemas debido al envejecimiento de sus componentes y al crecimiento poblacional, lo que provoca fugas y presiones insuficientes, afectando la calidad del servicio. Como respuesta, los paradigmas de diseño y gestión han evolucionado hacia la sectorización del sistema de agua para facilitar su control (Farley, 2001; Morrison et al., 2007). La sectorización consiste en dividir la red en zonas más pequeñas denominadas Áreas de Medición de Distritos (DMAs, por su sigla en inglés). Estas DMAs tienen límites definidos y permanentes, cuyas entradas y salidas son medidas y controladas mediante caudalímetros y válvulas. Esta técnica reduce la complejidad del sistema y facilita tanto el análisis como la gestión de las fugas de agua. La partición de redes de agua representa un desafío importante, especialmente en sistemas interconectados de gran tamaño donde el rendimiento hidráulico puede verse afectado por la eliminación de redundancias. Por esta razón, el diseño de las DMAs debe cumplir con restricciones de presión y mantener un alto nivel de confiabilidad. Además, es crucial incorporar herramientas de simulación y optimización que permitan evaluar distintos escenarios, minimizando el riesgo de fallos y asegurando un funcionamiento eficiente a largo plazo.

En este trabajo se aborda la sectorización de una red académica utilizando una metodología de dos etapas (Bianchotti et al., 2021). La primera etapa divide la red en módulos usando el índice de modularidad topológico para caracterizar su estructura en comunidades (Newman y Girvan, 2004). La segunda etapa se enfoca en la división física del sistema en subsistemas mediante un proceso de optimización de dos objetivos contrapuestos: mínima pérdida de resiliencia y mínimo número de conexiones entre las comunidades detectadas. Además, se evalúa la confiabilidad de dos sectorizaciones frente a diferentes escenarios de incrementos de las demandas.

2. Metodología

2.1 Índice de modularidad

La topología de una red con N_n nodos se representa por una matriz de adyacencia $\boldsymbol{A}$ de tamaño $N_n x N_n$, con elementos $A_{ij} = 1$ sólo si los vértices i y j están conectados, en caso contrario el elemento $A_{ij} = 0$. La matriz de adyacencia A_{nn} permite dividir la red en comunidades mediante el índice de modularidad propuesto por Newman y Girvan (2004):

$$Q_T = \frac{1}{2n_p}\sum ij\left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2n_p}\right)\delta\left(M_i, M_j\right) \quad (1)$$

donde K_i es el grado del nodo i, es decir el número de tubos conectados al nodo i. M_i identifica el módulo i de la red, δ es la función delta de Kronecker ($\delta = 1$ sólo si $M_i = M_j$) y la suma se realiza sobre todos los posibles pares de nodos (i, j), con $i \neq j$. Este índice de modularidad mide la fracción de enlaces que pertenecen a cada módulo. El índice de modularidad Q_T detecta comunidades al comprar la densidad de conexiones internas en un grupo de nodos con la densidad esperada en una red aleatoria; es una medida de la capacidad de la red para dividirse en módulos o comunidades, basada únicamente en propiedades topológicas. Un valor alto del índice indica que hay más conexiones internas de las esperadas.

2.2. Resiliencia

La sectorización física de una red de agua se consigue instalando válvulas de aislamiento en los tubos que delimitaran las DMAs. Sin embargo, esta técnica reduce la redundancia de conectividad del sistema hidráulico, lo que puede disminuir su capacidad para sobrellevar fallas hidráulicas. El concepto de resiliencia en redes de agua fue introducido por Todini (2000) como medida de la confiabilidad hidráulica y se lo utiliza comúnmente para mejorar el rendimiento del sistema bajo condiciones de falla, proporcionando mayor potencia que la mínima requerida. El índice de resiliencia se define como:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

$$I_R = 1 - \frac{P^*_{int}}{P^*_{máx}} \tag{2}$$

donde $P^*_{int} = \gamma \sum_{k=1}^{n_r} Q_k H_k - \gamma \sum_{k=1}^{n_r} q_i^* h_i$ es la potencia disipada en la red para satisfacer la demanda total, y $P^*_{máx} = \gamma \sum_{k=1}^{n_r} Q_k H_k - \gamma \sum_{k=1}^{n_n} q_i^* h_i^*$ es la máxima potencia disipada internamente para satisfacer las restricciones en términos de demanda q_i^* y presión h_i^* en el nodo i. Asimismo, q_i y h_i son las demandas y las presiones de cada nodo i, n_n es el número de nodos, Q_k y H_k son la descarga y la presión, respectivamente, de cada reservorio k, siendo n_r el número de reservorios y γ el peso específico del agua. Considerando que el índice propuesto se basa en un análisis del flujo de la red en estado estacionario y en la energía disipada en las tuberías, el índice de resiliencia es una medida del excedente de energía disponible para el abastecimiento. De esta manera un alto índice de resiliencia permite tener una red con mayor capacidad para sobrellevar fallas hidráulicas.

2.3. Formulación del problema

La Figura 1 muestra un diagrama de flujo de la metodología propuesta. La primera etapa consiste en identificar la estructura de comunidades maximizando la modularidad Q_T, lo que implica detectar estructuras de comunidades similares entre sí con respecto a la conectividad de la red. Esta etapa se plantea como un problema de optimización de un objetivo, para el cual se aplica un algoritmo del tipo Louvain (Blondel et al., 2008; Jeub et al., 2019). La formulación formal de la optimización es:

$$F_1(\boldsymbol{X}) = máx(Q_T) \tag{3}$$

La partición obtenida proporciona un conjunto de enlaces denominados cortes conceptuales, que son las variables de diseño de la primera etapa. Estos cortes se representan mediante el vector binario $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots x_m)$, donde $x_i = 0$ en caso de que exista un corte conceptual, y $x_i = 1$ indica lo contrario. Es importante destacar que estos cortes son conceptuales ya que esta etapa se realiza sin resolver el sistema hidráulico. Por lo tanto, no es posible afirmar que todos estos cortes podrán materializarse en la red para lograr una división en comunidades autónomas capaces de garantizar el servicio de agua potable.

La segunda etapa se centra en ubicar de manera óptima los dispositivos de aislamiento, es decir, determinar cuáles de los cortes conceptuales definidos en la primera etapa podrán materializarse. La ubicación de válvulas tiene como objetivo reducir el número de puntos de control entre comunidades y si es posible, definir estructuras de DMAs autónomas. La formulación del problema en esta etapa se plantea una optimización de dos objetivos: minimizar el número de tuberías que deben permanecer conectadas y minimizar la pérdida de resiliencia. Formalmente:

$$\begin{aligned} F_1(\boldsymbol{Y}) &= mín \left(\sum_{i=1}^{v} y_i \right) \\ F_2(\boldsymbol{Y}) &= mín\,(P_R) = mín\,(1 - I_R) \end{aligned} \tag{4}$$

donde $\boldsymbol{Y} = (y_1, y_2, \dots y_i, \dots y_v)$ representa vector de cortes conceptuales de la primera etapa que no pueden ser materializados. Para las simulaciones hidráulicas se utilizó el software EPANET 2.2. En esta etapa de optimización se implementó un algoritmo de recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983). En un contexto de minimización, el recocido simulado se basa en una generalización de la estrategia de progreso iterativo, comenzando con una solución inicial y buscando iterativamente una mejor solución dentro del entorno. La generalización del recocido simulado permite aceptar soluciones de mayor costo con una probabilidad distinta de cero, lo que ayuda a evitar quedar atrapado en un mínimo local. En este trabajo se implementa la versión SMOSA para múltiples objetivos propuesta por Suppapitnarm (2000), que provee un conjunto de soluciones denominado, conjunto óptimo de Pareto.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

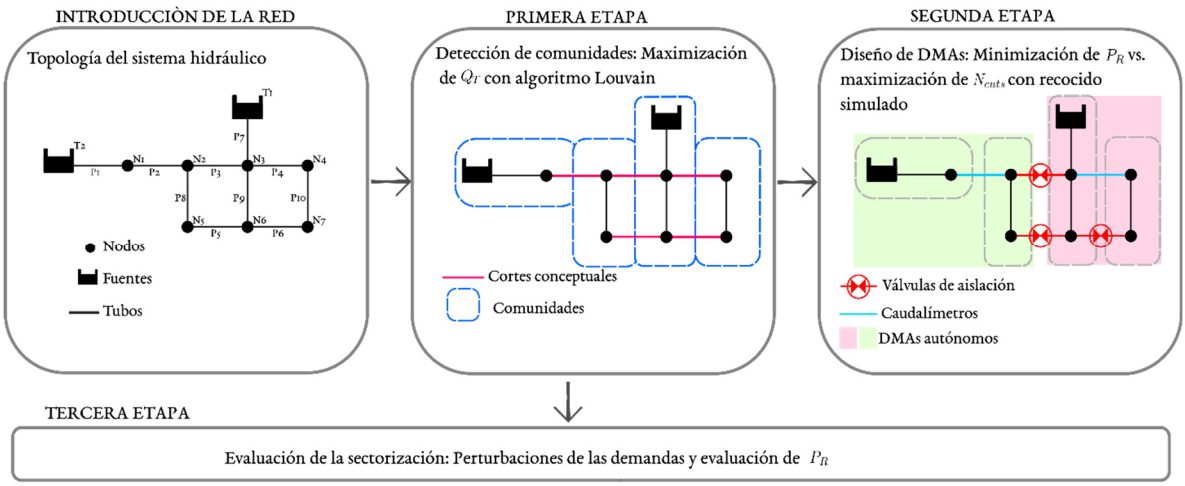


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento para el diseño de la sectorización óptima y el estudio de la confiabilidad

El análisis de confiabilidad del sistema bajo incrementos en las demandas se realiza luego del proceso de diseño de los DMAs. Para ello, se perturban las demandas de un número fijo de nodos multiplicándolas por un factor que varía entre 1,2 y 2,6 con incrementos de 0,2. Para cada incremento, se analizan 100 iteraciones, seleccionando aleatoriamente los nodos cuyas demandas se modifican. El valor de resiliencia de cada perturbación se promedia para las 100 iteraciones. Se estudian cuatro escenarios de incrementos de demandas en 5 nodos, 10 nodos, 20 nodos y 30 nodos.

2.4. Caso de estudio

La metodología desarrollada se aplicó a una red de distribución de agua potable denominada Red de Tres Embalses (TRN, por su sigla en inglés), que fue estudiada por Zheng y Zecchin (2014). Esta red, ilustrada en la Figura 2, está compuesta por 287 tuberías y 202 nodos. Durante el ciclo de operación, se utilizan tres depósitos como fuentes. La diferencia entre la elevación máxima y mínima del terreno es de 37 m, y la red está diseñada para simular un análisis hidráulico de período extendido de 24 horas.

3. Resultados

Como resultado de la primera etapa, se identificaron 52 cortes (indicados en rojo) que definen 15 comunidades, las cuales se muestran en la Figura 3 sombreadas en diferentes colores. Esta configuración corresponde al máximo global de la modularidad topológica, y se utiliza como punto de partida para la segunda etapa.

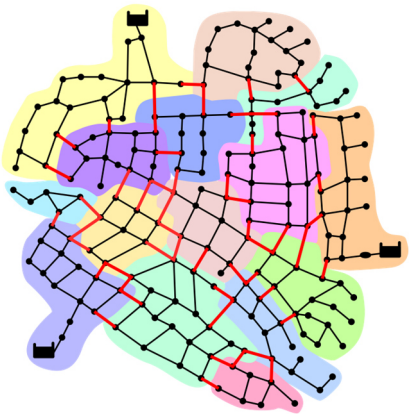


Figura 2. Resultado Primer etapa.

La Figura 3.a presenta el conjunto de Pareto obtenido tras la optimización de la segunda etapa. Este conjunto incluye 16 configuraciones, cada una de las cuales representa un diseño distinto de DMAs. De estos diseños, se seleccionaron dos soluciones que proponían la instalación del mayor número de cierres entre comunidades. En los casos seleccionados, todas las comunidades detectadas pueden considerarse como DMAs para la realización del balance de masas. Sin embargo, en la primera solución (figura 3.b), que propone la ubicación de 40 válvulas, se identificaron 3 comunidades autónomas que pueden funcionar cumpliendo las restricciones hidráulicas de presión y satisfaciendo todas las demandas. En cuanto a la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

segunda solución seleccionada (figura 3.c), el número de DMAs autónomos se reduce a 2 definidos por 39 válvulas. En este caso, la cantidad de fuentes ya no es el límite para la definición de los DMAs, sino las condiciones hidráulicas y el número de válvulas a instalar.

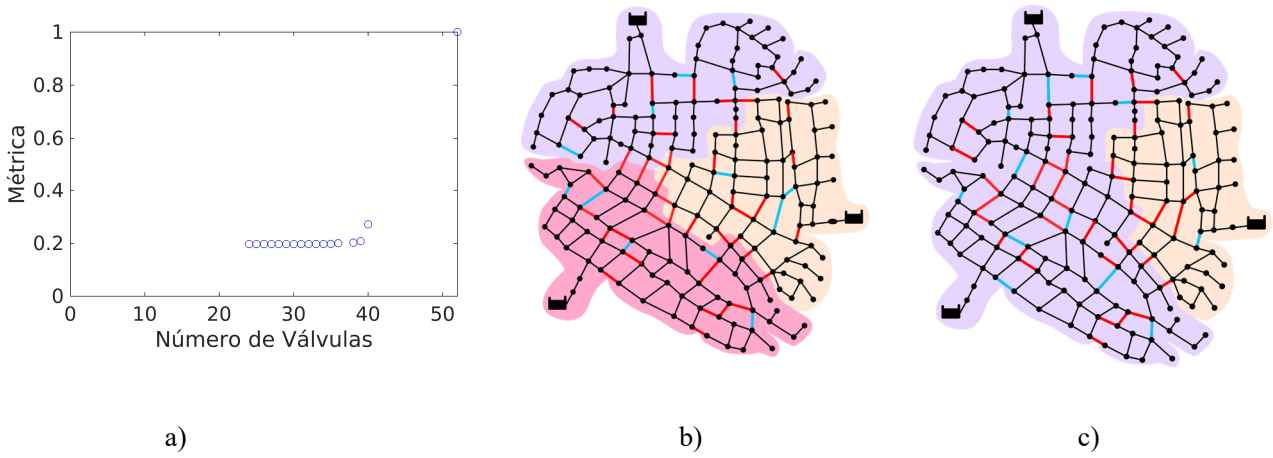


Figura 3. Solución segunda etapa.

Las Figuras 4 y 5 muestran los valores de resiliencia para las 100 iteraciones de cada escenario y cada perturbación. Los casos en los que la resiliencia resulta en un valor de cero indican que la red no puede satisfacer la totalidad de las demandas, lo que implica que las presiones caen en algún punto por debajo de la presión mínima de servicio.

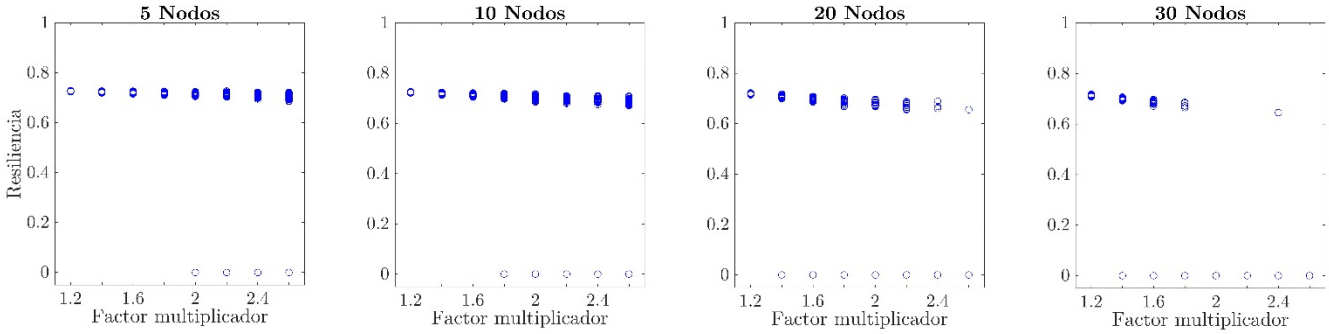


Figura 4. Resiliencia de la red para los casos de perturbación para la primer solución seleccionada.

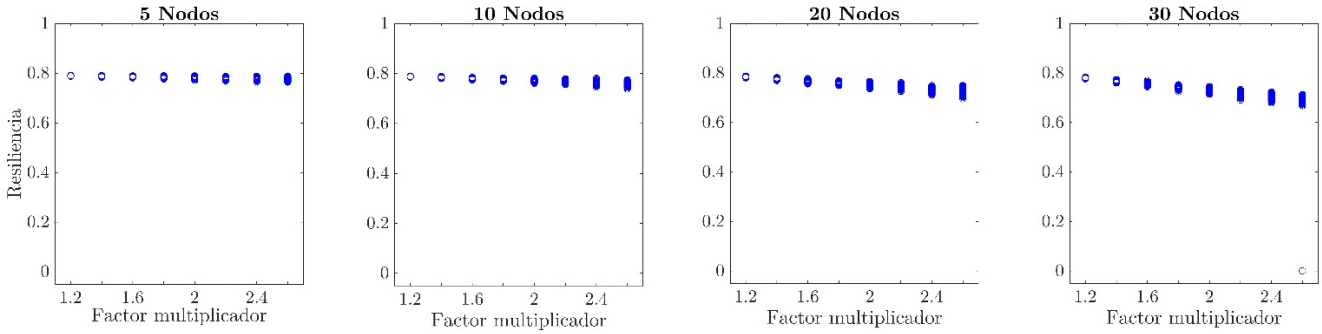


Figura 5. Resiliencia de la red para los casos de perturbación de la demanda para la segunda solución seleccionada.

En la primera solución de la Figuras 4 se observa que, a partir del primer escenario de perturbación, la red comienza a presentar problemas de presión cuando alcanza un factor multiplicador igual 2, lo que provoca que la resiliencia de la red alcance valores iguales cero. También se puede observar que a medida que aumenta el número de nodos perturbados, la resiliencia de la red cae a cero para factores multiplicadores menores y para un mayor número de soluciones. En la Figura 5 se muestra la segunda solución seleccionada que presenta mejores condiciones de funcionamiento frente a incrementos de la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

demanda para todos los escenarios. Solo presenta un valor de resiliencia igual cero al perturbar 30 nodos y con un factor multiplicador de 2.6 en la demanda.

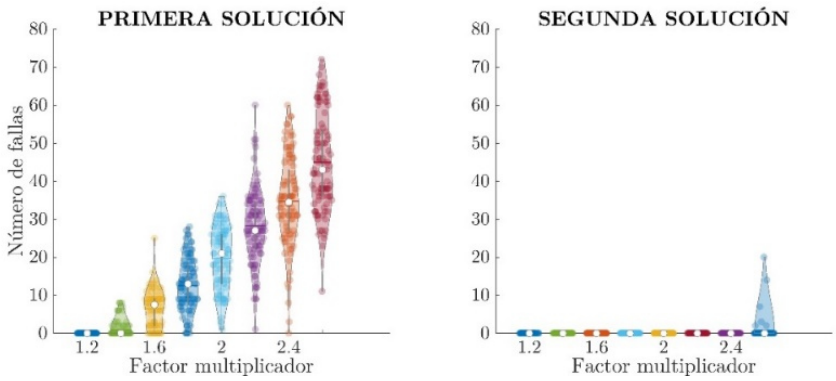


Figura 6. Diagrama de violín de nodos con presiones deficientes por solución para la perturbación de 30 nodos.

La Figura 6 presenta los diagramas de violín correspondiente al número de fallas, es decir, la cantidad de nodos que presentaba presiones deficientes en cada una de las 100 iteraciones realizadas para cada factor multiplicador. El diagrama de violín se utiliza para visualizar la distribución de los datos y su densidad de probabilidad. La línea central gruesa en el centro representa el intervalo intercuartil, la línea fina que se extiende desde ella representa el 95 % de los intervalos de confianza, y el punto blanco es la mediana. Estas gráficas permiten comparar la cantidad de fallas y confirmar que las condiciones presentadas por la segunda solución son más estables frente a cambios en las demandas, los cuales pueden generarse por cambios demográficos o la ampliación de la red.

4. Conclusiones

Este estudio ha abordado la sectorización de una red de distribución de agua mediante una metodología de dos etapas que combina la maximización de la modularidad topológica con la optimización hidráulica. La aplicación de esta metodología a la red TRN permitió identificar configuraciones óptimas de DMAs que cumplen con las restricciones de presión y aseguran la confiabilidad del sistema. El análisis de la resiliencia bajo diferentes escenarios de demanda mostró que ambas soluciones presentan comportamientos diferenciados frente a perturbaciones. En la primera solución, se observó que la resiliencia de la red cae a cero con un factor multiplicador de 2 cuando se perturban 5 nodos, y la situación empeora a medida que se incrementa el número de nodos perturbados. Por otro lado, la segunda solución demostró ser más robusta ya que la resiliencia no se reduce a cero hasta que se perturban 30 nodos y con un factor multiplicador de 2,6. La comparación de la distribución de fallas mediante diagramas de violín confirmó que la segunda solución ofrece una mayor estabilidad frente a incrementos en la demanda, lo que la hace más adecuada para enfrentar desafíos como el crecimiento demográfico y la expansión de la red.

En resumen, este estudio pone de manifiesto la importancia de combinar técnicas de sectorización basadas en la teoría de grafos y optimización hidráulica para mejorar la resiliencia de las redes de distribución de agua sectorizadas. Los diseños de DMAs propuestos no solo facilitan la gestión del sistema, sino que también aseguran un mejor rendimiento frente a perturbaciones, lo que es crucial para la sostenibilidad y eficiencia de las infraestructuras críticas.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó bajo la dirección de los investigadores Gabriel Puccini y Jezabel Bianchotti en el marco del proyecto “Sectorización y reducción de fugas de agua potable en redes de distribución” (Código SCyT: ASECARA008399).

Referencias bibliográficas

Yazdani, A., Jeffrey, P. (2011), Complex network analysis of water distribution systems, Chaos, 21(1)
Farley, M. (2001) World Health Organization. Leakeage Management and Control: A Best Practice Training Manual; World Health Organization: Genova, Switzerland

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Morrison, J., Tooms, S., Rogers, D., (2007) District Metered Areas Guidance Notes. IWA Publishing, Londres, Reino Unido.
Bianchotti J.D., Denardi M., Castro-Gama M., Puccini G.D. (2021) Sectorization for water distribution systems with multiple sources: A performance indices comparison. Water, 13(2).
Newman M.E.J., Girvan M. (2004) Finding and evaluating community structure in networks. Phys. Rev. E, 69:026113.
Todini E. (2000) Looped water distribution netowrks design using a resilience index based heuristic approach. Urban Water, 2:115–122.
Blondel V.D., Guillaume J., Lambiotte R., Lefebvre E. (2008) Fast unfolding of communities in large networks. J. Stat. Mech.: Theor. Exper., 10:P10008.
Jeub L., Bazziand M., Jutla. I., Mucha P. (2019) A generalized Louvain method for community detection implemented in matlab. Web: https://github.com/GenLouvain/GenLouvain.
Suppapitnarm A., Seffen K., Parks G., Clarkson P. (2000). Simulated annealing: an alternative approach to true multiobjective optimization. Engineering Optimization, 33:59-85.
Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C.D., Vecchi, M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. science, 220(4598), 671-680.
Zheng F., Zecchin A. (2014) An efficient decomposition and dual-stage multi-objective optimization method for water distribution systems with multiple supply sources. Environmental Modelling & Software, 55:143–155.

Aplicaciones mecánicas y mecatrónica



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Aplicaciones mecánicas y mecatrónica
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Desarrollo de una mesa vibratoria para análisis de modelos sismorresistentes

Development of a vibrating table for analysis of earthquake resistant models

Presentación 25/08/2024

Andrés Mansilla

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: simonolivia12@gmail.com

Paula Farandato

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: paula.farandato@gmail.com

Resumen

El proyecto de investigación tiene como objetivo desarrollar una mesa vibratoria uniaxial para la simulación de sismos, destinada a usos académicos. Esta mesa permitirá reproducir movimientos sísmicos en una única dirección para probar y analizar modelos de estructuras sismo resistentes a escala, que facilite la enseñanza y la investigación en ingeniería sísmica. A través de la mesa vibratoria, se podrán evaluar las respuestas dinámicas de diferentes modelos estructurales, obteniendo datos cruciales sobre su comportamiento ante movimientos sísmicos. El proyecto proporcionará una plataforma de aprendizaje práctica para estudiantes y permitirá la validación experimental de teorías y métodos de análisis sísmico.

Palabras clave: mesa vibratoria; modelos sísmicos; análisis dinámico

Abstract

The research project aims to develop a uniaxial shaking table for earthquake simulation, intended for academic use. This table will allow reproducing seismic motions in a single direction to test and analyze models of earthquake-resistant structures at scale, facilitating teaching and research in earthquake engineering. Through the shaking table, the dynamic responses of different structural models can be evaluated, obtaining crucial data on their behavior under seismic motions. The project will provide a practical learning platform for students and allow the experimental validation of seismic analysis theories and methods.

Keywords: vibrating table; seismic models; dynamic analysis

1. Introducción

El estudio del comportamiento de las estructuras ante eventos sísmicos forma parte de los alcances del título de ingeniero civil. El estudio del comportamiento de las tipologías estructurales es un área específica de las estructuras. La capacidad de reproducir y analizar los efectos de los movimientos sísmicos en un entorno controlado permite a los investigadores y estudiantes comprender mejor la respuesta a las cargas dinámicas de las fuerzas no gravitatorias que afectan a las

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

edificaciones durante un terremoto. En este contexto, el desarrollo de una mesa vibratoria uniaxial para fines didácticos es de gran utilidad para la formación académica e investigación aplicada.

Los estudiados terremotos, como el de Loma Prieta en California (1989) y el de Kobe en Japón (1995), han resaltado la urgente necesidad de analizar y mejorar la respuesta de las estructuras sismo resistentes. Estos eventos han demostrado que la vulnerabilidad de las construcciones ante sismos puede tener consecuencias catastróficas, subrayando la importancia de desarrollar métodos de diseño más seguros y eficientes.

La mesa vibratoria que desarrolla este proyecto permitirá simular aceleraciones de sismos en una dirección, proporcionando un medio accesible y efectivo para probar modelos estructurales a escala.

Esta herramienta facilitará la enseñanza práctica de principios de ingeniería sísmica, ofreciendo a los estudiantes una oportunidad de observar y medir las respuestas de diferentes tipologías estructurales en condiciones dinámicas controladas.

Existen dos tipos principales de pruebas de modelos sísmicos geotécnicos a escala: la prueba de mesa vibratoria a 1g y la prueba geotécnica centrífuga a ng. La prueba de mesa vibratoria en un campo de gravedad de 1g ofrece ventajas significativas, como una amplitud de movimiento bien controlada y la posibilidad de realizar mediciones experimentales de manera más sencilla en comparación con el modelado centrífugo, que es utilizado para geotecnia, más específicamente para la determinación del comportamiento de suelos (Madabhushi, 2017).

Sin embargo, una de las principales desventajas de la mesa vibratoria es que produce valores de tensión reducidos debido a la escala del modelo, lo que puede limitar la representatividad de los resultados obtenidos. Para evitar este problema, en la actualidad se construyen mesas vibratorias con equipos actuadores de alta capacidad que permiten el aumento de las dimensiones de las mesas vibratorias y los modelos pueden incrementar los niveles de tensión (Kramer, 1996).

2. Metodología

Para el desarrollo del primer prototipo de la mesa vibratoria, se consideraron varios tipos de mecanismos capaces de convertir el movimiento circular que provee el motor de accionamiento, en un desplazamiento lineal.

Evaluadas las diferentes opciones, se optó por utilizar el mecanismo de yugo escocés debido a su capacidad para realizar esta conversión de manera efectiva y precisa. Este mecanismo fue seleccionado por su simplicidad en la construcción y su eficiencia en la transformación del movimiento.



Figura 1. Prototipo de mesa sísmica: desarrollo de movimiento circular a lineal

Dado que el proyecto se encuentra en una fase de prototipo, se eligió el cartón como material principal de construcción: es fácil de trabajar, posee una rigidez adecuada para soportar las cargas del prototipo y, al mismo tiempo, es suficientemente maleable para permitir ajustes y modificaciones rápidas durante el desarrollo, por otra parte, es un material reciclable.

El proceso de construcción comenzó con el diseño y ensamblaje de una base estable para la colocación del motor. Se recortaron y prepararon las piezas necesarias para el mecanismo, que luego se unieron para formar el modelo completo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Finalizado el montaje, la etapa siguiente fue la puesta en marcha para evaluar su funcionamiento. Durante esta prueba inicial, se identificaron problemas en la rotación del motor; específicamente: las piezas en cartón resultaron demasiado pesadas para la potencia del motor indicado, impidiendo el movimiento adecuado del mecanismo.

También la forma en la que se creó este primer prototipo no tenía una forma “cómoda” para que se el motor tenga un mejor desempeño, por lo que dificultaba el funcionamiento del proyecto.

En respuesta a estos problemas, se procedió a rediseñar y construir un segundo prototipo. Este nuevo modelo incluyó un motor de mayor potencia para compensar el peso de las piezas y asegurar un movimiento suave y continuo.



Figura 2. Segundo prototipo de mesa sísmica, con las mejoras obtenidas de la experiencia. Se añadieron guías para mantener el mecanismo alineado durante el movimiento en el eje longitudinal y un soporte adicional para mejorar la estabilidad y la movilidad de las partes móviles. Se incorporó un botón de encendido y apagado para facilitar el control del prototipo y la alimentación es una batería de 9V que, de la alimentación suficiente al prototipo, un motor para que este pueda funcionar sin inconvenientes, las características de este son las siguientes: Voltaje de operación: 6-12V,Velocidad sin carga: 8750-17500 RPM, Diámetro del motor: 37 mm, Diámetro del eje: 3 mm, Longitud del motor: Aproximadamente 57mm ,Corriente sin carga: Aproximadamente 0.5-1.2 A, Corriente de bloqueo: Aproximadamente 10-20 A, Torque: Varía según el voltaje y la carga, pero generalmente es adecuado para aplicaciones de alta velocidad y baja carga, Peso: Aproximadamente 200-250 gramos. También se diseñó de una manera en donde el motor trabaje de igual manera en todas las partes, para que este estable y no tenga que hacer más fuerza de un lado que del otro.

Los siguientes desarrollos o prototipos para el proyecto de la mesa vibratoria se centrarán en mejorar aún más la precisión de los movimientos, aumentar la capacidad de carga y la versatilidad del dispositivo, con el objetivo de simular de manera más realista las condiciones sísmicas y permitir la prueba de una variedad más amplia de modelos estructurales. Algunas de las mejoras pensadas para mejorar este prototipo podrían ser la incorporación de Controladores Electrónicos Avanzados. Esto permitirá reproducir una gama más amplia de movimientos sísmicos, incluidos aquellos con patrones de vibración más complejos. La integración de Sensores para la Monitoreo en Tiempo Real, para medir aceleración, desplazamiento y fuerza del modelo estructural durante las pruebas. Esta integración permitirá la recolección de datos precisos, permitiendo al ingeniero, un mejor análisis de la respuesta dinámica de las estructuras.

Se adjunta el enlace del video del prototipo 1: https://www.youtube.com/watch?v=SXAQxvDgt7Y

3. Resultados.

El segundo prototipo logró mejorar significativamente la capacidad de carga de la mesa vibratoria en comparación con el primero. Gracias a la incorporación de un motor de mayor potencia y un diseño estructural optimizado con guías y soportes

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

adicionales, el prototipo fue capaz de soportar modelos estructurales a escala de manera más efectiva. Esto permitió realizar pruebas más representativas y realistas de las estructuras sismo-resistentes, cumpliendo mejor con los objetivos del proyecto. Cabe recalcar que es un prototipo, con una amplia capacidad para realizarle mejoras anteriormente mencionadas y que se espera poder realizar para que este deje de ser un prototipo y se vuelva una herramienta para el uso cotidiano de carreras como Arquitectura, Ingeniería Civil, entre otras, para así poder ayudar a tener una experiencia más real ante sismos.

4. Conclusiones

Es necesario disponer de un motor con la potencia adecuada para mover las piezas del mecanismo y soportar los modelos estructurales a escala. El fallo del primer prototipo debido a la insuficiente potencia del motor resaltó la importancia de considerar no solo la eficiencia energética, sino también la capacidad de carga y el torque necesario para realizar movimientos precisos y continuos.

El uso de cartón en ambos prototipos, aunque adecuado para una construcción rápida y económica, de fácil manipulación durante la fase inicial de diseño, demostró ser insuficiente para las demandas de pruebas más rigurosas. Para futuros prototipos, especialmente aquellos que requieran soportar modelos más pesados y simular condiciones más realistas, será necesario considerar materiales con módulos de elasticidad (E) mayores: plásticos reforzados, madera contrachapada o metales ligeros como el aluminio.

El desarrollo de los dos prototipos enfatizó la importancia del proceso iterativo en la ingeniería del diseño. Cada versión permitió identificar fallos, realizar ajustes y mejorar tanto el diseño como la funcionalidad del dispositivo. Este enfoque de mejora continua se aplica para solucionar los problemas encontrados y ajustar el prototipo para cumplir con los objetivos del proyecto.

Referencias bibliográficas

Anguita, F. O. (2015). Diseño y construcción de una mesa vibratoria unidireccional portable, para ensayos de modelos a escala de estructuras para distintas condiciones de frecuencia y amplitud de la solicitación. *Trabajo de grado, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.*

Kunetz C - Technical report (2011) Design Considerations of a Shaking Table for Seismic Analysis of Structures, Laboratorio de Dinámica de Estructuras (LABDIN) Facultad de Ingeniería Civil. Ciudad de Buenos Aires. Ed.: FIUBA

Madabhushi, G. (2017). Centrifuge Modelling for Civil Engineers. Nueva York. Ed: CRC Press.

Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Nueva York. Ed.: Prentice Hall.

Energía



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Energía
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

Optimización de sistemas de refrigeración por absorción de doble efecto H_2O-LiBr

Optimization of Double-Effect H_2O-LiBr Absorption Refrigeration Systems

Presentación 18/10/2024

Tomás Giuntoli

Universidad tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería, Rosario, Santa Fe, Argentina

E-mail de contacto: tomasgiuntoli@gmail.com

Resumen

Este trabajo se centra en la optimización de un ciclo de refrigeración por absorción utilizando una mezcla binaria de Agua-LiBr, empleando la herramienta GAMS. La función a optimizar (minimizar) es el costo anual de operación (TAC), que incluye costos fijos (CAPEX) y costos variables (OPEX). Los costos fijos se asocian al área de transferencia de calor de los equipos, mientras que los costos variables se refieren al caudal de fluido de calefacción utilizado. El sistema de doble efecto emplea dos generadores: uno de alta, alimentado con vapor de servicio, y uno de baja, que utiliza el fluido de calefacción. Este sistema ofrece una mejora significativa en los costos de operación en comparación con los sistemas de refrigeración simples. El resultado de este estudio motiva a la implementación de estos sistemas como una alternativa eficiente desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía.

Palabras clave: Modelado; Optimización NLP; Refrigeración; Absorción; H_2O-LiBr.

Abstract

This work focuses on the optimization of an absorption refrigeration cycle using a binary mixture of Water-LiBr, employing the GAMS tool. The objective function to optimize (minimize) is the Total Annual Cost (TAC), which includes fixed costs (CAPEX) and variable costs (OPEX). Fixed costs are associated with the heat transfer area of the equipment, while variable costs relate to the flow rate of the heating fluid used. The double-effect system employs two generators: one high-pressure, powered by service steam, and one low-pressure, using the heating fluid. This system offers a significant improvement in operating costs compared to simple refrigeration systems. The results of this study encourage the implementation of these systems as an efficient alternative from an energy utilization perspective.

Keywords: Modeling; NLP Optimization; Refrigeration; Absorption; H_2O-LiBr.

1. Introducción

1.1. *Consideraciones Generales*

Hoy en día, la gran mayoría de procesos de refrigeración se encuentran constituidos principalmente por sistemas de compresión de vapor. Aunque si bien, estos sistemas son más simples desde el punto de vista del diseño y la operación, su principal inconveniente repercute en el elevado consumo de energía eléctrica que los mismos conllevan (Mussatti et al,. 2020). Una respuesta a este tipo sistemas, radica en la implementación de sistemas de refrigeración por absorción de vapor de una mezcla binaria. Este tipo de sistemas puede aprovechar corrientes de calefacción provenientes de otros procesos que, en otros casos, serían utilizadas como corrientes de desecho. Esto conlleva a una mejora en el aprovechamiento energético y el uso eficiente de los recursos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Muchos sistemas bi-componentes han sido utilizados a lo largo de la historia, siendo los más conocidos y empleados los sistemas compuestos por NH_3-H_2O. En la bibliografía, se pueden encontrar sistemas compuestos por una mezcla LiBr-H_2O (Mussatti et al,. 2018). Este último tipo de mezclas puede ser empleado a temperaturas moderadas, encontrando múltiples usos como por ejemplo almacén de alimentos y productos farmacéuticos, climatización de edificios, sistemas de enfriamiento de equipos industriales, etc. La principal ventaja de los sistemas LiBr-H_2O por sobre los NH_3-H_2O, es que no se han reportado potencial de agotamiento de la capa de ozono ni efecto de calentamiento global (Mussatti et al,. 2019).

Para diseñar un sistema eficiente, es fundamental contar con un modelo matemático adecuado para el proceso. En este trabajo se emplea la herramienta “GAMS Studio”. GAMS (General Algebraic Modeling System) es una plataforma diseñada para modelar y resolver problemas de optimización matemática, incluyendo la programación no lineal (NLP). En este tipo de programación, las relaciones entre las variables pueden ser no lineales, lo que significa que tanto las funciones objetivo como las restricciones pueden no seguir una relación lineal.

El objetivo del trabajo se centra entonces, en hallar las condiciones operativas y de diseño de manera tal que se reduzca el costo anual de operación. Siendo, las variables más importantes para la toma de decisiones, las asociadas a los equipos de transferencia de calor. Las cuales corresponden, al cálculo del área de transferencia empleada, que repercute directamente en los costos de inversión del proyecto y el flujo de corriente de calefacción utilizado, que impacta en los costos de operación.

1.2. Descripción del proceso

La figura 1 muestra un esquema del proceso planteado. El mismo, consta de un sistema de refrigeración por absorción de vapor de doble efecto de una mezcla LiBr-H2O. Una solución concentrada de la sal se utiliza como medio absorbente, mientras que el agua se utiliza como fluido de proceso. El sistema está constituido por una bomba [BOM]; 4 válvulas de expansión [EV1], [EV2], [EV3] y [EV4]; un intercambiador de calor entre las soluciones de baja presión [LSHE], uno de alta presión [HSHE]; 2 generadores, de alta y baja presión [G_ALTA] y [G_BAJA]; un condensador [COND]; un evaporador [EVAP] y un absorbedor [ABS].

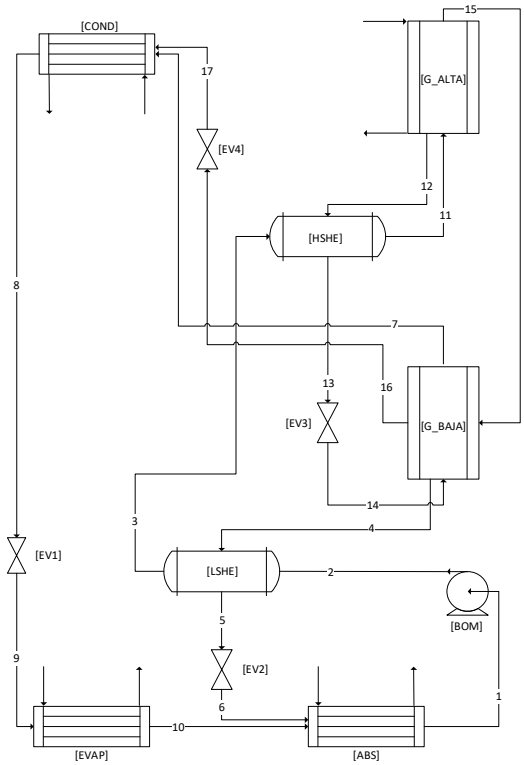


Figura 1. Diagrama de flujo del sistema.

El ciclo inicia en el absorbedor, donde las corrientes 10 (agua líquida saturada) y 6 (mezcla) ingresan a este. En dicho equipo, se produce la absorción del agua en la solución concentrada. Como esta reacción es altamente exotérmica, una corriente de refrigeración es utilizada para mantener esta solución en el punto correspondiente al de su saturación. Posteriormente se eleva la presión de la corriente 1 hasta la correspondiente a la del generador de alta presión.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

La corriente 2 es calentada mediante la solución de salida del generador de baja presión. Que a su vez es calentada nuevamente en el intercambiador de alta presión por la salida del generador de alta presión. En dicho equipo se utiliza una corriente auxiliar de vapor vivo de servicio que puede provenir de una corriente de desecho de otro proceso. En el generador de alta presión, la solución se divide en vapor sobrecalentado y una solución concentrada. Amabas corrientes se encentran en equilibrio térmico a la temperatura de saturación de la solución concentrada. La solución de vapor sobrecalentado 15, se utiliza como fluido calefactor del generador de baja presión.

La corriente 12, de la solución concentrada se utiliza como fluido calefactor del intercambiador [HSHE]. A la salida de este, se disminuye la presión mediante la válvula [EV3] y la corriente 14 ingresa en el evaporador de baja presión. Obteniendo otra vez una bifurcación entre dos corrientes, 7 de vapor sobrecalentado y 4 de solución concentrada saturada. La corriente 7 ingresa al condensador en conjunto con la 17 que sale del fluido calefactor de baja. Mientras que la corriente 4 se utiliza como fluido calefactor del intercambiador [LSHE]. Luego, esta se disminuye la presión mediante la válvula [EV2] para volver a ingresar en el evaporador.

Del condensador, se utiliza un fluido de enfriamiento como medio para condensar las corrientes 7 y 17. La condensación ocurre de manera total. Luego la válvula [EV1] se encarga de disminuir la presión a valores de vacío para lograr una temperatura menor que la ambiente. Finalmente, en el evaporador se produce la entrega de calor desde el medio frio al fluido.

2. Metodología

2.1 Modelado matemático del proceso

Se presenta el modelo matemático del sistema del tipo NLP (programación no lineal) para determinar las condiciones operativas y las dimensiones de los equipos. De manera tal, que cumplan con los requisitos planteados, minimizando los costos anuales totales del proceso.

Las restricciones de igualdad del modelo corresponden a los cálculos de propiedades termodinámicas de las distintas corrientes y a los balances de materia y energía. Mientras que, las restricciones de desigualdad corresponden a un diseño de operación factible, como por ejemplo cruces de temperatura en los equipos de intercambio de calor.

Estas ecuaciones son fundamentales para el cálculo, ya que permiten cuantificar y predecir los valores y parámetros a establecer para diseñar el equipo y operarlo bajo condiciones óptimas.

2.2 Hipótesis del proceso

- Se asume estado estacionario.
- Se desprecia las pérdidas de carga en las tuberías y los intercambiadores de calor.
- Se desprecia las pérdidas de calor en las tuberías y los equipos.
- La potencia desarrollada por la bomba es despreciable en comparación a las cargas calóricas de los equipos.
- La expansión en las válvulas es un proceso adiabático reversible (isentrópico).
- La corriente [1] de la solución salina se supone que corresponde a liquido saturado.
- Las corrientes de salida del condensador y del evaporador corresponden a las condiciones de saturación
- Las propiedades de la solución H2O-LiBr dependen de la temperatura y composición.
- Las propiedades de las corrientes auxiliares dependen de la temperatura.
- Las propiedades de las corrientes de agua pura dependen de su presión, temperatura y título (en caso de que se halle una mezcla líquido-vapor).

2.3. Ecuaciones del modelo

- Balance de masa global.

$$\sum_{i\in IN=1}^{n} F_{i;k} - \sum_{i\in OUT=1}^{n} F_{i;k} = 0 \quad (1)$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- Balance de masa por componente.

$$\sum_{i\in IN=1}^{n} F_{i;k} * x_{i;k} - \sum_{i\in OUT=1}^{n} F_{i;k} * x_{i;k} = 0 \quad (2)$$

- Balance de energía.

$$Q_k - W_k + \sum_{i\in IN=1}^{n} F_{i;k} * h_{i;k} - \sum_{i\in OUT=1}^{n} F_{i;k} * h_{i;k} = 0 \quad (3)$$

- Balance de energía en los intercambiadores de calor.

$$Q_k = F_i * (h_{ent} - h_{sal}) \quad (4)$$

- Ecuación de diseño de los intercambiadores de calor.

$$Q_k = U_k * S_k * (DMLT)_k \quad (5)$$

- Diferencia media logarítmica de temperaturas.

$$(DMLT)_k = f(t_{i;IN}; t_{i;OUT}; T_{i;IN}; T_{i;OUT}) \quad (6)$$

- Cálculo de entalpía.

$$h_i = f(t_i; x_i; P_i) \quad (7)$$

- Sumatoria de áreas totales.

$$A_T = \sum_{i=1}^{n} A_i \quad (8)$$

- Costo de inversión.

$$CAPEX = \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} * \sum_{i=1}^{n} (A_k * S_k^{B_k} + C_k) \quad (9)$$

- Costo de operación.

$$OPEX = C_{HU} * HU + C_{CU} * CU \quad (10)$$

- Costo total anual.

$$TAC = CAPEX + OPEX \quad (11)$$

Donde:

- $F_{i;k}$: Flujo másico de la i-ésima corriente en el equipo k, [kg/s].

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- $x_{i;k}$:Fracción másica de la i-ésima corriente en el equipo k, [kg/kg].
- t_i: Temperatura de la i-ésima corriente, [°C].
- P_i: Presión de la i-ésima corriente, [kPa].
- Q_k: Flujo de calor en el equipo k, [kW].
- W_k: Flujo de potencia en el equipo k, [kW].
- h_i: Entalpia especifica de la i-ésima corriente en el equipo k, [kJ/kg].
- U_k: Coeficiente global de transferencia de calor en el quipo k, [kW/m^2 °C].
- S_k: Área total de intercambio de calor en el quipo k, [m^2].
- $(DMLT)_k$: Diferencia media logarítmica de temperatura en el equipo k, [°C].
- A_T: Área total de transferencia de calor, [m^2].
- i: Tasa de interés, [USD/USD].
- n: Periodo, [años].
- $A_k;\ B_k; C_k$: Parámetros para la estimación del costo de inversión.
- $CAPEX$: Costo de inversión, [USD].
- $OPEX$:Costo de operación, [USD].
- $C_{HU} * HU$: Costo de calefaccionamiento, [USD].
- $C_{CU} * CU$: Costo de enfriamiento, [USD].
- TAC: Costo total anual, [USD].

3. Resultados

3.1. Minimización del costo total anual de operación.

Se resuelve el sistema minimizando la variable TAC correspondiente a la ecuación (11), dicha variable incluye los costos operativos y de inversión. En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos para diferentes valores de cargas calóricas en el evaporador requeridas.

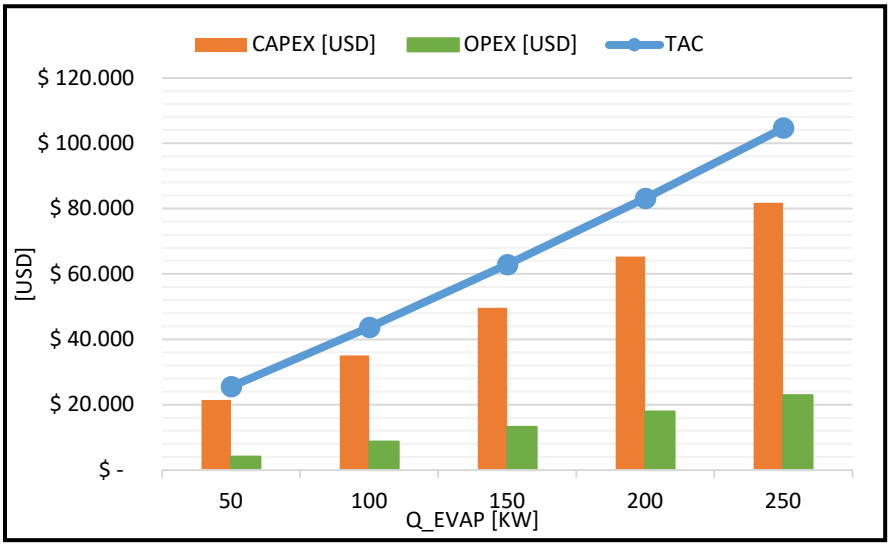


Figura 2. Costos del sistema en función de Q_EVAP

De la figura 2, podemos apreciar que, dentro del rango de carga calórica requerida en el evaporador, la relación entre el costo total de operación se correlaciona linealmente con un aumento de dicha carga.

Si ahora, se desea comparar la relación entre los costos, se dispone de la tabla 1. En ella puede observarse la relación en proporción que ocupa cada una con respecto al costo total.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 1. Resultados de la minimización de costos.

Q_EVAP [kW]	CAPEX		OPEX	
50	$ 21.462	84%	$ 4.114	16%
100	$ 35.026	80%	$ 8.676	20%
150	$ 49.678	79%	$ 13.184	21%
200	$ 65.279	79%	$ 17.873	21%
250	$ 81.761	78%	$ 22.901	22%

Como se ve en la tabla 1, a medida que se aumenta la carga del evaporador, se ve una reducción relativa entre los costos de inversión por sobre los costos de operación.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del mismo modelo, pero para un sistema simple efecto. Es decir que esta compuesto por un absorbedor; una bomba; un intercambiador; un generador; un evaporador; una válvula y un condensador. Bajo los mismos parámetros e hipótesis planteados anteriormente. La tabla 2 muestra una comparación del TAC entre este sistema y el presentado en este trabajo.

Tabla 2. Resultados de la minimización de costos (TAC) en [USD].

Q_EVAP [kW]	SIMPLE EFECTO	DOBLE EFECTO	Reducción costo
50	$ 36.063	$ 25.576	29%
100	$ 62.494	$ 43.702	30%
150	$ 92.407	$ 62.862	32%
200	$ 127.221	$ 83.151	35%
250	$ 163.272	$ 104.662	36%

De la tabla 2 se ve que a medida que se incrementa la carga calórica requerida, el sistema de doble efecto presentado en este trabajo obtiene una mayor rentabilidad que uno de simple efecto.

4. Conclusiones

Se presentó un modelo en estado estacionario de un sistema de refrigeración por absorción de doble efecto de un sistema LiBr-Agua. En él se introdujo la función de costos, con el objetivo de obtener la mejor performance desde el punto de vista económico del sistema.

Puede afirmarse entonces, que el sistema responde correctamente ante cambios en los parámetros establecidos. El modelado planteado del sistema puede entonces reducir costos anuales de entre un 29% y 36%, en comparación a una configuración simple. Lo que motiva a la implementación de estos sistemas.

Agradecimientos

Se agradece especialmente a los Dres. Sergio Mussati y Miguel Mussati quienes fueron de gran ayuda para la realización de este estudio.

Referencias bibliográficas

Mussati, S. Morosuk, T. Mussati, M. (2020) Superstructure-Based Optimization of Vapor Compression-Absorption Cascade Refrigeration Systems. Entropy, 22, 1-21.
Mussati, S. Cignitti, S. Soheil Mansouri, S. Gernaey, K. Morosuk, T. Mussati, M. (2018). Configuration optimization of series flow double-effect water-lithium bromide absorption refrigeration systems by cost minimization. Energy Conversion and Management, 158, 359-372.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Mussati, S. Soheil Mansouri, S. Gernaey, K. Morosuk, T. Mussati, M. (2019). Model-Based Cost Optimization of Double-Effect Water-Lithium Bromide Absorption Refrigeration Systems. Processes, 7, 50, 1-16.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Energía
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Reconquista

Reacondicionamiento de micro ohmímetro para uso educativo

Reconditioning a Micro-Ohmmeter for Educational Purposes

Presentación 18/10/2024

Luciano Soto

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: lsoto3036@comunidad.frrq.utn.edu.ar

Cristian Mancuello

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: cmancuello@comunidad.frrq.utn.edu.ar

Resumen

Se sabe de la importancia de medir las resistencias de contacto en uniones eléctricas para asegurar la eficiencia y seguridad en instalaciones industriales, siendo el micro ohmímetro el instrumento más utilizado para realizarla. En este trabajo se realiza la tarea de reacondicionar un micro ohmímetro digital MPK-102 que se había dado de baja, para permitir su uso en un entorno educativo. Para ello, se realizó un diagnóstico exhaustivo del equipo, identificando y reparando las fallas presentes. Se adaptó el dispositivo para funcionar con una fuente de tensión externa, limitando la corriente de prueba a 10 amperes. Si bien el equipo no alcanza su capacidad original de 100 amperes, los resultados obtenidos demuestran que es útil para ensayos educativos. Las conclusiones del trabajo destacan la importancia de restaurar completamente su funcionalidad para futuras aplicaciones industriales, siendo que además el proceso no sólo asegura la viabilidad del equipo en un contexto de producción, sino que también ofrece una valiosa experiencia práctica en el diagnóstico y reparación de equipos complejos.

Palabras clave: Resistencia de contacto, Micro ohmímetro, Reacondicionamiento, Educación en ingeniería

Abstract

The importance of measuring contact resistances in electrical connections to ensure efficiency and safety in industrial installations is well known, with micro-ohmmeters being the most commonly used instruments for this purpose. In this work, the task of refurbishing a digital micro-ohmmeter MPK-102, which had been decommissioned, was undertaken to allow its use in an educational environment. To achieve this, a thorough diagnosis of the equipment was carried out, identifying and repairing the existing faults. The device was adapted to operate with an external voltage source, limiting the test current to 10 amperes. Although the equipment does not reach its original capacity of 100 amperes, the results obtained demonstrate that it is useful for educational testing. The conclusions of the work emphasize the importance of fully restoring its functionality for future industrial applications, noting that the process not only ensures the viability of the equipment in a production context but also offers valuable practical experience in diagnosing and repairing complex equipment.

Keywords: Contact resistance, Micro ohmmeter, Reconditioning, Engineering education

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

1. Introducción

En la industria es fundamental conocer las resistencias de contacto en las uniones eléctricas entre los elementos constitutivos de una instalación para asegurar su eficiencia y seguridad (Mølmen, Fast, Lundblad, Eriksson, & Leisner, 2023; Ank, Wassiliadis, Kick, Wildfeuer, & Lienkamp, 2021). Todo esto a fin de evitar problemas relacionados con el sobrecalentamiento, pérdidas de energía o incluso incendios que pueden producirse. Al identificar estas resistencias, se pueden tomar medidas preventivas a fin de mejorar la confiabilidad del sistema y así poder reducir el riesgo de fallas. Para detectar el valor de estas resistencias de contacto se utiliza un instrumento llamado micro ohmímetro.

Las mediciones que se hacen con el micro ohmímetro son muy importantes para: (i) ensayos de tablero en prototipos, (ii) fabricación en serie, (iii) puestas en marcha y mantenimiento; ya que permiten monitorear el estado de las conexiones y planificar las posibles intervenciones que se deben hacer antes de que ocurra un fallo. Esto también habilita la validación de las instalaciones, ya que con el micro ohmímetro se garantiza que todas las conexiones se encuentran en valores aceptables de resistencia. Además, que se puede inferir la potencia disipada en los contactos calculando el valor de la resistencia medida por la corriente nominal al cuadrado, como muestra la Ecuación (1).

$$P = I^2 * R \tag{1}$$

El ensayo de medición de resistencia de contacto en la materia “Mediciones eléctricas” que pertenece al 4° nivel de la carrera de ingeniería electromecánica, es fundamental para la formación de los ingenieros. Esto a fin de permitir a los estudiantes poder aplicar de forma práctica los conocimientos teóricos que se dan en esa cátedra, desarrollando las habilidades necesarias para desempeñarse en su futura carrera profesional. Este tipo de actividades no solo logran reforzar el aprendizaje, sino que además prepara a los futuros ingenieros para poder enfrentar los desafíos reales en el ámbito industrial, asegurando que se comprenda la importancia de la precisión y fiabilidad en las mediciones eléctricas.

La facultad regional Reconquista recibió un micro ohmímetro que fue dado de baja por una industria de la zona. Debido a que ya había recibido varias reparaciones por parte del fabricante y luego del último envió de reparación, el proveedor determinó que no podía solucionarlo. Este equipo presenta un problema específico de funcionamiento: no enciende cuando se lo conecta a la red eléctrica mediante el cable de alimentación.

Se detectó, que cuando se conecta una fuente de tensión continua en donde iría la batería interna, el instrumento enciende y se puede realizar el ensayo de medición de resistencia de contacto, pero solo puede inyectar hasta 10 amperes, evitando que se pueda realizar el ensayo con los 100 amperes necesarios para las mediciones de instalaciones de potencia, limitando de esta forma su operatividad. Este equipo, a pesar de que esta fuera de servicio, representa una valiosa oportunidad para que los estudiantes puedan analizar, comprender y potenciar el funcionamiento del instrumento con las intervenciones adecuadas.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se expone el desarrollo de este, donde primero se da una descripción del instrumento, para luego describir su reacondicionamiento; en la sección 3 se muestran los resultados obtenidos; mientras que en la sección 4 se dan las conclusiones y los potenciales desarrollos a futuro.

2. Desarrollo

2.1 Descripción del micro ohmímetro

El micro ohmímetro digital MPK-102, mostrado en la Figura 1 junto con algunos de sus accesorios, es un instrumento diseñado para medir con alta exactitud valores de resistencia extremadamente bajos, tanto en el laboratorio como en el campo. Este dispositivo, controlado por un microprocesador, cuenta con una lectura digital en un display alfanumérico de hasta 4 ½ dígitos. Además, dispone de una batería recargable y puede alimentarse a través de la red eléctrica.

El MPK-102 ofrece una corriente de prueba que varía desde 1 mA hasta 100 A, con una resolución de 0,1 μΩ y una capacidad de medición máxima de 200 Ω. Además, está equipado con protección térmica, lo que garantiza su operatividad en diversas condiciones, asegurando un funcionamiento fiable tanto en entornos controlados como en situaciones más exigentes.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025



Figura 1. Micro ohmímetro digital MPK-102.

El equipo emplea la arquitectura de un Puente de Kelvin (o puente doble de Thompson) de cuatro terminales que se muestra en la Figura 2, siendo este un diseño especializado que permite eliminar los errores en las mediciones causados por la resistencia propia de los cables de prueba (Karcz, 1976; Ramírez, 1992). En un sistema de medición convencional, la resistencia de los cables puede introducir errores significativos, especialmente cuando se miden valores de resistencia extremadamente bajos. Sin embargo, el Puente de Kelvin mitiga este problema al utilizar cuatro terminales: dos para inyectar corriente y dos para medir la tensión.

Este método permite aislar la resistencia de los cables de prueba, asegurando que solo se mida la resistencia del objeto en estudio, lo que resulta en una mayor precisión. Al separar la inyección de corriente de la medición de tensión, el Puente de Kelvin garantiza que los valores de resistencia extremadamente bajos puedan medirse con la exactitud requerida, minimizando los errores que de otro modo serían inevitables en un sistema de medición convencional.

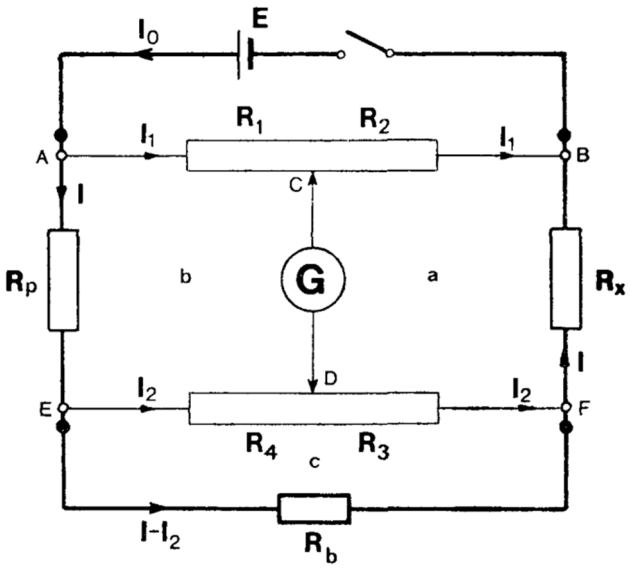


Figura 2. Puente de Kelvin. Donde: R_p resistencia patrón, R_x resistencia a medir, R_b barra de cortocircuito, E fuente de corriente continua, G galvanómetro.

El equipo permite al operador seleccionar la corriente de prueba según las necesidades específicas de la medición, lo que ofrece una gran flexibilidad para diversas aplicaciones. La medición se realiza mediante la comparación con patrones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

internos de alta estabilidad, asegurando así la fiabilidad de los resultados. Estos resultados se presentan de manera clara y precisa en un visor alfanumérico de fácil lectura, lo que facilita la interpretación de los datos por parte del usuario.

Este diseño optimizado convierte al MPK-102 en una herramienta ideal tanto para aplicaciones en laboratorio como en campo, donde la precisión y la confiabilidad son aspectos críticos. En la Tabla 1 se pueden apreciar los rangos de medición de resistencias que el equipo es capaz de medir, lo que destaca su versatilidad y capacidad para adaptarse a distintos entornos y requisitos de trabajo.

Tabla 1. Rangos de medición de resistencia.

Corrientes	Rangos	Resolución
100 A	0-199.9 μΩ	0.1 μΩ
100 A	0-1999 μΩ	1 μΩ
10 A	0-1999 μΩ	1 μΩ
10 A	0-19.999 mΩ	1 μΩ
1 A	0-19.99 mΩ	10 μΩ
1 A	0-199.99 mΩ	10 μΩ
100 mA	0-199.9 mΩ	100 μΩ
100 mA	0-1999.9 mΩ	100 μΩ
10 mA	0-1999 mΩ	1 mΩ
10 mA	0-19.999 Ω	1 mΩ
1 mA	0-19.99 Ω	10 mΩ
1 mA	0-199.99 Ω	10 mΩ

La corriente de prueba de 100 amperes puede utilizarse de manera continua durante un máximo de 15 minutos antes de que se active la protección térmica. Sin embargo, al utilizar una corriente de prueba de 10 amperes o menor, el tiempo de uso es ilimitado. El instrumento opera en un rango de temperatura de -5°C a 50°C, con una humedad relativa de hasta 95%. Su peso es de aproximadamente 13,9 kg.

El equipo incluye dos puntas de prueba combinadas (corriente y potencial) para 10 amperes con una longitud de 1,8 m, otras dos para 100 amperes con una longitud de 6 m, y un cable de alimentación. El fabricante de este instrumento es Megabras[1], una empresa establecida en 1982, especializada en el diseño, desarrollo y fabricación de equipos de prueba y medición de alta calidad. Megabras se destaca por producir instrumentos que combinan portabilidad y robustez, lo que los hace ideales para su uso en campo.

Al inspeccionar el interior del micro ohmímetro, se observó que el equipo se había intervenido en varias ocasiones anteriores. Se encontraron componentes externos añadidos a la placa electrónica del instrumento, y se notó la falta de algunos componentes electrónicos, entre ellos un optoacoplador.

2.2. Reacondicionamiento

Se retiraron los tornillos que fijaban el tablero del micro ohmímetro para acceder a su interior. Durante la inspección, se identificaron y repararon algunos cables sueltos. Posteriormente, se procedió a retirar la batería y la caja que la contenía, tal como se muestra en la Figura 3, el antes y el después.

[1] https://www.megabras.com/en/

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Para adaptar el dispositivo a una fuente de tensión externa, se añadieron adaptadores a los cables que anteriormente estaban conectados a la batería. Con esta modificación, es posible volver a utilizar el micro ohmímetro para realizar ensayos, aunque con una corriente máxima limitada a 10 amperes. Esta solución permite mantener la funcionalidad básica del equipo, facilitando su uso en aplicaciones donde no se requiere la corriente máxima original de 100 amperes.



Figura 3. Interior del micro ohmímetro con la batería instalada (izquierda) y con la batería retirada (derecha).

3. Resultados

La reciente incorporación del micro ohmímetro al equipamiento del laboratorio de electrotecnia ha representado un avance significativo para la cátedra de "Mediciones Eléctricas". Aunque este instrumento fue recibido con limitaciones tras haber sido dado de baja por una industria debido a fallas previas, se ha adaptado exitosamente para su uso en ensayos de resistencia de aislación, proporcionando una nueva herramienta didáctica para la formación de los estudiantes.

Ahora, con la capacidad de realizar mediciones de resistencia de aislación, la cátedra puede ofrecer una experiencia de aprendizaje más completa y práctica. Aunque el micro ohmímetro opera con una corriente máxima de 10 amperes, esta capacidad es más que suficiente para cumplir con los objetivos educativos. La realización de estos ensayos permite a los estudiantes comprender de manera práctica cómo se evalúa la calidad de los materiales conductores en sus uniones y cómo se diagnostican posibles fallos en sistemas eléctricos, conocimientos fundamentales para su formación como futuros ingenieros electromecánicos.

El uso de este micro ohmímetro en el laboratorio no solo enriquece el contenido de la cátedra, sino que también brinda a los estudiantes la oportunidad de familiarizarse con un tipo de ensayo que es ampliamente utilizado en la industria eléctrica. Esta experiencia práctica es invaluable, ya que permite a los estudiantes aplicar conceptos teóricos en un entorno controlado, preparándolos mejor para los desafíos que enfrentarán en su vida profesional.

Además, este equipo ofrece una demostración tangible de cómo las herramientas pueden adaptarse para maximizar su utilidad, incluso cuando no operan en su capacidad original. Esta enseñanza adicional sobre la adaptación y el uso eficiente de los recursos disponibles es un aspecto crucial en la educación de los ingenieros, quienes a menudo se enfrentan a la necesidad de innovar y solucionar problemas con los medios que tienen a su disposición.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

4. Conclusiones

En este trabajo se describieron las tareas desarrolladas para reacondicionar un micro ohmímetro para uso académico, donde se llevaron a cabo varias intervenciones que permitieron recuperar parcialmente su funcionalidad. Este reacondicionamiento permite que los estudiantes obtengan experiencia práctica en la medición de resistencias de contacto, un aspecto crucial en su formación como ingenieros electromecánicos.

Como trabajo futuro, es esencial enfocarse en la identificación y reparación de los defectos que impiden que el micro ohmímetro funcione a su máxima capacidad. El primer paso en este proceso será realizar un diagnóstico exhaustivo para determinar con precisión las partes del circuito que presentan fallas, especialmente en relación con su capacidad de operar cuando está conectado a la red eléctrica de corriente alterna. Actualmente, el equipo solo puede funcionar con la tensión continua inyectada directamente en el área donde originalmente se encontraba la batería, limitando su operatividad a inyectar una corriente máxima de 10 amperes.

Como objetivo a largo plazo, será restaurar completamente la funcionalidad del micro ohmímetro para que pueda inyectar los 100 amperes que requiere el ensayo de resistencia de contacto, especialmente en aplicaciones industriales. Este nivel de corriente es fundamental para realizar mediciones con la precisión y confiabilidad necesarias en un entorno profesional. Para lograr esto, será necesario evaluar la fuente de alimentación interna, los componentes electrónicos asociados con la conversión de energía y cualquier otro sistema que pueda estar impidiendo su funcionamiento adecuado con la red eléctrica. Este proyecto no solo mejorará la utilidad del equipo en el laboratorio, sino que también proporcionará una valiosa experiencia educativa para los estudiantes, quienes podrán participar en el proceso de diagnóstico y reparación, enfrentando desafíos reales que se alinean con los que encontrarán en su futura vida profesional.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Dr. Martín Alarcón por su guía en la realización de este informe. También extendemos nuestro agradecimiento al Ing. Claudio Cendra y al Ing. Aníbal Morzán por proporcionar los conocimientos teóricos que sustentan este trabajo. Agradecemos a la Facultad Regional UTN por permitirnos el uso de sus instalaciones, y a la empresa Electroluz por habernos proporcionado el micro ohmímetro utilizado en este estudio.

Referencias bibliográficas

Ank, M., Wassiliadis, N., Kick, M. K., Wildfeuer, L., & Lienkamp, M. (2021). Experimental investigation of the inuence of electrical contact resistance on lithium-ion battery testing for fast-charge applications. *Applied Energy, 295*(11706).

Karcz, A. M. (1976). *Fundamentos de metrología eléctrica, tomo II, Parámetros básicos.* Barcelona: MARCOMBO, S.A.

Mølmen, L., Fast, L., Lundblad, A., Eriksson, P., & Leisner, P. (2023). Contact resistance measurement methods for pem fuel cell bipolar plates and power terminals. *Journal of Power Sources, 555*(232341).

Ramírez, J. (1992). *Mediciones Eléctricas* (4ta ed.). Barcelona, España: Editorial CEAC.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Energía
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Reconquista

Calentador solar de agua sanitaria con materiales de bajo costo

Low-cost solar water heater for sanitary use

Presentación 30/08/2024

Gonzalo Nuñez

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina

E-mail de contacto: gonzalogn03@outlook.com

Federico Fontana

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina

E-mail de contacto: ffontana2702@comunidad.frrq.utn.edu

Nicolas Moschen

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina

E-mail de contacto: 22moschen@gmail.com

Resumen

Este trabajo consiste en la construcción de un sistema captador de energía solar térmica para el calentamiento de agua de uso sanitario y su correspondiente almacenamiento, realizado con materiales de bajo costo. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de termosifón, circulación natural de un fluido por diferencia de densidades, que en este caso es agua potable y donde la masa de esta que se encuentra a mayor temperatura tiende a ascender y la de menor temperatura a descender. El sistema captador se constituye de una cañería de Polietileno (PE) dispuesta en forma de espiral cónica con su diámetro mayor en la base de apoyo, el ingreso de agua fría proveniente del tanque de almacenamiento será por el diámetro mayor de la espiral o base mayor del cono y la salida del agua caliente será por la parte superior de la espiral (menor diámetro) hacia el mismo tanque. Además, este sistema se encuentra dispuesto sobre una base de madera de pino que hace de plataforma y apoyo mecánico con un cierto ángulo de inclinación hacia el Norte. El conjunto captador contará además con un cerramiento por su parte posterior, superior y laterales de un material resistente a la intemperie y reflectante en su lado interior, y por su parte frontal de un material transparente para permitir el ingreso de la radiación solar logrando además el efecto invernadero (conservación del calor captado). El sistema de almacenamiento del agua caliente será por medio de un tanque plástico aislado térmicamente y con la cobertura de un tacho metálico para su protección mecánica, todo el conjunto descrito se encontrará sobre una estructura y a una altura superior respecto a la del sistema captador, para lograr el efecto sifón.

Palabras clave: Energía solar térmica, Calentador de agua solar, Materiales de bajo costo.

Abstract

This work involves the construction of a solar thermal energy collection system for heating sanitary water and its corresponding storage, made with low-cost materials. Its operation is based on the thermosiphon phenomenon, a natural circulation of fluid due to density differences, which in this case would be potable water, where the mass of water at a higher temperature tends to rise, and the mass at a lower temperature tends to descend. The collector system consists of a polyethylene (PE) pipe arranged in a conical spiral shape, with the larger diameter at the base. Cold water from the storage tank enters through the larger diameter of the spiral (the base of the cone), and the hot water exits through the upper part of the spiral (smaller diameter) back into the same tank. Additionally, this system is mounted on a pine wood base, which acts as a platform and mechanical support, with a certain inclination angle towards the North. The collector assembly will also

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

have an enclosure on its rear, top, and sides made of a weather-resistant material that is reflective on the inside, and the front will be made of a transparent material to allow the entry of solar radiation, thus achieving the greenhouse effect (heat conservation). The system for storing hot water will use a thermally insulated plastic tank covered with a metal drum for mechanical protection. The entire described setup will be mounted on a structure, with the height of its base between 0.5 meters and 1 meter above the top of the collector system

Keywords: Solar thermal energy, Solar water heater, Low-cost materials.

1. Introducción

Este trabajo consiste en el diseño y construcción de un sistema captador de energía solar térmica, para el calentamiento de agua de uso sanitario y su correspondiente almacenamiento. El objetivo del proyecto recae en la obtención de un sistema de ACS (agua caliente sanitaria) a un precio accesible por lo que se plantea fabricar el sistema mediante el uso de materiales de bajo costo. Esto debido a que está destinado su uso en sectores de la sociedad de bajos recursos, donde mediante el aprovechamiento de energía renovable y sin grandes inversiones económica se podría mejorar la calidad de vida.
El proyecto se encuentra en fase de fabricación de un prototipo y tiene como objetivos en etapas posteriores la obtención de datos, a partir de la metodología que se desarrolla en este informe, y mediante el análisis de estos obtener posibles mejoras en el sistema.
Para comprender el funcionamiento del sistema es importante tener presente la definición de los siguientes conceptos:

- Radiación directa: es la radiación referida al flujo solar que llega a la superficie sin haber sufrido ninguna dispersión en la atmósfera. La misma procede del disco geométrico del Sol y es la componente de la luz solar que se enfoca mediante un sistema óptico dando una imagen del disco del Sol.
- Radiación dispersa: la atmósfera produce una componente difusa de luz dispersa a través de la denominada dispersión de Rayleigh y la dispersión por el polvo y aerosoles. Las nubes también dispersan la luz solar, lo cual se añade al flujo disperso total pero su naturaleza no es estrictamente difusa. Este tipo de radiación no puede enfocarse por ningún sistema óptico.
- Fenómeno de Termosifón: El efecto termosifón o tiro térmico es un fenómeno que se produce en los fluidos cuando se calientan. Al calentarse, las sustancias se dilatan y entonces disminuye su densidad. Si se considera la masa de un fluido, la porción más caliente tiene menos densidad, de modo que asciende (dicho al modo llano, flota) sobre la porción de fluido más fría.
- Efecto invernadero: El efecto invernadero es un proceso en el que la radiación solar térmica que recibe la superficie terrestre por parte del sol es contenida en esta superficie al atravesar la atmosfera y parte se deja escapar a través de esta al exterior.

2. Desarrollo

Para lograr disponer de agua caliente para uso sanitario el sistema en conjunto consta de dos partes a saber:

2.1 Sistema de almacenamiento de agua caliente: El mismo consiste en un tacho de material plástico de 100 litros, apto para agua potable, aislado por fuera con un aislamiento térmico aluminizado, en plancha de 10 mm. Este conjunto a la vez se alojará en el interior de un tacho de 200 litros metálico que brindará protección mecánica ante la intemperie.
El ingreso de agua de alimentación, a modo de prueba, se realizará por su parte superior como se observa en la figura 1, en la aplicación real el ingreso se realiza por su parte inferior y donde el tanque de agua potable domiciliario se encontrará a la misma altura del tanque de almacenamiento de agua caliente perteneciente al sistema calentador de agua.
En lo que respecta a la cañería que permite la salida del agua fría del tanque hacia el sistema captador y salida de agua caliente de este y su ingreso al tanque de almacenamiento, se realizará a diferentes niveles de agua que se corresponden con la estratificación por temperatura que ocurre por fenómeno de convección dentro del tanque de almacenamiento, es decir, el caño de salida de agua fría estará a 1/3 de la altura total del tanque mientras que el caño de ingreso de agua caliente, proveniente del captador solar, estará a una altura entre 1/2 y 2/3 (de altura total) desde el fondo del tanque, como se aprecia en la figura 1.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El sistema de almacenamiento de agua descripto se encontrará a una altura requerida entre 0,5 m a 1 m por encima del sistema captador para producir el fenómeno de termosifón (circulación de agua por diferencia de temperatura) y así provocar el calentamiento de agua para su posterior uso.

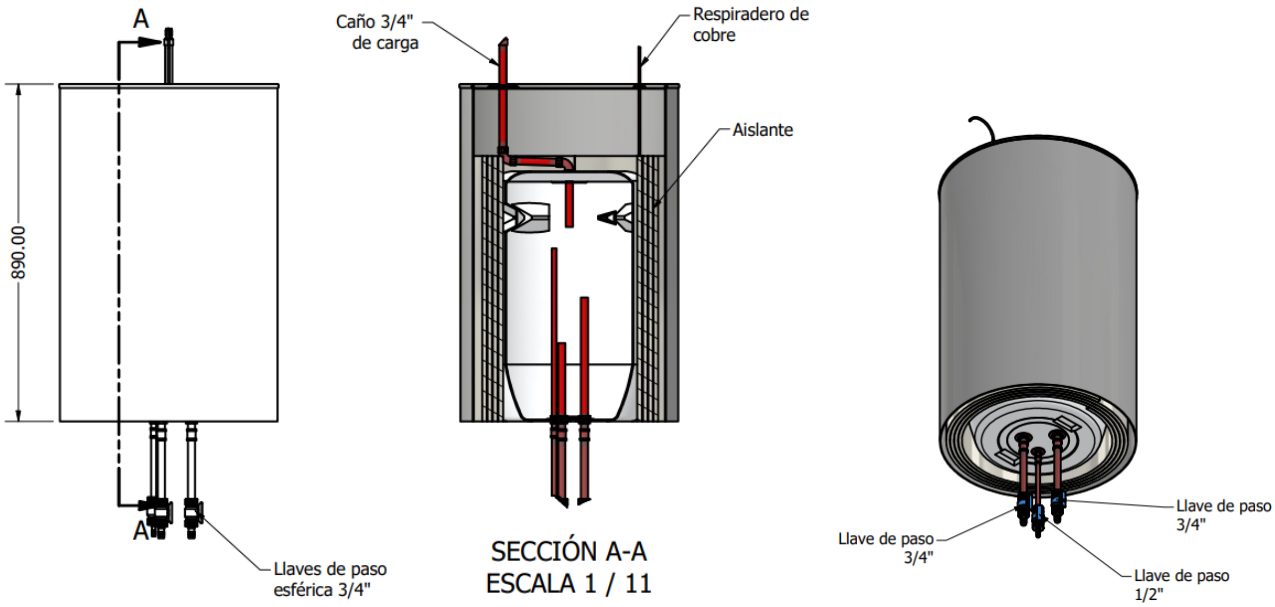


Figura 1. Sistema de almacenamiento de agua caliente.

2.2 Sistema captador de energía solar y calentador del agua: El mismo consiste en un sistema de espiral cónico con su diámetro mayor en la parte inferior, la cual se apoya sobre una base de madera de pino. Dicha espiral es soportada por cuatro (4) parantes de madera, los cuales en uno por lado y con escalones formará una figura como la pirámide Azteca para ofrecer soporte y sujeción a la espiral, ver figura 2 a) y b).

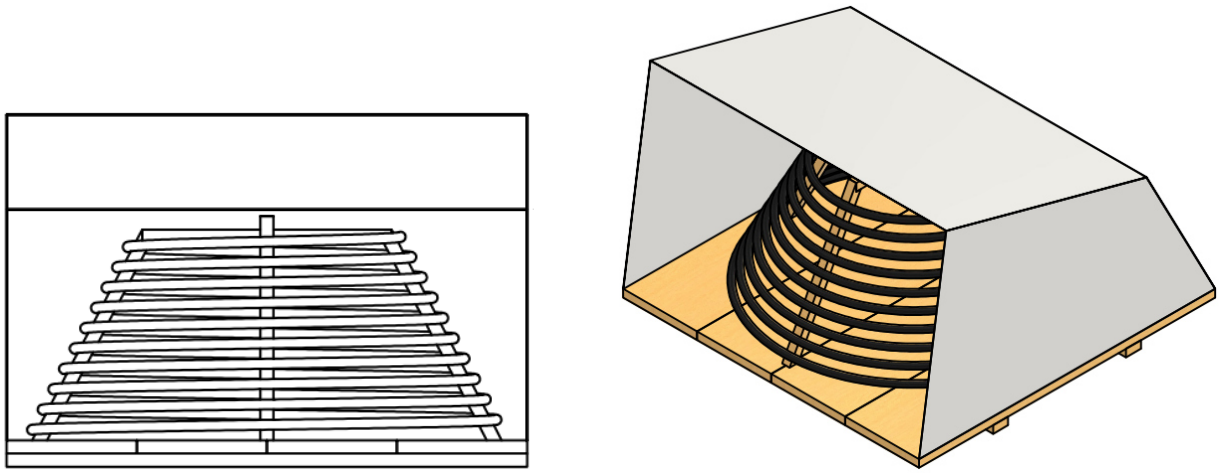
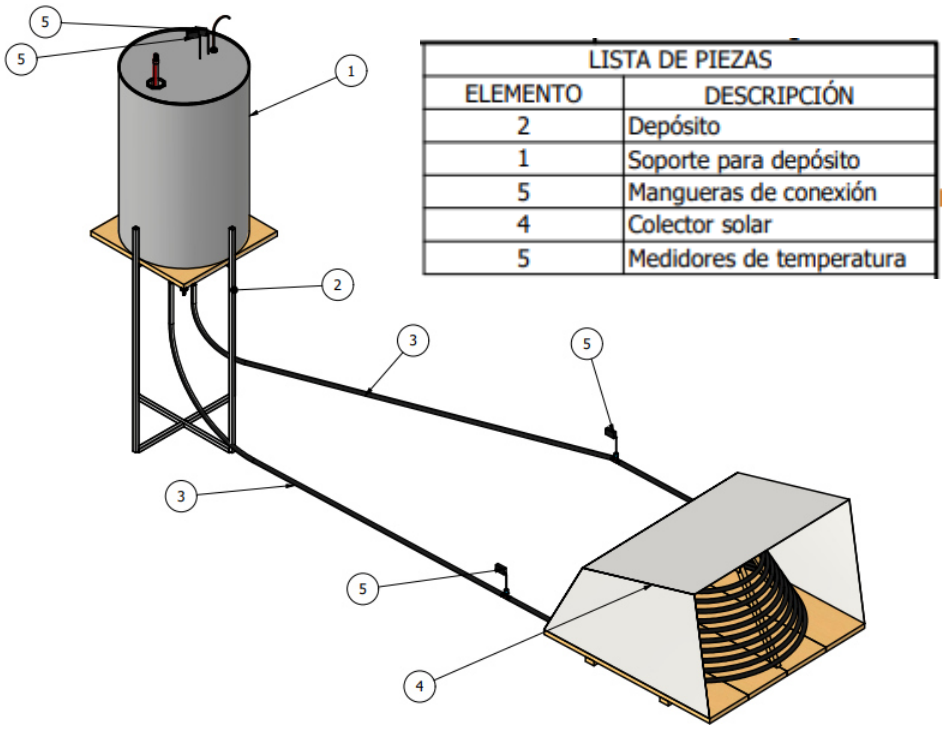


Figura 2. Sistema captador de radiación solar y de calentamiento de agua a) y b).

Además, el sistema captador contará, como se observa en la figura 2, de un cobertor en su parte posterior, superior y laterales para protegerlo de la intemperie y sobre todo de la radiación solar de altos valores de irradiancia que se tiene en verano. El frente, como se observa en la figura 2 b), es por donde ingresa la radiación solar térmica y la misma se dispondrá de un material de polietileno (en rollo) que cumpla con la función de efecto invernadero, es decir, de dejar pasar el espectro de radiación solar directo más difuso y no dejar salir el calor almacenado.
A la vez por su lado interior la superficie del cobertor contará con una lámina autoadhesiva aluminizada para reflejar los rayos solares que lograron entrar, pero no incidieron sobre el espiral cónico, haciendo de esta manera más efectiva el área de captación ya que esta es menor si se deja el sistema de espiral sin cobertor.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

2.3 Por último, ambos sistemas, tanto el de almacenamiento como el captador se conectarán mediante cañerías de polietileno de fusión también en ¾" al igual que la cañería que ingresa dentro del tanque de agua de almacenamiento. Además, contarán con llaves de paso para la interrupción ante mantenimiento o inspección del sistema en general, como se observa en la figura 1. Dicho circuito de conexión estará protegido ante la intemperie mediante aislante de tubo gris para aire acondicionado. Observar en la figura 3, el sistema de conexión y su esquema general donde se aprecia los dos sistemas antes descritos.



LISTA DE PIEZAS	
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
2	Depósito
1	Soporte para depósito
5	Mangueras de conexión
4	Colector solar
5	Medidores de temperatura

Figura 3. Esquema general de los sistemas de almacenamiento y calentador de agua.

3. Metodología

Las tomas de medidas a realizar en el sistema descrito serán tomadas en el predio de la Facultad Regional Reconquista, donde se encontrará emplazado el proyecto, y consistirán en:

a) De temperatura y hora: en cuatro (4) partes del circuito como ser; en dos niveles distintos de estratificación del agua dentro del recipiente de almacenamiento y en el ingreso al sistema captador de energía solar como en la salida de este hacia el tanque de almacenamiento.

a-1) A su vez, dichos datos serán tomados dos veces por semana en el intervalo horario entre las 10 h y las 16 h para los días del mes de invierno, entre las 9 h y las 17 h para los días del equinoccio y entre las 8 h y las 18 h para los días en el solsticio de verano. En dicho intervalo especificado según la estación se tomará cuatro (4) medidas por día indicadas por los termómetros en los cuatro puntos señalados.

a-2) Dentro del punto anterior también se contemplará los días con baja radiación solar, parcialmente nublados y totalmente nublados.

Los termómetros para usar con sondas incluidas son del Modelo LCD (digital) con batería tipo LR44 y un rango de temperatura entre -50 °C a 110 °C.

b) Datos de radiación solar global y temperatura ambiente: esta toma será diaria cada 5 minutos en los mismos días de estudio del inciso a) será por medio de una estación meteorológica que se encuentra instalada en el predio de la FRRq de marca PEGASUS y Modelo EP0304 N° 3704, como se observa en la figura 4 siguiente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025



Figura 4. Estación Meteorológica PEGASUS, Modelo EP0304 N° 3704.

c) Mapeo de la distribución del calor en el circuito de calentamiento del agua por medio de una cámara termográfica de Marca Fluke Modelo 62 max y rango de temperatura (-30 °C a 500 °C) que dispone la FRRq. Estos datos serán relevados en los mismos tiempos especificados en el inciso a).

De los datos de radiación solar global diaria captada por la estación meteorológica obtenidos cada cinco (5) minutos, se realizará el cálculo de energía (Irradiación recibida) en el punto de localización del proyecto y en base a la diferencia de temperatura, en rangos de estudio de una (1) hora, y conociendo el volumen de agua en ensayo se podrá determinar por las ecuaciones de calorimetría la eficiencia de captación del sistema captador como tal y de su transferencia de calor al fluido.
Una vez procesados los datos establecidos en la segunda etapa realizar su análisis, sacar conclusiones de estos y discutir sobre mejoras tanto en el diseño como en su construcción.

4. Conclusiones

Desde el diseño expuesto se puede concluir que este sistema ofrece un armado sencillo en cuanto al sistema captador, respecto por ejemplo a otros sistemas de parrilla y con botellas descartables de PET. A la vez lo que se busca con el cobertor no es solo darle protección contra la intemperie y de recinto conservador del calor, sino también de proteger el sistema calentador (espiral) de las altas radiaciones que se presentan en los meses de elevadas temperaturas como ser finales de la primavera, verano e inicio del otoño. Permitiendo solo el ingreso de los rayos solares cuando estos son de menor valor de radiación como en la época de finales de otoño, invierno y principio de primavera; y que a la vez el sol se encuentra con menor altitud solar como se observa en la figura 5, extraída de la referencia [3] sobre geometría solar, si bien la figura está realizada para una Latitud Norte el concepto de geometría solar vale igual para la misma Latitud Sur, que es a la que se encuentra emplazada la ciudad de Reconquista, donde se lleva adelante este proyecto.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

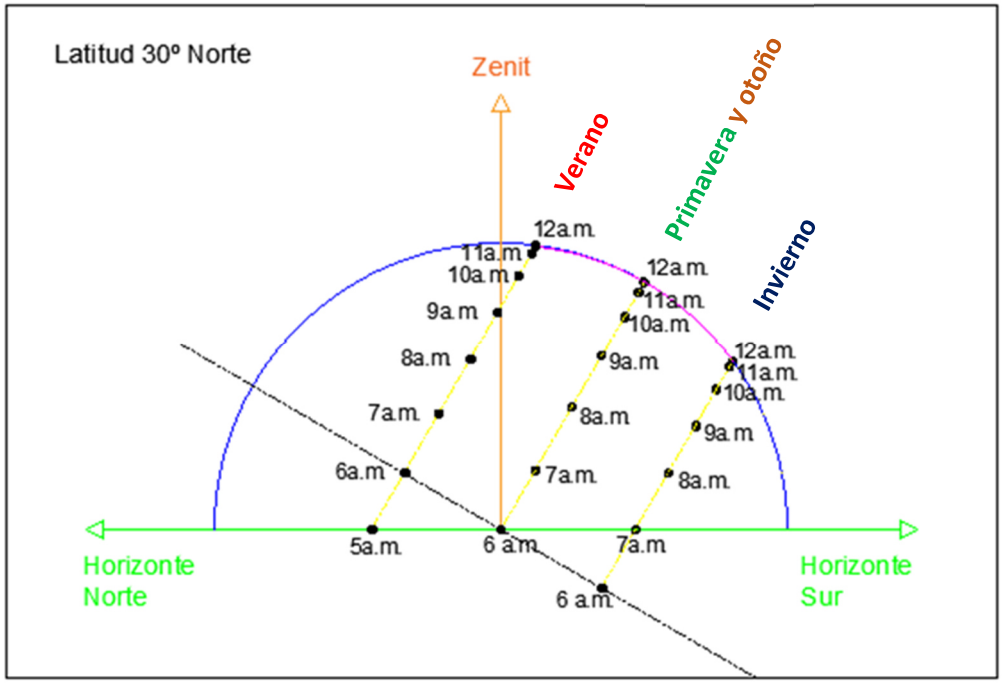


Figura 5. Altitud solar por hora y por cada estación.

De lo expuesto se desprende que se busca evitar tener el agua de servicio a altas temperaturas en épocas de elevada temperatura ambiente, como por ejemplo en el verano, y donde no se requiere que el agua de uso sanitario se encuentre a la misma temperatura que en invierno. Lo primero es debido a que el sistema está pensado y dirigido al sector de la sociedad que cuenta con bajos recursos económicos, como para que puedan acceder a un sistema de calentamiento solar comercial de tubos de vidrio al vacío, donde a la vez estos sistemas comerciales como así también los de placa plana logran la regulación de temperatura del agua de servicio mediante una válvula mezcladora termostática (figura 6), la cual mezcla agua natural de la red con el agua caliente en función a la temperatura de esta. Dicha válvula es de precio considerable y su costo, según el modelo, representa más del 50% del sistema en conjunto propuesto en este proyecto.



Figura 6. Válvula Mezcladora Termostática para termo solar.

Referencias bibliográficas

[1] Luis Monge Malo. Instalaciones de Energía Solar Térmica. Editorial Marcombo (2 Ed).
[2] A.B. Meinel, M.P. Meinel. (1982). Aplicaciones de la Energía Solar, Editorial Reverté s.a.
[3] Mario A. Ros, Ezequiel A. Rosatti, Walter A. Soto. (2020). Captación directa de la energía solar, Principios de geometría solar aplicados a instalaciones fotovoltaicas. Editorial Académica Española.
[4] TECMES. Estación meteorológica Pegasus. https://www.tecmes.com/estacion-pegasus/

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Energía
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Reconquista

Influencia de la temperatura en el rendimiento de paneles fotovoltaicos en la generación de energía

Influence of Temperature on the Performance of Photovoltaic Panels in Energy Generation

Presentación 30/08/2024

Andrés Gabriel López Nicola

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: andres15.- @hotmail.com

Matías Osmar Corgnali Puente

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: mcorgnali1222@comunidad.frrq.utn.edu.ar

Resumen

El presente trabajo consiste en analizar como varía el rendimiento (generación de energía eléctrica) de paneles fotovoltaicos de tecnología policristalina en función a la temperatura ambiente, o en condiciones de días de calor cálido respecto a días considerados meteorológicamente como de “olas de calor”. Para realizar dicha comparación se emplearon datos de captación de Radiación Solar Global, obtenidos de una estación meteorológica ubicada en el predio de la facultad, y datos de generación de energía eléctrica, por parte de un grupo de 4 paneles FV policristalinos de 270W, mostrados analítica y gráficamente por medio de un inversor On-Grid (con conexión a Red). A la vez se han tomado datos de temperatura en la superficie del panel FV, para el día de ola de calor mediante una pistola termográfica, para poder determinar de manera analítica y en base a su temperatura promedio la disminución de generación de energía el emplear en la expresión teórica del cálculo de generación de energía el factor de disminución porcentual por °C dado por el fabricante bajo el concepto de características TONC (Temperatura de Operación Nominal de la Célula). De esta forma poder comparar también este último valor dado, por las características del fabricante, con el valor de energía indicado por el inversor. Los días en estudio fueron dos; uno parcialmente nublado y con ola de calor y el otro mayormente despejado y de condición cálida, siendo sus fechas el 08/02 y 21/08 del corriente año respectivamente.

Palabras clave: Efecto de la temperatura, Generación de energía solar Fotovoltaica, Pérdida de rendimiento fotovoltaico.

Abstract

This study analyzes how the performance (electricity generation) of polycrystalline photovoltaic panels varies according to ambient temperature, specifically comparing warm days to those classified meteorologically as "heat wave" days. To conduct this comparison, data on Global Solar Radiation capture was obtained from a weather station located on the faculty's premises, along with electricity generation data from a group of four 270W polycrystalline photovoltaic panels, presented both analytically and graphically through an On-Grid inverter (connected to the grid). Additionally, temperature data on the surface of the photovoltaic panel was collected on the heat wave day using a thermal imaging gun to analytically determine, based on the average temperature, the decrease in energy generation. This was done by employing the percentage reduction factor per °C provided by the manufacturer in the theoretical expression for energy generation, under the concept of NOMC (Nominal Operating Cell Temperature) specifications given by the manufacturer. This allows for a comparison of this last value provided by the manufacturer with the energy value indicated by the inverter. The days studied

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

were two: one partly cloudy with a heat wave and the other mostly clear and warm, occurring on 02/08 and 08/21 of the current year, respectively.

Keywords: Effect of temperature, Generation of photovoltaic solar energy, Loss of photovoltaic performance.

1. Introducción

En el predio de la Facultad Regional Reconquista (FRRq) se encuentra una estación meteorológica PEGASUS Modelo EP0304 N° 3704, esta estación permite medir, almacenar y visualizar en tiempo real información ambiental. Su alimentación es por batería y panel solar, todo integrado en su exclusivo diseño. La tecnología GSM incorporada transmite los datos registrados por cada sensor vía 2G y 3G a la nube para ser visualizados en tiempo real desde una computadora o a través de la aplicación PEGASUS MOBILE. Esta estación provee los datos de Radiación solar, más específicamente la Irradiancia (potencia lumínica), entre otra información como ser la temperatura ambiente y velocidad del viento, donde ambos datos son los empleados para elaborar el presente trabajo.

Toda la información obtenida es empleada luego para comparar con el valor de generación de energía diaria por un sistema fotovoltaico, integrado por 4 paneles FV en serie de la marca Jinko 260-280 Eagle 60 de 270Wp policristalinos y un inversor On-grid ABB, conectado a la Red de la EPESF, bajo el Programa ERA, inscripto como usuario generador. De esta forma se tiene la diferencia entre la energía o radiación solar recibida por los paneles fotovoltaicos (dado por medio de la estación meteorológica) y la generada o inyectada a la Red, la cual es obtenida vía wifi por el inversor.

Además, se ha empleado una cámara o pistola termográfica para tomar datos o registros de la temperatura de la superficie del panel FV y obtener de esta manera su valor promedio para el día de ola de calor como lo fue el 08/02.

De esta manera el objetivo de este trabajo es averiguar la influencia que tiene la temperatura ambiente sobre la generación de energía eléctrica en paneles FV policristalinos respecto a la energía total captada (radiación global), como también poder comparar analíticamente el valor arrojado por el inversor con el valor que resulta de la expresión que contempla la disminución de generación de energía en base a la perdida de energía porcentual por cada °C de aumento, coeficiente dado por el fabricante, en función al valor de aumento de temperatura, de la superficie del panel FV, por encima de 25°C (temperatura de ensayo).

Los paneles fotovoltaicos y la estación meteorológica se encuentran ubicados en el predio de la UTN-FRRq, con una ubicación geográfica de 29°08′40″S 59°38′38″O, de Latitud y Longitud respectivamente de la ciudad de Reconquista provincia de Santa Fe.

2. Metodología

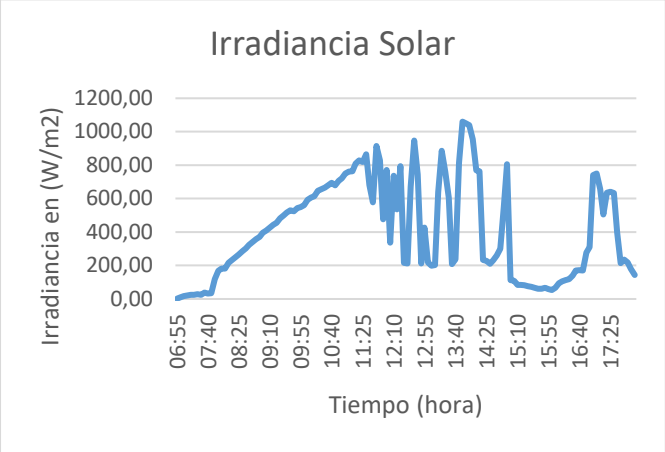
Los estudios se realizaron para un intervalo horario entre las 7h y las 19h en los días 08/02 y 21/02 y los datos de potencia (irradiancia) obtenidos cada 5 minutos al igual que los datos de temperatura ambiente se guardaron en una planilla Excel para su procesamiento estos dos tipos de datos son obtenidos de la estación meteorológica PEGASUS MOBILE presentada en la figura 1.



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Figura 1. Estación Meteorológica PEGASUS, Modelo EP0304 N° 3704.

Los datos mencionados son volcados a una planilla Excel y representados gráficamente, como se muestran en las figuras 2 y 3 para los datos de Irradiancia (W/m^2) o potencia lumínica en los días 08/02 y 21/02 respectivamente.



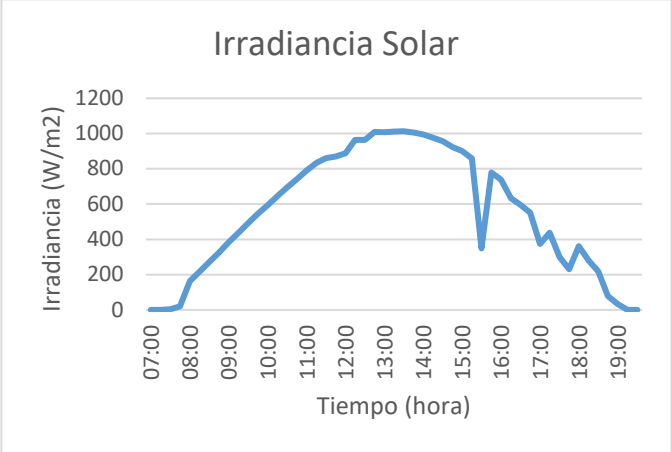


Figura 2 y 3. Datos de Irradiancia obtenidos de la estación Meteorológica en el día 08/02 y 21/02 respectivamente.

En primer lugar, se calcula el área bajo la curva utilizando la sumatoria de los trapecios como se muestra en la expresión (1):

$$E = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n-1}(t_{i+1} - t_i)(p_{i+1} + p_i) \quad (1)$$

En la cual, E es la energía en Wh, n la cantidad de datos, ti el tiempo en el punto i, y pi la potencia en el mismo punto. Debido a que los datos se registran cada 5 minutos los intervalos de tiempo son constantes durante todo el día, esto significa que (t_(i+1)-t_i)=5 minutos, la expresión de la energía total diaria (irradiación) queda simplificada de la siguiente forma (2):

$$E = \frac{5}{2}\sum_{i=1}^{n-1}(p_{i+1} + p_i) \quad (2)$$

Los valores arrojados por el método de los trapecios, para ambos días, son mostrados en la Tabla 1 siguiente.

Día	Trapecios, (Wh)
08/02/2024	**4574, 2**
21/02/2024	**7075,75**

Tabla 1. Valores de energía (Wh) por cada día y función.

En la figura 4 a) y b) siguiente se observa la gráfica de valores de temperatura ambiente, también obtenidos de la estación meteorológica, cada 5 minutos para los días 08/02 y 21/02 en un intervalo horario de las 7h a 18h.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

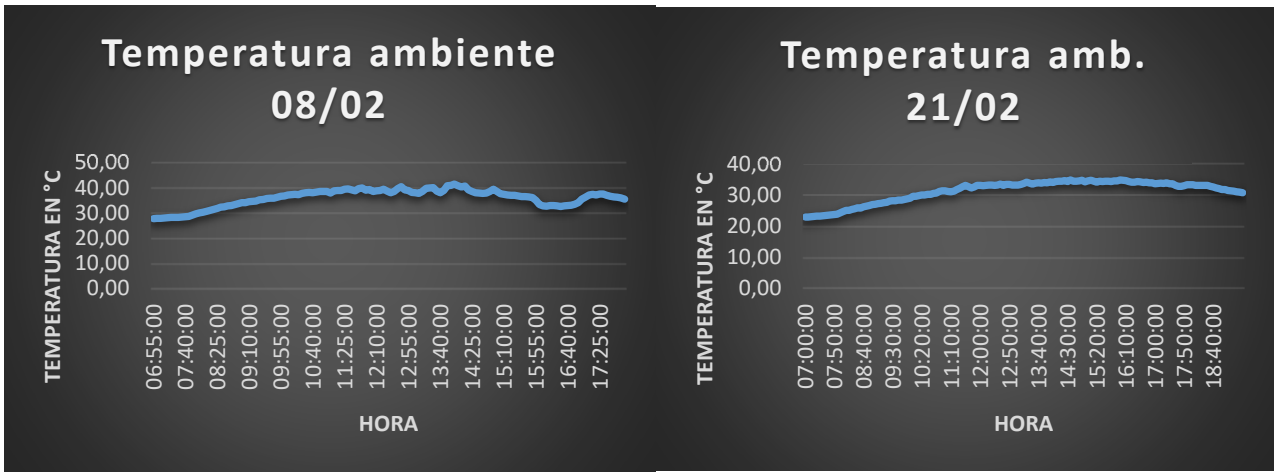


Figura 4. Temperatura ambiente en °C; a) y b) para los días 08/02 y 21/02 respectivamente.

- Temperatura ambiente promedio para el día 08/02: **35,98 °C.**
- Temperatura ambiente promedio para el día 21/02: **31,31 °C**.

A continuación, se muestra una gráfica (figura 6) con los valores de temperatura sobre la superficie del panel dados para el día con condiciones de ola de calor como lo fue el día 08/02 que es objeto de estudio, y los cuales fueron obtenidos con una cámara termográfica (Pistola) Fluke 62 Max (Termómetro Infrarrojo) con intervalo de medición de -30°C a 500 °C, ver figura 5 siguiente, y en la figura 7 la gráfica de velocidad del viento con los datos dados por la estación meteorológica descrita anteriormente.



Figura 5. Pistola Termográfica Fluke 62 Max (-30°C a 500°C)

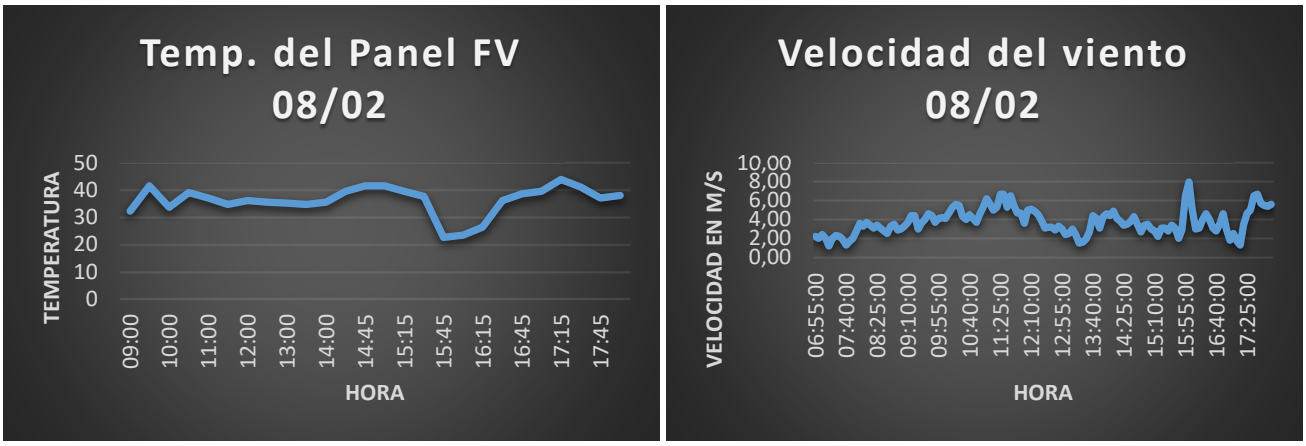


Figura 6 y 7. Temperatura en la superficie del Panel Solar fijo en °C y Velocidad del viento para el día 08/02.

- Temperatura promedio de la superficie del panel FV = 36,26°C
- Velocidad promedio: 3,9 m/s = 14,04 km/h.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

De la tabla 2 siguiente se puede observar el valor de HSP (Hora Solar Pico) que fueron datos obtenidos en cinco (5) ciudades de la Provincia de Santa Fe, entre ellas la ciudad de Reconquista mostrada junto con la de Tostado;

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Promedio parcial	Promedio Anual
Tostado	Medida			5,47	4,49	2,8	2,46	3,27	3,58	3,68	
	NASA			4,99	3,83	3,2	2,62	3,02	3,94	3,6	4,89
Reconquista	Medida		5,86	5,63	4,79	3,14	2,71	3,08	3,43	4,09	
	NASA		5,99	5,08	3,81	3,27	2,65	3,04	3,9	3,96	4,85

Tabla 2. Valores de HSP obtenidas por la Red Solarimétrica de estudio entre la FIQ-UNL y el CONICET Santa Fe comparados con los valores obtenidos por la NASA (2015).

A continuación, se muestra las gráficas obtenidas del inversor (figuras 8 y 9) en lo que respecta a energía eléctrica generada y entregada a la red para los dos días de estudios, 08/02 y 21/02 respectivamente.

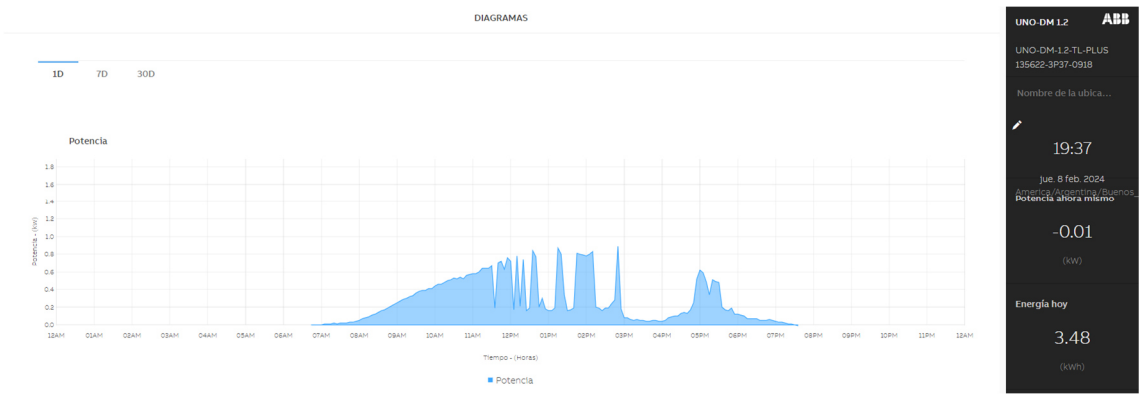


Figura 8. Captura de pantalla donde se observa la gráfica, dado por el inversor, para el día 08/02.

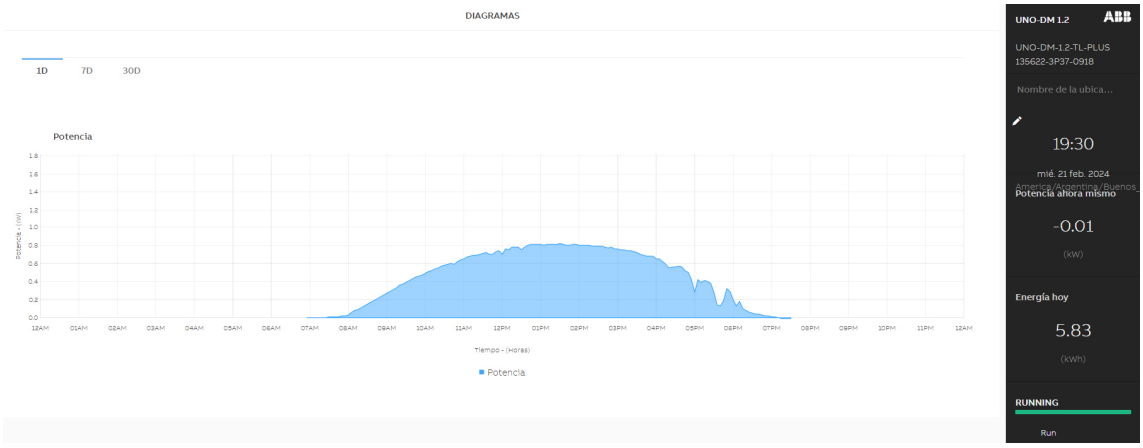


Figura 9. Captura de pantalla donde se observa la gráfica, dado por el inversor, para el día 21/02.

3. Resultados

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

De la tabla 2 anterior se puede calcular la energía teórica que generaría el sistema fotovoltaico integrado por 4 paneles de 270W, mediante la expresión (1) siguiente, donde; PR un porcentaje considerado de 98% de generación del panel en su estado nuevo (dado por el fabricante) y HSP es el valor de la hora solar pico para el mes de Febrero (mes de estudio) dado por la FIQ-UNL.

$$Energía\ diaria\ (STC) = PR\ x\ Potencia\ Instalada\ x\ HSP\ = 0{,}98\ x\ 4\ x\ 270W\ x\ 5{,}86h = 6202{,}22Wh/día \quad [1]$$

Además, el fabricante da las características del panel en condiciones STC (Standar Test Conditions) para una Irradiancia de 1000W/m2 y Temperatura de la célula de 25°C y AM (Masa de Aire) 1,5. Ahora bien también da como valor el porcentaje de perdida en generación por cada °C por encima de ese valor de temperatura de la célula y que es de k = -0,39%/°C y que forma parte de las características TONC (Temperatura de Operación Nominal de la Célula). De esta manera se pasa a calcular el nuevo valor de potencia (expresión 2) bajo el efecto del aumento de temperatura superficial para el día 08/02;

$$Pot._{(TONC)} = P_{max(STC)}\ x\ [1 + (T_{prom.} - 25°C)\ x\ K] = 270W\ x\ [1 + (36{,}26°C - 25°C)\ x\ (-0{,}39\%/°C)\ /100] = 258{,}14W \quad [2]$$

Si ahora usamos este valor dado, al considerar el efecto de la temperatura, en la expresión (1) se obtiene el valor de energía generada:

$$E.diaria\ (TONC) = PR\ x\ Potencia\ Instalada\ x\ HSP\ x\ 0{,}8 = 0{,}98\ x\ 4\ x\ 258{,}14W\ x\ 5{,}86h\ x\ 0{,}8 = 4743{,}82Wh/día \quad [1]$$

El valor de 0,8 corresponde al 80% de los 1000W/ m2 de Irradiancia de laboratorio, ya que las características TONC consideran un valor de Irradiancia de 800W/m2 ya que el valor de HSP es considerado a 1000W/m2.
Se puede apreciar, mediante capturas de pantalla, que los valores de energía arrojados por el inversor son: en la figura 8 de 3,48kWh o 3480Wh para el día 08/02 (de condición parcialmente nublado) y en la figura 9 un valor de energía generada de 5,83kWh o 5830Wh para el día 21/02 (mayormente despejado).

4. Conclusiones

De los resultados obtenidos se puede concluir comparando en primer lugar la diferencia de energía generada, indicada por el inversor para cada día de estudio, y la energía captada por la estación meteorológica que:

- Para el día 08/02 el inversor indico una generación de energía de 3,48kWh o 3480Wh siendo un 23,91% menor respecto a la energía captada con un valor de 4574,2Wh.
- Para el día 21/02 el inversor da un valor de energía generada de 5,83kWh o 5830Wh con un 17,61% menor respecto a la energía captada, donde arrojo un valor de 7075,75Wh.

Se concluye que los paneles fotovoltaicos de tecnología policristalina se ven afectados por las condiciones climatológicas circundante, especialmente por la temperatura ambiente, como se aprecia en la diferencia entre la energía captada y la generada, en los dos días de estudio y sobre todo en aquellos días clasificados meteorológicamente como con “ola de calor”, como se presentó el día 08/02 del corriente año, donde la diferencia se acentúa más.
A la vez se aprecia que para el día 08/02, el valor arrojado por la expresión (1) sobre el calculo de energía eléctrica, para el grupo de paneles FV, mediante el concepto del coeficiente de reducción de perdida porcentual por °C (característica TONC del fabricante) y de la temperatura promedio de la superficie del panel FV, un valor que difiere del obtenido por el cálculo teórico en condiciones STC de 23,51% y que es muy cercano a la diferencia entre lo que generó el sistema y la energía captada con un valor de 23,91%.
También se puede concluir en base a la figura 7 sobre velocidades del viento, también dados por la estación meteorológica, que en los intervalos de tiempo donde el viento alcanza mayor velocidad la temperatura del panel FV disminuye (ver figura 6), debido al conocido fenómeno de extracción de calor por convección, como por ejemplo en el intervalo cercano a las 16h.

Referencias Bibliográficas

Miquel. Casa, Mónica. Barrio. (2012). Instalaciones solares fotovoltaicas, Editorial Marcombo.
Grupo de Energías No-Convencionales (GENOC), Facultad de Ingeniería Química (UNL), Instituto de Física del Litoral (CONICET-UNL). (2015). “Estado de la Red Solarimétrica de la provincia de Santa Fe”, Informe Técnico de Avance.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Priscila Gonçalves Vasconcelos Sampaio, Mario Orestes Aguirre González. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework.
Cepeda, J., Sierra, A. Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones. Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
TECMES. Estación meteorológica Pegasus. https://www.tecmes.com/estacion-pegasus/

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Energía
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Estudio del comportamiento de colectores solares ante la variación de sus parámetros fundamentales

Study of the behavior of solar collectors when their fundamental parameters vary

Presentación 02/10/2024

Nicolas A. Bon

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: nicobon73@gmail.com

Johann M. Schmidt Waigel

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: johannschmidt60@gmail.com

Resumen

El desarrollo productivo y económico del país trae aparejado una necesidad implícita de optimizar el gasto de energía y minimizar el alto impacto que genera en diferentes ámbitos. Los costos del aprovisionamiento de energía y las externalidades, sobre todo ambientales, comenzaron a generar una nueva visión al respecto.
El presente trabajo desarrolla y resume el funcionamiento y evaluación de un sistema solar térmico, analizado mediante un banco de pruebas, utilizado para el calentamiento de agua sanitaria. El mismo, funciona mediante el aprovechamiento de una fuente de energía alternativa, como lo es la energía solar.
Se lograrán obtener parámetros del comportamiento de este en diferentes condiciones, como así también en diferentes épocas del año.

Palabras clave: Gastó de energía; Funcionamiento; Sistema solar térmico; Energía alternativa.

Abstract

The productive and economic development of the country is accompanied by an implicit need to optimize energy expenditure and minimize the high impact it has on various aspects. The costs of energy supply and, especially, environmental externalities have begun to generate a new perspective on this matter.This paper elaborates on and summarizes the operation and evaluation of a thermal solar system, analyzed through a test bench, used for heating domestic water. It operates by harnessing an alternative energy source, namely solar energy.Parameters of its performance will be obtained under different conditions, as well as during different times of the year.

Keywords: Energy expenditure;Operation;Thermal solar system;Alternative energy.

1. Introducción

Actualmente, el gasto energético para calentar agua implica altos costos económicos y ambientales debido a métodos convencionales de generación de energía. Según (**Almanza 2003),** el sol proporciona a la Tierra cuatro mil veces más

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

energías de la que consumimos, por lo que es vital aprovechar esta fuente gratuita, limpia e inagotable. Diversos laboratorios buscan tecnologías para usar eficientemente la energía solar **(Arbane, 2013).**

La matriz energética global se está desplazando hacia fuentes alternativas, apoyada por avances tecnológicos que mejoran la eficiencia. Los sistemas solares térmicos utilizan la energía solar para calentar agua, aplicable en usos domésticos, industriales y climatización.

En Argentina, los colectores solares están en desarrollo, con fabricantes nacionales que presentan limitaciones tecnológicas. Es crucial que como institución y jóvenes investigadores colaboremos con el sector privado para impulsar el desarrollo nacional.

El proyecto tiene como objetivo optimizar equipos de calentamiento solar de agua, proporcionando datos cuantitativos de rendimiento a través de un banco de ensayos, conforme a las normas **IRAM 210004 (2016)**.

La evolución del mercado exige mejoras tecnológicas continuas. Proyectos como este serán fundamentales debido al agotamiento de fuentes de energía convencionales **(Quadri, 2016)**, y es esencial que tomemos un papel activo en la preservación del medio ambiente.

Al finalizar, el trabajo permitirá predecir el rendimiento de los equipos en diversas condiciones meteorológicas y proyectar su desempeño futuro, siendo útil para el diseño y caracterización a largo plazo de instalaciones solares **(Hernández et al., 2007).**

2. Metodología

2.1. Determinación del rendimiento diario

Los ensayos y pruebas a los equipos solares se realizaron por medio de un banco de ensayos. El mismo consiste en una serie de sensores de temperatura y equipos necesarios para la realización de este, se detalla en la **(Figura 1)** un diagrama esquemático del circuito hidráulico como también las referencias de cada símbolo.

Cabe aclarar que actualmente no se cuenta con el funcionamiento del piranómetro como así tampoco del anemómetro, por lo que dichos datos son obtenidos de una estación meteorológica aledaña a la UTN - Facultad Regional Santa Fe (FRSF). **PWS Weather "estación General Paz", (2024).**

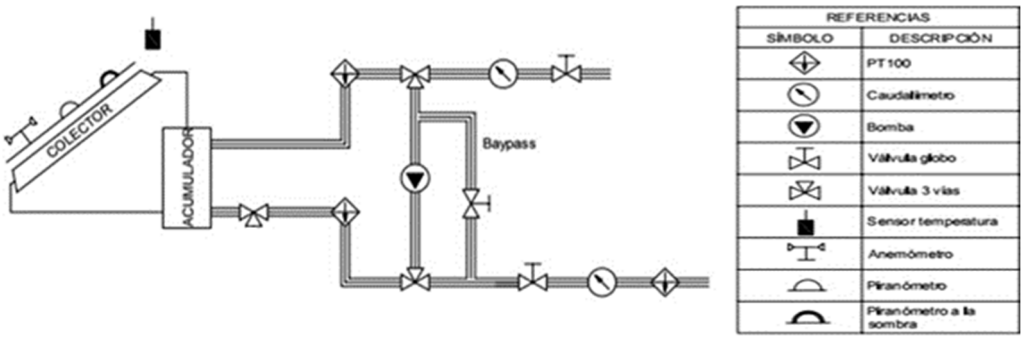


Figura 1. Diagrama esquemático del banco de ensayos y símbolos.

Para la realización de los ensayos el banco presentado anteriormente utiliza un controlador lógico programable o más conocido como PLC, de la empresa Schneider Electric. Se utiliza el modelo TM221CE40R y se le anexa al mismo un módulo de entradas analógicas modelo Modicon TM3-M221.

De esta manera se logra una mayor confiabilidad en los resultados, lo que deriva en la disminución de errores de medición.

El colector solar es del tipo tubos de vacío marca KingShip, cuenta con 30 tubos y un tanque de almacenamiento de 300 litros. El mismo está instalado en el segundo piso de la UTN - FRSF con orientación norte e inclinación de 50°; el cual se utiliza para alimentar una sección de la UTN-FRSF, como así también un dispenser de agua caliente.

El periodo de ensayo dura aproximadamente 12 horas de corrido luego de obtener en el colector la temperatura t(main).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

3. Resultados

El análisis se centra en los resultados del ensayo correspondiente al rendimiento y la energía útil generada por el equipo.

Cabe aclarar que los valores como los resultados obtenidos no son valores absolutos sino una aproximación representativa del comportamiento del colector solar evaluado, (Figura 2).



Figura 2. Colector solar utilizado.

3.1. rendimiento diario

El procedimiento en cuestión tiene como finalidad obtener un valor de rendimiento instantáneo del colector (η), es decir, se busca determinar un coeficiente que luego pueda ser utilizado para predecir el comportamiento de los equipos en diferentes condiciones ambientales. El mismo se obtiene mediante la **(Ecuación 1).**

$$\eta = \eta_0 - a1\left(\frac{tm-ta}{tg}\right) \quad (1)$$

En la siguiente tabla se presentan las unidades de los distintos parámetros, con sus respectivas unidades **(Tabla 1)**.

Tabla 1. Unidades utilizadas y coeficientes de cálculo.

Descripción	Unidades
Coeficiente de rendimiento óptico "$\eta_\circ$ "	0,55
Coeficiente de pérdidas térmicas de 1° grado "a1"	2,1(W/Km²)
Temperatura media del fluido caloportador "tm"	K
Temperatura de ambiente "ta"	K
Irradiancia solar "Ig"	W/m²

En la siguiente tabla se representan los valores obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha **(Tabla 2).**

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 2. Valores obtenidos de cada ensayo para determinar la ecuación (1).

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23	25-03-24
Temperatura media del fluido caloportador “tm"	304,11	302,10	300,05	318,65
Temperatura de ambiente “ta”	292,15	292,15	291,15	304,15
Irradiancia solar (W/m²)	281,58	375,83	406,91	585,07

El valor de la irradiancia solar “Ig” que se muestra en la **(Tabla 2).** Hace referencia al promedio de la radiación solar en un día de ensayo, obteniendo las mediciones de **PWS Weather “estación General Paz”, (2024)** y haciendo un promedio de estas respecto a las doce horas que dura el ensayo según ***IRAM 210004, (2016)***

Mediante la **(Ecuación 1)** y utilizando los datos plasmados en las **(Tabla 1)** y **(Tabla 2)** se calculan los rendimientos diarios para cada día de ensayo. Los mismos están plasmados en la **(Tabla 3).**

Tabla 3. Rendimiento del colector.

Rendimiento Ensayo 12/06/23	η=0,46
Rendimiento Ensayo 22/08/23	η=0,49
Rendimiento Ensayo 25/08/23	η=0,50
Rendimiento Ensayo 25/03/24	η=0,49

3.2. Producción del colector

La potencia útil extraída, se representa con la siguiente ecuación **(Ecuación 2).**

$$\dot{Q} = \dot{m}\, cf\, \Delta T$$
(2)

Se presentan las unidades de los distintos parámetros, con su respectiva referencia **(Tabla 4).**

Tabla 4. Unidades utilizadas calculo potencia útil extraída.

Descripción	Unidades
Potencia útil extraída $\dot{Q}$	MJ/s
Caudal másico del fluido caloportador $\dot{m}$	Kg/s
Poder calorífico fluido caloportador *cf*	J/KgK

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Delta de temperaturas ΔT (Salida/ingreso colector)	K

A continuación, se procede a calcular cada término de la **(ecuación 2).**

El caudal másico del fluido caloportador, se representa con la siguiente ecuación **(Ecuación 3).**

$$\dot{Q} = \frac{L\,\varphi}{s\,\varphi'}$$

(3)

En la siguiente tabla, se presentan las unidades de los distintos parámetros, con su respectiva referencia **(Tabla 5).**

Tabla 5. Unidades utilizadas cálculo caudal másico.

Descripción	Unidades
Litros de fluido caloportador "L"	L
Duración del ensayo "s"	s
Densidad del fluido caloportador a temperatura ambiente "φ"	Kg/m^3
Densidad del fluido caloportador a temperatura media "φ'"	Kg/m^3

Se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha **(Tabla 6)**.

Tabla 6. Valores utilizados calculo caudal másico.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23	25-03-24
Litros de fluido caloportador (L)	965	909	900	893
Duración del ensayo (s)	4200	5100	4260	4920
Densidad del fluido caloportador a temperatura ambiente "φ" (Kg/m^3)	1000	1000	1000	1000
Densidad del fluido caloportador a temperatura media "φ'" (Kg/m^3)	996	996	996	990

En la siguiente tabla se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha, **(Tabla 7).**

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 7. Valores utilizados calculo potencia útil extraída.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23	25-03-24
Caudal másico del fluido caloportador “ m ” (Kg/s)	0,22	0,18	0,21	0,18
Poder calorífico fluido caloportador “Cf” (J/KgK)	4178	4179	4179	4178
Delta de temperaturas “ΔT” (Salida/ingreso colector) (K)	23	19	17	32

Mediante la **(ecuación 3)** y utilizando los datos plasmados en la **(Tabla 7),** calculamos la producción del colector para cada día de ensayo **(Tabla 8)**.

Tabla 8. Resultados cálculo de potencia extraída.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23	25-03-24
Potencia útil extraída "Q " (MJ/s)	0,022	0,014	0,015	0,024

Mediante la **(Ecuación 4)** se calcula la irradiancia sobre el plano del colector.

$$Irradiancia\ en\ el\ plano\ del\ colector\ \left(\frac{MJ}{m^2}\right) = I = Ig * \Delta T \quad (4)$$

En la **(Tabla 10).** se presentan las unidades de los distintos parámetros, con su respectiva referencia.

Tabla 10. Unidades utilizadas cálculo de irradiancia plano del colector.

Descripción	Unidades
Irradiancia solar “Ig”	(W/m²)
Delta de tiempo en las doce horas solares “ΔT”	s

Se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha **(Tabla 11)**.

Tabla 11. Valores para cálculo de irradiancia en el plano del colector.

Fecha Ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23	25-03-24
Irradiancia solar “Ig” (W/m²)	281,58	375,83	406,91	585,07

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Delta de tiempo en las doce horas solares “ΔT” (s)	43200	43200	43200	43200

Mediante la **(ecuación 4)** y utilizando los datos de la **(Tabla 11)**. se obtiene la Irradiancia en el plano del colector **(Tabla 12).**

Tabla 12. Resultados cálculo de Irradiancia en el plano del colector.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23	25-03-24
Irradiancia en el plano del colector (MJ/m²)	12,16	16,23	17,58	25,26

4. Conclusiones

En este informe detallamos el rendimiento de un equipo solar térmico de tubos de vacío, calculando parámetros clave según la norma **IRAM 210004 (2016).** La eficiencia del equipo depende de la inclinación, temperatura ambiente, radiación solar, velocidad del viento y caudal de circulación. Utilizando los datos de las **(Tablas 1 y 2)**, calculamos los rendimientos del colector en la **(Tabla 3)**, observando que el 12-06 el rendimiento disminuyó por la menor irradiancia solar.

La energía útil almacenada, determinada por la **(ecuación 2)**, refleja la cantidad de energía térmica generada para un valor específico de radiación solar. Aunque el 12-06 mostró una potencia extraída mayor **(Tabla 8)**, esto se atribuye a la inercia térmica del depósito, ya que lógicamente debería ser menor, debido a la baja irradiancia solar.

Concluimos que el rendimiento de un equipo depende de varios factores y seguiremos analizando diferentes colectores solares para entender mejor su comportamiento ante cambios climáticos. El objetivo es mejorar técnicamente estos dispositivos y su instalación para maximizar su rendimiento y eficiencia.

Como jóvenes investigadores, estamos comprometidos con esta problemática, ya que la implementación de estos equipos en hogares puede reducir significativamente el uso de energías no renovables.

5. Agradecimientos

Agradecimiento al Grupo de Estudio Sobre Energía de UTN - FRSF por brindar un hogar de estudio y capacitación, y al equipo de trabajo por transmitir conocimientos y experiencias adquiridas. De manera especial agradecer al Ing. D´ Andrea Adrián y al Ing. Pacheco Gustavo, por el apoyo total en el desempeño diario de nuestras actividades.

6. Referencias

Quadri, N. (2016). Energía solar (6ª edición). Editorial Alsina.
Almanza S., Muñoz F. (2003). Ingeniería de la energía solar (2ª edición). México.
Hernández, J., Willson, H., Ten, A., Duharte, G., Rodriguez, J. (2007). Métodos de ensayos del comportamiento térmico del colector solar integral "COMPACSOL". Revista tecnología química, Vol. XXVII, No.
PWS Weather. (2024). Estación General Paz. Recuperado de https://www.pwsweather.com/station/pws/ESTGRALPAZ?timespan=day&date=2023-08-22.
IRAM 210004. (2016). Energía solar. Sistemas de calentamiento de agua sanitaria. Método de ensayo exterior para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares. Parte 7.6 - 8.2 - 8.3.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

IRAM 210002-1. (2016). Energía solar. Colectores solares térmicos. Parte 1 - Métodos de ensayo para determinar el rendimiento térmico de los colectores solares con cubierta para el calentamiento de líquidos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Energía
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en baterías en generación solar fotovoltaica

Battery Energy Storage Systems in solar photovoltaic power generation

Presentación 18/10/2024

Cindy Touma

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES), Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: toumacindy@gmail.com

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo investigar los beneficios de integrar sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) con la generación solar fotovoltaica. La metodología utilizada incluye una revisión bibliográfica de aplicaciones actuales de BESS y estudios de casos reales, donde se observan mejoras significativas en la regulación de frecuencia, tensión, y nivelación de carga en redes eléctricas. Los resultados destacan el impacto positivo de los BESS en la optimización del uso de la energía generada y la mitigación de problemas en redes con alta penetración de energía renovable.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica; Sistemas de almacenamiento en baterías; Energía eléctrica; Generación; Transición energética

Abstract

The aim of this study is to investigate the benefits of integrating battery energy storage systems (BESS) with solar photovoltaic generation. The methodology includes a literature review of current BESS applications and real case studies, where significant improvements in frequency regulation, voltage control, and load leveling in power grids are observed. The results highlight the positive impact of BESS in optimizing energy usage and mitigating issues in grids with high penetration of renewable energy.

Keywords: Photovoltaic solar energy; Battery energy storage system; Electrical energy; Generation; Energy transition

1. Introducción

La generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, como la energía solar fotovoltaica, ha crecido de manera notable en las últimas décadas, impulsada por la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. No obstante, la naturaleza intermitente y variable de estas fuentes renovables presenta desafíos significativos para la estabilidad y seguridad de las redes eléctricas.

La variabilidad del recurso solar, influenciada por factores climáticos y la desalineación entre los picos de generación y los de demanda, puede afectar la estabilidad de la red eléctrica mediante fluctuaciones de tensión y frecuencia. Este último es un parámetro crítico para mantener el equilibrio de la red y asegurar un funcionamiento seguro y eficiente. Además, la infraestructura eléctrica existente a menudo no está diseñada para gestionar la incorporación masiva de energía generada de manera distribuida, lo que puede provocar sobrecargas en la red durante períodos de alta generación y baja demanda.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en la integración de sistemas fotovoltaicos junto con sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS, por sus siglas en inglés) siendo esta ultima una solución prometedora para

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

mitigar estos desafíos. Se detallarán las partes de ambos sistemas, sus aplicaciones y las formas de integración, así como los casos reales que se presentan al instalar grandes potencias de energía solar fotovoltaica a sistema interconectado y cómo los BESS pueden resolver o reducir estos problemas presentes en la red.

2. Metodología

Se describirá a continuación las partes implicadas en este desarrollo, tales como los sistemas fotovoltaicos y BESS, detallando de este último las partes principales que lo componen, como así también las aplicaciones para las que se lo utiliza y las maneras en que se integran ambos sistemas. Además, se presentarán casos reales en donde la masiva inserción de generación fotovoltaica a la red ha producido ciertos inconvenientes en el sistema de distribución, y se determinarán las soluciones que provee la utilización de BESS en coordinación con sistemas fotovoltaicos a red en estos aspectos.

2.1 Sistema fotovoltaico (FV)

A lo largo de la historia se ha aprovechado el recurso solar como una fuente de energía, en un principio, por ejemplo, concentrando los rayos solares para generar fuego o calentar agua. Pero luego, a partir de la revolución industrial han surgido experimentos relacionados a la conversión de la energía solar en energía eléctrica. Llegando así a mediados del siglo pasado, en donde se crea la primera célula solar de silicio, que dio comienzo a las tecnologías fotovoltaicas modernas. Desde entonces, se ha avanzado mejorando la eficiencia de estos sistemas y reduciendo sus costos, lo que permitió su adopción en gran escala, teniendo al sol como fuente renovable considerado inagotable, limpio y de libre utilización.

En cuanto a su funcionamiento (Luque, A., Hegedus, S., 2003), dentro del sistema fotovoltaico cada módulo solar se encuentra compuesto a su vez de celdas del semiconductor silicio cristalino, conectadas en serie y paralelo, mediante las que la energía solar (en particular, los fotones) actúa permitiendo el movimiento de los electrones, generando así una corriente continua, que luego es convertida a corriente alterna a través de un inversor para su utilización.

A pesar de que es una gran forma de aprovechar un recurso renovable y libre, tiene sus inconvenientes en la integración a las redes de distribución. En primer lugar, la generación de energía eléctrica depende de forma directa de la irradiación solar (Rosés, R. et al., 2017), que puede cambiar rápidamente debido a condiciones meteorológicas como las nubes. Esto puede causar desbalances de frecuencia en la red, desviándola de los 50Hz de operación, que debe ser contrarrestado por los operadores para mantener la estabilidad del sistema de distribución.

Otro problema surge debido a la inyección de energía durante horas pico de generación solar, como ocurre los días soleados al mediodía cuando la demanda eléctrica es relativamente baja. En estos casos, los operadores de la red pueden verse obligados a reducir la generación solar o desconectar estas fuentes de energía renovable para evitar la sobrecarga y la sobretensión en la red de distribución, desperdiciando una cantidad significativa de energía generada.

2.2. Inconvenientes en casos reales de integración de gran cantidad de sistemas de generación fotovoltaicos en la red del sistema interconectado.

La integración de gran cantidad de sistemas de generación fotovoltaicos ha generado inconvenientes en algunas redes eléctricas:

- Alemania (Wirth, H., 2024) es uno de los países líderes en la adopción de energía solar fotovoltaica, pero está teniendo problemas en la estabilidad de la red por la gran integración de sistemas FV. En los momentos en que la demanda es baja y la generación es mayor, se han experimentado fluctuaciones de tensión en la red, superando los límites aceptables y provocando problemas en los equipos eléctricos.
- En China (Liu, S. et al., 2018), ha aumentado rápidamente la capacidad instalada en energía solar, generando problemas de reducción forzada de generación (“curtailment”), especialmente en la región noroeste del país donde hay menor densidad poblacional, y las redes eléctricas no poseen la capacidad necesaria para la cantidad de generación actual.
- En California, se instalaron a lo largo de los últimos años gran cantidad de sistemas fotovoltaicos de generación distribuida conectados a red, sin baterías. La instalación de paneles solares en los techos de las casas aumentó más del doble en tan solo 5 años, desde 2019 a la actualidad. Esto está produciendo que la curva de carga de la red, teniendo en cuenta la generación renovable, caiga a valores muy cercanos a cero o, como muestra la siguiente Figura 1 (Osaka, S., 2024), a valores negativos durante los horarios del mediodía.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

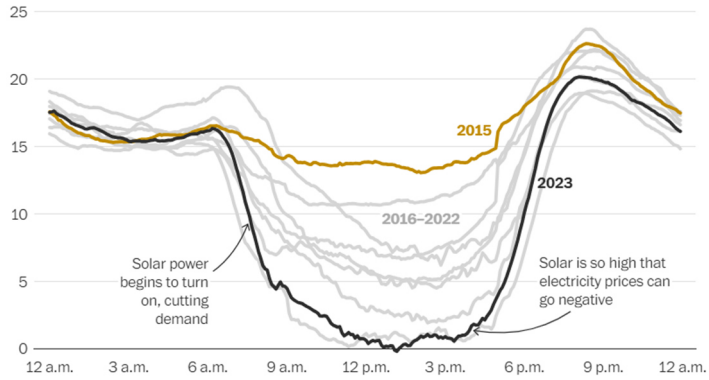


Figura 1. Carga de la red (demanda menos generación solar y eólica) en giga watts, en el Estado de California, el día de primavera (entre marzo y mayo) de menor carga de cada año.

Esto no solo es un problema porque se deben desconectar algunos sistemas fotovoltaicos para reducir la carga de la red, sino que también el precio de la energía cae significativamente en esos horarios, llegando a tener valores cercanos a cero dólares por kWh.

2.3. Sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS)

Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en baterías permiten almacenar la energía eléctrica para ser utilizada posteriormente en distintas aplicaciones, obteniendo un mayor aprovechamiento del recurso del que proviene la energía. Se encuentran compuestos por baterías, conversor de corriente continua a corriente alterna, sistema de gestión de baterías (BMS, Battery Management System), controlador, sistema de protección y sistema de gestión de temperatura.

2.3.1. Baterías

En la actualidad, han penetrado ampliamente en el mercado mundial las baterías de iones de litio, convirtiéndose en una tecnología dominante en el almacenamiento de la energía eléctrica.

Una batería de iones de litio (Li-ion) es un tipo de acumulador recargable compuesto por celdas que contienen dos electrodos (ánodo y cátodo), un electrolito y un separador que evita el contacto directo del ánodo con el cátodo.

Esta clase de baterías posee grandes ventajas que hicieron que se propague su uso (Hatziargyriou, N. et al., 2024):

- Gran eficiencia y densidad energética: es la medida que indica la cantidad de energía que puede almacenar una batería en relación con su masa.
- Amplio rango de temperatura de operación
- Largo ciclo de vida
- Bajo mantenimiento
- Tiempo de carga cortos

Sin embargo, entre las desventajas se encuentra la necesidad de refrigeración y controles de seguridad por degradación en temperaturas elevadas, y de gestión activa del estado de carga, además de la imposibilidad de carga rápida en temperaturas bajo cero.

Cada batería comercial se compone por un conjunto estas celdas, que a su vez se comercializan en módulos (conjuntos de baterías, con su respectivo sistema de protección y control), y en sistemas o “racks” de baterías (conjunto de módulos integrados en una misma infraestructura).

2.3.2. Sistema de gestión de baterías (BMS)

Un sistema de gestión de baterías se encuentra compuesto por un hardware, un software y sensores que controlan los niveles de carga y descarga, los valores de tensión y corriente, y la temperatura de cada celda. De esta forma, se encarga de gestionar el estado de las baterías, mantener el equilibrio en las celdas, y brindar protección en caso de sobrecargas, descargas profundas y aumento de la temperatura. Este tipo de sistema de gestión tiene gran importancia en los BESS permite optimizar la capacidad de almacenamiento, mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de estos acumuladores.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

2.3.3. Sistema conversor de potencia (PCS)

El sistema conversor de potencia se encarga de transformar la potencia eléctrica de una forma a otra, como en estos casos que, de acuerdo al tipo de conexión, convierten la corriente continua de las baterías en alterna, o en otra corriente continua con mayor tensión para permitir la conexión en la línea de continua de los sistemas fotovoltaicos. Tiene como objetivo optimizar el flujo de energía entre la fuente de generación, las baterías y la red eléctrica. Pueden ser tanto unidireccionales, como bidireccionales, de acuerdo con sus aplicaciones y forma de conexión con los BESS y sistemas fotovoltaicos. Además, son los actores principales en la inyección y sustracción de la potencia activa y reactiva de la red, ya que ajustan dichos parámetros de acuerdo con la regulación de tensión de red que aplica el sistema.

2.4. Aplicaciones de los BESS

Entre las principales aplicaciones de los BESS (Rodríguez, D. et al., 2015), se encuentran:

- Regulación de frecuencia: La frecuencia es el parámetro clave para la estabilidad de las redes eléctricas. Grandes desviaciones de la frecuencia nominal del sistema producen cambios en el funcionamiento de los equipos, afectando su rendimiento y velocidad, niveles de tensión inestables y hasta daños los equipos. La utilización de BESS implica la carga y descarga de potencia activa para regular esta frecuencia, almacenando energía en las baterías en momento de sobre frecuencia (generación>demanda), y descargando e inyectando a la red cuando hay sub-frecuencia.
- Regulación de tensión: Las variaciones de tensión pueden causar problemas significativos tanto en la infraestructura de la red como en los equipos conectados a ella, provocando daños en equipos, reduciendo su vida útil o generando un rendimiento ineficiente y fallas en los dispositivos. De esta forma, los BESS pueden regular la tensión de la red, inyectando o sustrayendo potencia activa y reactiva de acuerdo con los requerimientos del sistema de distribución y de la generación a la que se encuentren asociados.
- Nivelación de carga o distribución de la energía: En los momentos en que la generación supera a la demanda, el precio por energía generada cae. Entonces, los acumuladores se cargan en los horarios en que la energía es más barata, y se descargan en aquellos que su precio es mayor, produciendo un desplazamiento de la energía, aplanando la curva de carga y permitiendo un ahorro económico.
- Reducción de los picos de demanda de potencia en redes de distribución para no sobrepasar la potencia contratada, o “peak shaving”: En este caso, las baterías se cargan en los periodos de mayor generación y menor demanda, y se descargan en los picos en que la demanda supera el valor de potencia contratado por la distribuidora de energía. Así, se genera una curva de demanda de energía más plana, reduciendo la carga de la red de distribución y aumentando su eficiencia.
- Recuperación de la energía perdida debido al corte en la relación de corriente continua y alterna del inversor (“clipping recovery”): Durante períodos de alta generación, cuando la producción de energía supera la capacidad máxima de los inversores, el exceso de energía se "recorta" o se desperdicia. La implementación de BESS permitiría almacenar esa energía desperdiciada, enviándola hacia las baterías para su posterior utilización.
- Recuperación de la energía reducida por la red eléctrica debido a limitaciones de capacidad: Muchas veces, las redes de distribución existentes no están preparadas para transportar más energía que la actual por límites físicos de conductores o transformadores. Entonces, solamente se inyecta a la red la energía que soporta el sistema de distribución, desperdiciando parte de la potencia generada. Al utilizar BESS, esa energía desperdiciada se aprovecharía almacenándola en las baterías y descargándola en los momentos en que la generación es baja.

2.5. Formas de conexión de BESS + FV

Existen dos configuraciones comunes para la integración de acumuladores de energía en sistemas solares fotovoltaicas, de acuerdo con su punto de interconexión (Hatziargyriou et al., 2024):

- Del lado de corriente continua (DC) de los inversores. Puede ser mono direccional o bidireccional, basado en el inversor utilizado. De esto dependerá si las baterías pueden ser cargadas utilizando solamente la energía producida por el conjunto fotovoltaico o también por energía de la red.
- Del lado de corriente alterna (AC) de los inversores. El punto de interconexión puede encontrarse del lado de baja tensión del transformador, así como también del lado de alta tensión. Las baterías pueden ser cargadas tanto por el sistema fotovoltaico como por la red.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

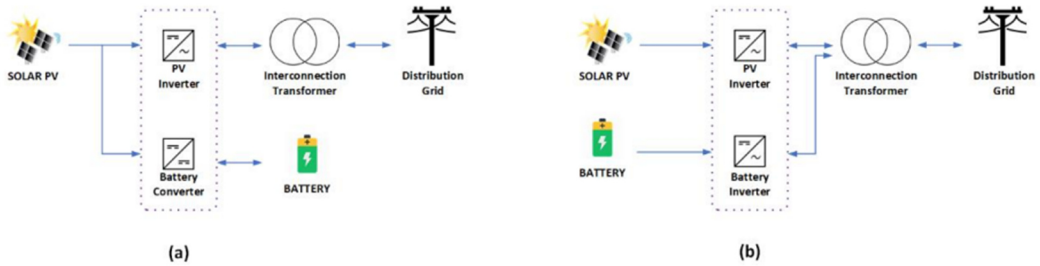


Figura 2. Conexiones típicas de sistemas de generación solar fotovoltaicos en conjunto con acumuladores. (a) Conexión en corriente continua. (b) Conexión en corriente alterna.

La Figura 2 (a) muestra una configuración genérica del acoplamiento en corriente continua. Esta conexión puede tener variaciones, como colocar un conversor DC-DC entre el inversor y ambos sistemas, en vez de uno o el otro. En el modelo bidireccional, las baterías pueden cargarse tanto por la energía producida por el sistema fotovoltaico, como así también por energía brindada por la red. En cambio, en el modelo monodireccional las baterías solo toman energía del sistema fotovoltaico.

El tipo de conexión para una instalación puede variar de acuerdo a la distancia entre los paneles solares y las baterías, ya que a grandes distancias se incrementa mucho más el costo de instalación, principalmente en corriente continua, donde los conductores y elementos del sistema eléctrico, como el inversor o las protecciones, son dimensionados para grandes valores de corriente continua (BESS+FV). Por el otro lado, en corriente alterna es posible utilizar inversores más pequeños y menos costosos, pero en mayor cantidad, aprovechando así una segmentación del sistema que permite, en caso de falla en un conjunto, aislar ese único lazo, continuando con la operación normal del resto del sistema. No obstante, una gran ventaja de la conexión en corriente continua es la recuperación de la energía recortada por las limitaciones del inversor (clipping recovery), que se perdería en la conexión AC.

3. Resultados

La integración de BESS en conjunto con sistemas fotovoltaicos trae ciertos beneficios a la inserción de generación solar a la red, mitigando ciertos problemas comunes que se tiene sin este tipo de sistemas de almacenamiento, gestión y control de la energía:

- Las fuentes renovables de energía, como la solar, utiliza un recurso con gran variabilidad de acuerdo con condiciones meteorológicas aleatorias, tal como la presencia de nubes bajas y densas que disminuyen considerablemente la irradiación que incide sobre los paneles solares. Estos cambios se dan de manera repentina en pequeños periodos de tiempo, causando una señal muy variable en la potencia inyectada a la red. Estas fluctuaciones afectan directamente a la frecuencia del sistema de distribución, llevándola a niveles límites de operación y desbalanceando la red. La implementación de BESS en estos casos ayuda a mantener la frecuencia de la red dentro de los límites permitidos, inyectando (actuando como generador) o tomando (actuando como carga) potencia activa de la red, asegurando la estabilidad del sistema de distribución. Un ejemplo es el de Hornsdale Power Reserve, que con una capacidad instalada de 100MW y 129MWh en BESS (almacenando energía de fuente eólica), en 2017 fue de gran utilidad para mantener la frecuencia de la red ante una falla de un gran generador
- Estas variaciones propias del recurso también influyen directamente en la tensión de salida del sistema, produciendo grandes fluctuaciones en pocos segundos, comprometiendo la estabilidad y seguridad de la red, y disminuyendo la calidad de la energía inyectada. Los sistemas FV generan potencia activa durante las horas de sol, mientras que los BESS pueden almacenar el exceso de energía generada y liberarla cuando la generación solar disminuye. Además, los BESS, en particular los PCS, gestionan la inyección u absorción potencia reactiva para estabilizar la tensión en tiempo real.
- Por otro lado, los días soleados no se tiene este problema con respecto a las variaciones en irradiación, pero en horarios del mediodía se genera gran cantidad de energía que no se corresponde con la demanda, disminuyendo su precio en esas horas, alcanzando como en el caso de California valores cercanos o iguales a cero. De esta forma, aplicando la distribución de la energía (“peak shaving”, o también “energy shifting”) mediante BESS, almacenando la energía generada cuando su valor en mínimo y despachándola cuando aumenta su precio, se resolvería este

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

problema en los mercados eléctricos con precios variables. California, teniendo en cuenta esta forma de solucionar su dilema, busca aumentar su capacidad instalada de BESS (California Energy Comission, 2024), partiendo del actual valor de 10383MW a 52000MW en 2045.

- Otro problema respecto a la cantidad de energía generada corresponde a las limitaciones de las líneas de distribución y los transformadores del sistema, que mediante la aplicación de BESS esa energía generada que no se puede introducir a la red se almacena en las baterías, evitando la sobrecarga de los equipos y conductores del sistema de distribución.

4. Conclusiones

La integración de sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) con la generación solar fotovoltaica ofrece una solución efectiva para superar los desafíos inherentes a la variabilidad y la intermitencia de las fuentes de energía renovable. Los BESS permiten tanto la regulación de la frecuencia y la tensión en la red, como así la optimización del uso de la energía generada, al almacenar el exceso de producción en momentos de baja demanda y liberarla cuando la demanda aumenta. Esto resulta en una mayor estabilidad y eficiencia en las redes de distribución, promoviendo una mayor penetración de energías renovables en la matriz energética. En resumen, la combinación de estas tecnologías no solo responde a las necesidades actuales del sistema eléctrico, sino que además prepara el terreno para una integración más amplia de las energías limpias en el futuro.

Agradecimientos

Se agradece la ayuda en la redacción del trabajo y en la búsqueda de información a Juan Salerno, Maximiliano Oliva, Ignacio Arraña, Pablo Rullo, y demás integrantes del OES.

Referencias bibliográficas

Luque, A., Hegedus, S. (2003). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Rodríguez, D., Gómez, R., Campos, A. (2015). Sistemas de gestión de baterías (BMS) y su importancia para los sistemas de almacenamiento de baterías (BESS). Tecnura, 19, 51-56.

Hatziargyriou, N. et al. (2024). Aggregation of Battery Energy Storage and Distributed Energy Resources. Cigre, 932.

Skeath, J. P. et al. (2021). The new kid in the block. IEEE Electrification Magazine, 10.1109/MELE.2021.3115540.

Chalamala, B. et al. (2021). Grid-Scale Energy Storage Systems. IEEE Electrification Magazine, 10.1109/MELE.2021.3115541.

Fitzgerald G., Mandel, J., Morris, J., Touati, H. (2015). The Economics of Battery Energy Storage: How multi-use, customer-sited batteries deliver the most services and value to customers and the grid. Boulder: Rocky Mountain Institute.

Rosés, R., Giménez, M., Balmaceda, M., Pontoriero, D. (2017). Límite de generación fotovoltaica en sistemas eléctricos. ASADES, 21, 08.11-08.22.

Werner, E. (2022). Web: https://www.washingtonpost.com/us-policy/2022/09/21/california-is-awash-renewable-energy-except-when-its-most-needed/

Osaka, S. (2024). Web: https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2024/04/22/california-solar-duck-curve-rooftop/

Wirth, H. (2024). Recent Facts about Photovoltaics in Germany. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.

Liu, S., Bie, Z., Lin, J., Wang, X. (2018). Curtailment of Renewable Energy in Northwest China and Market-Based Solutions. Energy Policy, 123, 494-502.

NREL (2019). Web: https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74426.pdf

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

California Energy Comission (2024). Web: https://www.energy.ca.gov/data-reports/energy-almanac/california-electricity-data/california-energy-storage-system-survey

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Energía
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Comportamiento de la demanda eléctrica en el sector residencial de Santa Fe

Behavior of electrical demand in the residential sector of Santa Fe

Presentación 18/10/2024

Kevin T. Basilio

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: kbasilio@frsf.utn.edu.ar

Roberto J. Nagel

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: rnagel@frsf.utn.edu.ar

Resumen

El sector residencial representa un porcentaje significativo de la demanda eléctrica de la provincia de Santa Fe. En este contexto, caracterizar los perfiles de cargas típicos de los usuarios de este segmento es de gran interés para estudiar cuestiones asociadas a eficiencia energética, calidad de energía y gestión de la demanda. El actual estudio logra caracterizar perfiles de demanda de consumidores residenciales en la provincia, distinguir las componentes de sus consumos y considerar las características de su impacto en la red de distribución eléctrica.
Para lograrlo se recurrió al análisis de mediciones históricas en distribuidores provistas por la Empresa Provincial de la Energía (eléctrica) y se comprobaron puntualmente perfiles residenciales en usuarios de la ciudad por medio de analizadores de redes eléctricas. Asimismo, cada medición se ha correlacionado a sus respectivos registros de temperatura ambiente. Para la representación de resultados y evaluación de datos se usó Python y Power BI.

Palabras clave: consumo residencial, perfiles de potencia, demanda estacional, calidad de energía.

Abstract

The residential sector represents a significant percentage of the electricity demand in the province of Santa Fe. In this context, characterizing the typical load profiles of users in this segment is of great interest to study issues associated with energy efficiency, energy quality and demand management. This study characterizes the demand profiles of residential users in the province, distinguishes the components of their consumption and considers the characteristics of their impact on the electricity distribution network. To achieve this, historical measurements in distributors provided by the Provincial Energy Company (electricity company) were analyzed and residential profiles in users of the city were checked punctually using electrical network analyzers. Likewise, each measurement has been correlated with its respective ambient temperature records. Python and Power BI are used to represent results and evaluate data.

Keywords: residential consumption, power profiles, seasonal demand, energy quality.

1. Introducción

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El sector residencial representa el 46% de la demanda eléctrica de la República Argentina (CAMMESA, 2024), y se estiman valores similares para la provincia de Santa Fe. Este sector es, por tanto, una fuente importante de emisión de CO2 y un gran contribuidor a perturbaciones cuando presenta una baja calidad de energía eléctrica (Dehghanpour, et al., 2016). En este contexto, resulta relevante caracterizar la demanda de estos usuarios, considerando no solo la forma del perfil de demanda diario sino también el grado de perturbaciones inyectadas a la red (principalmente polución armónica).

Cabe destacar que en trabajos anteriores ya se ha demostrado como algunas cargas electrónicas de potencia utilizadas en domicilios consumen energía con valores de distorsión armónica total (THD) de corriente (THDI) notablemente elevados (K. Basilio, 2023), lo que suele traducirse en perfiles consumo de usuarios con alta THDI, en general.

Visto esto, y ya que la capacidad de ejecutar medidas de mejora en cuestiones de eficiencia energética y calidad de energía requiere de mediciones experimentales (Meyer, et al., 2017), se han realizado por cuenta propia caracterizaciones de perfiles en acometidas de clientes residenciales de la provincia de Santa Fe, y se ha trabajado con los registros de corriente en distribuidores de la ciudad que abastecen demandas residenciales. Estos últimos, proporcionados por la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe (EPESF).

Este articulo busca aportar parte del sustento necesario para expandir el estudio a técnicas de gestión de la demanda, mitigación de armónicos y eficiencia energética, que puedan mantener la calidad de energía dentro de valores normados en toda la Argentina, tal como se ha comenzado a realizar en otros países (Iqbal, et al., 2018). Sin embargo, en este estudio solo nos limitaremos a realizar un diagnóstico del estado actual del consumo energético.

2. Metodología

En cuanto a los datos recopilados en distribuidores, se consideraron registros en 81 distribuidores de 13,2 kV. Cabe destacar que, en este caso, cada uno de los registros en subestaciones guarda solo valores de corriente y energía, junto con información detallada sobre la cantidad de usuarios residenciales, industriales y comerciales presentes en cada distribuidor. Los registros son anuales y con cadencias de 30 minutos. Estos registros se complementaron con datos de temperatura ambiente para sus respectivos periodos de tiempo.

De estos datos, se trabajó exclusivamente con aquellos que abastecen a un alto porcentaje de usuarios residenciales. Para ello, se conservó únicamente aquellos distribuidores cuyo consumo residencial representa el 87% o más del consumo total. Los 14 distribuidores finalmente considerados para la determinación de los perfiles de carga se muestran en la Tabla 1.

En cuanto a las mediciones individuales, éstas se realizaron en acometidas de clientes residenciales de la ciudad de Santa Fe con equipos disponibles en el Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) de la Facultad Regional Santa Fe. En este caso en particular se empleó un analizador marca Metrel, modelo 2892 (clase A según IEC 61000-4-30). Si bien se informan solo alguna de las variables medidas, se registraron todas las variables eléctricas asociadas al consumo.

Tabla 1 - Energía anual por distribuidor.

ET	DISTRIBUIDOR	CANT. CLIENTES	COMERCIAL [kWh]	RESIDENCIAL [kWh]	INDUSTRIAL [kWh]	RES/TOTAL
BPA	AYACUCHO	1,689	235,368	6,527,790	10,452	96.37%
BPA	NAMUNCURA	749	103,020	2,922,594	9,924	96.28%
CAL	ALTO VERDE	1,935	423,384	7,579,800	1,554	94.69%
SFO	AGUADO	2,088	399,156	7,274,952	14,754	94.62%
SFN	QUIROGA	748	152,946	2,771,352	9,456	94.46%
SFN	CIBILS	1,051	131,460	3,333,090	76,038	94.14%
SFN	TERNA NORTE	1,141	203,268	3,791,226	46,758	93.81%
SFO	CHALET	2,117	509,190	7,206,606	45,084	92.86%
SFN	GADA	2,153	400,860	6,832,788	193,992	91.99%
BPA	MERC, ABASTO	2,548	537,474	10,532,934	541,266	90.71%
SFN	AZCUENAGA	1,314	423,990	3,730,506	32,028	89.11%
SFN	NORESTE	3,005	1,163,034	9,301,548	102,294	88.03%
SFO	ALIMENT. 2	1,329	462,600	3,125,766	0	87.11%
BPA	ROSAS	1,425	515,352	4,554,906	159,858	87.09%

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las características de las mediciones realizadas a los 7 usuarios residenciales de la ciudad. Los mismos están geográficamente distanciados uno de otros. Notar que se consideraron hogares con distintas características en cuanto a ocupación, tipo de vivienda y superficie cubierta.

Tabla 2 - Detalles de las mediciones en cada usuario

	USUARIO 1	USUARIO 2	USUARIO 3	USUARIO 4	USUARIO 5	USUARIO 6	USUARIO 7
Duración	9.3 días	7.5 días	9.4 días	9.0 días	9.1 días	10.7 días	10.6 días
Muestras	13356	10741	13523	12984	1311	15359	15240
Cadencia	60.0 seg	60.0 seg	60.0 seg	60.0 seg	10.0 min	60.0 seg	60.0 seg
Ocupantes adultos	2	3	4	2	2	2	2
Ocupantes menores	0	1	1	0	1	2	3
Tipo de vivienda	Casa	Dep.	Casa	Dep.	Dep.	Casa	Casa
Sup. cubierta [m2]	80	50	110	50	76	250	200

Para la representación y evaluación de resultados se usó Python y Power BI. El tratamiento de los datos requirió una depuración previa de los datos que se hizo también con estas herramientas.

3. Resultados

3.1 Caracterización de perfiles de distribuidores

En la Fig. 1 se muestran los perfiles de carga típicos obtenidos para todos los meses del año, expresados en proporción al consumo máximo registrado. Los resultados que se presentan en esta instancia son equivalentes a evaluar el promedio del aporte de todos los distribuidores. Puede notarse que el mes de mayor consumo en verano suele ser diciembre y en invierno, junio.

En un análisis más detallado se ha podido advertir que para los meses invernales se produce un pico de consumo de energía matutino entre las 7 a.m. y las 11 a.m., un valle durante el día y un pico nocturno (donde se produce el consumo máximo diario). En los perfiles obtenidos para meses de verano se observa un valle en la madrugada, un pico en horas de la tarde (donde se produce el consumo máximo diario) y un pico nocturno. Los picos de consumo se adjudican sobre todo al uso de equipos de calefacción o refrigeración de ambientes en los respectivos horarios de mayor consumo.

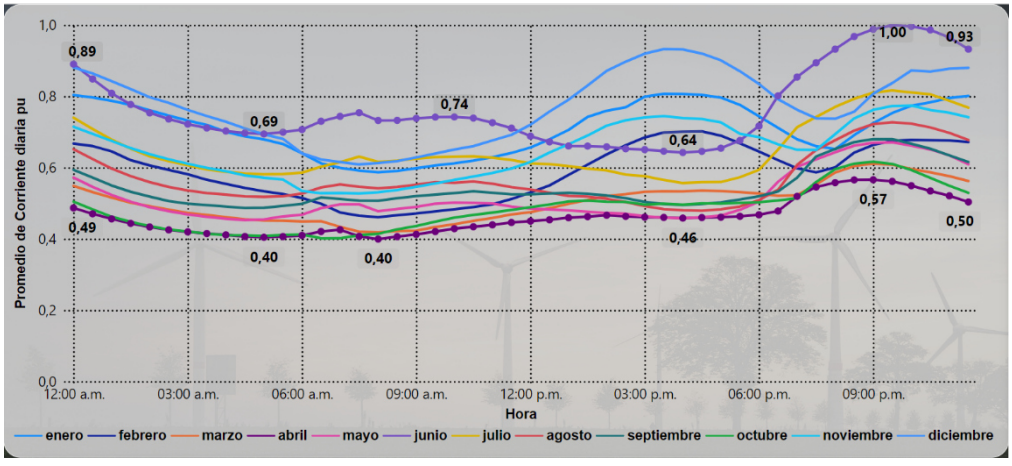


Fig. 1 - Perfiles diarios promedios obtenidos para todos los meses del año.

Los perfiles de carga también se han tipificado según el día de la semana. En la Fig. 2 se muestran perfiles semanales típicos para meses de verano y en la Fig. 3 para los meses de invierno. Se observa que los consumos de los días hábiles no son significativamente distintos a los de los días semi-hábiles y no hábiles. Esta característica es distintiva del consumo residencial, pues, tanto en días laborables como no laborables los consumos se tienen a mantener, no así, en comercios e industrias.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Además, es sabido que la temperatura ambiente está fuertemente correlacionada con el consumo de energía eléctrica. Si contrastamos perfiles de consumo promedios, notaremos que, por ejemplo, en invierno, el consumo baja cuando sube la temperatura y sube, al bajar esta. Y en verano sucede lo contrario, ya que, a mayor temperatura mayor consumo y viceversa.

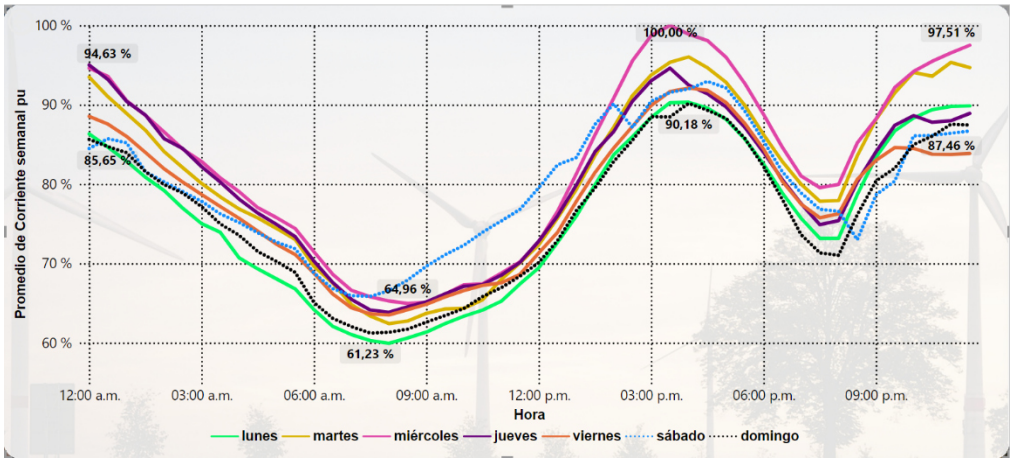


Fig. 2 - Perfil diario típico para días de la semana en meses de verano (diciembre-enero-febrero).

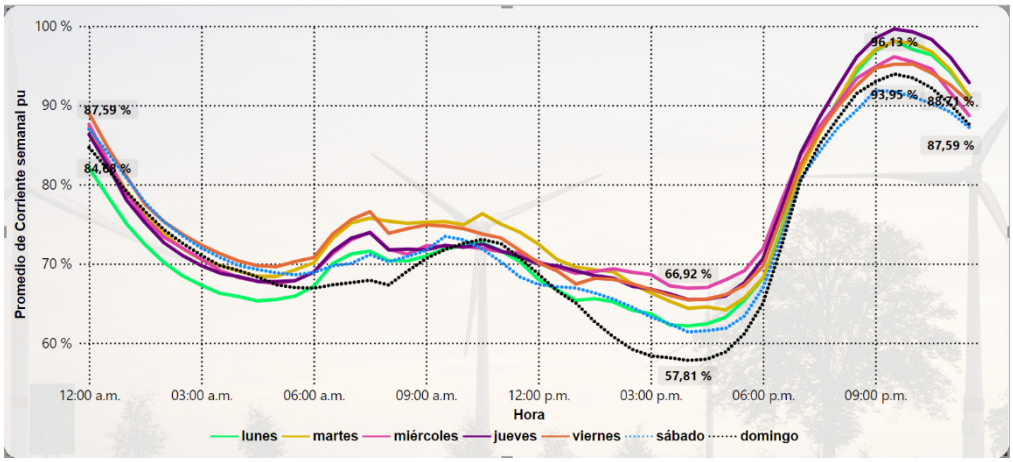


Fig. 3 - Perfil diario típico para días de la semana en meses de invierno (junio-julio-agosto).

3.2 Caracterización de perfiles de usuarios residenciales

Los perfiles de consumo individuales no se clasificaron por estación ya que los mismos se registraron entre los meses de noviembre y marzo. No obstante, se clasificaron en perfiles para días hábiles y no hábiles. Estos resultados permitieron obtener perfiles de carga que caracterizan el consumo de usuarios individuales, sin el "suavizado" resultante de trabajar con perfiles promedios. Para ciertos estudios en la red de distribución, estos resultados resultan relevantes y representativo de casos reales. En la Fig. 4 se observan los perfiles promedios diarios obtenidos para los 7 usuarios considerados. Cada perfil se expresa en proporción al consumo máximo de cada usuario. Las potencias máximas registradas para estos usuarios estuvieron comprendidas entre 1,5 y 3 kW. No obstante, las potencias medias estuvieron generalmente por debajo de 0,5 kW.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

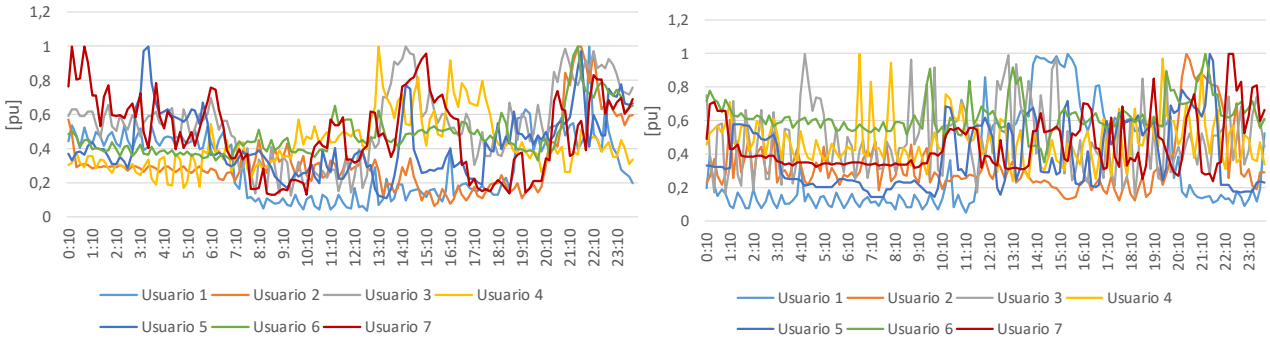


Fig. 4 - Perfil diario medio de potencia activa para días hábiles (izquierda) y para días no hábiles (derecha).

En la Fig. 5 se detalla el consumo de energía activa y reactiva junto con el factor de potencia medido para cada usuario. Los consumos de energía medios diarios resultaron bastante disimiles entre usuarios, pero puede hacerse una distinción entre aquellos clientes considerados de bajo consumo y alto consumo. Los primeros presentaron consumos comprendidos entre 4 y 7 kWh/día (consumo diario per cápita medio de 1,8 kWh/día), mientras que los segundos presentaron consumos comprendidos entre 13 y 20 kWh/día (consumo diario per cápita medio de 3,6 kWh/día). En estos consumos influyó de forma apreciable la temperatura ambiente y el uso de acondicionadores de aire.

Los consumos de energía reactiva inductiva resultaron muy dispares entre los distintos usuarios, no pudiéndose identificar un patrón claro para su correlación. Contrariamente a lo que puede pensarse a priori, en términos de energía activa y reactiva, el factor de potencia de los consumidores es, en general, alto y cercano a 1. En 5 de los 7 usuarios registrados el factor de potencia estuvo por encima de 0,95. Probablemente, esto sea causado por la componente capacitiva que prepondera en muchas de las cargas actuales basadas en electrónica.

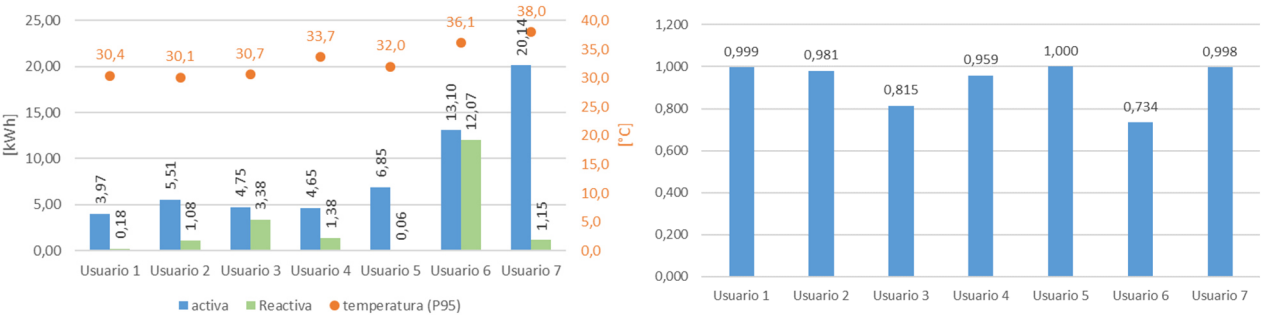


Fig. 5 - Consumo de energía (diaria activa y reactiva) y temperatura del periodo de medición (izquierda) y factor de potencia en cada usuario, calculado a partir de los consumos de energía activa y reactiva (derecha)

Se muestra a continuación los resultados del análisis de algunos parámetros que definen la calidad de energía en el punto de suministro para los 7 usuarios. En la Fig. 6 se muestra Distorsión armónica total de la tensión y corriente mediante el valor del THD (Percentil 95 del THD registrado en cada usuario).

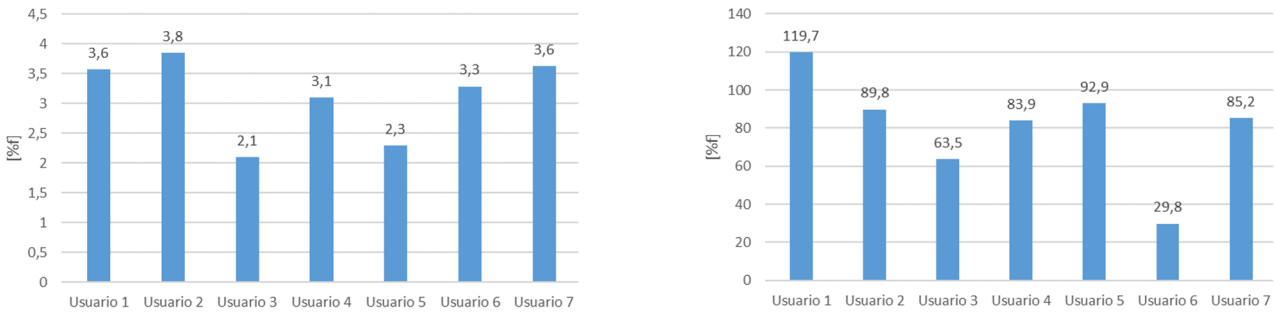


Fig. 6 - Distorsión armónica total de la tensión (izquierda) y distorsión armónica total de la corriente (derecha). Valores en % de la componente fundamental.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Durante el 95% del tiempo de registro, el THD tuvo valores que promedian 3,1 %. Estos valores son bajos si se considera el límite normativo de 8%. El espectro de frecuencia de las tensiones resultó ser bastante similar en todos los usuarios, siendo característica la presencia de armónicas de orden 3, 5, 7, 9, 11 y 15, mayoritariamente.

La distorsión armónica de la corriente tiene más variaciones entre un usuario y otro. Más allá de las diferencias en los valores globales de distorsión, el espectro de frecuencia de la corriente resulta similar, siendo característica la presencia de armónicas de orden 3, 5, 7 y 9 (en amplitud, mayores al 20%, y en ese orden). La de mayor amplitud fue la de orden 3 (amplitudes mayores al 50%), lo cual suele derivar en un problema con las corrientes en el neutro.

Más allá de lo mencionado anteriormente, los valores de distorsión armónica de la demanda (con relación a una "potencia contratada" asumida de 3,5 kVA), estuvieron comprendidos entre 3 % y 8 %, lo cual puede considerarse bajo si se considerar el límite normativo del 20 %.

4. Conclusiones

Este trabajo ha cumplido con el objetivo de realizar un diagnóstico del estado de la red distribución de energía eléctrica de la ciudad de Santa Fe, a través del análisis de perfiles de usuarios y datos de distribuidores. Cabe destacar que a estos resultados se suman los presentados en anteriores congresos donde se caracterizaba cargas preponderantes en el sector residencial. Estos aportes en su conjunto contribuyen al conocimiento de la situación actual en la provincia de Santa Fe y, en un futuro serán la base de estudio para la aplicación de medidas correctivas en la ciudad, en cuanto a gestión de la demanda, generación distribuida, eficiencia energética, entre otros.

El estudio realizado permitió caracterizar el consumo eléctrico en distintos escenarios para usuarios residenciales de la ciudad de Santa Fe. A través del análisis se logró identificar algunos patrones estacionales, semanales y horarios relacionados a su consumo. En este sentido, se considera valioso el aporte logrado con la obtención de perfiles típicos basados el análisis de registros en los distribuidores. Estos perfiles pueden emplearse en el modelado de redes de distribución y estudios específicos para la ciudad.

Por otro lado, se observaron algunos aspectos relacionados con la calidad de energía en redes de baja tensión, como la distorsión armónica provocada por las cargas de estos clientes. A pesar de no poseer una muestra suficientemente grande como para caracterizar completamente el consumo de los usuarios residenciales de forma general, puesto que, i) estadísticamente, constituyen un conjunto pequeño de muestras, ii) las mediciones corresponden a momentos distintos del año, con condiciones ambientales distintas, y iii) las características de ocupación y tamaño de las viviendas, junto con los horarios de mayor actividad de los usuarios considerados, son distintos y no permiten hacer una clasificación contundente entre los usuarios; los registros obtenidos permitieron identificar algunas particularidades que no se detectaron en el promedio de grandes muestras obtenidas con registros de alimentadores de la empresa distribuidora.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Universidad Tecnológica Nacional mediante su programa de proyectos y por el Consejo Interuniversitario Nacional a través de la Beca de Vocaciones Científicas otorgada (CIN CE. 480/2023). Se desea agradecer a los directores de la beca, el Dr. Ing. Emmanuel Sangoi, y al Ing. Ulises Manassero, al CIESE y a su equipo de trabajo por la provisión de materiales y a la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe por la información brindada.

Referencias Bibliográficas

CAMMESA. (enero de 2024). Informe Anual 2023. Obtenido de CAMMESA: https://cammesaweb.cammesa.com/informe-anual/

Dehghanpour, K., Wang, Z., Wang, J., & Bu, Y. Y. (Marzo 2016). A Survey on State Estimation Techniques and Challenges in Smart Distribution Systems. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 2, 2312-2322.

K. Basilio (2023). Caracterización del perfil de consumo de cargas de uso residencial. Jornadas para Jóvenes Investigadores Tecnológicos, Facultad Regional Rafaela 2023.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Meyer, J., Blanco, A. -M., Domagk, M., & Schegner, P. (2017). Assessment of Prevailing Harmonic Current Emission in Public Low-Voltage Networks. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 2, 962-970.
M. Iqbal, L. Kütt & A. Rosin. (2018) "Complexities associated with modeling of residential electricity consumption". 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 1-6

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Energía
Categoría:	Graduado
Facultad Regional:	Reconquista

Aproximación de la Irradiación solar global captada mediante funciones polinómicas

Approximation of the global solar irradiation captured using polynomial functions

Presentación 30/08/2024

Jose Ignacio Giménez

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: gimenezjoseignacio@hotmail.com

Agustin Nicolas Muñoz

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: agustinmunoz116@gmail.com

Resumen

El presente trabajo consiste en la determinación de la energía solar (radiación solar global) en días despejados y/o parcialmente nublados, mediante el empleo de curvas polinómicas a partir de datos de potencia (Irradiancia) extraídos cada 5 minutos de una estación meteorológica ubicada en el predio de la Facultad Regional Reconquista. La determinación de dicha energía se ha realizado por medio de cálculos de las áreas bajo la curva, mediante aproximaciones de funciones y resolviendo las respectivas integrales definidas para dos días en particular, despejado y parcialmente nublado. El método matemático empleado fue la aplicación de funciones polinómicas de 2° y 6° grado para determinar el valor de energía captado (Irradiación) y contrastado con en el valor, más próximo al real, que entrega el método de cálculo de los trapecios para el cálculo del área bajo de la curva. Los valores obtenidos por este método matemático son usados para compararse con los valores de energía generada por una instalación fotovoltaica de 4 paneles policristalinos de 270W, en el mismo predio y en los mismos días 08/02 y 21/02, donde la diferencia entre ambos contempla las pérdidas por aumento de temperatura de la célula solar (olas de calor), por suciedad, pérdidas en la instalación eléctrica y pérdidas inherente a los equipos electrónicos como ser el inversor.

Palabras clave: Radiación solar global, integrales, aproximaciones de funciones.

Abstract

This work consists of determining solar energy (global solar radiation) on clear and/or partially cloudy days, using polynomial curves based on power (irradiance) data extracted every 5 minutes from a weather station located on the premises of the Regional Faculty of Reconquista. The determination of this energy has been carried out through calculations of the areas under the curve, using function approximations and solving the respective definite integrals for two specific days: one clear and one partially cloudy. The mathematical method employed was the application of polynomial functions of 2nd and 6th degrees to determine the value of captured energy (irradiation), which was then compared to the value obtained using the trapezoidal method for calculating the area under the curve. The values obtained from this mathematical method are used to compare with the energy generated by a photovoltaic installation of 4 polycrystalline panels of 270W, on the same premises and on the same days (February 8 and February 21), where the difference between the two accounts for losses due to increased temperature of the solar cell (heat waves), dirt, losses in the electrical installation, and inherent losses in electronic equipment such as the inverter.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Keywords: Global solar radiation, integrals, function approximations.

1. Introducción

1.1. Definición de conceptos [2, 3, 5]:

- Radiación directa: es la radiación referida al flujo solar que llega a la superficie sin haber sufrido ninguna dispersión en la atmósfera. La misma procede del disco geométrico del Sol y es la componente de la luz solar que se enfoca mediante un sistema óptico dando una imagen del disco del Sol.
- Radiación dispersa: la atmósfera produce una componente difusa de luz dispersa a través de la denominada dispersión de Rayleigh y la dispersión por el polvo y aerosoles. Las nubes también dispersan la luz solar, lo cual se añade al flujo disperso total pero su naturaleza no es estrictamente difusa. Este tipo de radiación no puede enfocarse por ningún sistema óptico.
- Irradiancia: es la potencia de la radiación solar por unidad de área en un momento dado.
- Irradiación: es la energía recibida o captada en un intervalo de tiempo por unidad de área.
- Célula fotoeléctrica: también llamada celda solar, célula solar, fotocélula o célula fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía lumínica (fotones) en energía eléctrica (flujo de electrones libres) mediante el efecto fotoeléctrico y luego por el efecto fotovoltaico. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad. La célula fotovoltaica tradicional (de silicio) trabaja mayoritariamente con el espectro de la luz visible y una fracción del ultravioleta, este intervalo del espectro de trabajo se encuentra en el intervalo de frecuencia de 300nm a 700nm. De esto último se desprende que la célula fotovoltaica trabaja en un mayor porcentaje con el espectro de luz “visible” y debido a esto acusa una disminución en los valores de potencia instantánea (Irradiancia) al interponerse entre esta y la dirección de los rayos solares una nube.
- EPESF: Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe.
- ERA: Energía Renovable para el Ambiente.

El objetivo es emplear un método de mayor facilidad para el cálculo de la radiación global captada por una instalación solar fotovoltaica con respecto al método de los trapecios, para días parcialmente nublados, y/o con intermitencia de radiación solar directa como lo fue el día 08/02/2024, y en días mayormente despejados como lo fue el 21/02/2024. Los datos de la estación meteorológica son valores de Irradiancia (W/m^2) arrojados cada 5 minutos. Los estudios para los días mencionados se realizaron para un intervalo horario entre las 7h y las 19h donde los datos de potencia (irradiancia) se guardaron en una planilla Excel para luego ser trabajados analítica y gráficamente para calcular de esta manera, por medio de distintos métodos matemáticos, la energía solar global diaria captada.

Por último, se aclara que ambos sistemas se encuentran en el mismo predio con una ubicación geográfica de 29°08′40″S 59°38′38″O, de Latitud y Longitud respectivamente de la ciudad de Reconquista provincia de Santa Fe.

2. Metodología

En el predio de la Facultad Regional Reconquista (FRRq) se encuentra una estación meteorológica (figura 1) PEGASUS Modelo EP0304 N° 3704 [7], esta estación permite medir, almacenar y visualizar en tiempo real información ambiental. Su alimentación es por batería y panel solar, todo integrado en su exclusivo diseño. La tecnología GSM incorporada transmite los datos registrados por cada sensor vía 2G y 3G a la nube para ser visualizados en tiempo real (cada 5 minutos) desde una computadora o a través de la aplicación PEGASUS MOBILE desde un teléfono celular (móvil). Esta estación provee los datos de Irradiancia solar, entre otros datos como ser temperatura ambiente, con los cuales se ha elaborado el presente trabajo.

La información obtenida, por la estación meteorológica (Irradiancia), es empleada luego para comparar con el valor de generación de energía diaria por un sistema fotovoltaico, integrado por 4 paneles FV de marca Jinko 260-280 Eagle 60 de 270Wp y un inversor On-grid ABB, conectado a la Red de la EPESF, bajo el Programa ERA, inscripto como usuario generador. De esta forma se tiene la diferencia entre la energía o radiación solar recibida por los paneles fotovoltaicos (dado por medio de la estación meteorológica) y la generada o inyectada a la Red, la cual es obtenida vía wifi por el inversor. La

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

diferencia contempla distintas pérdidas como ser: pérdida por temperatura elevada de las células en verano (olas de calor), por suciedad y otras pérdidas inherentes a los componentes electrónicos como el panel fotovoltaico, el inversor y en su instalación eléctrica. A la vez, este trabajo en particular aporta una referencia de cómo influye las condiciones ambientales (temperatura ambiente) en la generación de energía eléctrica de un panel fotovoltaico, mediante la comparación de dos días con diferentes condiciones climáticas, una de condición cálida y la otra con la denominada clasificación de “ola de calor”.



Figura 1. Estación Meteorológica PEGASUS, Modelo EP0304 N° 3704.

A partir de los datos obtenidos en las planillas, los cuales se los representa en las gráficas de las figuras 2 y 3 para los días 08/02/2024 y 21/02/2024 respectivamente, se los transporta al programa de lenguaje simbólico Mathematica en forma de matriz.

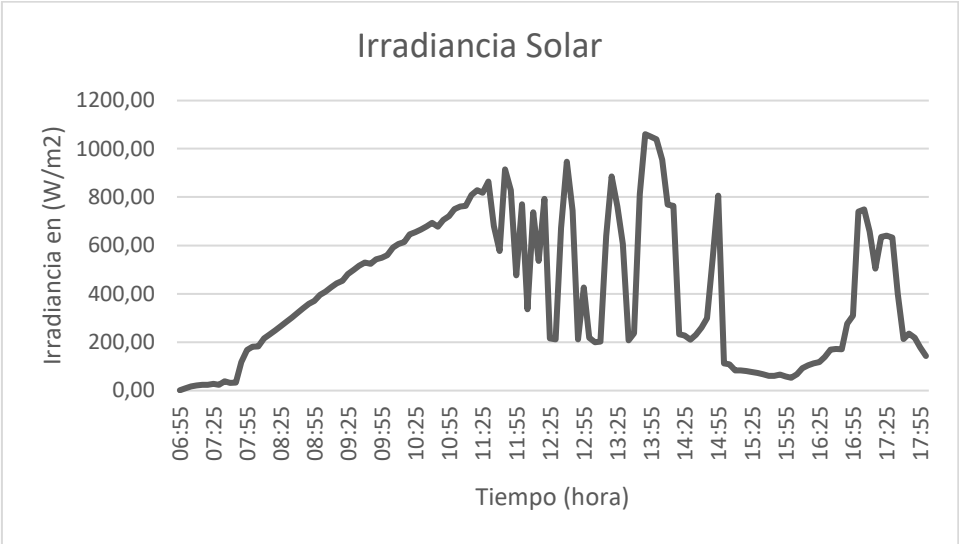


Figura 2. Datos de Irradiancia obtenidos de la estación Metereológica en el día 08/02.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

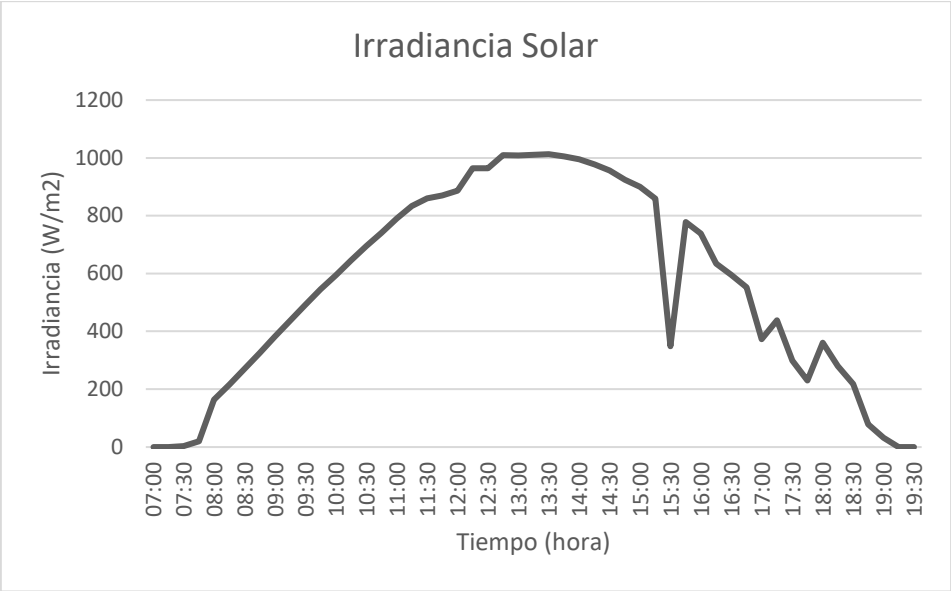


Figura 3. Datos Irradiancia obtenidos de la estación Metereológica en el día 21/02.

En primer lugar, se calcula el área bajo la curva utilizando la sumatoria de los trapecios como se muestra en la expresión (1):

$$E = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n-1}(t_{i+1} - t_i)(p_{i+1} + p_i) \quad (1)$$

En la cual, E es la energía en Wh, n la cantidad de datos, t_i el tiempo en el punto i, y p_i la potencia en el mismo punto. Debido a que los datos se registran cada 5 minutos los intervalos de tiempo son constantes durante todo el día, esto significa que $(t_{i+1} - t_i) = 5$ minutos, la expresión de la energía total diaria (irradiación) queda simplificada de la siguiente forma (2):

$$E = \frac{5}{2}\sum_{i=1}^{n-1}(p_{i+1} + p_i) \quad (2)$$

Luego, se aproxima la curva con polinomios de 2do grado (gráfica de color verde) y de 6to grado (curva de color rojo), ver figura 4, y se calcula el área bajo la curva de ambas funciones polinómicas mediante integrales definidas. Lo anterior se aplicó a dos días de condiciones de radiación diaria distintos en el mes de febrero del corriente año. Esto significa que se compararon datos en un día en el que hubo nubosidad o radiación solar directa intermitente, como se presentó el día 08/02 (figura 4-a), con un día totalmente claro o mayormente despejado como se presentó el día 21/02 (figura 4-b).

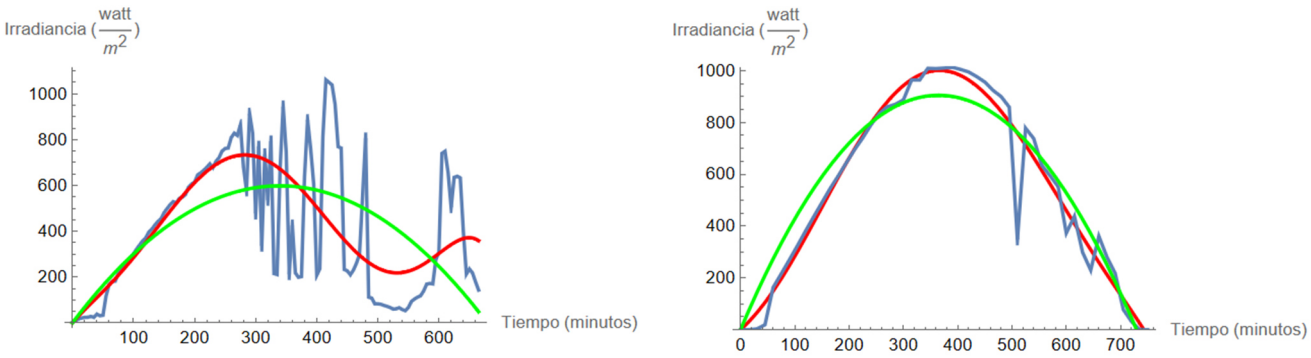


Figura 4. Funciones polinómicas aproximadas de sexto y segundo grado en dos días: a) 08/02/2024 y b) 21/02/2024, respectivamente utilizando el programa Mathematica.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Las expresiones polinómicas halladas para los días 08/02 y 21/02 se muestran en las expresiones (3) y (4) siguientes.

$$P_2(8) = 3.524\,x - 0.005\,x^2 \qquad P_2(21) = 4.962x - 0.007x^2 \tag{3}$$

$$P_6(8) = 3.079\,x - 0.015\,x^2 + 0.0002x^3 - 9.29 \times 10^{-7}x^4 + 1.55 \times 10^{-9}x^5 - 8.73 \times 10^{-13}x^6$$
$$P_6(21) = 1.854x + 0.011x^2 + 1.18 \times 10^{-6}x^3 - 1.377 \times 10^{-7}x^4 + 2.389 \times 10^{-10}x^5 - 1.187 \times 10^{-13}x^6 \tag{4}$$

Los valores arrojados por el método de los trapecios y por las curvas polinómicas de 2° y 6° grados son mostrados en la Tabla 1 siguiente.

Día	Trapecios, (Wh)	Polinomio 2°, (Wh)	Polinomio 6°, (Wh)
08/02/2024	4574,2	4587,9	4509,24
21/02/2024	7075,75	7317,48	7100,54

Tabla 1. Valores de energía (Wh) por cada día y función.

En la tabla anterior se puede observar que el polinomio de 2° obtiene una muy buena aproximación para el caso de un día con intermitencia solar como lo fue el 8 de febrero del corriente año, mientras que la curva polinómica de 6° lo hace para el día 21/02 de condición mayormente despejado. Entendiéndose que el valor más próximo al real es el que se encuentra debajo de la gráfica de color azul, que se calcula por le método de sumatoria de trapecios.

Posteriormente se adjunta las gráficas y su valor de Irradiación dados por el inversor de la instalación fotovoltaica bajo la conexión On-grid (a la red de distribución de la EPESF), como usuario generador dentro del programa ERA colaborativo de la provincia y ubicada en el mismo predio. Ambas gráficas y sus valores se aprecian en las imágenes (capturas de pantallas) en las figuras 5 y 6 siguientes para los mismos días de estudios 08/02 y 21/02 respectivamente.

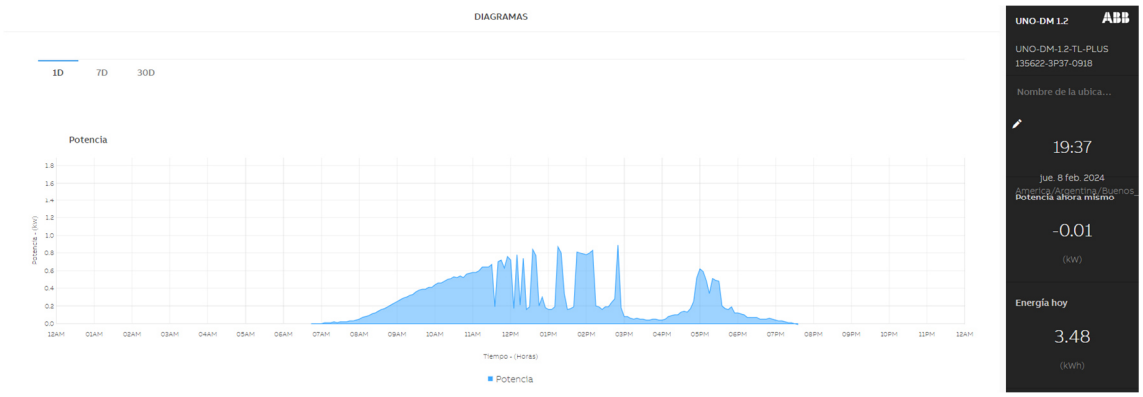


Figura 5. Captura de pantalla donde se observa la gráfica y su valor de Irradiación, dado por el inversor, para el día 08/02.

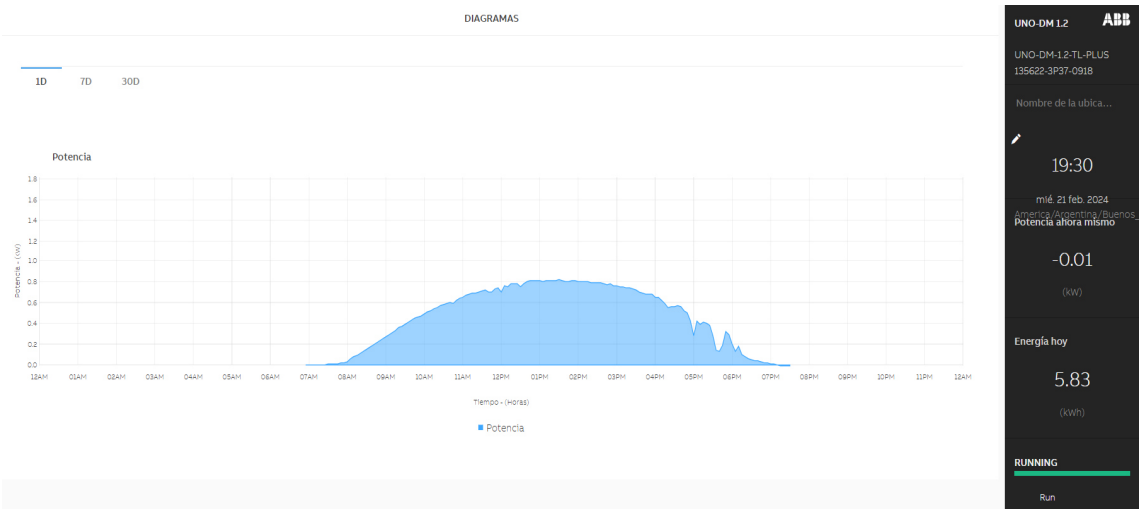


Figura 6. Captura de pantalla donde se observa la gráfica y su valor de Irradiación, dado por el inversor, para el día 21/02.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Se puede apreciar que los valores de energía arrojados por el inversor en la figura 5 fue de 3,48kWh o 3480Wh para el día 08/02, de condición parcialmente nublado [4], siendo un 23,91% menor respecto al valor calculado por el método de los trapecios para ese día, con un valor de 4574,2Wh. Y en la figura 6 se aprecia un valor de energía generada de 5,83kWh o 5830Wh para el día 21/02 (mayormente despejado) con un 17,61% menor respecto al valor calculado por el mismo método, donde arrojo un valor de 7075,75Wh. Esta diferencia de energía, entre el valor generado y el calculado en función a la energía captada es debido a que, a elevadas temperaturas las células fotovoltaicas [6], en particular las de estructura policristalinas, disminuyen su rendimiento en lo que respecta a la generación de energía eléctrica.

En base a lo expresado el mayor porcentaje de diferencia entre la energía captada y generada se da para el día 08/02, aún en condición de parcialmente nublado, ya que se registró una temperatura ambiente promedio de 35,98°C, hallado entre las 7h y las 18h, mientras que para el día 21/02 la temperatura promedio en el mismo intervalo de medición fue de 31,31°C dando así una diferencia entre energía captada y generada menor. De esto se desprende que por más que en el primer día de estudio se tuviera una condición de menor radiación solar (parcialmente nublado) respecto al segundo día de estudio, la temperatura ambiente en el primero fue mayor, acusándose a la vez una condición medioambiental de “ola de calor” respecto al segundo día de condición cálida, y por ello una mayor disminución en el valor de la energía generada respecto a la captada (diferencia), esto es debido a lo explicado en el párrafo anterior.

3. Conclusiones

Se concluye que, según el porcentaje de nubosidad presente en el día, un grado de curva polinómica, de los dos presentados, resulta más aproximada que otra a la hora de determinar la energía solar global captada, por ejemplo, para días parcialmente nublado o de radiación solar directa intermitente se tiene una mejor aproximación con una curva polinómica de 2° y qué, para días mayormente despejados o claros se tiene una mejor aproximación con una curva polinómica de 6°, ambas comparadas respecto al método de cálculo de la sumatoria de los Trapecios. A la vez la aplicación de estos métodos de cálculos de área, por curvas polinómicas, resultan de gran simpleza en su ejecución (menor tiempo) respecto al método de los trapecios, particularmente en días nublados donde se presenta grandes intermitencias de energía solar global captada.

Esta información obtenida, valores de la energía solar global diaria captada por la estación meteorológica, resulta de vital importancia para el estudio o análisis respecto a cómo afecta en la generación de energía eléctrica, por medio de paneles fotovoltaicos, las distintas condiciones climáticas, particularmente la temperatura ambiente.

Referencias bibliográficas

[1] Wolfram Mathematica © 1988-2023, Wolfram Research inc. Versión 13.3.
[2] Casa, M., Barrio, M. (2017). Instalaciones solares fotovoltaicas, Marcombo Ediciones Técnicas, Alfaomega Grupo Editor.
[3] A.B. Meinel, M.P. Meinel. (1982). “Aplicaciones de la Energía Solar”, Editorial Reverté s.a.
[4] Álvarez, O., Montaño, T., Quentin, E., Maldonado, J., & Solano, J. La radiación solar global en la región sur del Ecuador. Reanálisis de la nubosidad diurna.
[5] Priscila Gonçalves Vasconcelos Sampaio, Mario Orestes Aguirre González. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework.
[6] Cepeda, J., Sierra, A. Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones. Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
[7] TECMES. Estación meteorológica Pegasus. https://www.tecmes.com/estacion-pegasus/

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Energía
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Estudio de Factibilidad Técnica para la Conformación de una Multi-Microrred Eléctrica en la Ciudad de Rafaela

Technical Feasibility Study for the Formation of an Electrical Multi-Microgrid in the City of Rafaela

Presentación 02/09/2024

Agustín Chiani

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: aggus.06@gmail.com

Resumen

Las microrredes constituyen sistemas de distribución eléctrica en media o baja tensión, que integran equipamiento de generación distribuida y consumidores en una misma infraestructura de red, mejorando la eficiencia del sistema y su flexibilidad. En la provincia de Santa Fe (Argentina), programas gubernamentales recientes contribuyen a esta propuesta, incentivando la inclusión de generadores convencionales y otros basados en fuentes renovables en la red de distribución provincial. Este trabajo analiza la factibilidad técnica de incorporar generadores diésel y fotovoltaicos sobre una región de la ciudad de Rafaela, en la provincia de Santa Fe, fraccionada en microrredes interconectadas, bajo el concepto de multi-microrred. Se realizan simulaciones para conocer el estado de las mismas en diversos escenarios, utilizando software libre. Los resultados concluyen en la validez de la propuesta y permiten identificar limitaciones en la capacidad de la generación incorporada para mantener los niveles de tensión en rangos considerados aceptables.

Palabras clave: Distribución eléctrica; Energías renovables; Generación fotovoltaica; Microrredes; Simulación

Abstract

Microgrids are medium or low voltage electrical distribution systems designed to integrate distributed power generation equipment and consumers into a single network infrastructure, improving the system efficiency and flexibility. In the province of Santa Fe (Argentina), recent government programs contribute to this proposal, encouraging the inclusion of conventional generators and renewable energy-based generators in the local distribution network. This work analyzes the technical feasibility of incorporating distributed diesel and photovoltaic generators in a specific region of the city of Rafaela, in the province of Santa Fe, divided into interconnected microgrids, under the concept of multi-microgrid. Simulations are performed to assess the state of the microgrids in various scenarios, using open-source software. The results conclude on the viability of the proposal and allow identifying limitations in the capacity of the incorporated generation to maintain the voltage levels in acceptable ranges.

Keywords: Electrical distribution; Renewable energy; Photovoltaic generation; Microgrids; Simulation

1. Introducción

La tradicional estructura de los sistemas eléctricos, caracterizada por grandes centrales de generación conectadas a extensas redes de transmisión y distribución, ha evolucionado significativamente en las últimas décadas (Mojumdar y col., 2015). Este modelo ha enfrentado diversos desafíos, como la creciente demanda energética, la necesidad de integrar fuentes

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

renovables y la búsqueda de mayor eficiencia y resiliencia. En este contexto, la generación distribuida (GD) ha emergido como una alternativa atractiva (Singh y Sharma, 2017), y refiere a la producción de energía a reducida escala, cerca de los puntos de consumo, utilizando una variedad de tecnologías, como paneles solares fotovoltaicos, turbinas eólicas, microturbinas de gas y cogeneración. La GD ofrece numerosos beneficios, entre los que se destacan (Nadeem y col., 2023): i) mayor eficiencia, al reducir las pérdidas en la transmisión y distribución; ii) mayor confiabilidad, al diversificar la generación; iii) eventual mayor resiliencia, en caso de sistemas que puedan autoabastecerse en condiciones de interrupciones de suministro por parte de la red principal; y iv) integración de energías renovables.

Una *microrred* (MR), como sistema de distribución eléctrica de baja escala que integra generadores y carga, es una manifestación concreta de la GD (Abbasi y col., 2023). Las MRs pueden operar conectadas a la red principal (Cavus y col., 2023) o desconectadas (Han y col., 2016), lo que les confiere una gran flexibilidad. Sin embargo, la operación en modo aislado plantea desafíos técnicos y regulatorios que limitan su aplicación. Para superar estas limitaciones, se ha propuesto el concepto de *multi-microrred* (MMR, Xing y Jia, 2023). Una MMR es un conjunto de MRs interconectadas que operan de forma coordinada, permitiendo una mayor capacidad de adaptación a las condiciones cambiantes del sistema. En este contexto, este trabajo estudia la factibilidad técnica de implementar una MMR en la ciudad de Rafaela, provincia de Santa Fe, Argentina, manteniendo la infraestructura actual de líneas y transformadores, pero incorporando GD de baja escala de acuerdo con las posibilidades que brindan las normativas. La propuesta consiste en subdividirla en cinco MRs interconectadas, añadiendo generación diésel y solar, en consideración de las restricciones que impone la reglamentación. La infraestructura existente de la empresa distribuidora local que se ubica fuera de las MRs (distribuidores), se utiliza como nexo de interconexión, quedando así conformada una MMR.

Para evaluar la factibilidad de la propuesta, se realizan simulaciones mediante un software desarrollado en la UTN Santa Fe, *Electrical Grid Simulator* (EGS), originado en investigaciones previas comprendidas en el mismo proyecto de I+D (Loyarte y col., 2023). En las pruebas, se consideran diversos escenarios, incluyendo condiciones de carga pico y valle, y fluctuaciones en la generación fotovoltaica, simulando el avance de un frente de tormenta (Loyarte y col., 2019). Los resultados permiten determinar la viabilidad técnica de la implementación de la MMR, así como identificar las medidas necesarias para garantizar un funcionamiento adecuado del sistema. En este sentido, el presente trabajo constituye una primera etapa en el análisis de la factibilidad técnica. Estudios futuros explorarán la posibilidad de implementar un mercado de intercambio entre las MRs y la integración de sistemas de almacenamiento.

2. Metodología

2.1. Identificación y modelado matemático de las microrredes

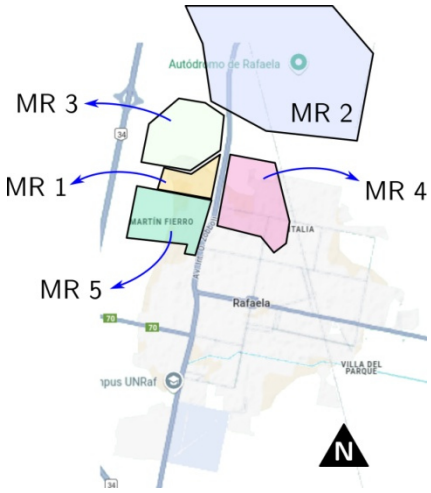


Figura 1. Mapa de la ciudad de Rafaela y disposición de las MRs.

La red opera con una tensión nominal de 13,2 kV y registra un consumo anual de entre 1200 y 4700 MWh. De acuerdo con la disposición de alimentadores, Manassero y col. (2023) propusieron la subdivisión en 5 MRs que se utiliza en este trabajo, manteniendo la vinculación con la estación de transformación (ET) ubicada aguas arriba. La información fue aportada por la Empresa Provincial de la Energía (EPE), con datos de demanda pico y valle. En el fraccionamiento puede identificarse (ver Figura 1): Parque Industrial de Rafaela (**MR 1**); Autódromo de Rafaela y zonas rurales aledañas (**MR 2**); Parque de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Actividades Económicas de Rafaela y zonas rurales aledañas (**MR 3**); barrio residencial y zonas rurales aledañas (**MR 4**); otro barrio residencial y zonas rurales aledañas (**MR 5**). Cada MR se implementó en EGS, que emplea modelos electrotécnicos equivalentes para simulaciones en régimen estacionario a partir del problema del *flujo de potencia*.

2.2. Incorporación de los generadores distribuidos

La incorporación de los generadores distribuidos se realizó considerando limitaciones reglamentarias establecidas en los anexos del código de red de la EPE para la inserción de generación distribuida en la provincia de Santa Fe, en consideración de los aspectos técnicos mencionados en el Anexo 39 de "Los Procedimientos" de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico en Argentina (CAMMESA), y en los Procedimientos Técnicos 4, Anexo I. De acuerdo con estas normativas, se estableció:

i) Independientemente de la tecnología, la potencia nominal de un generador no debe exceder el 50% de la capacidad nominal de los componentes que transferirán la potencia erogada (líneas y transformadores).
ii) Se procura que la suma de las potencias nominales (activas) de los generadores no exceda la demanda pico de la MR. Un exceso de generación puede ser válido, con la diferencia no consumida exportada a la red externa.
iii) Los generadores se despachan al 100% de su potencia nominal, con la excepción de los estudios de fluctuaciones de la generación solar. Se configuran con una consigna de tensión de 1 "por unidad del valor nominal" (p.u.).
iv) Los generadores diésel se configuran con límites de capabilidad de reactivo computados a partir de la potencia activa nominal y factor de potencia (f.p.) entre 0,95 capacitivo y 0,8 inductivo.
v) Para generadores fotovoltaicos, se considera como potencia nominal a la correspondiente a datos climatológicos estándar de 1000 W/m^2 para la irradiancia (G_{std}) y 25 °C para la temperatura de las celdas solares (T_c).
vi) En generadores fotovoltaicos, los límites de potencia reactiva son más estrechos, debido a restricciones de la electrónica de los equipos inversores y se establecen de acuerdo con un f.p. entre 0,9 capacitivo y 0,9 inductivo.
vii) Las tensiones nodales no deben exceder un mínimo de 0,92 p.u., ni un máximo de 1,08 p.u.
viii) Es requerimiento simular variaciones rápidas para representar la intermitencia del recurso solar, considerando caídas abruptas del 50% de la potencia nominal.
ix) Las variaciones fotovoltaicas rápidas no deben generar fluctuaciones de tensión que excedan el 3%.

Tabla 1. Pot. nominal por generador diésel incorporado.

MR	Gen.	P nom. (kW)
1	1	320
	2	320
	3	680
	4	1200
2	1	320
	2	320
	3	680
	4	680
3	1	320
	2	320
4	1	320
	2	320
	3	320
5	1	320
	2	680

Tabla 2. Pot. nominal por parque fotovoltaico.

MR	Gen.	Cant. de paneles	P nom. (kW)
1	1	300	170,85
	2	300	170,85
	3	250	142,38
	4	707	402,64
	5	500	284,75
2	1	750	427,13
	2	600	341,70
	3	500	284,75
	4	750	427,13
	5	707	402,84
3	1	700	398,65
	2	300	170,85
4	1	500	284,75
	2	500	284,75
	3	500	284,75
5	1	750	427,13
	2	250	142,38

Con las consideraciones anteriores, se propuso incorporar generadores en locaciones mayormente alejadas de la ET, para compensar el efecto de las caídas de potencial, priorizando zonas donde se disponen consumos elevados. Para instalaciones fotovoltaicas, se agrega el requerimiento de la superficie adecuada. La Tabla 1 resume las potencias activas nominales (disponibles comercialmente) de los grupos diésel incorporados. La Tabla 2 hace lo propio con los parques fotovoltaicos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

En estos casos, se aplica un rendimiento global típico del 85% y paneles de la marca CanadianSolar, modelo BiHiKu7-670MBAG, de 670 W-pico. Con estas características, el rendimiento superficial es de aproximadamente 178 W/m^2.

En esta instancia, las adopciones de las Tablas 1 y 2 corresponden a un dimensionamiento preliminar, basado en las condiciones i) ii) y v). Deben confirmarse verificando las restricciones operativas y normativas (que cubren las restantes condiciones), de acuerdo con un procedimiento coordinado de simulaciones, como se explicita en el apartado siguiente.

2.3. Ejecución de las simulaciones

a) Condición base

Se simula el funcionamiento de las MRs en escenarios de demanda pico y valle, en la designada como “condición base”, correspondiente al estado actual, sin generación añadida. La conexión entre las MRs y la ET (barra slack) se realiza simulando una red de potencia infinita con tensión controlada de 1,05 p.u. (efecto de un regulador automático de tensión).

b) Generadores distribuidos a potencia (activa) nominal

De acuerdo con las condiciones establecidas en la sección 2.2, los generadores distribuidos se despachan al 100% de su potencia activa nominal, tanto en escenario de demanda pico como valle (2 simulaciones), considerando capacidad de regulación de tensión tanto en los motogeneradores diésel como en los parques fotovoltaicos.

c) Aporte exclusivo de la generación fotovoltaica

Se desactivan los generadores diésel y se evalúa el desempeño de las MRs en escenarios de demanda pico y valle (2 simulaciones), manteniendo la generación fotovoltaica al 100% de la potencia activa nominal, con control de tensión.

d) Variación rápida del 50% en la generación renovable en condición de pico diurno

Se toman como partida los resultados anteriores, para la condición de generadores diésel inactivos y fotovoltaicos al 100%, con demanda pico; condición designada como “pico diurno”. De esta simulación inicial, se observa la potencia reactiva entregada por los generadores fotovoltaicos. A continuación, se modifica el modelo de representación de estos generadores para fijar, en una próxima simulación, el reactivo aportado como igual a la cantidad anteriormente registrada, pero disminuyendo la potencia activa al 50%. Con este esquema, se simula el desempeño de la red ante el avance rápido de un frente nuboso, sin capacidad de respuesta del sistema de control de tensión, que altera la potencia reactiva inyectada.

e) Variación rápida del 50% de la generación renovable en condición de valle diurno

Análogo a lo anterior, se simula una caída del 50% de la potencia solar, pero partiendo del escenario de demanda valle. Se utiliza el mismo procedimiento anterior, empleando una simulación inicial realizada en c), designada como “valle diurno”.

Es de notar que en condiciones de nubosidad parcial, la producción fotovoltaica puede diferir de la presentada en los escenarios planteados. No obstante, estos casos no son contemplados en los estudios propuestos, dado que éstos se orientan a condiciones extremas para evaluar dimensionamiento en términos de potencia (y no en términos energéticos), y condiciones de borde para niveles de tensión y estados de carga en las MRs.

3. Resultados

3.1. Perfiles de tensión

La Figura 2 muestra, en diagramas de caja, las magnitudes de los niveles de tensión en todas las barras de cada MR y por cada escenario de simulación de los listados en la sección 2.3. En general, las tensiones tienden a elevarse con la incorporación de los generadores. Se demuestra que en los escenarios a), de la condición base, las tensiones se ubican entre los márgenes aceptables de 0,92 a 1,08 p.u. La tendencia que surge de añadir generadores, es la de incrementar aún más estos niveles. Esto responde a menores caídas de potencial, puesto que se reducen los flujos de potencia que provienen de la ET. Adicionalmente, el aporte de potencia reactiva de los generadores también eleva los perfiles de tensión.
No obstante, en la MR 2, el dimensionamiento preliminar propuesto en la sección 2.2 conduce a tensiones excesivas en condiciones de un exceso de generación. Por un lado, para los escenarios b), con despacho al 100%. Pero por otro lado, esto también se registra aún cuando sin aporte de los generadores diésel, cuando la demanda es baja (valle), en el escenario c). La misma problemática se observa en e), sin generación diésel y con el 50% de la producción fotovoltaica, lo que sigue siendo excesivo para una demanda valle. Estos resultados indican la necesidad de modificar las potencias y/o distribución de los generadores. Se verifica que la suma de las potencias nominales de los generadores en la MR 2 supera a la carga pico.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

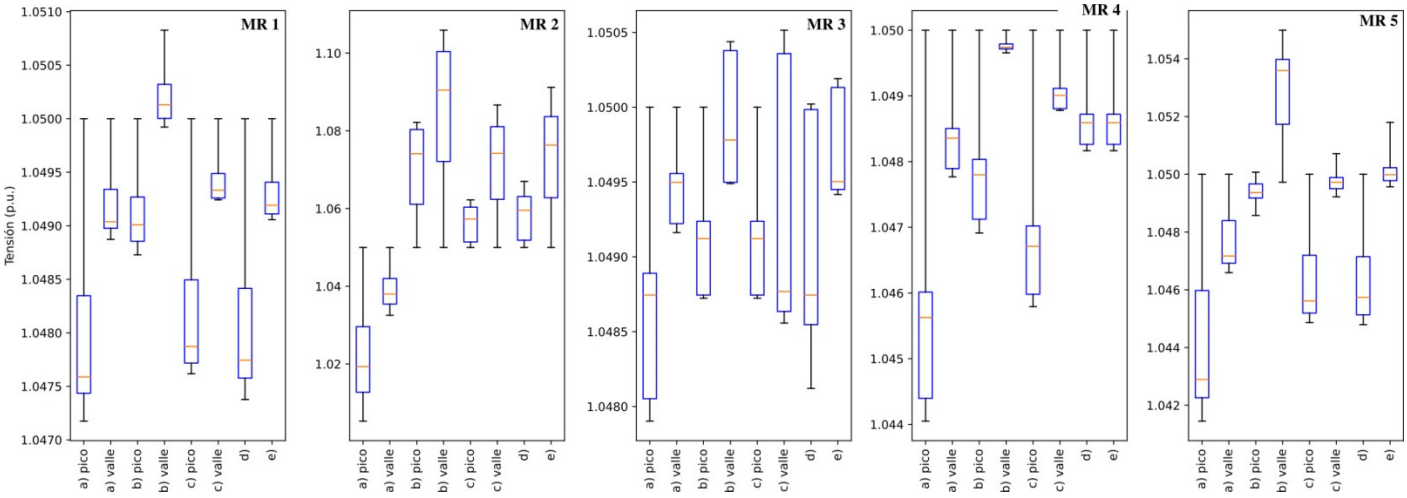


Figura 2. Diagramas de caja para los niveles de tensión según MR y escenario de simulación.

3.2. Estado de carga

La Figura 3 muestra los niveles de carga porcentual de las líneas. En todos los casos, con o sin generación añadida, los niveles son aceptables (< 100%). En la mayoría de los escenarios se observa que la incorporación tiende a reducir el estado de carga de las líneas, sustituyendo potencia importada desde la ET por producción local, cercana a la demanda. Sin embargo, en la MR 2, se advierte el efecto contrario (aún siendo condiciones aceptables), motivo de exceso de generación.

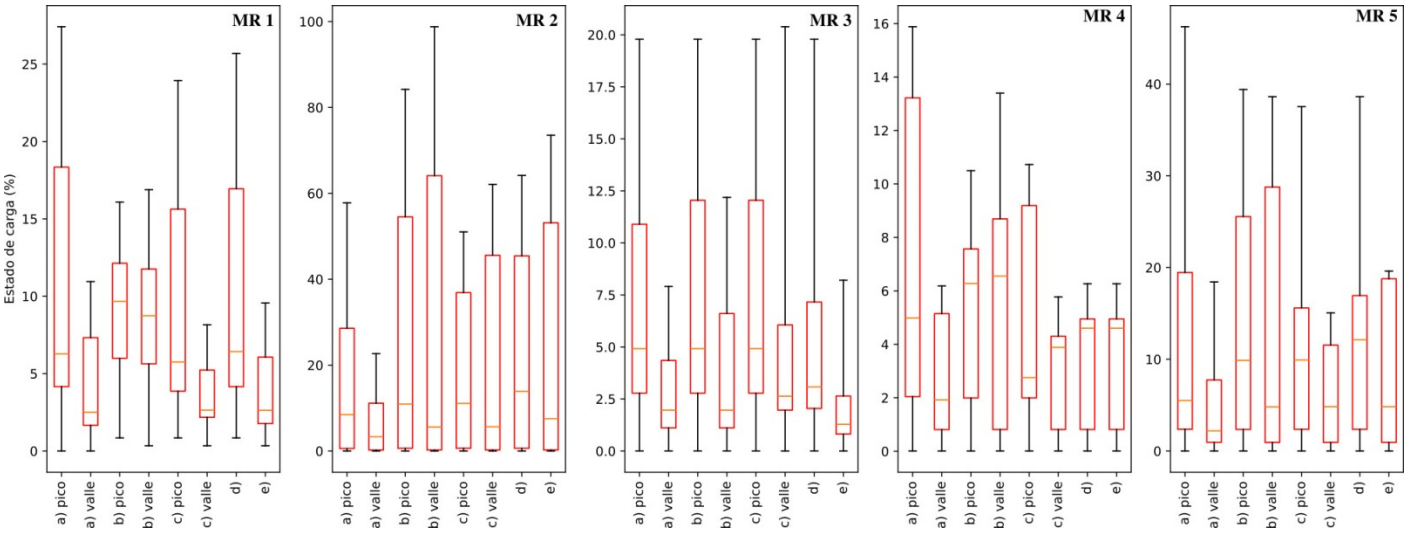


Figura 3. Diagramas de caja para los niveles de carga en líneas según MR y escenario de simulación.

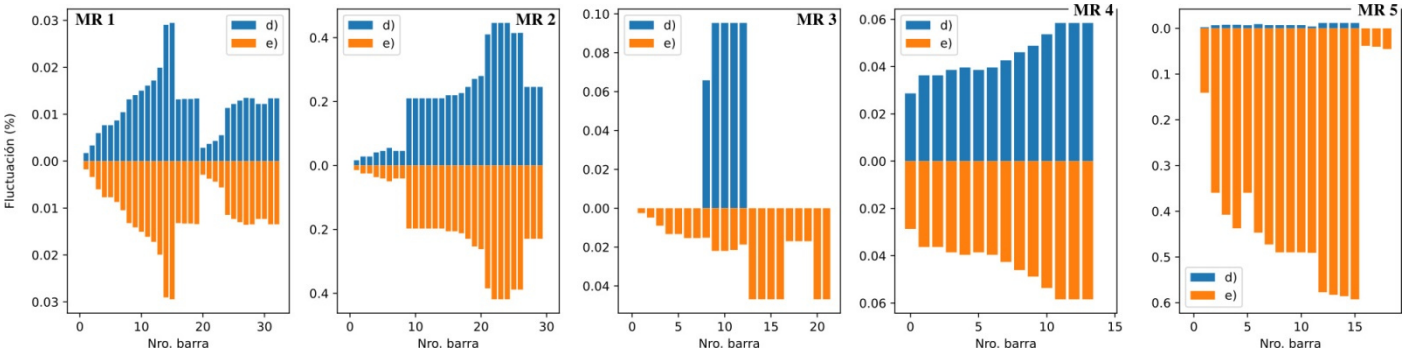


Figura 4. Fluctuaciones porcentuales de tensión por MR y escenario de simulación d) y e).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

3.3. Fluctuaciones de tensión por intermitencia del recurso renovable

Las simulaciones d) y e) analizan las fluctuaciones de tensión para un avance rápido de un frente de tormenta que afecte a la generación solar. Se computa la diferencia porcentual entre las tensiones en el estado previo (antes de la tormenta) y en un estado posterior (durante la misma), en valor absoluto, y se grafican por MR en la Figura 4. Para una fluctuación aceptada de hasta 3%, se observa que en todos los casos los generadores propuestos no conducen a situaciones inconvenientes.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos sugieren factible la incorporación de generadores distribuidos en la red analizada y en potencias nominales que totalicen cantidades cercanas al consumo global pico de cada MR. Cuando la producción excede la demanda pico, la red externa puede absorberla (exportación), aunque en tales condiciones pueden registrarse tensiones que superen a la tensión regulada en el punto de conexión con la ET. Esta circunstancia no es problemática, siempre que los niveles se mantengan por debajo del límite superior aceptable. El caso extremo corresponde a la MR 2, con un exceso significativo de generación en diversos escenarios, lo que conlleva a sobretensiones inaceptables. Se concluye, por tanto, que en estas condiciones es requerimiento un redimensionamiento de las instalaciones de generación. La disposición de estos generadores también podría tener efecto en los resultados. Se observa, asimismo, que estas condiciones de producción excesiva de potencia (fundamentalmente fotovoltaica) responden a un incentivo para el aprovechamiento de la extensa superficie libre disponible en la MR 2, en zonas del autódromo de la ciudad, con regiones rurales amplias.

Referencias Bibliográficas

Abbasi, M., Abbasi, E., Li, L., Aguilera, R. P., Lu, D., & Wang, F. (2023). Review on the microgrid concept, structures, components, communication systems, and control methods. *Energies, 16*(1), 484.

Cavus, M., Allahham, A., Adhikari, K., Zangiabadi, M. y Giaouris, D. (2023). Energy management of grid-connected microgrids using an optimal systems approach. *IEEE Access, 11*, 9907-9919.

Han, H., Hou, X., Yang, J., Wu, J., Su, M. y Guerrero, J. M. (2016). Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(1), 200-215.

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*.

Loyarte, A. S., Clementi, L. A. y Vega, J. R. (2019). A hybrid methodology for a contingency constrained economic dispatch under high variability in the renewable generation. *IEEE Latin America Transactions, 17*(10), 1715-1723.

Manassero, U., Nahs, A., Loyarte, A., Acosta, J. y Rossi, L. (1-3 de noviembre de 2023). *Análisis Operativo de una Red de Distribución para su Potencial Conformación de Microrredes*. Congreso Internacional de Ingeniería Industrial y Afines, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina.

Mojumdar, M. R. R., Himel, M. S. H. y Kayes, G. (2015). A Distinctive Analysis between Distributed and Centralized Power Generation. *International Journal of Recent Research in Electrical and Electronics Engineering, 2*(4), 1-6.

Nadeem, T. B., Siddiqui, M., Khalid, M., & Asif, M. (2023). Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies. *Energy Strategy Reviews, 48*, 101096.

Singh, B. y Sharma, J. (2017). A review on distributed generation planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76*, 529-544.

Xing, X. y Jia, L. (2023). Energy management in microgrid and multi-microgrid. *IET Renewable Power Generation*.

Estructura y construcciones civiles



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Análisis numérico y experimental de vigas reticuladas con perfiles conformados en frío y nudos soldados

Numerical and experimental analysis of truss beams with cold-formed sections and welded nodes

Presentación 18/10/2024

Maira Sosa

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: msosa@frsf.utn.edu.ar

Julián Gelfuso

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: jgelfuso@frsf.utn.edu.ar

Resumen

En el presente trabajo se analiza una solución de vigas reticuladas utilizadas en construcciones de galpones de pequeña escala. Estas son diseñadas con perfiles conformados en frío de sección C, con una particular conexión, donde las diagonales se sueldan al labio rigidizador del cordón, tratándose de una unión compleja entre barras desde el punto de vista estructural, lo que hace que se dificulte su evaluación mediante métodos tradicionales. El estudio se desarrolla en el CECOVI, UTN, Facultad Regional Santa Fe, donde se realizan ensayos a escala real, cuyos resultados son comparados con los valores obtenidos a partir de modelos de elementos finitos y análisis numéricos no lineales, dando como resultado que el comportamiento de los modelos y ensayos es similar y la capacidad de carga real de la viga se reduce significativamente comparando con la teórica, correspondiente a un reticulado ideal con una adecuada transferencia de esfuerzos en los nudos.

Palabras clave: Vigas reticuladas; Perfiles conformados en frío; Conexión soldada, Ensayos a escala real; Modelos de elementos finitos

Abstract

This paper analyzes a solution for truss beams used in small-scale warehouse constructions. These are designed with cold-formed C-section profiles, featuring a particular connection where the diagonals are welded to the lip stiffener of the chord, resulting in a complex joint from a structural standpoint, which complicates its evaluation using traditional methods. The study is conducted at CECOVI, UTN, Faculty of Regional Santa Fe, where full-scale tests are performed. The results are compared with values obtained from finite element models and nonlinear numerical analyses, showing that the behavior of the models and tests is similar. However, the actual load capacity of the beam is significantly reduced when compared to the theoretical capacity, which corresponds to an ideal truss with proper force transfer at the nodes.

Keywords: Truss beams, Cold-formed sections; welded connection; Finite element models; Nonlinear numerical analysis

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

1. Introducción

Las teorías que estudian el comportamiento estructural de vigas reticuladas, en general se centran en lo que se conoce como reticulado ideal, para lo cual deben cumplirse con las siguientes hipótesis en su diseño: las barras se conectan en los nudos, y estos son articulaciones sin fricción, todas las barras son rectas y coplanares, las cargas y las barras están en un mismo plano y las cargas se aplican en los nudos.
En reticulados de gran envergadura con cargas significativas y grandes luces, mantener la hipótesis de reticulado ideal asegura la eficiencia de la estructura y un comportamiento correcto, ya que las barras trabajan principalmente bajo los esfuerzos axiales de tracción y compresión.
Para lograr que las barras se encuentren en nudos teóricos, es común recurrir al uso de elementos auxiliares de conexión como chapas o cartelas de nudo que permitan la intersección de sus ejes baricéntricos. Sin embargo, este proceso aumenta la complejidad de la fabricación y exige mayores recursos para realizar el trabajo de manera adecuada. Por esta razón, en la práctica es frecuente que las hipótesis del reticulado ideal no se cumplan en su totalidad.
En este trabajo se analizan vigas que por un lado presentan un desvío de las hipótesis principales y que, además, utiliza una solución de conexión muy especial, ya que las uniones entre las diagonales y los cordones de las vigas son soldadas a través del labio rigidizador del cordón, adoptándose la geometría de las secciones tipo C de los perfiles conformados en frío.
A lo largo del proceso de investigación previo, se encontraron múltiples estudios acerca de vigas reticuladas a partir de perfiles conformados en frio, por ejemplo, Dizdar et al., (2019) [1] propusieron una serie de ensayos en vigas reticuladas con perfiles conformados con diferentes tipos de uniones y elementos de conexión. Luego Zagórowska et al., (2020) [2] realizaron ensayos de vigas reticuladas con excentricidades de nudo y uniones atornilladas observando problemas de estabilidad que comienzan en dichas conexiones. Ungureanu et al., (2021) [3] investigaron la eficiencia de las soldaduras por puntos en vigas armadas mediante chapas trapezoidales. Sin embargo, en la mayoría de los trabajos de investigación las uniones son realizadas mediante bulones, debido a que es una solución que no implica mano de obra especializada, pero como contrapartida, se requiere de los equipos de control numérico en fabrica que se encargan de generar los agujeros correspondientes. Por otro lado, no se observaron trabajos de investigación relacionadas con vigas reticuladas soldadas de este tipo.
En la primera etapa de la investigación se evaluó y analizó el comportamiento de este tipo de nudos, recurriendo al uso de modelos de elementos finitos con no linealidad material y geométrica. Los softwares utilizados fueron calibrados a partir de resultados de ensayos reales a escala, donde se aísla un nudo a modo de simplificación (probeta en forma de T) y se comparan las deformaciones producidas con las teóricas obtenidas en los modelos numéricos, lo cual describieron Gelfuso, Sosa., (2023) [4] y también Avendaño, et al., (2023) [5].
El presente artículo continúa con la línea de investigación de la fase inicial, pero el análisis se centra en el estudio del comportamiento de vigas completas. Para ello se recurre al uso de los mismos recursos y procedimientos de la primera etapa, es decir, el modelado de reticulados con elementos finitos y ensayo a escala real de celosías con esta tipología de nudos.
El objetivo es analizar el comportamiento y capacidad de carga de las vigas mediante elementos finitos y ensayos de escala real, realizando una comparativa de resultados entre ambos. A su vez, particularmente, se estudia el comportamiento de la unión con el fin de evaluar cómo influye en la capacidad de carga global del sistema. Para ello, se define una viga tipo para proceder con el estudio mediante ambas metodologías establecidas (**Figura 1**), las cuales se describen en la siguiente sección.

2. Materiales y metodología

Los modelos se realizan con el Software SimSolid (Versión 22.2.1), el cual permite trabajar con modelos no lineales, por lo que es útil cuando el sólido bajo el aumento de carga comienza a plastificarse. Esto se realiza para evaluar el comportamiento y capacidad de la viga cuando la falla se produce por plastificación de la unión entre diagonales y cordones, ya que allí radica la particularidad de este sistema. Además, se modeló la viga en el Software RAM Elements, con el fin de analizar las condiciones de estabilidad global y local de los elementos, para garantizar que la falla no ocurra de esta manera. Finalmente, la viga a ensayar queda diseñada como se muestra en la **Figura 1**.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

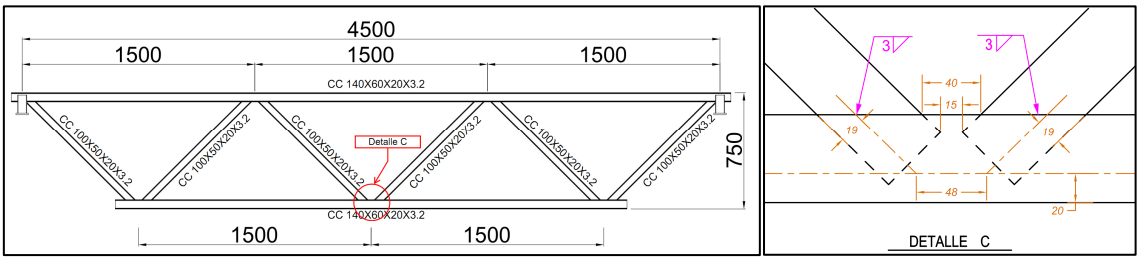


Figura 1. Geometría de viga reticulada con perfiles conformados en frío soldados a labios rigidizadores de cordones

2.1 Materiales

Como se observa en la **Figura 1**, las probetas están fabricadas con PCF, unidos mediante soldadura en el labio rigidizador de los cordones, cuyo detalle se muestra en la **Figura 2**. Las diagonales se materializan con perfiles C 100x50x20x3,2mm, mientras que los cordones con perfiles C 140x60x20x3,2mm debido que requieren una mayor longitud de alma para permitir que los primeros ingresen al mismo. El material de los perfiles es acero ZAR 250.



Figura 2: Detalle de nudo

2.2 Modelos Numéricos

2.2.1 SimSolid

Se modelaron dos vigas reticuladas isostáticas con catetos de soldadura de 3 mm y 5 mm, bajo la acción de dos cargas puntuales aplicadas en los nudos internos superiores. Esta carga comienza desde los 10 kN, aumentado cada un intervalo de 10 [kN], hasta llegar a los 60 kN (zona donde comienza a plastificar), donde el escalón de carga se reduce a 5 kN hasta alcanzar una carga de 100 kN. Para cada escalón de carga se toma la deformación vertical en el punto medio de la luz de la viga. A su vez para garantizar la compatibilidad de los resultados del software con los del ensayo, se realizaron ensayos de tracción de cuatro probetas del material utilizado para la fabricación de las vigas, denominado ZAR250, obteniéndose una tensión de fluencia mínima Fy=350 Mpa y de rotura mínima Fu= 430 Mpa, datos que fueron utilizados para definir el material dentro de los modelos con comportamiento bilineal. El material de la soldadura también se define con comportamiento bilineal con la curva tensión-deformación teórica. Finalmente, la viga queda modelada como se muestra en la **Figura 3**.

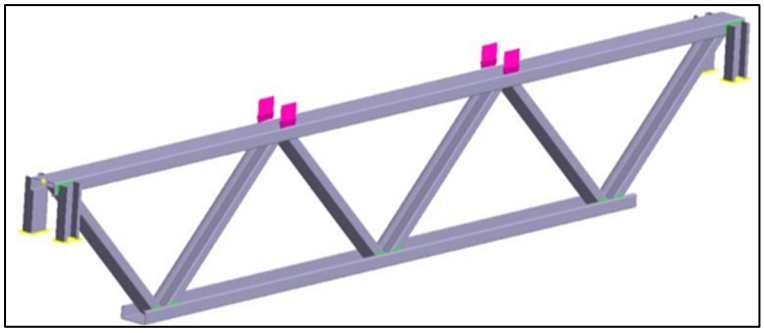


Figura 3. Modelo de viga reticulada con perfiles conformados en frío soldados a labios rigidizadores de cordones – SimSolid

El análisis no lineal realizado no contempla problemas de estabilidad, los que son analizados mediante un software que verifica normativamente estos problemas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

2.2.2 RAM Elements

Se realizó el modelado de la viga en RAM Elements, software que trabaja con elementos finitos de barras, con el fin de verificar los estados límites de pandeo global y local, cuya verificación no se tuvo en cuenta en el SimSolid. Además, se realizó un análisis de sensibilidad de las diferentes variables que intervienen en el comportamiento de la viga, para lo cual se plantearon diferentes tipos de unión entre barras (articuladas o empotradas) y excentricidades, como se muestra en la **Figura 4**, contemplando los casos extremos, sabiendo que, si bien son difíciles de alcanzar en la práctica y nos encontramos en un término intermedio, son más sencillos de modelar.

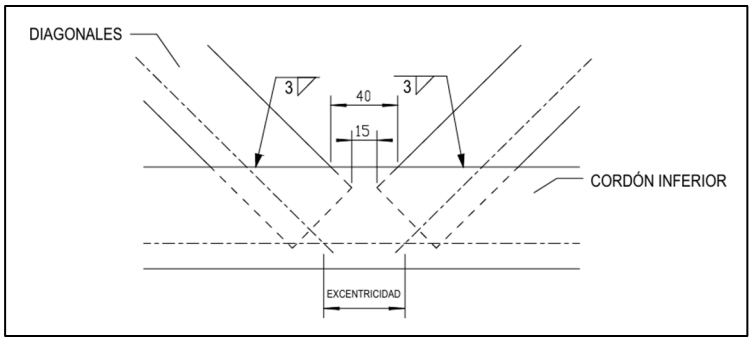


Figura 4: Excentricidad de diagonales

Se realizaron dos tipos de modelos (M1, M2) que, a su vez, cada uno de estos tiene dos diferentes tipos de uniones, es decir, sus barras son completamente articuladas o empotradas en sus extremos, dando como resultado cuatro distintas configuraciones finales: Modelo de viga reticulada con excentricidades reales (Exc. Inf.=48mm; Exc. Sup.=11mm) y fluencia real del material (M1) y Modelo de viga reticulada sin excentricidades y fluencia real del material (M2).

A partir de los resultados de los distintos modelos bajo los mismos escalones de carga realizados en los modelos de SimSolid, se puede abordar a una primera conclusión que es la mínima variación de las deformaciones entre modelos considerando articulaciones o empotramientos. Esto se debe principalmente a la gran diferencia de rigidez relativa, entre elementos individuales (cordones y diagonales) y la estructura completa.

Por otro lado, debido a la presencia de la excentricidad entre diagonales y cordón inferior, se presentan momentos flectores y esfuerzo de corte locales en los nudos. Ante esta situación la capacidad a corte del cordón llega a su límite, de acuerdo a criterios normativos, para una carga total de 90 kN. En el caso de la solución articulada la flexión en el cordón es mayor y por lo tanto la interacción corte-flexión es más desfavorable. Este valor de carga límite es similar al obtenido mediante el análisis en SimSolid.

Finalmente, de los resultados observados de estos modelos, se concluye que no existen problemas de pandeo local en las secciones utilizadas para la fabricación de las probetas a ensayar y que es necesario reducir la longitud de pandeo del cordón superior fuera del plano de la viga, a la mitad de la luz. De esta forma la capacidad del cordón alcanza un valor de 143 kN a compresión y por lo tanto no será una limitante para lograr los valores últimos de carga determinados con el modelo.

2.3 Ensayo a Escala

Para el ensayo se fabricaron dos probetas de vigas reticuladas bajo la misma configuración geométrica, siendo el mismo realizado en el Laboratorio de grandes estructuras del Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI) en la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe.
La viga posee una longitud de 4,50 metros entre apoyos, siendo 1,50 metros la distancia entre la unión de las diagonales. La forma de la misma y disposición se puede observar en la **Figura 5**.

El procedimiento del ensayo se lleva a cabo posicionando cada una de las vigas en dos apoyos extremos tipo caballetes, en donde en uno de ellos apoya de forma directa simulando un apoyo fijo, y en el opuesto lo hace sobre un rodillo que representa un apoyo móvil, de tal manera de constituir un esquema estructural isostático. A su vez, se realiza un arrostramiento del cordón superior en su punto medio, de manera tal que el pandeo fuera del plano del mismo no gobierne la capacidad de carga.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

La carga sobre la viga se produce mediante la acción de un gato hidráulico colocado por encima de la misma y sobre dos perfiles IPN160, de manera de transformar una única carga puntual en dos fuerzas sobre los nudos del cordón superior. El gato reacciona sobre un pórtico de carga y transmite el esfuerzo a la estructura.
El ensayo se plantea mediante una serie de escalones de carga predefinidos como se mencionó en la etapa de modelado. Para cada escalón de carga se toma la medida de deformación de la viga en el nudo inferior central mediante 2 comparadores centesimales marca Mitutoyo. Además, se realiza una medición adicional mediante nivel óptico, sobre una regla dispuesta en el centro del cordón superior.



Figura 5. Disposición de viga reticulada durante el ensayo

3. Resultados

A continuación, en la **Tabla 1**, se presentan los resultados obtenidos del software, resumidos en la **Tabla 1**, discriminandolos en función del cateto de soldadura considerado.

Tabla 1. Cargas y deformaciones [mm] – para catetos de soldadura de 3 y 5 [mm] - SimSolid

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Def-W 3 (mm)	0.0	0.9	1.8	2.7	3.8	4.9	6.5	7.5	8.9	10.6	13.1	16.3	21.9	33.2	52.7
Def-W 5 (mm)	0.0	0.9	1.7	2.6	3.5	4.4	5.5	6.0	6.7	7.4	8.2	9.2	10.7	13.0	15.8

De la misma manera que para el modelado de elementos finitos, se obtiene la **Tabla 2**, donde se muestran los escalones de carga aplicados y las deformaciones correspondientes.

Tabla 2. Carga y deformación [mm] - Ensayos

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Prob. N°1	0.0	1.0	2.1	3.1	4.2	5.1	6.0	7.5	10.0	14.5	31.2	-	-	-	-
Prob. N°2	0.0	1.2	2.5	3.7	4.9	6.3	8.1	9.5	11.7	16.8	22.1	28.0	32.4	35.4	-

Con los valores de la **Tabla 1** y la **Tabla 2** se obtiene el gráfico presentado en la **Figura 6**, el cual representa la deformación vs carga aplicada, con el fin de analizar el comportamiento de las probetas y compararlos con los modelos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

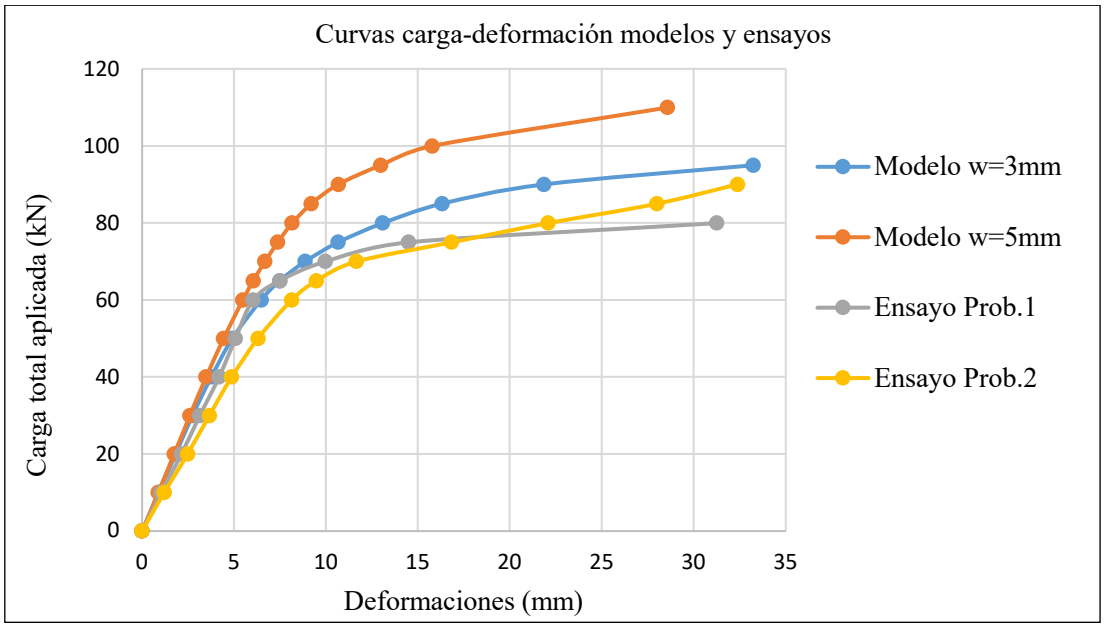


Figura 6. Gráfico Comparativo Carga - Deformación (Ensayo – SimSolid)

Se aprecia un comportamiento similar en los diagramas carga-deformación de modelos y ensayo, resultando mayor rigidez y capacidad de carga en los modelos. A su vez, ambas vigas poseen un comportamiento elástico general, por debajo del modelo, hasta alcanzar el escalón de carga de 50 kN en el ensayo, 60kN en el modelo de soldaduras 5mm y 50kN en el modelo de soldaduras de 3mm. Se percibe en el modelo, que las soldaduras son las primeras en plastificar, extendiéndose poco a poco hacia el perfil. Por otro lado, en particular, en el ensayo de la probeta N°2, se observa que comienza a tomar carga nuevamente a partir de la deformación de 20 mm de deformación en estado de plastificación, fenómeno que se produce cuando la diagonal empieza a tener contacto con el alma del cordón debido al descenso excesivo, lo que genera un leve incremento de la capacidad de carga.

En cuanto al comportamiento del nudo, se destaca la incidencia de las excentricidades, tanto en los modelos como en el comportamiento real de la viga ya que, como se observa en la **Figura 7**, los nudos inferiores presentan grandes deformaciones, fallando primero en el nudo inferior de la primera diagonal, debido al trabajo de los cordones a flexión.

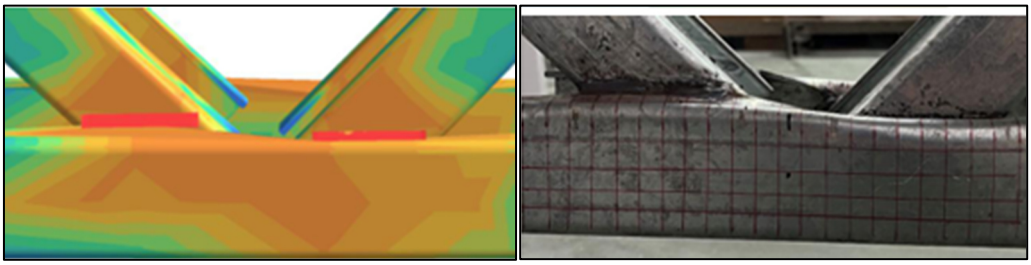


Figura 7. Deformación en nudo modelo vs ensayo

4. Conclusiones

En el presente trabajo se recurre a modelos de elementos finitos y ensayos en escala real para analizar el comportamiento de vigas reticuladas con nudos soldados a través del labio rigidizador de los cordones. Los resultados obtenidos de los modelos muestran un comportamiento similar al real, aunque presentan una mayor capacidad de carga, lo que sugiere que no son conservadores. A pesar de esta similitud en el comportamiento, la capacidad de carga real de la viga está condicionada por el desempeño del nudo, resultando significativamente inferior a la capacidad posible de los elementos que la conforman. Tanto los ensayos como los modelos permiten concluir que, en la unión, el labio rigidizador trabaja a flexión para transmitir los esfuerzos. Finalmente, la capacidad de carga está gobernada por la plastificación que ocurre en los nudos debido a la excentricidad de las barras y la transferencia indirecta de las cargas a través del labio rigidizador.

5. Referencias Bibliográficas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

[1] Dizdar, C.; Baran, E.; Topkaya C. (2019). “Strength and stiffness of floor trusses fabricated from cold-formed steel lipped channels”. Engineering Structures, 181, 437–457.
[2] Zagórowska, M.; Galewska, E.; Deniziak, P. (2020). “Experimental investigation of joint with positive eccentricity in CFS truss”. Thin-Walled Structures, 157, 106998.
[3] Ungureanu, V.; Both, I.; Burca, M.; Radu, B.; Neagu, C.; Dubina, D. (2021). “Experimental and numerical investigations on built-up cold-formed steel beams using resistance spot welding”. Thin-Walled Structures, 161, 107456.
[4] Gelfuso, J.; Sosa, M. (2023). Nudos de vigas reticuladas con perfiles conformados en frío. Estudio preliminar. Jornada de Jóvenes Investigadores Tecnológicos 2023.
[5] Avendaño L., Erck P., Ruffo H. (2023). Nudos soldados en vigas reticuladas con perfiles conformados en frío. Análisis y comportamiento. Revista IE N°76, ISSN 16671511 (año 27), página 28.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Retención de contaminantes del agua de lluvia en hormigón drenante

Retention of stormwater pollutants in Pervious Concrete

Presentación 18/10/2024

Fernando L. Fogliatti

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: ffogliatti@frsf.utn.edu.ar

Rocío C. Goddio

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: rgoddio@frsf.utn.edu.ar

Santiago A. Noguera Vivas

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: snogueravivas@frsf.utn.edu.ar

Resumen

El agua de lluvia es una fuente de contaminantes que, cuando se desplaza en forma de escorrentía superficial puede alcanzar cursos de agua y afectar su calidad. En techos, paramentos y pavimentos se depositan contaminantes como sedimentos, sales u otros residuos provenientes del funcionamiento de vehículos, que son arrastrados hacia los sistemas de desagües pluviales y posteriormente a los cursos de agua.
Un sistema compuesto por baldosas de hormigón drenante fue evaluado en relación con su capacidad de retener contaminantes provenientes de una cubierta de grandes dimensiones en un entorno urbano. La evaluación consistió en la toma de muestras del agua que atraviesa el sistema propuesto y del agua que no recibe tratamiento. Los resultados mostraron una reducción significativa de los contaminantes evaluados, alcanzando una disminución de residuos sólidos del 89 %, del 99 % de la materia orgánica y un aumento del pH de hasta un 23%.

Palabras clave: Hormigón drenante; Contaminantes; Agua de lluvia; Calidad del agua

Abstract

The stormwater is a source of contaminants that, while moving as surface runoff, can reach watercourses and affect their quality. Pollutants such as sediments, salts, and other residues from vehicles accumulate on roofs, walls, and pavements. These contaminants are then washed into stormwater drainage systems and eventually into watercourses.
A system composed of pervious concrete tiles was evaluated concerning its capacity to retain pollutants from a large-scale rooftop in an urban environment. The evaluation involved water sampling, one passing through the proposed system and the other from untreated water. The results showed a significant reduction of pollutants contents evaluated, achieving a decrease of 89% in suspended solids, 99% in organic matter, and an increase in pH up to 23%.

Keywords: Pervious concrete; Polluntants; Stormwater; Water quality

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

1. Introducción

La rápida urbanización transforma las superficies naturales en áreas impermeables, como carreteras, techos y estacionamientos (Arnold Jr. y Gibbons. 1996), lo cual incrementa el riesgo y probabilidad de contaminación. El aumento de la impermeabilidad favorece la conectividad hidrológica dentro de una cuenca, lo que provoca un mayor volumen de escorrentía y un flujo pico más alto. Como resultado, se descargan mayores cantidades de contaminantes en las aguas receptoras (Zhao et al. 2018).

En las superficies impermeables generadas en las nuevas urbanizaciones, se depositan contaminantes tales como sedimentos, sales o residuos asociados a vehículos. Éstos permanecen en las superficies hasta que el agua de lluvia los arrastra hacia los desagües pluviales, a través de los cuales alcanzan cursos de agua superficial afectando potencialmente a la fauna, generando perdida de hábitat, del valor estético y contaminación del agua (USEPA, 2005).

En los ambientes naturales, donde se mantienen elevadas proporciones de superficies permeables que posibilitan la infiltración del agua pluvial a los suelos, la retención de contaminantes se produce en esos medios porosos como resultado de procesos complejos. Por lo general, se distinguen dos tipos de filtración, dependiendo del tamaño de las partículas (Dechesn, et al. 2003): la filtración mecánica que afecta a las partículas grandes, mientras que las de menor tamaño se ven modificadas por procesos de filtración fisicoquímica.

El aumento de los volúmenes de escorrentía superficial generado por las tormentas resulta en mayores volúmenes asociados a los escurrimientos iniciales (first flush), los cuales contienen una cantidad importante de contaminantes y acrecientan el riesgo de inundaciones rápidas (Haselbach et al. 2006). Para abordar esta problemática, una técnica de control son los Desarrollos de Bajo Impacto (LID) que se enfocan en la captación de contaminantes convencionales urbanos reduciendo los volúmenes de descarga (Ma et al. 2018). Entre ellas se puede mencionar, cisternas de captación, pavimentos permeables, techos verdes y bio retención, entre otros (Ahiablame et al. 2016).

Aplicando este concepto, han desarrollado sistemas de pavimentos alternativos, entre ellos el hormigón drenante ha resultado ser muy conveniente por sus beneficios económicos, estructurales y respecto a su superficie de rodamiento. El hormigón drenante es un material con una estructura de poros abierta que permite el paso del agua a través de su masa, y se caracteriza por estar compuesto de agregado grueso de granulometría uniforme, cemento portland, agua y aditivos, omitiendo el uso de finos para lograr un porcentaje de vacíos entre el 15 % y 35 % (Kováč et al. 2018). Su estructura se fundamenta en la interacción directa entre los agregados, donde los puntos de contacto entre las partículas recubiertas con pasta de cemento se consiguen mediante una compactación adecuada. Este diseño permite mantener valores de resistencia a la compresión que varían entre 3,5 MPa y 28 MPa con permeabilidades asociadas entre 0,14 y 1,22 cm/s (ACI Committee 522. 2010).

Cuando se emplea este material para la retención, una parte del agua de lluvia se infiltra en el suelo, de modo que se reduce la escorrentía superficial y los contaminantes transportados por el agua infiltrada son filtrados por el suelo subyacente (USEPA, 2009). Debido a la estructura abierta de los hormigones drenantes, resulta un ambiente aireado y que se humedece periódicamente por las lluvias, donde suelen generarse ecosistemas similares a los que se encuentran en los filtros percoladores de aguas residuales, lo que permite reducir sólidos suspendidos, nutrientes, y la demanda biológica y química de oxígeno (DBO y DQO). La efectividad en la reducción de DBO y DQO varía según la granulometría y el espesor del material, con mayores reducciones observadas con agregados más grandes y espesores mayores. Para un espesor de 20 cm, la reducción puede alcanzar el 54 % y 68 % para DQO y DBO, respectivamente (Kim et al. 2017). Además, el hormigón drenante puede retener contaminantes orgánicos, inorgánicos y metales pesados en su estructura de poros (Drake et al. 2014).

A pesar de los beneficios mencionados, no se han realizado investigaciones que permitan comprender la capacidad de depuración del hormigón drenante con los materiales y bajo las condiciones locales.

En este artículo se estudió la modificación del contenido de residuos sólidos, materia orgánica y acidez del agua de escorrentía superficial causada por la lluvia en la ciudad de Santa Fe. Para estas determinaciones se empleó un módulo de hormigón drenante, que recibe el agua de lluvia proveniente de una cubierta de grandes dimensiones y permite evaluar la calidad del agua que atraviesa el módulo y la que se almacena de escorrentía directa para su posterior comparación. El análisis presentado forma parte de un proyecto de mayor extensión (PID: ECTCFE8795C *"Hormigones Drenantes sobre la retención y percolación de agua y su depuración"*.) que busca desarrollar el sistema planteado para su utilización como propuesta de intervención en desagües pluviales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

2. Materiales y métodos

Como un primer paso en la evaluación de la capacidad de filtración del agua proveniente de escorrentía a través del hormigón drenante, se propuso la colocación de un módulo ejecutado en este material, ubicado en una cámara de desagüe pluvial, que recibe de forma directa el agua que escurre por una cubierta de chapa de 25m x 10m, por los paramentos verticales del edificio y un portón metálico de 3m x 4m. En cada precipitación, las partículas sólidas y materia orgánica que se almacenan en estas superficies son arrastradas por el agua y convergen a la cámara de desagüe mencionada. En la cámara se instalaron dos recipientes recolectores como se muestra en la figura 1. Uno de ellos almacena el agua que se infiltra a través del bloque de hormigón drenante y cae en el recipiente, mientras que en el otro se almacena el agua que cae de forma directa sin ningún tipo de tratamiento, de este último se tenía un segundo recipiente que funcionaba como resguardo ante una posible pérdida de la muestra del agua sin proceso de filtrado.

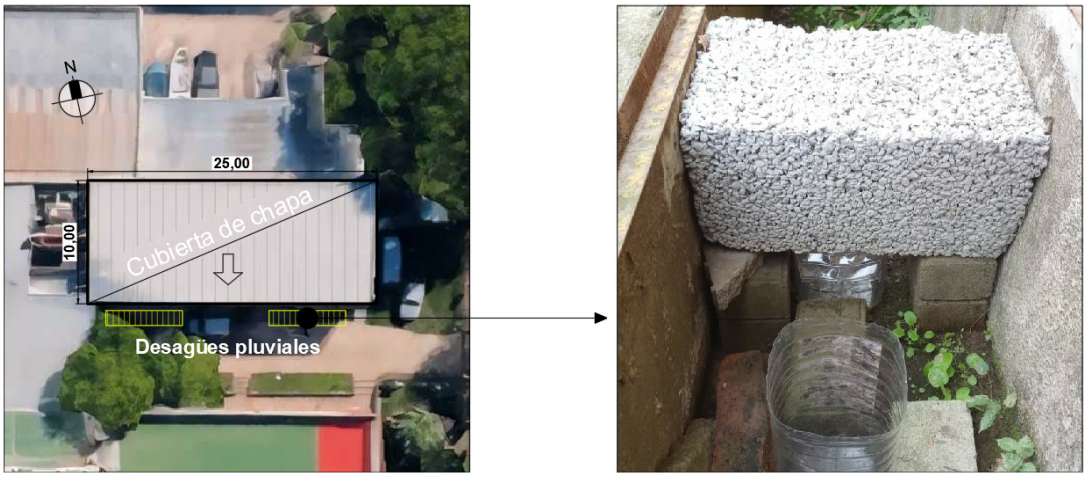


Figura 1. Ubicación y disposición de módulo drenante y recolectores.

2.1 Materiales y dosificación de la mezcla

El hormigón empleado se dosificó utilizando el método propuesto por ACI 522R-10, para un volumen de pasta de 15%, volumen de vacíos teórico de 20% y relación agua/cemento de 0,35. Las cantidades finales para elaborar un metro cúbico fueron de 1494 kg de piedra partida granítica 3-9 mm con TMN = 9,5 mm (según IRAM 1505), 220 kg de cemento portland compuesto CPC-40 (según IRAM 50000) y 77 kg de agua potable de red, que cumple con los requisitos del reglamento CIRSOC 201 y la norma IRAM 1601.

Se moldearon probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, con el objetivo de evaluar las propiedades de la mezcla resultante. Se obtuvo una resistencia a compresión a 28 días de 5 MPa, densidad seca de 1691 kg/m^3, volumen de vacíos de 41%, absorción de 5,4% y permeabilidad medida con permeabilímetro de carga variable de 1,14 cm/s.

Con el mismo hormigón se ejecutaron módulos trapezoidales de 20 cm de base menor, 28 cm de base mayor, 20 cm de altura y 50 cm de profundidad, los cuales se compactaron en 3 capas, con 27 golpes cada una, proporcionando una energía de 152,7 kJ/m^3 utilizando un pisón Proctor modificado. Finalmente, estos elementos se introdujeron en una pileta de agua saturada con cal a temperatura de 23 +/-2°C para el curado hasta la edad de 28 días. La configuración del bloque se debe a que han sido aprovechados de los ejecutados en el marco de otras investigaciones en desarrollo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025



Figura 2. Módulo ejecutado.

2.2 Ensayos

De ambos recipientes dispuestos, se recolectaron muestras en lluvias ocurridas en seis periodos de precipitación comprendidas entre febrero y julio de 2024, a las cuales se les realizó la medición de residuos sólidos y materia orgánica siguiendo la norma IRAM 1601 y la medición del potencial de hidrogeno mediante cintas de pH y un pHmetro digital, el cual se calibró en cada ensayo, empleando soluciones buffer con un pH de 4, 7 y 10. Posterior de su calibración, se procedió a lavar el electrodo en agua destilada previo a introducirlo en cada una de las muestras.

Para la determinación de la cantidad de residuos sólidos (R) se colocaron 100ml (V) del agua de ambas muestras en una cápsula de porcelana previamente tarada, se realizó evaporación a baño maría, posteriormente se colocó en estufa entre 120 °C y 130 °C durante 1h, se dejó enfriar y se tomó su peso final (mi). Luego, se calculó R en función de la ecuación (1):

$$R = \frac{m_i \,.\, 10^6}{V} \tag{1}$$

La muestra obtenida en la determinación previa fue calcinada en mufla a temperaturas comprendidas entre 600 y 650°C y se dejó enfriar para su posterior pesaje (mf). La cantidad de materia orgánica (MO) se obtiene mediante la ecuación (2):

$$MO = m_i - m_f \tag{2}$$

3. Resultados y discusión

Los resultados del agua analizada se muestran en la tabla 1 con la fecha y la altura de precipitación asociada, tanto para la que atraviesa el elemento de hormigón drenante como para aquella sin tratar. La altura de precipitación ha sido tomada del Centro de Informaciones Meteorológicas de UNL – FICH.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 1. Resultados.

Datos generales			Medición a través de Drenante				Medición escurrimiento libre			
N° de muestra	Fecha	Altura de Precipitación [mm]	Altura de Precipitación Total [mm]	pH	Residuos Sólidos [gr/dm^3]	Materia Orgánica [gr/dm^3]	pH	Residuos Sólidos [gr/dm^3]	Materia Orgánica [gr/dm^3]
1	9/2/2024 12/2/2024	9,50 27,25	36,75	6,00[1]	85,00	59,00	6,00[1]	788,50	595,50
2	23/2/2024 24/2/2024 25/2/2024	25,75 2,00 45,50	73,25	6,00[1]	76,67	26,67	6,00[1]	278,00	185,00
3	14/3/2024 15/3/2024 16/3/2024	15,25 7,50 4,50	27,25	6,00[1]	99,33	3,50	6,00[1]	200,00	355,67
4	3/4/2024 6/4/2024	19,00 2,50	21,50	6,00[1]	88,67	48,50	6,00[1]	108,00	63,33
5	12/4/2024 13/4/2024 14/4/2024 15/4/2024	8,50 18,00 59,75 29,25	115,50	6,00[1] 8,09[2]	93,33	19,00	6,00[1] 6,59[2]	616,50	96,50
6	15/7/2024 19/7/2024	0,25 21,50	21,75	6,00[1] 7,37[2]	236,67	97,50	6,00[1] 7,00[2]	492,50	128,50

En la figura 3 se puede observar la variación de los parámetros analizados en el agua. Los residuos sólidos muestran un drástico descenso al pasar por el filtro, exponiendo una reducción entre el 18 y 89 %, comportamiento similar que se da en la materia orgánica, logrando una disminución entre un 23 y 99 %. La disminución de residuos sólidos es importante para los LID, ya que se identifican como uno de los contaminantes más significativos en los escurrimientos de agua de lluvia, por su capacidad de absorber otros contaminantes químicos como metales pesados, hidrocarburos, nutrientes y materia orgánica. (Chang et al., 2016; Djukic et al., 2016; Nielsen et al., 2015).

Respecto del pH, las primeras cuatro determinaciones no permitieron obtener resultados concluyentes debido a que fueron medidos con cintas de pH, las cuales presentan generalmente una baja sensibilidad en el rango de 7, dichas mediciones corresponden a las referenciadas con “1”. Consecuentemente, los datos recopilados no fueron considerados para el análisis y se modificó el método para su medición con un pHmetro para las muestras identificadas con “2”, las cuales presentaron un aumento de la alcalinidad entre un 5 a 23%.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

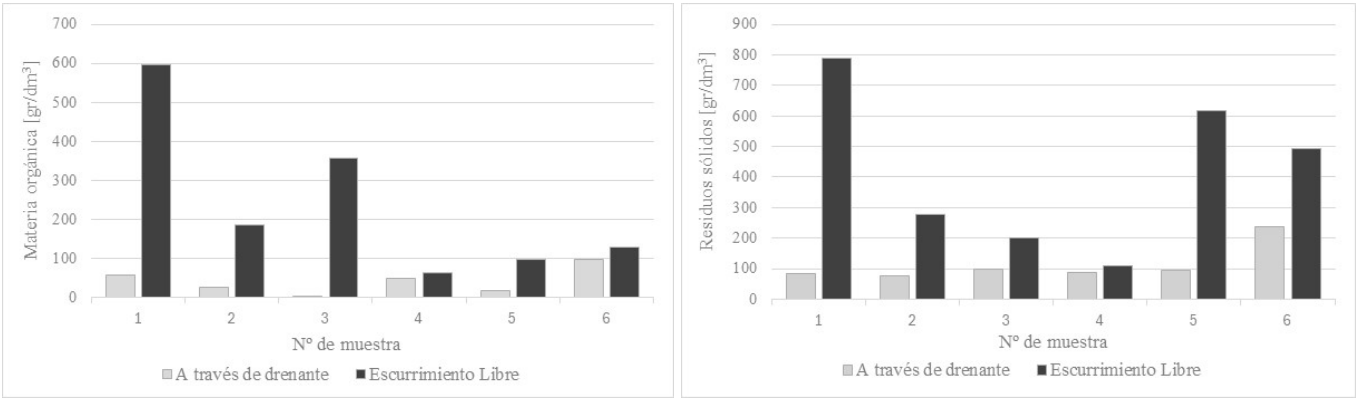


Figura 3. Resultados de materia orgánica y residuos sólidos.

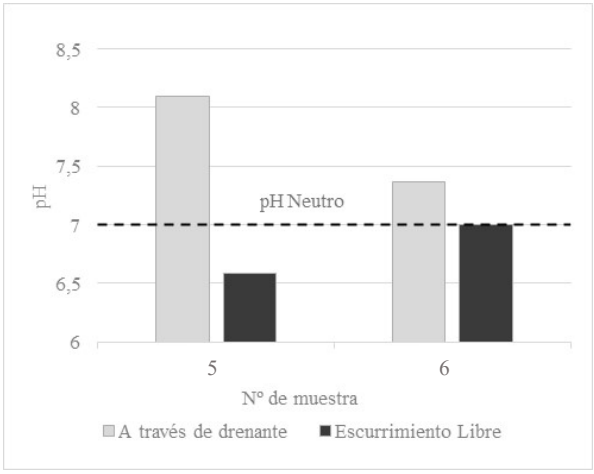


Figura 4. Resultados de medición de pH.

4. Conclusiones

El análisis realizado en este artículo, mediante la implementación de un prototipo a escala reducida, confirmó la eficacia del uso de hormigones drenantes como filtros para aguas pluviales, demostrando una notable capacidad para purificar el agua de lluvia que arrastra contaminantes en entornos urbanos.

Se verificó la viabilidad de fabricar elementos de hormigón drenante con los materiales locales para la confección de sistemas de captación pluvial.

Se registró una reducción de hasta un 89% en residuos sólidos y un 99% en materia orgánica, para una longitud de filtro de 20 cm. Se observó un aumento de la alcalinidad del agua de hasta un 23%.

La variedad y cantidad de contaminantes presentes en las ciudades requiere una investigación más exhaustiva de este material para evaluar su eficacia en la captura de estos contaminantes a largo plazo. Además, es necesario analizar cómo la obstrucción de los poros por estos contaminantes podría afectar la permeabilidad del hormigón con el tiempo.

Por lo tanto, en futuras investigaciones, se planea la incorporación de módulos de diferentes dosificaciones, colocados a su vez en puntos de recolección donde las características del agua permitan considerar en el análisis un espectro más amplio de contaminantes. De esta forma, se permitirá evaluar el rendimiento del material ante condiciones disímiles y se aumentará el número de ensayos realizados, optimizando su diseño a fin de contribuir en la mejora de la calidad del agua de los sistemas de drenaje urbano.

Referencias bibliográficas

Arnold Jr., C.L., Gibbons, C.J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. Journal of American Planning Association, 62, pp 243-258.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Zhao, H., Jiang, Q., Xie, W., Li, X., Yin, C. (2018). Role of urban surface roughness in road-deposited sediment build-up and wash-off. J. Hydrol, 560, pp. 75-85.
USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2005). Stormwater Phase II Final Rule; Office of Water, USEPA: Washington, DC, USA.
Dechesne M., Barraud S., Bardin J. (2003). Spatial distribution of pollution in an urban stormwater infiltration basin, Journal of Contaminant Hydrology, 75, pp. 189-205.
Haselbach, L., Valavala, S., Montes, F. (2006). Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems, Journal of Environmental Management, 81, pp. 42-49.
Ma, Y., He, W., Zhao, H., Zhao, J., Wu, X., Wu, W., Li, X., Yin, C. (2019) Influence of Low Impact Development practices on urban diffuse pollutant transport process at catchment scale, Journal of Cleaner Production, 213, pp. 357-364.
Ahiablame, L., Shakya, R., (2016). Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale. J. Environ. Manag, 171, pp. 81-91.
Kováč, M.; Sičáková, A. (2018). Pervious Concrete as an Environmental Solution for Pavements: Focus on Key Properties, Environments 5,11.
ACI Committee 522, (2010). Report on Pervious Concrete, ACI 522R-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, pp. 1-38.
USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2009). Pervious Concrete Pavement; National Pollutant Discharge Elimination System, USEPA: Washington, DC, USA.
Kim, G.M., Jang, J. G., Khalid, H. R., Lee, H. K. (2017). Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates, Construction and Building Materials, 136, pp. 1-8
Drake J., Bradford, A., Van Seters, T. (2014). Stormwater quality of spring–summer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement, Journal of Environmental Management, 139, pp. 69-79.
Chang, N., Lin, K.S., Wanielista, M.P., Crawford, A.J., Hartshorn, N., Clouet, B. (2016). An innovative solar energy-powered floating media bed reactor for nutrient removal (I): reactor design, Journal of Cleaner Production,133, pp. 495-503.
Djukić, A., Lekić, B., Rajaković-Ognjanović, V., Veljović, D., Vulić, T., Djolić, M., Naunovic, Z., Despotović, J., Prodanović, D. (2016). Further insight into the mechanism of heavy metals partitioning in stormwater runoff, Journal of Environmental Management, 168, pp. 104-110.
Nielsen, K., Kalmykova, Y., Strömvall, A.-M., Baun, A., Eriksson, E., 2015. Particle phase distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in stormwater using humic acid and iron nano-sized colloids as test particles. Science of The Total Environment, 532, pp. 103-111.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

	-
Área prioritaria:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Criterios para la Aplicación Práctica del Método de los Factores de la Norma ISO 15686 para la Estimación de la Vida Útil en Edificaciones Patrimoniales

Criteria for the Practical Application of the ISO 15686 Standard Factor Method for Estimating the Useful Life of Heritage Buildings

Presentación 2/09/2024

Catalina Cerutti

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: ccerutti@frsf.utn.edu.ar

Augusto Baqué

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: abaque@frsf.utn.edu.ar

Resumen

En los últimos años, ha aumentado el interés por determinar la vida útil de las construcciones, impulsado por factores económicos, ambientales, patrimoniales y sociales. La durabilidad de una construcción depende de la naturaleza y duración de las acciones destructivas, así como del uso y su entorno. Conocer los principios físicos, mecánicos y químicos de las acciones en los materiales es crucial. Sin embargo, fuera de los parámetros de diseño, la vida útil no siempre se puede prever con precisión. La determinación de la vida útil busca obtener predicciones confiables con la información disponible actualmente. En construcciones patrimoniales de más de cien años, la falta de métodos desarrollados en su época para evaluar la durabilidad dificulta la obtención de datos precisos sobre su vida útil. Este trabajo informa los avances en la determinación de lineamientos para la estimación de la vida útil de construcciones patrimoniales, utilizando la norma ISO 15686.

Palabras clave: Vida Útil, Durabilidad, Patrimonio

Abstract

In recent years, there has been increased interest in determining the service life of buildings, driven by economic, environmental, heritage, and social factors. The durability of a building depends on the nature and duration of destructive actions, as well as its use and environment. Understanding the physical, mechanical, and chemical principles of these actions in materials is crucial. However, outside of design parameters, the service life cannot always be precisely predicted. The determination of service life aims to provide reliable predictions with the currently available information. For heritage buildings over a hundred years old, the lack of methods developed at the time to assess durability complicates obtaining accurate data on their lifespan. This work reports on advances in establishing guidelines for estimating the lifespan of heritage buildings using the ISO 15686 standard.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Keywords: Service Life; Durability; Heritage

1. Introducción

La estimación de la vida útil de una construcción es esencial en la planificación y diseño de infraestructuras. Esta tarea implica calcular la durabilidad no solo de la estructura en su totalidad, sino también de sus componentes individuales, desde los elementos más pequeños hasta la construcción en su conjunto. Para realizar estas estimaciones, es crucial considerar el rendimiento de cada componente bajo las condiciones esperadas, los modos de falla probables, las causas de pérdida de funcionalidad, y el riesgo de fallas prematuras.

El objetivo de estimar la vida útil es proporcionar una base cuantitativa que permita evaluar si una construcción puede alcanzar su vida útil de diseño con la confiabilidad requerida. Esta estimación, junto con una evaluación de su incertidumbre, ayuda a demostrar que la vida útil de diseño es alcanzable y orienta las decisiones de diseño necesarias.

A fines de la década de 1980 se comenzó a investigar en el campo de la durabilidad y la vida útil de los elementos constructivos, sus componentes y materiales. Algunas de estas iniciativas fueron recopiladas en el estudio "Performance based methods for service life prediction" de Moser y Hovde, (Moser y Hovde, 2004). Muchas de las actividades en esta materia se iniciaron luego de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD) que tuvo lugar en Río de Janeiro, en 1992. Esta conferencia dio como resultado, dos acuerdos internacionales, dos declaraciones de principios y una agenda para un desarrollo global sostenible, la Agenda 21, (CNUMAD, 1992). También se encuentran actividades de I+D dentro del CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction), como lo es el trabajo del grupo W080 que lleva a cabo en colaboración con un Comité Técnico de RILEM (International Association for Building Materials and Structures): W080/RILEM 175-SLM (Service Life Methodologies), (CIB W080 / RILEM 175 - SLM ,2004). RILEM publicó en 1989 un documento de recomendaciones para la estimación de la vida útil de los elementos y materiales de construcción, (RILEM TC 71-PSL,1989). Este documento ha sido la base para la elaboración de las normas dentro de la International Organization for Standardization (ISO) para la estimación de la vida útil. En este sentido, ISO publicó en 1984 una norma que describe los principios para la elaboración de normas ISO con relación al comportamiento de los edificios, la norma ISO 6241 "Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered", (ISO, 1984). En la norma se presentan los agentes que influyen en la durabilidad de los edificios, por ejemplo, la exposición a los agentes atmosféricos. El comité técnico más relevante constituido sobre vida útil dentro de ISO para el sector de la construcción es el TC 59 "Building Construction", donde un subcomité, SC 14 "Design life", trabaja exclusivamente en vida útil. Como resultado del trabajo de este comité, durante la última década se han ido editando una serie de normas para la planificación de la vida útil de los edificios, ellas corresponden a las 11 partes de la ISO 15686, la principal en aplicación para la planificación de la vida útil de las construcciones.

Por otra parte, la Comisión de la Unión Europea adoptó en 1988 la Directiva sobre productos de la construcción 89/106/CEE relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción, (Comisión Europea, 1999). Dentro de la directiva se definen seis requisitos esenciales que deben cumplirse en un edificio durante su vida útil. En Japón se lleva trabajando desde hace décadas en métodos para predecir la durabilidad y vida útil de los materiales y los edificios, tanto en la fase de diseño como en la fase de mantenimiento. El resultado de las investigaciones fue expuesto en la publicación "Principal Guide" en 1989 que más tarde fue resumida en una versión en inglés, (Architectural Institute of Japan,1993). Este documento también es una de las bases para la norma ISO 15686.

En nuestro país, la normativa que aborda este tema en términos generales es la norma IRAM 11553:1969 "Durabilidad de los edificios", (IRAM, 1969). Es de notar que esta es la única versión de la norma hasta la actualidad. La misma menciona que, para ese momento, el avance de la industrialización era reciente, así como sus "incalculables consecuencias sobre las construcciones", dejando un terreno muy impreciso y discutido. En esta norma se definen una serie de conceptos relacionados con la vida útil y la durabilidad, a partir de la terminología utilizada en la industria normalizada, dentro de la cual la construcción se estaba insertando. Además, se incorporan los factores que afectan la durabilidad y los explica brevemente, considerándolos desde el diseño y la elección de los materiales. Establece categoría de construcciones donde sugiere vida útil mínima, se establecieron según el ciclo evolutivo de la familia en aquel momento, la evolución del confort, la evolución de las ciudades y sus avances tecnológicos. Otra normativa aplicable a la temática es el "Reglamento argentino de estructuras de hormigón" CIRSOC 201:2005, donde en su capítulo 2 se definen los requisitos por durabilidad para dichas estructuras. Establece requisitos para el proyecto o diseño estructural donde se considera la degradación de la estructura por efectos diferentes a las cargas consideradas. Este Reglamento contiene exigencias para lograr una vida útil en servicio de 50

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

años, pero cuando el proyectista o diseñador estructural decida prolongar la vida útil de la estructura podrá utilizar la mayor protección debida al revestimiento superficial especificando las exigencias adicionales necesarias. A lo largo de sus artículos, se desarrollan todos los requisitos para alcanzar dicha vida útil, así como se muestran esquemas y tablas para orientar las decisiones según el ambiente al que están expuestas las estructuras (INTI – CIRSOC, 2005).

En las últimas décadas, se han desarrollado diversos enfoques para estimar la vida útil de los edificios y sus componentes, y numerosos estudios, normas y directrices han sugerido valores específicos. Sin embargo, persisten ciertas inconsistencias en los datos disponibles sobre este tema. Por ejemplo, los valores de vida útil presentados en documentos normativos suelen ser demasiado generales, sin tener en cuenta las particularidades de cada componente, como lo menciona Grant y Ries, (Grant y Ries, 2013). La variabilidad en los datos reportados es también considerable, con estimaciones que sitúan la vida útil de los edificios en un rango amplio de 30 a 100 años, lo cual limita la precisión de las predicciones. Además, los valores propuestos en diferentes estudios no siempre son comparables, ya que cada edificio y sus componentes poseen características y condiciones únicas, lo que complica la aplicación directa de valores generales en contextos específicos, (Silva y de Brito, 2021).

Hasta la fecha, los métodos propuestos para predecir la vida útil no se pueden considerar una ciencia exacta debido a que deben tener en cuenta diferentes tipos de factores, lo que hace que la predicción de la vida útil sea una actividad interdisciplinaria. Existen tres enfoques que sientan las bases para el desarrollo de métodos de predicción de vida útil de diferente complejidad, con diferentes requisitos de aplicación y con diferente necesidad de entrada de datos, ellos son los métodos deterministas, los métodos probabilísticos y los métodos de ingeniería.

Los métodos deterministas se basan en el estudio de los factores que influyen en la degradación de los elementos estudiados, en la comprensión de sus mecanismos de actuación y, por último, en su determinación traducida en funciones de degradación, (Cecconi, 2011). Los factores se traducen en fórmulas que expresan su acción en el tiempo. El ejemplo más conocido de este enfoque es el método de los factores, el que aparece contemplado en la normativa ISO 15686. Los métodos probabilísticos consideran la degradación como un proceso estocástico, donde se define la probabilidad de deterioro para cada propiedad durante un período de tiempo. Para su aplicación es necesario poseer datos reales recogidos durante un amplio periodo de tiempo. El modelo más utilizado en los métodos probabilísticos es el modelo de Markov. En la norma ISO 15686 Parte 8, se establece que, en la aplicación del método de los factores explicado, se puedan utilizar distribuciones o funciones de probabilidad.

La combinación de los métodos deterministas, junto con los métodos probabilísticos, ha resultado ser la mejor fórmula desarrollada hasta el momento en el campo de la predicción de la vida útil de los elementos constructivos de los edificios y sus componentes. Este enfoque está contemplado en la norma ISO 15686 en su Parte 8. La aplicación del método dependerá de la disponibilidad de bases de datos que permitan la caracterización de los diferentes factores como funciones de probabilidad. Los métodos de ingeniería son de fácil aplicación como el método de los factores, y además describen los procesos de degradación de una forma probabilística, como en los métodos probabilísticos. Los métodos de ingeniería se pueden utilizar para identificar los fenómenos de degradación de forma más analítica, pudiendo así controlarlos en proyecto a través de la planificación del mantenimiento. Algunos de los métodos de ingeniería más conocidos son el Análisis Modal de Fallos y Efectos del Proceso AMFE (Failure Mode Effects), Análisis FMEA y el Método de los Estados Límite (Performance Limits Methods). El método de los factores utiliza un enfoque determinista permitiendo determinar la vida útil de un elemento o sistema sujeto a unas condiciones específicas basándose en una vida útil de referencia y modificándola mediante unos factores relativos a las condiciones específicas de cada caso. En la Norma ISO 15686 del año 2000 se describe el método de los factores y se dan indicaciones de cómo establecer la vida útil de referencia y cada uno de los factores.

Hasta la fecha, la aplicación práctica del método de los factores publicado en la norma ISO 15686 para la predicción de vida útil de los elementos constructivos, sus materiales y componentes, ha sido muy limitada. La mayoría de los casos publicados se describen en artículos teóricos donde se proporcionan ejemplos de su utilización. La aplicación práctica del método ha sido limitada debido a la falta de conocimiento del método entre los profesionales (arquitectos, constructores o los propios propietarios de edificios y administradores) o también debido a la necesidad de valores útiles de los diversos factores, (Hernández, 2011), (Hovde, 2002), (Davies y Wyatt, 2005), (Hovde, 2005), (Corvacho y Antunes, 2011).

El objetivo del trabajo es establecer lineamientos específicos para la aplicación de la norma ISO 15686 en la estimación de la vida útil de edificios patrimoniales bajo condiciones particulares. Se busca que estos lineamientos sean aplicables a cualquier localidad o región, considerando los mecanismos de deterioro propios del entorno. A partir de ejemplos reales, se

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

identificarán patologías comunes y los factores que influyen en la durabilidad de las construcciones, con el fin de determinar la metodología más adecuada para estimar su vida remanente.

2. Metodología

A los fines de alcanzar el objetivo del presente trabajo se propone la siguiente metodología.

2.1 Análisis de la Norma ISO 15686 "Buildings and constructed assets - Service life planning"

Tal como se indicó anteriormente, la ISO 15686 es una serie de once partes que proporciona directrices y principios para la planificación, diseño, y gestión de la vida útil de los edificios y sus componentes.

2.2 Caracterización de las construcciones patrimoniales

Se selecciona el tipo de construcción patrimonial que será objeto de estudio, esta tarea es parte de la metodología experimental ya que la selección del tipo de construcción patrimonial está condicionada por la posibilidad de disponer de información y contar con acceso para el relevamiento y evaluación de este tipo de construcciones. Una vez seleccionada se procede a su caracterización, a partir del análisis de antecedentes y de la exploración en campo de construcciones reales, en cuanto a materiales, procesos de diseño y ejecución, condiciones ambientales y factores de deterioro, uso y mantenimiento. Para esto debe conocerse o identificarse sobre qué construcciones se trabajará, ya que es necesario geo localizarlas para caracterizar las condiciones ambientales e identificar en ellas el resto de las características.

2.3 Identificación de indicadores de deterioro.

Se realiza la identificación de los indicadores o factores de deterioro con sus consecuentes patologías, correspondientes a las construcciones evaluadas. Esto permitirá obtener una base de datos para la aplicación de la metodología propuesta en el método de los factores de la ISO 15686.

2.4 Propuesta de los lineamientos que permitan predecir la vida útil de las construcciones patrimoniales

Se establecen los lineamientos para la estimación de la vida útil de las construcciones patrimoniales consideradas, a partir de identificar cuál es el método que mejores posibilidades presente. Esto implica elaborar y definir los factores del método propuesto en la norma ISO 15686. Estos factores son:

- Calidad del diseño arquitectónico y constructivo.
- Calidad de los materiales de construcción.
- Condiciones ambientales en el interior de la construcción.
- Condiciones ambientales en el exterior de la construcción
- Calidad de la mano de obra.
- Uso que se le destina a la construcción.
- Nivel de mantenimiento.

2.5 *Validación a partir del análisis de ejemplos de aplicación*

Se lleva a cabo ejemplos de aplicación que permitan validar el método propuesto, con conclusiones de lo obtenido.

3. Resultados

A partir del desarrollo de la metodología descripta se espera obtener una serie de lineamientos que permitan a los profesionales determinar la vida remanente de estructuras patrimoniales, dentro de la zona de estudio, en condiciones específicas de acuerdo con la norma ISO 15686, ya que, por su antigüedad, al momento de su diseño y construcción, los parámetros de durabilidad actuales no existían o no eran considerados. A partir de ellos, se podrá planificar intervenciones basadas en datos confiables sobre la vida útil, es decir, se podrá gestionar la construcción para su correcto uso y

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

mantenimiento, tomando las decisiones que permitan alcanzar o prolongar su vida útil a partir de los indicadores relevados en el método de los factores. Esta herramienta permitirá no solo preservar el patrimonio, sino también optimizar recursos aplicados en su uso y mantenimiento.

4. Conclusiones

La estimación de la vida útil de las construcciones, especialmente de aquellas de valor patrimonial, es esencial para asegurar su preservación y funcionalidad a lo largo del tiempo. Mediante el desarrollo de metodologías como las propuestas en la ISO 15686, es posible establecer lineamientos específicos que permitan a los profesionales del sector determinar de manera confiable la vida remanente de estas estructuras bajo condiciones particulares. Estos lineamientos facilitan la planificación de intervenciones basadas en datos precisos sobre la durabilidad y la identificación de patologías y factores de deterioro. Como resultado, no solo se optimizan los recursos en el mantenimiento, sino que también se contribuye a la conservación efectiva del patrimonio arquitectónico.

Referencias bibliográficas

Moser, K., & Hovde, P. J. (2004). Performance based methods for service life prediction. CIB Report Publication 294. Rotterdam: CIB.

Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo. (1992). Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Río de Janeiro, Brasil, 3 a 14 de junio de 1992). Naciones Unidas.

CIB W080 / RILEM 175 - SLM. (2004). Service life methodologies: Factor methods: State of the art. NTNU – Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering.

RILEM TC 71-PSL. (1989). Prediction of service life of building material and component. Materials and Structures, 22, 385-392.

ISO 6241. (1984). Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered.

ISO 15686. Buildings and constructed assets – Service life planning. ISO 15686-1. (2011). Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 1: General principles and framework. International Standard. ISO 15686-2. (2012). Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures. International Standard. ISO 15686-3. (2002). Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 3: Performance audits and reviews. International Standard. ISO 15686-7. (2017). Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice. International Standard. ISO 15686-8. (2008). Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 8: Reference service life and service-life estimation. International Standard. ISO 15686-9. (2008). Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 9: Guidance on assessment of service-life data. International Standard. ISO 15686-10. (2010). Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 10: When to assess functional performance. International Standard. ISO/TR 15686-11. (2014). Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 11: Terminology. International Standard.

Comisión Europea. (1999). Durability and the Construction Products Directive, Guidance Paper F. Bélgica: Comisión Europea.

AIJ, Architectural Institute of Japan. (1993). The English Edition of Principal Guide for Service Life Planning of Buildings. Architectural Institute of Japan.

IRAM. (1969). IRAM 11553: Durabilidad de los edificios. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

INTI – CIRSOC. (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, CIRSOC 201-05. INTI – CIRSOC.

Grant, A., Ries, R. (2013). Impact of building service life models on life cycle assessment. Building Research and Information, 41, 10.1080/09613218.2012.730735.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Silva, A., de Brito, J. (2021). Service life of building envelopes: A critical literature review. Journal of Building Engineering, 44, 102646

Cecconi, F. (2011). Epistemic uncertainty propagation in service life prediction using the factor method. En XIIDBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components (pp. 1144-1152). Porto: CIB.

Hernández Moreno, S. (2011). Aplicación de la información de la vida útil en la planeación y diseño de proyectos de edificación. Acta Universitaria, 21(2). Universidad de Guanajuato, México, Mayo-Agosto.

Hovde, J. (2002). The Factor Method for service life prediction: From theoretical evaluation to practical implementation. En IX DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components (Paper 232). Australia: CIB.

Davies, H., Wyatt, H. (2005). Appropriate use of the ISO 15686-1 factor method for durability and service life prediction. En X DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components (TT5-208). Francia: CIB.

Hovde, J. (2005). The Factor Method – a simple tool to service life estimation. En X DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components (TT4-115). Francia: CIB.

Corvacho, H., Antunes, M. (2011). Establishing specific criteria for the application of ISO 15686 factor method for service life estimation. En XIIDBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto: C

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Venado Tuerto

PRESENTACION ORAL

Resistencia al cizallamiento en líneas de encolado de madera laminada estructural

Shear resistance in structural laminated wood gluing lines

Presentación 18/10/2024

Andrés Germán Rottet

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación de Estructuras Civiles (GIDEC), Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: rottetandres@gmail.com

Resumen

En la zona andina de Neuquén, Chubut y Río Negro existen más de 100.000 ha implantadas de coníferas, la gran mayoría con pino ponderosa (Pinus ponderosa Dougl x Laws). No existe a la fecha una norma de clasificación estructural de esta combinación especie / procedencia. Resulta de interés el estudio del comportamiento estructural para su inclusión en los suplementos del reglamento INTI-CIRSOC. En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos realizados sobre 30 probetas de medidas 50x50mm de vigas laminadas encoladas estructural. Se utilizó madera de pino ponderosa de 25-32 años provenientes de un primer raleo comercial. Los ensayos fueron realizados siguiendo la norma IRAM 9660/2. Se evaluaron nueve líneas de encolado, cuyo tipo de adhesivo es EPI. El valor de resistencia al cizallamiento alcanzado fue 2,65 N/mm^2, superior al valor teórico de tensiones tangenciales máximas de 1,5 N/mm^2, estableciendo un coeficiente de relación de 1,77.

Palabras clave: Construcción con madera, Pino ponderosa, Vigas laminadas; Propiedades mecánicas

Abstract

In the Andean region of the Provinces of Neuquén, Chubut and Río Negro there are more than 100,000 ha implanted with conifers, the vast majority with the species ponderosa pine (Pinus ponderosa Dougl x Laws). To date, there is no standard of structural classification for this combination species/provenance. It is interesting to study its structural behavior for its inclusion in the supplements of the INTI-CIRSOC. This work presents the results of the tests carried out on 30 50x50mm structural glued laminated beam test pieces. Ponderosa pine wood of 25-32 years from a first commercial thinning was used. The tests were carried out following the IRAM 9660/2 standard. Nine gluing lines were evaluated, whose adhesive type is EPI. The shear strength value achieved was 2,65 N/mm2, higher than the theoretical value of maximum tangential stresses of 1.5 N/mm2, establishing a relationship coefficient of 1.77.

Keywords: Wooden construction; Ponderosa pine; Laminated beam; Mechanical properties

1. Introducción

1.1. *Consideraciones Generales*

En el estudio del estado tensional cuando tenemos una sección de una pieza sometida a flexión y corte, la presencia del corte origina en la sección tensiones tangenciales, variables a lo largo de la altura, que producen distorsión entre los elementos de la pieza, lo que hace que las secciones originalmente planas, al deformarse por la suma de los efectos de flexión y corte ya no sigan siendo planas. Sin embargo, este alabeo del plano de las secciones transversales no influye sensiblemente sobre el valor de las tensiones normales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

En estructuras como las vigas, que están predominantemente flexionadas, es muy importante considerar la distribución real de tensiones, para lo cual nos basaremos en la denominada “Teoría de Jouravski - Collignon”.

El pino Ponderosa se introdujo en la Patagonia Argentina en el comienzo del siglo XX y las primeras plantaciones para la producción de madera se establecieron en la década de los 70. Actualmente es la especie forestal más plantada en la región de los andes patagónicos, concentrándose en la pre-cordillera andina de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut (Gonda, 2001), con una superficie total cercanas a las 100 mil hectáreas según el Inventario de Plantaciones Forestales de 2015. Esta amplia superficie con bosques implantados hace relevante el estudio de sus propiedades estructurales con el fin de optimizar su utilización para la construcción.

La necesidad de longitudes y escuadrías de dimensiones que no se pueden satisfacer con elementos aserrados orientan a la utilización de vigas laminadas encoladas (VLE). Los elementos de VLE son piezas de sección transversal rectangular de ancho fijo y altura constante o variable y de eje recto o curvo, constituidos por láminas o tablas unidas en forma irreversible con un adhesivo estructural específicamente formulado. El espesor normal de las láminas varía entre 20 y 45 mm. En Argentina la normalización de estos elementos estructurales está regida por las normas IRAM 9660 (2015), 9661 (2015).

En este trabajo se analiza la resistencia de la unión entre láminas de vigas laminadas encoladas estructurales de medidas 100x250mm, donde la especie de madera es pino ponderosa y su clase resistente es 1, de acuerdo con las IRAM 9660/1 (2015) y 9661(2015). El tipo de adhesivo utilizado es Advantage EP-950A, que es un sistema de emulsión de polímero de isocianato con base acrílica (EPI) desarrollado con una elevada resistencia al agua y calor. Trabaja bien en aplicaciones de prensa fría y caliente y tiene muy baja formación de espuma.

2. Materiales y Métodos

2.1. Material

Se utilizaron probetas de sección completa extraídas de una zona cercana a la rotura de vigas laminadas encoladas con sección 100x250mm ensayadas a flexión y construidas de acuerdo a la normativa IRAM vigente, con madera de pino ponderosa de Neuquén. Se ajustaron las dimensiones de las probetas a 50 mm x 50 mm x 250mm, se rotuló cada probeta indicando a que viga corresponde, según muestra la Figura 1. Se aseguró que las superficies donde se aplicaron las cargas, fueran paralelas entre ellas y perpendiculares a la dirección de las fibras. Formada por 9 líneas de encolado por probeta, 3 de la parte superior, 3 de la parte central y 3 de la parte inferior.

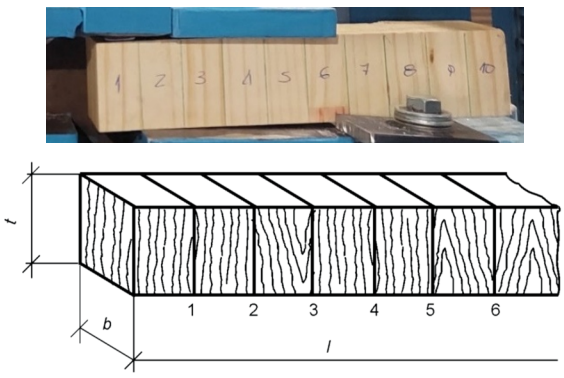


Figura 1. Probeta del ensayo de cizallamiento.

2.2. Método

El procedimiento experimental se realizó en el laboratorio de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Venado Tuerto, de acuerdo con los lineamientos de la norma IRAM 9660/2 (2015) - “4 Resistencia al cizallamiento en las líneas de encolado”, la cual consiste en someter el plano de encolado de la probeta a una fuerza de cizallamiento, aplicando una carga de dirección paralela a las fibras de la madera, que se incrementa gradualmente, hasta llegar al punto de falla de la probeta.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Se determina la resistencia al cizallamiento en la línea de encolado y el porcentaje de falla de madera en el área cizallada y se compara con la tensión de trabajo esperada.

Se utilizó una máquina de ensayo universal Galdabini Quasar 600, con una precisión de ± 3% que aplica la carga a una velocidad constante, de manera que la carga de rotura se alcance luego de 20 s, como mínimo. La figura 2 muestra el dispositivo con rótula para asegurar la verticalidad de la carga, que permite aplicar el esfuerzo de corte o cizalla en forma uniforme en toda la sección de la lámina y en la dirección de las fibras. El dispositivo actúa sobre la superficie transversal de la probeta con una distribución uniforme de la presión en todo el ancho de la misma.

Se registra la carga máxima (f) a la cual se produce la falla, en newton y se verifica si la rotura fue por falla de madera, asegurando que el adhesivo cubría toda la superficie.

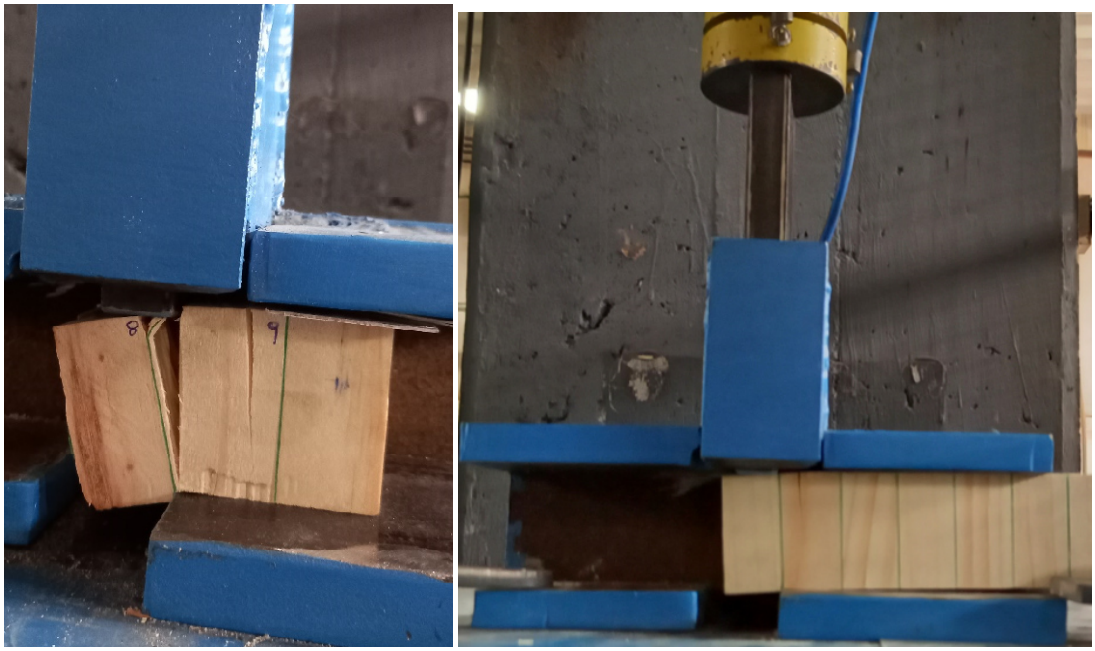


Figura 2. Dispositivo de aplicación de carga en el ensayo de cizallamiento.

2.4. Cálculos

Se calcula la resistencia al cizallamiento para la línea de encolado de la forma siguiente (ecuación 1):

$$f = \frac{F}{b*t} \quad (1)$$

siendo:

- f la resistencia al cizallamiento de la línea de encolado (MPa)
- F la carga de rotura (N)
- b el ancho de la probeta (mm)
- t la altura de la probeta (mm)

Se estimó el porcentaje de falla por madera respecto del total del área sometida al cizallamiento, procediendo a la observación del plano de rotura en relación con la superficie total de la probeta.

3. Resultados

3.1. Resultados Experimentales

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Se ensayaron 30 probetas de madera laminada encolada de 50x50mm, donde se observa que la gran mayoría no falla en la línea de encolado, sino que falla por madera. La Tabla 1 muestra el análisis estadístico de los datos obtenidos de resistencia al cizallamiento en las líneas de encolado.

Tabla 1. Resultados experimentales de resistencia a cizallamiento en líneas de encolado.

f_m [N/mm²]	f_{max} [N/mm²]	f_{min} [N/mm²]	$f_{0,05}$ [N/mm²]	Desviación estándar [N/mm²]	Coeficiente de variación	Cantidad n
5,66	10,07	1,24	2,65	1,68	0,30	156,00

Donde:

- f_m: valor medio de la resistencia a cizallamiento.
- f_{max}: valor máximo de la resistencia a cizallamiento.
- f_{min}: valor mínimo de la resistencia a cizallamiento.
- $f_{0,05}$: percentil 5% de la resistencia a cizallamiento.

3.2. Estudio de tensiones tangenciales de trabajo

Los datos experimentales obtenidos, son contrastados con el valor de la tensión tangencial máxima que se desarrolla en la viga laminada encolada cuando se la somete a flexión, de acuerdo a la teoría de Jouravski-Collignon (ecuación 2)

$$\tau_{med} = \frac{Q S_n^s}{I_n S} \tag{2}$$

Donde:

- Q: Esfuerzo de corte en la sección de estudio.
- Sn^s: Momento estático respecto al eje baricéntrico.
- In: Momento de inercia
- S: Ancho de la sección.

La distribución de las tensiones tangenciales en una sección rectangular es parabólica, alcanzando el valor máximo en correspondencia con el eje neutro (ecuación 3).

$$\tau_{max} = 1{,}5\frac{Q}{\Omega} \tag{3}$$

Donde Ω es el área de la sección de estudio, y Q es el esfuerzo de corte.

Para obtener el esfuerzo de corte "Q", analizo el resultado del ensayo de resistencia a flexión, para VLE de pino ponderosa de medidas 100x250mm (Figura 3).

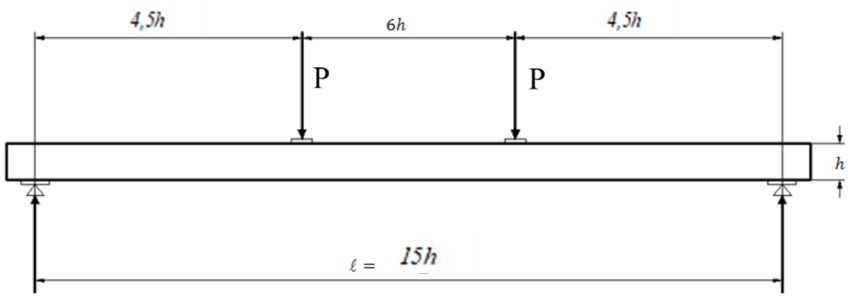


Figura 3. Dispositivo de ensayo para la medición de la resistencia a la flexión s/ IRAM 9663(2015)

Este ensayo fue realizado por Filippetti et al (2024), donde alcanzaron tensiones de rotura máxima de 23 N/mm2 que considerando las dimensiones de las vigas ensayadas corresponde a una carga máxima total de 50kN, lo que conduce a que

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

cada fuerza fue de P = 25.000 N, valor que corresponde al esfuerzo de corte a emplear en ecuación 3, resultando la tensión tangencial máxima de trabajo de 1,5 N/mm^2

Si comparamos esta tensión tangencial máxima de 1.5 N/mm2, respecto del percentil 5% de la resistencia de cizallamiento 2.65 N/mm2, esta última resulta 1.77 veces superior.

4. Conclusiones

La resistencia al cizallamiento expresada como tensión tangencial obtenida en los ensayos experimentales, superan en un 77% a la máxima tensión de corte, calculada utilizando como esfuerzo de corte a la máxima carga que soporto una viga de esta escuadría en un ensayo a flexión.

Los valores teóricos de tensiones tangenciales para las vigas laminadas encoladas revelan propiedades resistentes adecuadas para su uso en estructuras.

Se propone avanzar en una serie de ensayos para validar estos valores y de esta manera gestionar su incorporación a la norma IRAM 9660/2 (2015).

Agradecimientos

A los becarios alumnos y graduados del grupo GIDEC de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional por su responsable colaboración en los ensayos.

A la Comisión Forestal y Maderera Bariloche.

Referencias bibliográficas

INTI CIRSOC (2016a). Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Buenos Aires, Argentina, disponible en https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf.

IRAM 9660/1. 2015. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y de control. Buenos Aires, Argentina.

IRAM 9660/2. 2015. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Parte 2: Métodos de ensayo. Buenos Aires, Argentina.

IRAM 9661. 2015. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada. Buenos Aires, Argentina.

IRAM 9663. 2013. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Buenos Aires,

Guillaumet AA, Filippetti, MC, Manavella RD, Meyer LC, Caballé G, Martinez Meier G. (2019). Resistencia a la flexión del Pino Ponderosa de la Patagonia norte Argentina. En 4to Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera. Montevideo, Uruguay.

Guillaumet AA, Filippetti MC, Manavella RD, Meyer LC. (2022). Vigas laminadas encoladas de pino ponderosa, una buena opción estructural. Jornadas Forestales Patagónicas. Bariloche. Argentina.

Filippetti MC, Guillaumet AA, Tosco A, Meyer LC (2024). EVALUACIÓN DE LA PRESTACIÓN ESTRUCTURAL DE VIGAS LAMINADAS ENCOLADAS DE PINO PONDEROSA. 28 Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires. Argentina.

Materiales



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Materiales
Categoría:	Estudiante de posgrado
Facultad Regional:	Venado Tuerto

Análisis preliminar del comportamiento a flexión de paneles contralaminados de Pinus elliottii-taeda

Preliminary analysis of the bending behavior of elliottii-taeda cross-laminated timber

Presentación 18/10/2024

Andrea D. Tosco

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC) Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: atosco@frvt.utn.edu.ar

Resumen

Este trabajo analiza el comportamiento a flexión de ocho probetas de paneles de madera contralaminada (CLT) fabricados en Argentina con Pinus elliottii-taeda de dos clases resistentes y adhesivo estructural EPI. Se siguió la metodología de la norma UNE-EN 16351(2021), aplicando carga perpendicular al plano de las probetas, colocadas en la dirección principal con una disposición plana, generando una configuración de flexión simétrica de cuatro puntos. Las rigideces, resistencias y densidades se encontraron dentro de los límites esperados, pero se presentaron fallas por delaminación durante los ensayos. La resistencia media a flexión de probetas sin delaminación (35 N/mm²) superó en 8% el valor reportado para tablas. El módulo de elasticidad local medio (7.271 N/mm²) coincidió con el normativo para tablas. Estos hallazgos fundamentan la planificación de una nueva fase de investigación, donde la fabricación de prototipos adicionales y la ejecución de ensayos complementarios serán cruciales para establecer los parámetros óptimos de producción de paneles CLT en el contexto nacional.

Palabras clave: Madera contralaminada; Flexión; Pinus elliottii-taeda; Argentina; Delaminación.

Abstract

This work analyzes the flexural behavior of eight cross-laminated timber (CLT) panel specimens manufactured in Argentina with Pinus elliottii-taeda of two strength classes and EPI structural adhesive. The methodology of the UNE-EN 16351(2021) standard was followed, applying a load perpendicular to the plane of the specimens, placed in the main direction with a flat arrangement, generating a four-point symmetrical bending configuration. The stiffnesses, strengths, and densities were within the expected limits, but delamination failures occurred during the tests. The average flexural strength of specimens without delamination (35 N/mm²) exceeded the value reported for boards by 8%. The average local modulus of elasticity (7.271 N/mm²) coincided with the standard for boards. These findings support the planning of a new phase of research, where the manufacture of additional prototypes and the execution of complementary tests will be crucial to establish the optimal production parameters of CLT panels in the national context.

Keywords: Cross-Laminated Timber; Bending; Pinus elliottii-taeda; Argentina; Delamination.

1. Introducción

La "madera maciza estructural" o "mass timber" involucra el empleo de materiales de construcción compuestos por capas de madera de grado estructural. Esta categoría incluye a la madera laminada encolada (GLT por sus siglas en inglés) y la madera contralaminada (CLT por sus siglas en inglés) que demuestran una resistencia significativa ante cargas diversas. El CLT es un producto de ingeniería prefabricado construido por un número impar de capas de madera, usualmente

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

ortogonales entre sí, que se unen con adhesivos estructurales. La diferencia principal entre ambos sistemas radica en una mayor estabilidad dimensional del CLT dada por la disposición de sus capas. Figura 1.

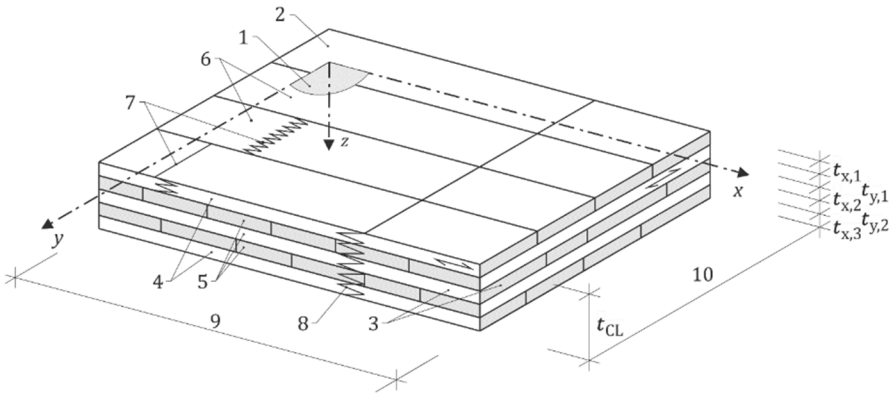


Figura 1. Madera contralaminada. EN 16351:2021

Esta tecnología, desarrollada inicialmente en Austria y Alemania a principios de la década de 1990 ha experimentado una expansión global debido a su eficiencia y seguridad en diversas tipologías edilicias. Numerosos autores e instituciones han contribuido a ampliar el conocimiento sobre este material, que ha demostrado ser competitivo en términos de resistencia y costos frente a materiales convencionales como el hormigón y el acero, destacándose en sostenibilidad y rapidez de construcción.

La versatilidad estructural del CLT permite su aplicación tanto en elementos sometidos a cargas fuera del plano, pisos y techos, como en aquellos que soportan cargas en el plano, muros portantes, vigas y dinteles. Para su adecuada implementación, es fundamental caracterizarlo estructuralmente. La normativa europea en vigencia es la EN 16351:2021 *Timber structures - Cross laminated timber – Requirements,* que proporciona un marco regulatorio estandarizado para garantizar las características de prestación de la madera contralaminada en la construcción de edificios y puentes. Esta norma define tres metodologías para la determinación de las propiedades de resistencia, rigidez y densidad del CLT: a) Usar datos de geometría del CLT y propiedades de las capas individuales; b) Determinar propiedades del CLT mediante ensayos con probetas de grandes dimensiones; c) Combinar métodos a) y b). Se adoptan hipótesis como que las capas transversales no contribuyen a la rigidez del elemento ($E_{90,l,medio} = 0$). Los valores de resistencia y rigidez de las tablas longitudinales pueden usarse como valores mínimos de entrada para determinar los parámetros característicos de los paneles, sin embargo, este procedimiento no tiene en cuenta el efecto de láminas y sistema que conduce a una mejora considerable del panel en comparación con las tablas que componen el material base (Blass & Fellmoser, 2014).

Uno de los parámetros más relacionados con la falla, en paneles sometidos a cargas perpendiculares al plano, es el corte por rodadura. El módulo de corte por rodadura (G_{rod}) depende de múltiples factores, tales como la especie y contenido de humedad de la madera; la densidad de la capa transversal; el espesor de las capas; la orientación anual de los anillos, el tamaño y geometría de la sección transversal del tablero, etc. (Karacabeyli & Gagnon, 2019). Las normas y códigos técnicos recomiendan una relación anchura-espesor de lámina mayor o igual a 4, $b_l/t_l \geq 4$ para evitar reducciones en la resistencia (Guindos, 2019).

La integridad estructural de los paneles CLT depende de la eficacia del proceso de fabricación y el diseño adecuado de los conectores mecánicos en la estructura. En cuanto al primero, es crucial asegurar una óptima cohesión entre las láminas que componen las capas del panel, cumpliendo con los estándares establecidos para el proceso de encolado y las uniones dentadas. La adherencia adecuada entre estos componentes es esencial para que el panel CLT funcione como una unidad estructural monolítica. Los parámetros de fabricación que influyen significativamente en la calidad final del producto son diversos, incluyendo la calidad intrínseca y el contenido de humedad de la madera, la dosificación del adhesivo y su tiempo de exposición al aire, las condiciones ambientales durante el proceso, la magnitud y duración de la presión aplicada al panel, así como el tiempo de curado. Los fabricantes de CLT proporcionan tablas detalladas con aspectos geométricos, de seguridad y de dimensionamiento, incluyendo parámetros como el momento flector y la rigidez flexional expresados por metro de ancho. Esta información es esencial para ingenieros y diseñadores, permitiendo una selección adecuada de los

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

paneles según las cargas y condiciones específicas de cada proyecto, garantizando así la integridad y durabilidad de las construcciones.

Si bien el CLT ha tenido su mayor desarrollo en Europa, en países como Chile, Brasil y Uruguay, se han llevado a cabo investigaciones relevantes sobre la viabilidad del CLT usando especies locales de rápido crecimiento y, en algunos casos, de bajas propiedades mecánicas. En Argentina, la investigación sobre la madera contralaminada se encuentra en una fase incipiente. Si bien diversos grupos de investigación han iniciado estudios exploratorios en este campo, hasta la fecha no se han registrado publicaciones académicas específicas sobre el comportamiento del CLT fabricado con madera de reforestación. Argentina posee un significativo potencial forestal, con 20 millones de hectáreas aptas para este fin (Braier, 2004), y solo utiliza el 7% para bosques cultivado (Galarco & Ramilo, 2019) s. Las plantaciones se concentran principalmente en cuatro provincias y están dominadas por especies de rápido crecimiento como pinos, eucaliptos, sauces y álamos. En Misiones, la especie predominante es el pino resinoso, específicamente Pinus taeda L. y Pinus elliottii Engelm (Sharry, 2013). Estos pinos no se diferencian comercialmente en nuestro país ya que no existen estudios que evidencien una diferencia significativa de sus propiedades físico-mecánicas. Fank et al. (2020) demostraron que, a pesar de alguna discrepancia relacionada con la densidad, ambas especies presentan un comportamiento mecánico similar, lo cual está en línea con el criterio adoptado por IRAM 9662-3 (2013) e INTI-CIRSOC 601 (2016).

En este contexto, surge la oportunidad de mejorar la cadena de valor de la madera y la sostenibilidad de la construcción mediante la determinación de las mejores prácticas para la utilización de especies locales en paneles CLT. Esto implica investigar sus propiedades físicas y mecánicas, compararlas con las opciones del mercado actual de CLT y fomentar una producción adaptada a las necesidades del país, promoviendo el uso de materiales sostenibles y el crecimiento económico en las industrias forestal y de la construcción.

El presente trabajo estudia las propiedades estructurales de ocho probetas de paneles de madera contralaminada (CLT) fabricados en Argentina, ejecutados con Pinus elliottii-taeda de dos clases resistentes y adhesivo estructural (EPI). La metodología experimental se desarrolló de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma española UNE-EN 16351(2021).

2. Metodología

2.1 Materiales

La fabricación se llevó a cabo a partir de un procedimiento de producción piloto en fase de prueba y evaluación, basado en estándares internacionales (UNE-EN 16351, 2016). Se utilizaron tablas secas en horno y cepilladas de 175 mm x 2950 mm x 20 mm (anchura, longitud, espesor) de madera de pino elliotti-taeda, provenientes de la provincia de Misiones, Argentina. Se clasificaron visualmente de acuerdo con la norma IRAM 9662-3 (2013). Se ejecutaron paneles compuestos por cinco capas de tablas dispuestas perpendicularmente, sin uniones dentadas, sin ranuras en tablas y sin holguras entre tablas. El espesor de los anillos de crecimiento determinó que la mayoría de los paneles fueran clase resistente 2 en todas sus capas. Sin embargo, se logró elaborar un panel con capas exteriores de clase 1 y capas intermedias de clase 2. El contenido de humedad promedio de las tablas durante la fabricación fue inferior al 16%. Se utilizó Emulsión de Polímero de Isocianato (EPI) como adhesivo estructural, fabricado por Akzo Nobel Argentina S.A. La aplicación del adhesivo (300 g/m^2) se realizó con rociador manual en una cara de las capas, sin encolar los cantos, con un tiempo de exposición al aire de 5 minutos. El prensado se efectuó en un único paso con prensa neumática, aplicando 0,2 MPa de presión vertical. El tiempo de prensado fue de 24 horas. Tras el curado, se cortó y mecanizó para obtener paneles de 2400 mm x 3000 mm x 100 mm. De los paneles se extrajeron probetas experimentales de dimensiones medias 350 mm x 2950 mm x 100 mm y se enviaron, envueltas en un film estanco al vapor de agua, al laboratorio del Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC) de la Universidad Tecnológica Nacional de Venado Tuerto (UTN FRVT).

2.2. Métodos

Las medidas nominales de las probetas se obtuvieron a partir del promedio de las mediciones realizadas en ocho especímenes. El grosor se midió en cuatro puntos diferentes, la anchura en dos puntos y la longitud en un único punto. Los datos geométricos se detallan en la

Tabla **1**.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 1. Datos de geometría de la madera contralaminada

n	Sección Transversal (mm)		Longitud (mm)	Orientación y grosor (mm) de capas					Ranuras	b_l/t_l
	b	h	l	x	y	x	y	x		
8	350	100	2400	20	20	20	20	20	No	> 4

n: cantidad de probetas; ***b***: anchura en mm; ***h***: grosor en mm; ***l***: luz entre apoyos para el ensayo a flexión, en mm; ***x*:** se da el grosor de capa correspondiente a la orientación paralela al eje x, en mm; ***y*:** se da el grosor de capa correspondiente a la orientación paralela al eje y, en mm; $\boldsymbol{b_l/t_l}$: relación anchura y grosor nominales de las láminas.

Se ejecutó el ensayo a flexión con carga perpendicular al plano según las normas UNE-EN 16351 (2021) y UNE-EN 408:2010+A1:2012. Las probetas, colocadas en la dirección principal para una disposición plana, fueron sometidas a una carga perpendicular al plano, generando una configuración de flexión simétrica a partir de cuatro puntos. El contenido de humedad se mantuvo en el rango 12 ±3 %. En la Figura 2 se muestra la configuración del ensayo con la probeta simplemente apoyada, donde: h es el grosor de la probeta (100 mm); l es la luz entre apoyos (2400 mm); l_1 es la distancia de referencia para medir w_{local} (500 mm); l_2 es la distancia de la carga al apoyo (900 mm); w_{local} es la flecha medida sobre la longitud l_1 de la zona exenta a esfuerzo cortante y F es la carga máxima.

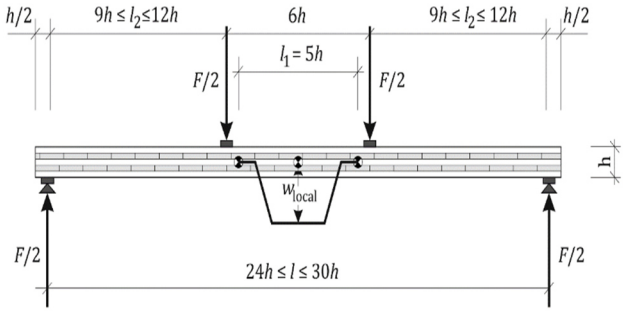


Figura 2. Ensayo de flexión de madera contralaminada con cargas perpendiculares a su plano. UNE EN-16351 (2021).

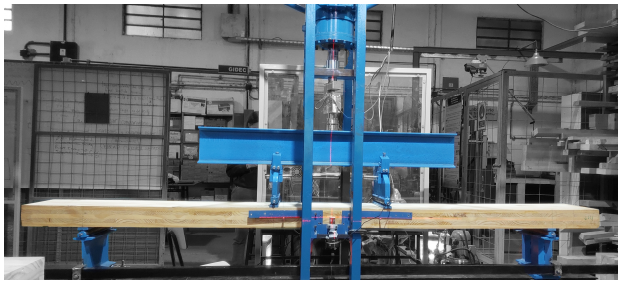


Figura 3. Ensayo de flexión de madera contralaminada con cargas perpendiculares a su plano. Prensa de carga del laboratorio de la UTN FRVT.

La carga se aplicó con un equipo hidráulico instalado en un marco de cargas con control de velocidad que, para este ensayo, no supera los 0,3 mm/s (0,003 h). La carga se midió con una celda de carga de 100 kN y las deformaciones con tres comparadores Mitutoyo de precisión de 0,01 mm. Las probetas fueron sometidas a una carga inferior al 40% de la carga máxima estimada ($F_{max,est}$). Posteriormente se extrajeron los comparadores para evitar dañarlos y se continuó aplicando carga hasta la rotura de la probeta. Los dispositivos de ensayos, diseñados por el grupo GIDEC, cumplen con las exigencias establecidas en la norma UNE-EN 16351 (2021). Figura 3.

La resistencia a la flexión paralela a la fibra de la sección transversal neta de la madera contralaminada se calculó con la ecuación (1), no siendo necesario su ajuste por altura. El momento cuadrático de la madera contralaminada, calculado de las capas cuya dirección de la fibra es paralela a la luz y de la misma clase resistente, se obtuvo de la ecuación de Steiner (2). Se aplicó la teoría de vigas de Timoshenko para materiales isotrópicos transversales.

$$f_{\mathrm{m,x,LC}} = \frac{3\,F_u\,l_2}{bh^2} \tag{1}$$

$$I_{\mathrm{LC,eficaz}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{b\cdot t_i^3}{12} + \sum_{i=1}^{n} b\cdot t_i\cdot e_i^2 \tag{2}$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Dónde: $f_{m,x,LC}$ es la resistencia a la flexión de la madera contralaminada, en N/mm^2; F_u es carga de rotura, en N; l_2 es la distancia de la carga al apoyo, en mm; b es la anchura del panel, en mm; h es el grosor del panel, en mm; $I_{LC,eficaz}$ es el momento cuadrático de la madera contralaminada, en mm^4; t_i es el grosor de las capas longitudinales, en mm; e_i es la distancia desde el centro de gravedad (CG) de cada capa longitudinal al CG del panel, en mm.

La rigidez en flexión se obtuvo de la ecuación (3).

$$(EI)_{LC,local,eficaz} = \frac{l_2 \cdot l_1^2}{16} \cdot \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1} \quad (3)$$

Dónde: $(EI)_{LC,local,eficaz}$ es la rigidez en flexión de la madera contralaminada, en Nmm^2; l_2 es la distancia de la carga al apoyo; l_1 es la distancia de referencia para medir w_{local}; $F_2 - F_1$ es el incremento de carga en N y $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación en mm.

Para la determinación de la humedad y densidad, se extrajeron de la zona cercana a la rotura, sub-probetas prismáticas de 350 mm x 50 mm x 100 mm (anchura, longitud, espesor) de acuerdo con las normas UNE-EN 16351 (2021), UNE-EN 408:2010+A1:2012 e ISO 13061-1/2 (2014). Los resultados fueron corregidos a la humedad de referencia del 12% como establece la UNE-EN 384 (2016).

Dado que la norma IRAM 9662-3 (2013) establece únicamente los percentiles 5% de la resistencia a la flexión y la densidad para tablas ($f_{m,k}$; ρ_k), realizar un completo análisis comparativo de los resultados obtenidos en el presente estudio, implicó que se contrastasen con los valores medios para tablas aserradas carentes de médula, reportados por P. J. Fank (2018) en su tesis doctoral (p.139). Las fuentes consultadas proporcionan valores del módulo de elasticidad global.

3. Resultados

La Tabla 2 presenta los resultados de la resistencia a la flexión paralela a la fibra ($f_{m,x,LC}$); el módulo de elasticidad local medio ($E_{x,medio,}$); el máximo momento flector (m_{max}); la rigidez en flexión $(EI)_{LC,local,eficaz}$ y la densidad (ρ), para cada probeta de CLT ensayada. Están organizados por grupos según las clases resistentes (F1 y F2 para ensayos a flexión en clase 1 y 2, respectivamente) y los modos de falla (A por flexo-tracción y B por delaminación). Para cada grupo, se tabulan los valores medios (PROM.) y el coeficiente de variación (CV.).

Tabla 2. Resultados de ensayos a flexión perpendicular al plano, en la dirección de máximos esfuerzos

ID. probeta	$f_{m,x,LC}$ (N/mm^2)	$E_{x,medio}$ (1) (N/mm^2)	m_{max} (Nmm^2)	$(EI)_{LC,local,eficaz}$ (Nmm^2)	ρ (1) (kg/m^3)	u_{medio} (%)	Falla
F2-5-20-2	38	7.031	$1{,}6 \times 10^7$	$1{,}6 \times 10^{11}$	449	10,4	A
F2-5-20-5	32	7.512	$1{,}5 \times 10^7$	$1{,}7 \times 10^{11}$	554	9,9	A
PROM.	**35**	**7.271**	$\mathbf{1{,}5 \times 10^7}$	$\mathbf{1{,}7 \times 10^{11}}$	-	-	**A**
CV. (%)	12	5	3	5	-	-	-
F2-5-20-1	27	8.617	$1{,}3 \times 10^7$	$2{,}0 \times 10^{11}$	545	9,3	B
F2-5-20-3	29	6.015	$1{,}3 \times 10^7$	$1{,}4 \times 10^{11}$	504	10,3	B
F2-5-20-4	20	7.867	$9{,}2 \times 10^6$	$1{,}8 \times 10^{11}$	463	9,9	B
F2-5-20-6	30	7.054	$1{,}4 \times 10^7$	$1{,}6 \times 10^{11}$	521	10,6	B
PROM.	**27**	**7.388**	$\mathbf{1{,}2 \times 10^7}$	$\mathbf{1{,}7 \times 10^{11}}$	-	-	**B**
CV. (%)	18	15	18	15	-	-	-
F1-5-20-1	26	12.209	$1{,}2 \times 10^7$	$2{,}8 \times 10^{11}$	531	10,0	B
F1-5-20-2	30	10.330	$1{,}4 \times 10^7$	$2{,}4 \times 10^{11}$	517	10,1	B
PROM.	**28**	**11.270**	$\mathbf{1{,}3 \times 10^7}$	$\mathbf{2{,}6 \times 10^{11}}$	-	-	**B**

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

CV. (%)	11	12	12	12	-	-	-

(1) Valores ajustados a la humedad 12% según EN 384 (2016). **A**: Falla por flexo-tracción; **B**: Falla por delaminación o cizalle del adhesivo.

El análisis de las dos probetas CLT con falla por flexo-tracción (tipo A, Figura 4) reveló una resistencia a la flexión media de 35 N/mm^2 (variación del 12%), superando en un 8% al valor medio reportado por P. J. Fank (2018) (32,6 N/mm^2) para tablas sin médula. El módulo de elasticidad local medio (7.271 N/mm^2), coincidió con el contrastado de la norma IRAM 9662-3 (2013) (7.000 N/mm^2) y P. J. Fank (2018) (7.694 N/mm^2). El momento flector máximo alcanzó un valor de 1,5 × 10^7 Nmm, equivalente a 4,3 × 10^7 Nmm/m de ancho. La rigidez en flexión alcanzó un valor medio de 1,7 × 10^{11} Nmm^2, equivalente a 4,9 × 10^{11} Nmm^2/m de ancho. La cantidad de probetas implica que los resultados experimentales fueron insuficientes para establecer con precisión su comportamiento estructural.



Figura 4. Falla por flexo tracción. Laboratorio UTN FRVT.



Figura 5. Rotura por delaminación o cizalle del adhesivo. Laboratorio UTN FRVT.

Las probetas de clase 2 que fallaron por delaminación (tipo B, Figura 5) mostraron un 25% menos de resistencia media a flexión (27 N/mm^2 vs. 35 N/mm^2 en piezas sin delaminación). El módulo de elasticidad local medio (7.388 N/mm^2) fue comparable al de piezas sin delaminación (7.271 N/mm^2), indicando un comportamiento monolítico hasta alcanzar aproximadamente el 50% de la carga de rotura. Las rigideces efectivas fueron consistentes (1,7 × 10^{11} Nmm^2), independientemente del tipo de falla.

Las probetas de clase 1 que fallaron por delaminación (tipo B, Figura 5) mostraron una resistencia a la flexión (28 N/mm^2) 4% superior a la de clase 2 (27 N/mm^2), manteniendo esta proporción para el momento flector (1,3 × 10^7 Nmm^2 vs. 1,2 × 10^7 Nmm^2). El módulo de elasticidad local medio (11.270 N/mm^2) resultó un 10% inferior al valor medio obtenido de IRAM 9662-3 (2013) para tablas de esta clase (12.576 N/mm^2), atribuyéndose la diferencia al tipo de falla. La rigidez a la flexión (2,6 × 10^{11} Nmm^2) superó en 35% a la de clase 2 (1,7 × 10^{11} Nmm^2).

La densidad promedio de las ocho probetas fue de 510 kg/m^3, atribuible a la especie mixta elliotti-taeda, resultando un 6% superior al reportado por P. J. Fank (2018) (478 kg/m^3). La humedad promedio de los paneles durante los ensayos fue del 10%.

4. Conclusiones

i. Las probetas de CLT clase 2 con rotura por flexo-tracción (A) mostraron una resistencia media a la flexión (35 N/mm^2) un 8% mayor al valor medio para las tablas que la componen (32,6 N/mm^2) y un módulo de elasticidad local medio equivalente al obtenido de la norma IRAM 9662-3 (2013) (7.271 N/mm^2 vs. 7.326 N/mm^2). No obstante, los resultados experimentales fueron insuficientes para establecer con precisión el comportamiento estructural de los paneles. Será necesario realizar un mayor número de ensayos para obtener resultados más concluyentes y permitir una comparación fiable con las opciones de CLT actualmente disponibles en el mercado.

ii. Inicialmente las piezas demostraron un comportamiento monolítico. Sin embargo, al acercarse al 50% de la carga de rotura, comenzaron a manifestarse problemas de delaminación en algunas probetas, comprometiendo la transmisión de esfuerzos rasantes longitudinales. Consecuentemente, las tres capas de tablas longitudinales comenzaron a trabajar individualmente, cada una con su propia inercia, limitando la capacidad de carga de los paneles y restringiendo la continuación de los ensayos previstos en estos especímenes.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

iii. Estos hallazgos fundamentan una fase subsecuente de investigación centrada en estudios de adhesión en probetas a pequeña escala. La fabricación de prototipos adicionales y la ejecución de ensayos complementarios serán cruciales para establecer los parámetros óptimos de producción de paneles CLT en el contexto nacional. Además se evaluará el uso de especies con bajas propiedades mecánicas para potenciar su valor estructural respecto a su uso como piezas aserradas o laminadas.

Agradecimientos

La autora agradece a la Universidad Tecnológica Nacional (UTN); a su Facultad Regional Venado Tuerto; al fabricante de CLT y a los miembros del Grupo GIDEC por su colaboración en las distintas etapas de la investigación.

Referencias bibliográficas

Blass, H. J., & Fellmoser, P. (2014). Design of solid wood panels with cross layers. *Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering*, 1001–1006.

Braier, G. (2004). Argentina. Tendencias y perspectivas del sector forestal al año 2020. *Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de La Nación, Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura y La Alimentación.*

Fank, P. J. (2018). *Caracterización físico-mecánica del pino resinoso (Pinus taeda y Pinus elliottii) cultivado en el nordeste argentino para uso estructural* [Tesis Doctoral]. Universidad Tecnológica Nacional.

Fank, P. Y., García, D. A., & Piter, J. C. (2020). Análisis comparativo de la madera de Pinus elliottii y Pinus taeda a través de las propiedades físico-mecánicas. *Revista Forestal Yvyraretá*, *28*, 15–21.

Galarco, S. P., & Ramilo, D. I. (2019). *Plantaciones forestales en Argentina. Fundamentos técnicos y metodologías para la realización de forestaciones en diferentes regiones* (Editorial de la UNLP, Ed.). Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

Guindos, P. (2019). *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera PARTE II* (UPV Press, Ed.; 1st ed.).

INTI-CIRSOC 601. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones Generales y Requisitos Para El Diseño y La Construcción de Estructuras de Madera En Edificaciones., 1 1 (2016). www.inti.gob.ar/cirsoc

IRAM 9662-3:2013. Madera Laminada Encolada Estructural. Clasificación Visual de Las Tablas Por Resistencia. Parte 3 - Tablas de Pino Taeda y Elliotti (Pinus Taeda y Elliotti) (2013).

ISO 13061-1:2014(E). Physical and Mechanical Properties of Wood — Test Methods for Small Clear Wood Specimens — Part 1: General Requirements for Physical and Mechanical Tests, International Organization for Standardization (2014).

ISO 13061-2:2014(E). Physical and Mechanical Properties of Wood — Test Methods for Small Clear Wood Specimens — Part 2: Determination of Density for Physical and Mechanical Tests, International Organization for Standardization (2014).

Karacabeyli, E., & Gagnon, S. (2019). *Canadian CLT Handbook*. FPInnovations.

Sharry, S. (2013). *Producción y Procesamiento de Recursos Forestales: Documento de Referencia*. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.

UNE-EN 384:2016. Madera Estructural. Determinación de Los Valores Característicos de Las Propiedades Mecánicas y La Densidad., Asociación Española de Normalización y Certificación. Comité Europeo de Normalización. (2016).

UNE-EN 408:2010 + A1:2012. Estructuras de Madera. Madera Aserrada y Laminada Encolada Para Uso Estructural. Determinación de Algunas Propiedades Físicas y Mecánicas., Asociación Española de Normalización y Certificación. Comité Europeo de Normalización. (2011).

UNE-EN 16351:2021. Estructuras de Madera. Madera Contralaminada. Requisitos, Asociación Española de Normalización. Comité Europeo de Normalización. (2021).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

JIT 24 ROSARIO

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Materiales
Categoría:	Graduado
Facultad Regional:	Rafaela

PRESENTACION ORAL

Estudio de porosidad en fundición de Al-Si usando tomografía computada

Porosity study in Al-Si casting using computed tomography

Presentación 18/10/2024

Martín Felcaro

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Departamento de Ingeniería Industrial, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: martinfelcaro8@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta, empleando tomografía computada de rayos X, una metodología para analizar la porosidad cercana a la zona de fractura en una muestra de fundición de Al-Si, solicitada a flexión de 3 puntos. El software utilizado posibilitó el diseño de una estrategia para evaluar y comparar la porosidad en diferentes regiones de interés (ROIs), lo cual a su vez permitió evaluar la correlación entre la porosidad y el plano de fractura. En dichas ROIs se evaluó, cuantitativamente, la distribución espacial, conteo, tamaño y forma de los poros. El análisis exhaustivo de estas ROIs posibilitó evaluar la fractura, la cual ocurre en un plano de transición entre dos subpoblaciones diferentes de poros. Finalmente, para el presente caso, donde las tensiones normales son máximas en los bordes de dicho plano, la fractura inicia en el borde superior debido a que la densidad de poros es mayor que en el borde inferior.

Palabras clave: Porosidad; Fundición de Al-Si; Tomografía computada

Abstract

This work presents, using X-ray computed tomography, a methodology to analyze the porosity close to the fracture zone in an Al-Si cast sample subjected to 3-point bending. The software enabled the design of a strategy to evaluate and compare the porosity in different regions of interest (ROIs), which allowed the evaluation of the correlation between the porosity and fracture plane. In these ROIs, the spatial distribution, count, size and shape of each pore were quantitatively evaluated. The exhaustive analysis of these ROIs allowed to evaluate the fracture, which occurs in a transition plane between two different subpopulations of pores. Finally, for the present case, where normal stresses are maximum at the edges, the fracture starts at the upper edge because the pore density is high.

Keywords: Porosity; Al-Si casting; Computed tomography

1. Introducción

La tomografía computada (TC) de rayos X es una técnica no-destructiva que posibilita evaluar la estructura interna de un conjunto, componente o muestra, con elevada resolución (Hanke, 2016; Maire, 2014; Rueckel, 2014). Esta técnica utiliza un software especial para la generación de un modelo 3D del sólido evaluado y para el pos-procesamiento de los datos obtenidos, posibilitando la evaluación cuantitativa de tamaño, forma, cantidad y distribución espacial de defectos, fisuras, poros y/o inclusiones generadas a partir de diferentes procesos de fabricación.

Por otra parte, las aleaciones Al-Si de moldeo, usadas en la producción de componentes industriales con diferentes niveles de resistencia y tenacidad, son materiales que brindan un amplio rango de propiedades mecánicas, las cuales dependen de la composición química, las condiciones de fundición, la velocidad de solidificación y el tratamiento térmico (Glazoff, 2018).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Sin embargo, estas aleaciones pueden contener mayor o menor porosidad, lo cual va en detrimento de dichas propiedades. Es importante destacar que estas dependen, fuertemente, de la cantidad, tamaño, forma, y distribución espacial de los poros. En los últimos años, la TC ha sido una importante herramienta no-destructiva para el estudio de los mismos a partir del pos procesamiento de las imágenes generadas (Mathew, 2021).

En este trabajo, la TC se aplica al análisis de una muestra de aleación de Al-Si obtenida por moldeo de arena (Felcaro, 2023). Se evalúa, en primer lugar, la porosidad global de dicha muestra, y luego, dos pequeños volúmenes adyacentes al plano de fractura. La generación de esta fue llevada a cabo a partir de un ensayo de flexión de 3 puntos, incorporando, de esta manera, la singularidad de esta solicitación a estudios previos llevados a cabo a partir de la solicitación axial (Cuyás, 2002).

En los volúmenes mencionados, denominados regiones de interés (ROIs), se evaluó la distribución espacial, conteo, tamaño y forma de los poros. Además, se compararon gráficos de dispersión de parámetros de forma en función de parámetros de tamaño. Finalmente, a partir de la distribución espacial de los poros y el diagrama de momento flector inherente al ensayo de flexión, fue posible evaluar la influencia de la porosidad en las secciones transversales más exigidas por la solicitación externa.

2. Materiales y métodos

2.1. Material y parámetros de tomografía

La muestra evaluada es de aleación de Al-Si obtenida por moldeo de arena. La dimensión de la misma es de 25,48 mm x 5,18 mm x 4,55 mm. Su composición química, mostrada en la Tabla 1, fue obtenida usando un espectrómetro de chispa por emisión óptica Brucker (Q4 Tasman).

Tabla 1. Composición química de la muestra.

Al	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Ti	Cr
Base	5,23	0,66	0,59	0,36	0,36	0,14	0,05	0,03

Las imágenes se obtuvieron empleando un tomógrafo General Electric Phoenix V |tome| x S 240, usando un voltaje de aceleración de 75 kV y una corriente de filamento de 100 µA. Los parámetros de resolución, magnificación y tamaño de punto focal fueron 34,22 µm/vóxel, 5,84x y 7,5 µm, respectivamente, con un total de 1000 proyecciones, 3 fotogramas promediados por cada proyección, y un tiempo de escaneo aproximado de 1 hora. Cabe destacar que, antes de tomografiar la muestra, se realizó un ajuste dimensional con un patrón de distancias del tipo ball bar (Hiller, 2012; Zwanenburg, 2022).

2.2. Parámetros de análisis

Con el objetivo de realizar un análisis representativo de la porosidad de la muestra, se tomaron los parámetros de compacidad (C) y volumen (V) ya que se demostró en estudios precedentes (Felcaro, 2023) que poseen un rango más amplio, y, por ende, brindan también mayor grado de detalle, que los parámetros esfericidad (SG) y diámetro (D).

La compacidad se define como la relación entre el volumen del poro (V) y el volumen de la esfera circunscripta en dicho poro (Vs), como se presenta en la Ecuación (1). la esfericidad se define como la relación entre el volumen V y el área superficial del poro

$$C = \frac{V}{Vs} \tag{1}$$

2.3. Ensayo de flexión y evaluación vía ROIs

La muestra fue ensayada a flexión de 3 puntos hasta su fractura, empleando una prensa hidráulica AMOB Group (PH4C 60T). La Figura 1 (a) muestra una representación esquemática de dicho ensayo de flexión.

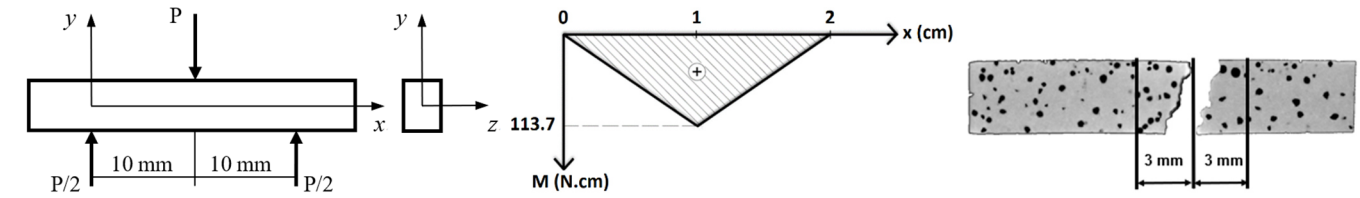
La carga P de rotura fue de 227 N, este valor de rotura se alcanzó con una velocidad de carga de 98 N/s. Es importante destacar que, la flexión de 3 puntos genera tanto momento flector (M) como esfuerzo de corte (Q) en las secciones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

transversales de la muestra entre ambas cargas P/2 (Gere, 2009). Debido a que el esfuerzo de corte muestra valores bajos, las tensiones de corte generadas pueden despreciarse. La Figura 1 (b) muestra como varía dicho momento flector para las secciones transversales ubicadas entre ambas cargas P/2. La variación es simétrica con respecto a la sección transversal donde se aplica la carga P. El valor máximo corresponde a la carga de rotura y posee valor nulo en los puntos de apoyo P/2.

Posterior a la fractura, se realizó nuevamente el proceso de tomografiado, seguido de un pos-procesamiento del modelo 3D a fin de generar diferentes ROIs a partir de las cuales fue posible evaluar la morfología y distribución espacial de los poros cercanos a las superficies de fractura. Dicho pos-procesamiento, llevado a cabo usando el software VGSTUDIO MAX 3.0 (Volume graphics, 2024), posibilitó realizar un estudio exhaustivo de las condiciones de la muestra adyacente a la fractura, a fin de establecer una correlación entre los datos de porosidad y la misma.

Las ROIs evaluadas fueron 2, cada una conteniendo una superficie de fractura. La Figura 1 (c) muestra, en un corte de tomografías, el alcance (3 mm) de cada una. La ubicada en lado izquierdo se la denomina ROI 1, y la del derecho, ROI 2.



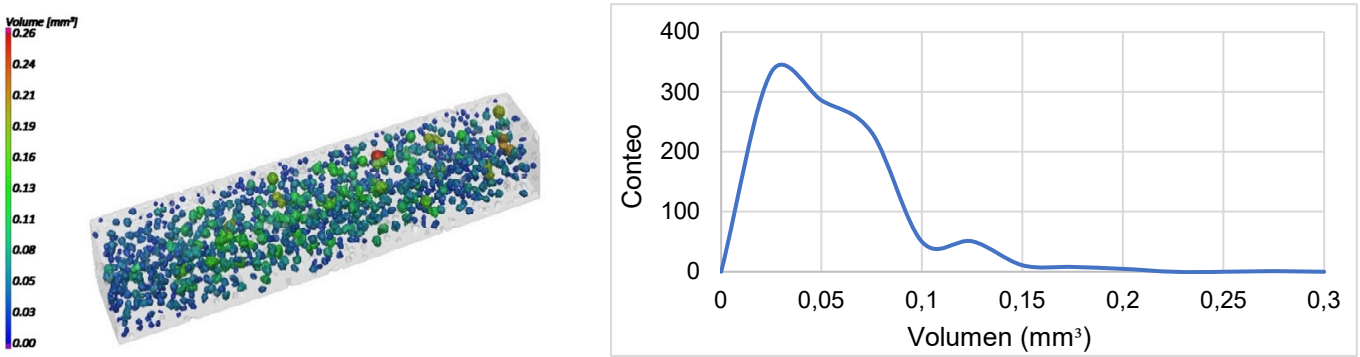
(a) (b) (c)

Figura 1. (a) Ensayo de flexión, (b) distribución de momento flector y (c) definición de ROIs.

3. Resultados

3.1. Evaluación de porosidad general en la muestra

Luego de realizar la tomografía de la muestra, previa a su rotura mediante el ensayo de flexión por 3 puntos, como se mencionó previamente, se generaron diferentes imágenes 3D, como se muestra en la Figura 2 (a). Además, se ilustra en la Figura 2 (b) un gráfico de conteo de poros vs volumen. La curva sería cuasi-gaussiana solo expandida a derecha. La mayoría de los poros se hallan dentro del rango de 0,025-0,1 mm^3 y por encima de este valor el número de poros es muy bajo.



(a) (b)

Figura 2. (a) Porosidad de la muestra. (b) Conteo de poros vs volumen.

La tabla 2 muestra la cantidad de poros para cada una de las subpoblaciones definidas. Cabe destacar que para dicha segmentación se tomó en cuenta la zona principal de la curva cuasi-gaussiana (rango de 0-0,1 mm^3), la cual se subdividió en 3 zonas de igual amplitud (poros pequeños, medianos y grandes) considerando el tamaño de los poros en función de V. La categoría poros muy grandes es las correspondiente a la expansión a derecha de dicha curva. Del total de la muestra (948), el 50,2% corresponde a la categoría de poros pequeños, el 32,7% a poros medianos y el 11,9% a los denominados grandes. En cuanto a la categoría de poros muy grandes, esta contiene solo el 5,2%.

Tabla 2. Cantidad de poros en cada subpoblación.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

PEQUEÑOS	MEDIANOS	GRANDES	MUY GRANDES
V: 0 – 0,033 mm^3	V: 0,033 – 0,067 mm^3	V: 0,067 – 0,10 mm^3	V: > 0,10 mm^3
494	322	117	51

3.2. Evaluación de porosidad en ROIs

Para llevar a cabo una evaluación que posibilite explicar el plano donde se produce la fractura, fue necesario analizar la porosidad cercana a la misma. Los parámetros definidos previamente fueron usados en el análisis de las regiones de interés que contienen a las superficies de fractura. La Tabla 3 muestra la cantidad de poros para cada subpoblación evaluada, en las regiones de interés 1 y 2, respectivamente.

Tabla 3. Cantidad de poros en cada subpoblación de las ROIs.

	PEQUEÑOS	MEDIANOS	GRANDES	MUY GRANDES
	V: 0 – 0,033 mm^3	V: 0,033 – 0,067 mm^3	V: 0,067 – 0,10 mm^3	V: > 0,10 mm^3
ROI 1	83	22	7	1
ROI 2	45	26	14	11

Es importante destacar que la ROI 1 contiene un total de 113 poros, de los cuales el 73,5% corresponde a poros pequeños. Este valor porcentual asciende a 92,9% cuando se considera la suma de poros pequeños y medianos. El valor, para la suma de poros grandes y muy grandes, es menor al 8%. La ROI 2 contiene un total 96 poros. De estos, menos de la mitad corresponden a la categoría pequeños (46,9%) y, la suma de pequeños y medianos alcanza un 73,9%. A diferencia de la ROI 1, en esta región, la suma de las categorías grandes y muy grandes superan el 26%.

De estos valores se desprende que las subpoblaciones de poros asociadas a las superficies de fractura son diferentes en tamaño. Esto contribuiría a explicar la ubicación del plano de fractura. Las Figuras 3 y 4 muestran las distribuciones de conteo para las regiones de interés 1 y 2, respectivamente. Estas distribuciones corroboran las notables diferencias, en cuanto a tamaño de poros, que muestran las regiones de interés evaluadas.

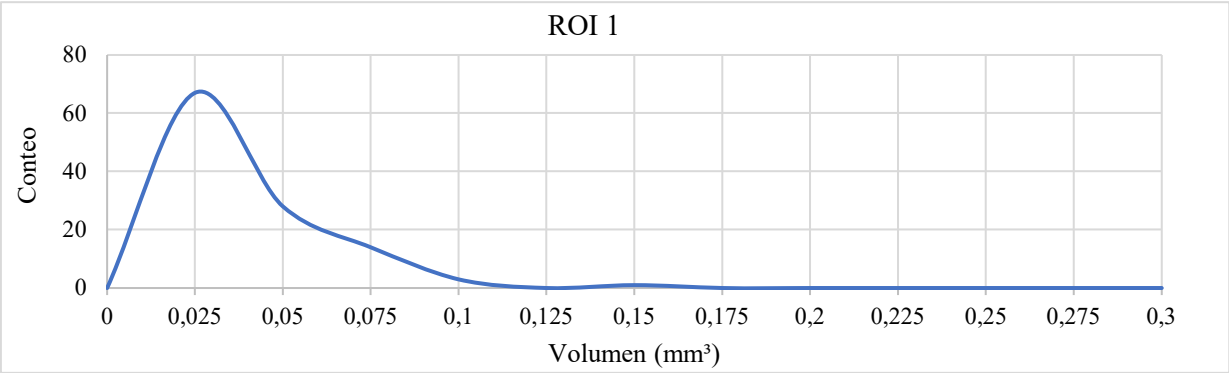


Figura 3. Cantidad de poros vs volumen para la ROI 1.

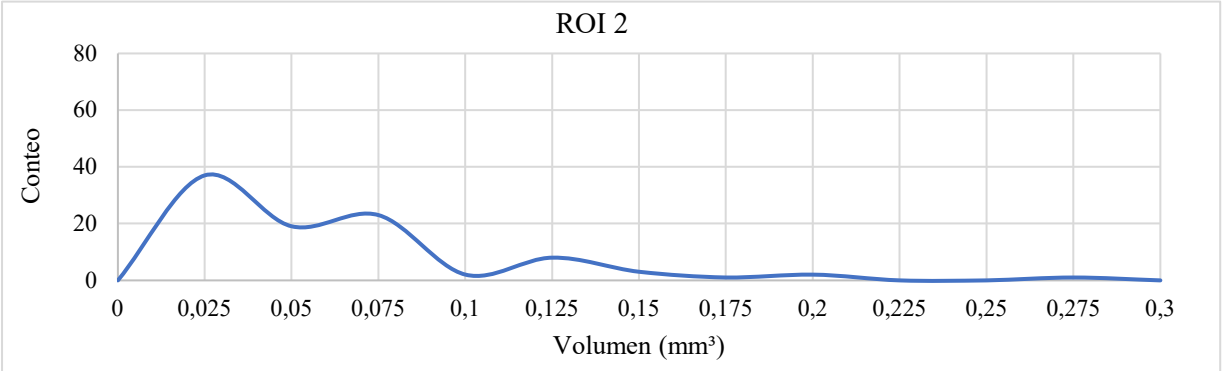
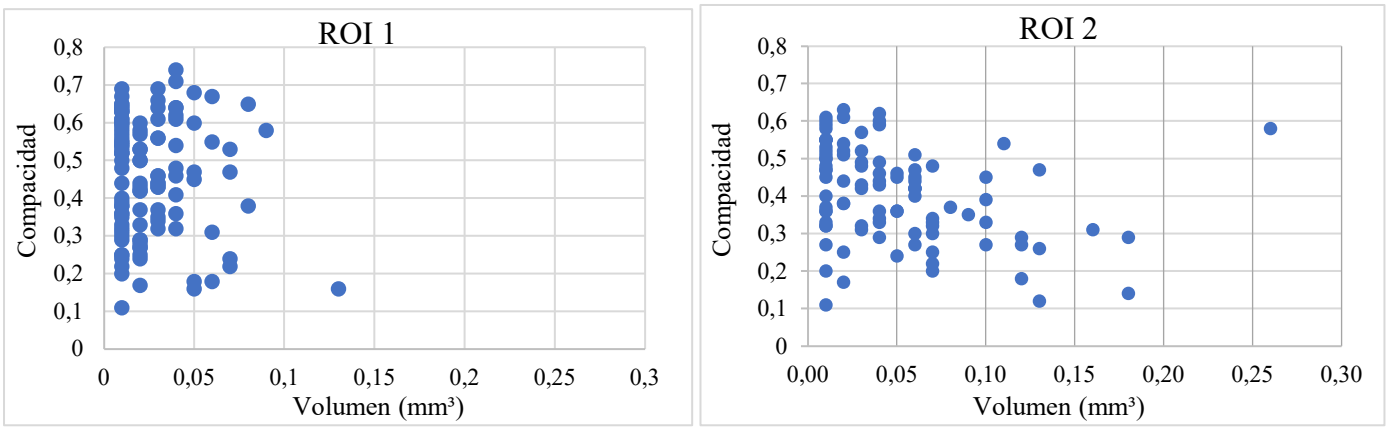


Figura 4. Cantidad de poros vs volumen para la ROI 2.

Los gráficos de dispersión mostrados en la Figura 5 relacionan forma y tamaño de los poros. En cuanto a la forma, los poros de la ROI 2 son ligeramente más homogéneos. Sin embargo, en cuanto al tamaño, los poros de ROI 1 son notoriamente más

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

homogéneos (la dispersión en tamaño es muy notoria en ROI 2). La mayoría de los poros de ROI 1 poseen un rango de compacidad de 0,2 a 0,7, ligeramente mayor a los poros de la ROI 2 (0,2 – 0,6). Gran parte de los poros pequeños de ROI 1 tienen valores elevados de compacidad (tienden a la forma esférica ideal). Si bien en ROI 1 hay poros con baja compacidad, esta ROI contiene una gran cantidad de poros con C > 0,5. Por el contrario, en ROI 2, la mayoría de los poros tienen C < 0,5.



(a) (b)

Figura 5. Gráficos de dispersión para las ROIs (a) 1 y (b) 2.

3.3. Correlación entre porosidad y fractura

En un plano (sección transversal de la muestra) que contenga gran cantidad de poros que lo atraviesen, su momento de inercia (Iz) disminuirá sensiblemente. Es importante notar que Iz representa la rigidez de forma de dicha sección transversal. La Ecuacion (2) muestra la influencia de Iz en cuanto a la generación de tensiones normales asociadas a M (Hibbeller, 2016)

$$\sigma_x = -\frac{M\,y}{I_z} \tag{2}$$

En esta expresión, “y” es la ordenada del punto a evaluar con respecto al eje z de la sección transversal, el cual es baricéntrico (ver Fig. 2 a). Por lo tanto, despreciando las tensiones de corte, la fractura siempre iniciará en la zona más alejada del eje z, necesariamente en el borde superior o inferior de la sección transversal. Por lo tanto, interesa en particular, la porosidad cercana a dichos bordes para la estimación del valor máximo que alcanza σ_x. En cuanto al plano de fractura, será aquel más afectado por la combinación de M elevado e Iz bajo, como es posible deducir de Ecuacion (2). Además, cuando la porosidad este más alejada al eje z, Iz disminuirá una cantidad aún más elevada, como es posible deducir a partir de su expresión

$$I_z = \int_A y^2 \,.\, dA \tag{3}$$

Cabe mencionar que M disminuye linealmente a partir del plano de aplicación de la carga P en el ensayo de flexión de 3 puntos, donde el mismo es máximo (ver Fig. 3). En cambio, la modificación de Iz a lo largo de la muestra es más compleja, ya que depende de la cantidad, tamaño y ubicación de los poros. De este planteamiento se deduce que la muestra romperá en una región central, aunque no necesariamente en la sección transversal equidistante de ambos extremos, ya que es donde se posee un valor de M elevado (cerca de los puntos de apoyo este disminuye); y dentro de esta región central de M elevado, el plano de fractura quedara definido por el factor de porosidad, ya que, puede presentar una gran variabilidad de Iz según la distribución y características de los poros. El plano atravesado por gran cantidad de poros que hagan disminuir en este plano particular su Iz bruscamente, sumado al valor elevado de M, generara la máxima tensión normal σ_x que inicie la fractura.

En la Fig. 6, que muestra dos imágenes que representan la zona de la pieza donde se produjo la fractura, antes y después de la misma, se puede apreciar con claridad que dicha fractura se produce en un plano de transición que separa una región densa de poros pequeños de otra menos densa que contiene poros de mayor tamaño. El perímetro rojo en dicha Fig. 6

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

contiene un conjunto de poros pequeños en la parte delantera de la muestra hacia uno de sus bordes (cara sobre la cual se aplicó la carga). Esta elevada densidad de poros cercanos a superficie, como se mencionó más arriba, genera una disminución brusca de Iz, debilitando a esta zona con respecto a las zonas adyacentes, y provocando un aumento de la tensión normal. Finalmente, la propagación se produce, con velocidad elevada, siguiendo un plano con alta densidad de poros, que a su vez constituye el límite entre dos zonas con gran diferencia en cuanto a la densidad de porosidad.

En base a lo expresado se deduce la importancia de conocer la distribución de porosidad de la pieza ya que esta afecta directamente a la resistencia de la misma. En la práctica profesional al conocer los esfuerzos a los que estará sometido una componente, si mediante la aplicación de tomografía se puede identificar que característica tiene la distribución de porosidad, se podrá identificar zonas críticas en las que podría generarse una concentración de tensiones y hasta la rotura del material. Estos resultados se alinean con los obtenidos en estudios precedentes por lo que se demuestra que la consideración y el análisis del factor porosidad es fundamental para identificar zonas críticas de una componente a la hora de su dimensionamiento.

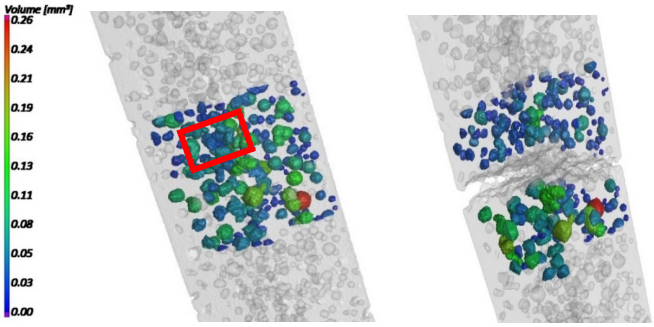


Figura 6. Porosidad antes y después de la fractura.

4. Conclusiones

El presente estudio utilizo tomografía computada de rayos X para evaluar inicialmente la porosidad global y luego, más detalladamente, la cercana a la fractura, en una muestra de fundición de Al-Si solicitada a flexión de 3 puntos. Los resultados obtenidos muestran en la mayoría de los poros, de cada ROI y de la muestra global, valores medios a bajos de compacidad (rango de 0,2-0,6), y valores bajos en cuanto al tamaño (0-0,033 mm3). En las ROIs asociadas a las superficies de fractura, es posible advertir marcadas asimetrías en cuanto al tamaño de los poros. La fractura ocurrió en un plano de transición entre una zona de alta densidad de poros pequeños y otra de menor densidad con poros de mayor tamaño. La fractura se produjo en una región perteneciente al tercio medio, donde M es elevado. El plano de fractura quedó definido por el factor porosidad, ya que el Iz presenta una gran variabilidad en cuanto al tamaño, forma y distribución de los poros. Necesariamente este plano de propagación es aquel cuya porosidad, sobre todo la cercana a los bordes, hace mínimo el Iz.

Referencias bibliográficas

Cuyás, J.C., Mugica, G. W., Tovio, D. O., Gonzales, A. C. (2002). Relación entre porosidad y propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio de moldeo. Estado del conocimiento, 38, 139–149.
Felcaro, M. (2023). Tomografía computada de rayos x aplicada a estudios de porosidad en fundiciones de aluminio. CAIM-CAIFE, 1-12.
Gere J.M., Goodno B.J. (2009). *Mechanics of Materials*. Toronto: Cengage Learning.
Glazoff, M.V., Khvan, A., Zolotorevsky, V.S., Belov, N.A., Dinsdale, A. (2018). Casting Aluminum Alloys: Their Physical and Mechanical Metallurgy. Oxford: Butterworth-Heinemann.
Hanke, R. (2016). X-ray microtomography for materials characterization. Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods. 45-79.
Hibbeler, R. (2016). Mechanics of Materials. London: Pearson.
Hiller, J. (2012). Physical characterization and performance evaluation of an X-ray micro-computed tomography system for dimensional metrology applications. Meas. Sci. Technol., 23, 1-18.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Maire, E. (2014). Quantitative X-ray tomography. Int. Mater, 59, 1-43.
Mathew, J. (2021). X-ray computed tomography studies on porosity distribution in vacuum induction cast Al-7Si alloys. JOM, 73, 3866–3872.
Rueckel, J. (2014). Spatial resolution characterization of an X-ray microCT system. Appl. Radiat. Isot., 94, 230-234.
Volume graphics. (2024). Web: https://www.volumegraphics.com/en/products/vgsm.html.
Zwanenburg, E.A. (2022). Performance testing of dimensional X-ray computed tomography systems. Precision Eng., 77, 179-193.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Ing

JIT 24 ROSARIO

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Materiales
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	San Nicolás

PRESENTACION ORAL

Estudio de corrosión en acero inoxidable AISI 316L ensayado en cámara de niebla salina

Study of corrosion in AISI 316L stainless steel tested in a salt fog chamber

Presentación 18/10/2024

Priscila Vallejos

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Laboratorio Metalurgia Física, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina.

E-mail de contacto: pvallejos@frsn.utn.edu.ar

Resumen

El acero inoxidable austenítico AISI 316L es ampliamente utilizado como parte de componentes y estructuras industriales debido a su excelente resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, cuando se lo somete a condiciones de servicio inadecuadas (por ejemplo, exposición a temperatura, atmósferas agresivas o solicitaciones mecánicas) existe riesgo de que su resistencia a la corrosión se vea afectada. En este trabajo se estudia el comportamiento microestructural de un acero inoxidable AISI 316L tratado térmicamente (1100 °C/1h seguido de enfriamiento en agua) sometido a ensayo de corrosión acelerada en cámara de niebla salina, considerando tiempos de exposición de 8 h, 50 h y 96 h a una atmósfera salina. Del análisis micrográfico realizado en las muestras corroídas, se determinaron zonas con una mayor profundidad de la corrosión en las muestras tratadas térmicamente respecto de sus pares en condición as-received. Además, se identificaron avances por picado e intergranular, vinculados con carburos de cromo.

Palabras clave: Corrosión intergranular; Carburos; Aceros inoxidables; Microscopia

Abstract

AISI 316L austenitic stainless steel is widely used as part of industrial components and structures due to its excellent corrosion resistance and good mechanical properties. However, when it is subjected to inadequate service conditions (for example, exposure to temperature, aggressive atmospheres or mechanical stress) there is a risk that its corrosion resistance will be affected. In this work, the microstructural behavior of a heat-treated AISI 316L stainless steel (1100 °C/1h followed by cooling in water) subjected to accelerated corrosion testing in a salt fog chamber is studied, considering exposure times of 8 h, 50 h and 96 h. to a saline atmosphere. From the micrographic analysis carried out on the corroded samples, areas with a greater depth of corrosion were determined in the thermally treated samples compared to their peers in as-received condition. In addition, pitting and intergranular advances were identified, linked to chromium carbides.

Keywords: Intergranular corrosion; Carbides; Stainless steels; Microscopy

1. Introducción

Los aceros inoxidables austeníticos poseen contenidos en cromo superiores al 16 % que les permite la formación en superficie de una fina capa pasivadora de óxido de cromo (Cr_2O_3), firmemente adherida, que los protege de la corrosión, sin embargo, hay un contenido mínimo de 11 % en cromo que el acero debe presentar para que esta capa se forme, Forero (1982). Es por esto que, el comportamiento frente a la corrosión dependerá de la propia naturaleza del material (elementos

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

de aleación) y de las condiciones de servicio a las que se los exponga, fundamentalmente exposiciones a temperatura y atmósferas agresivas, como las encontradas en los ensayos acelerados de corrosión en Cámara de Niebla Salina (CNS).

El acero inoxidable austenítico AISI 316L posee gran aplicabilidad en el campo industrial, por poseer un adecuado equilibrio entre su resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas, Sedriks (1996). Sin embargo, la presencia de iones cloruros presentes en la atmósfera generada en las CNS promueven la ruptura localizada de la capa pasivadora del material en zonas con defectos previos o que posean un comportamiento más anódico, permitiendo una rápida reacción de corrosión, que frecuentemente se presenta bajo la forma de corrosión intergranular, y también por picado, Rodriguez et al. (2013), Abd Rashid et al. (2012), Afolabi (2011).

En estos aceros prevalecen carburos de cromo del tipo $Cr_{23}C_6$ y Cr_6C, y en especial, de fase sigma (σ), estas partículas son muy perjudiciales debido a que fragilizan el material y permiten un gran avance de la corrosión. Los autores Inés y Mansilla (2023) afirman que la incorporación de elementos de aleación apropiados, junto con el empleo de tratamientos térmicos adecuados, pueden dar lugar a la formación de distintos tipos de carburos, lo que conduciría a una resistencia mecánica mejorada en estos aceros. Sin embargo, la presencia de carburos debe controlarse cuidadosamente, debido a que la exposición continua a altas temperaturas desencadena fenómenos de difusión, en particular la difusión de carbono y cromo desde los granos austeníticos hasta los límites de grano. La formación de una estructura austenítica monofásica y la disolución de carburos y otras fases son los principales objetivos de los tratamientos de austenización, Masoud et al. (2017). Aceros inoxidables austeníticos en esta condición deberían mostrar una mejora en la resistencia a la corrosión debido a la disolución de las partículas de carburos de cromo, y a la consecuente redistribución homogénea del cromo en la red de la austenita. Sin embargo, la literatura reporta que los aceros inoxidables austenizados y templados en agua, podrían ver afectado su comportamiento corrosivo en condiciones de servicio nocivas, principalmente por las tensiones introducidas por el severo enfriamiento en agua, y, además, a causa de una distribución heterogénea del cromo, lo que podría dar origen a fallas por corrosión bajo tensiones o del tipo localizado intergranular, Davis (1994).

El objetivo de este trabajo es analizar los efectos de la corrosión de un acero inoxidable austenítico AISI 316L, con tratamiento térmico previo, expuesto a una atmósfera salina.

1. Metodología

2.1 Materiales y Métodos

En este trabajo se utilizaron muestras planas de acero inoxidable austenítico AISI 316L. La composición química se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 316L.

Elemento	C	Si	Cr	Mn	Ni	Mo	Fe
(% w)	0,032	0,65	17,2	1,50	10,7	2,57	Bal.

Inicialmente, sobre el material en condición as-received (AR) se realizó tratamiento de recocido de solubilización (TT) a 1100 °C durante 1h, con enfriamiento posterior en agua. Posteriormente, estas muestras y aquellas en condición as-received, se colocaron en una CNS DIGIMESS modelo QSS-108. Las pruebas se desarrollaron de acuerdo con las normas ASTM B117 (2003). Las muestras fueron expuestas a una solución de NaCl al 5 % considerando extracciones periódicas a intervalos de 8 h, 50 h y 96 h. Las muestras se identificaron como: AR8, AR50, AR96 (muestras as-received) y TT8, TT50, TT96 (muestras con tratamiento térmico). El número que acompaña a cada identificación representa la duración (en horas) del ensayo de corrosión.

Considerando los tiempos definidos previamente, se extrajeron muestras de la cámara salina para evaluar la pérdida de masa y calcular luego la velocidad de corrosión, siguiendo el procedimiento explicado por Bertucelli et al. (2018).

Se emplearon métodos convencionales de caracterización microestructural, con lupa estereoscópica (Olympus SZ61) y microscopía óptica (Olympus GX51). Para esta última, las muestras fueron inicialmente seccionadas con cortadora

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

ultralenta de manera de no dañar características superficiales e internas de la muestra, luego se las incluyó en resina fenólica termoplástica, empleando temperatura y presión. Se realizó desbaste grueso, fino y muy fino mediante pulidora metalográfica con papeles de SiC de granulometrías: 400, 600, 1000 y 1200, y finalmente se realizó pulido con pastas diamantadas de 6 µm y 1 µm, respectivamente. Para el revelado de la microestructura se utilizó reactivo de Agua Regia diluída, el cual permitió determinar la estructura del material con los distintos tratamientos térmicos y analizar caminos preferenciales de avance de la corrosión.

2. Resultados

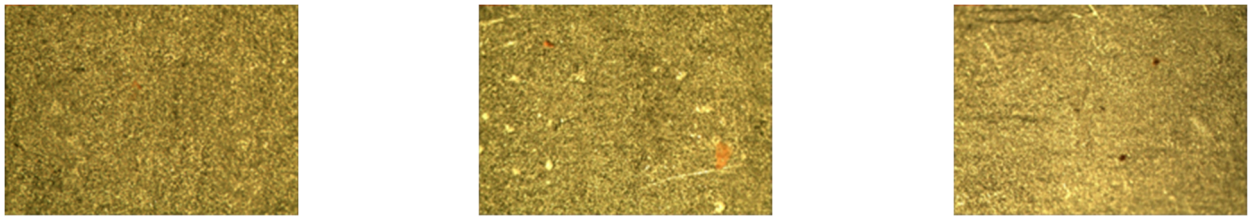
Se determinó un tamaño de grano de 35,3 µm, con presencia de partículas de carburos de cromo globulares en bordes de grano y también, dentro de los granos de austenita para el material en la condición AR, tal como se observa en la Figura 1a, en cambio, en las muestras tratadas térmicamente se observó una disminución en la cantidad y tamaño de las partículas de carburos, con un consecuente aumento del tamaño de grano (43 µm), Figura 1b.



a) b)

Figura 1. Micrografía óptica de acero inoxidable AISI 316L, condición: a) As-received, y b) Tratamiento térmico.

Una vez finalizado el ensayo de corrosión, se analizaron las superficies de las muestras con lupa estereoscópica. A partir de la observación realizada en las muestras as-received, considerando distintos tiempos de exposición al spray salino, esto es, 8 h (muestra AR8), 50 h (muestra AR50) y 96 h (muestra AR96), se logró identificar presencia muy aislada de óxidos en superficie, como se observa en la Figura 2 (a, b, c).



a) b) c)

Figura 2. Óxidos superficiales en muestras as-received, considerando tiempos variables de exposición a spray salino: a) 8 h, b) 50 h, y c) 96 h. Aumento [4,5X].

Sin embargo, contrariamente a lo hallado en estas muestras, en aquellas con tratamiento térmico se determinó una pátina rojiza de aspecto irregular y muy rugosa asociada a óxidos de hierro, con claros signos de corrosión, Figura 3 (a, b, c), para todas las muestras analizadas, esto es, TT8, TT50 y TT96.



a) b) c)

Figura 3. Óxidos superficiales en muestras con tratamiento térmico, considerando tiempos variables de exposición a spray salino: a) 8 h, b) 50 h, y c) 96 h. Aumento [4,5X].

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Luego se procedió al cálculo de cantidad relativa de óxidos generados, mediante programa de procesamiento digital ImageJ®. Para ello, se analizaron las superficies de las probetas recubiertas por óxido en relación con la superficie total de las mismas. Se determinó un aumento sustancial en la cantidad de óxidos en superficie de las muestras con tratamiento térmico frente a sus pares en condición as-received, independientemente del tiempo de exposición al spray salino, Figura 4. Los autores Inés y Mansilla (2023) comprobaron que, trabajando sobre el mismo material (AISI 316L), en muestras tratadas térmicamente a 900 °C, también dieron lugar a una mayor cantidad de óxidos en superficie del acero inoxidable, cuando se expuso a éstas a ensayos de corrosión acelerada.

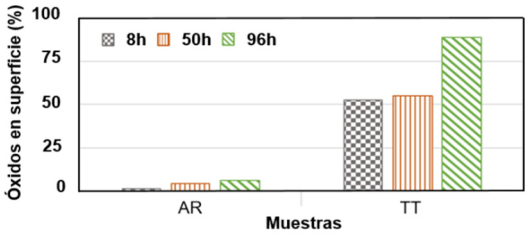


Figura 4. Cuantificación de óxidos en superficie de las muestras.

Es decir, en aquellas muestras en condición AR se halló un leve incremento (5 %) en la cantidad de óxidos formados cuando se consideran los tiempos extremos de exposición al spray salino, esto es, 8 h y 96 h. Sin embargo, este porcentaje trepó a 36 % cuando se tuvo en consideración el comportamiento evidenciado por la muestra con tratamiento térmico, presentando un 89 % de su superficie cubierta de óxidos. Por otra parte, respecto de las muestras tratadas térmicamente y con los menores tiempos de exposición a la niebla salina, esto es, 8 h y 50 h, las mismas mostraron muy poca variación (2 %) en la cantidad de óxidos desarrollados. Ahora bien, para estudiar el grado de avance del proceso corrosivo en regiones internas de la microestructura del acero inoxidable, en la Figura 5 se presentan las micrografías ópticas de las muestras en condición as-received, y con tratamiento térmico, para 8 h, 50 h y 96 h de exposición a la niebla salina. De la observación, es claro que hay una mayor penetración de la degradación superficial para todas las muestras, siendo esta más pronunciada para las muestras con TT frente a sus pares AR. Si bien se distingue el avance intergranular de la corrosión asociada con los carburos ya desde las primeras horas de ensayo (8 h), este fenómeno es más evidente a partir de las 50 h de exposición en muestras con tratamiento térmico, presentando esta muestra un avance de aproximadamente 25 µm, frente a su par en condición AR con solo 3 µm, Figura 6.

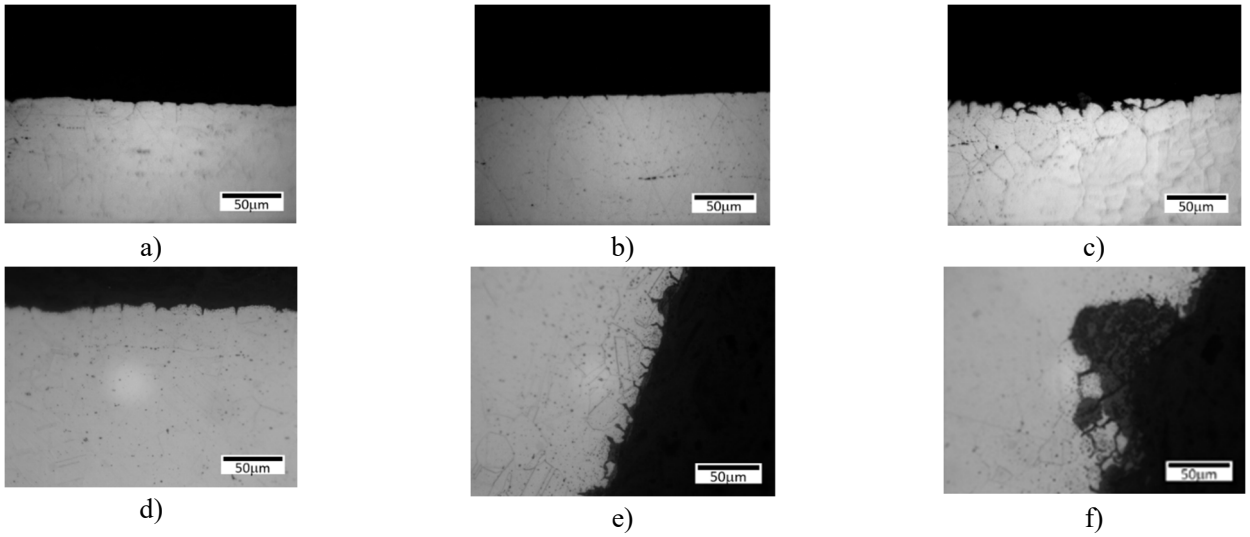


Figura 5. Propagación del daño por corrosión en muestras de acero inoxidable AISI 316L, condición as received (a-b-c) y con tratamiento térmico (d-e-f), considerando tiempos variables de exposición a spray salino: a-d) 8 h, b-e) 50 h, y c-f) 96 h.

Evidentemente, cuando se considera el tiempo máximo de exposición de las muestras a la niebla salina, se aprecian los mayores daños, presentando la muestra TT96 un avance de la corrosión de 35 µm desde la superficie, Figura 6.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

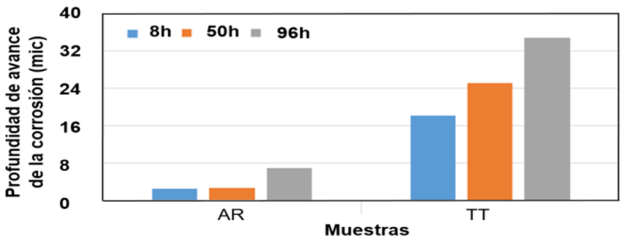


Figura 6. Grado de avance de la corrosión en las muestras (as-received y con tratamiento térmico) según tiempo de exposición al spray salino.

Volviendo al análisis de la muestra tratada térmicamente, TT96, lo más significativo es la identificación de dos mecanismos localizados de avance de la corrosión, esto es, picado e intergranular. La corrosión por picado puede actuar como un sitio iniciador para la corrosión intergranular, ya que una vez que se ha formado un hoyo o hueco (pit), el entorno dentro del mismo puede volverse altamente corrosivo debido a la acumulación de cloruros y la disminución del pH, promoviendo así la disolución del material a lo largo de los límites de grano. Si bien el acero inoxidable de este trabajo no está sensibilizado, aquí probablemente se presentaron una conjunción de distintos factores que terminaron de producir un mayor grado de avance de la corrosión, a saber, redistribución de cromo de manera no homogénea durante el tratamiento de solubilización de carburos y posterior empobrecimiento de éste en zonas de bordes de grano austenítico a causa del reducido tiempo de mantenimiento a la temperatura de tratamiento, y acrecentado por el enfriamiento severo en agua al que fue sometido la muestra, Davis (1994). Este medio de enfriamiento tan enérgico puede llegar a introducir tensiones residuales y defectos microscópicos en el material, que podrían llegar a actuar como sitios de nucleación para la corrosión.

Para mostrar más evidencia acerca de la mayor profundidad de daño y avance de la corrosión en muestras con TT respecto de las AR, independientemente del tiempo de permanencia en la cámara de niebla salina, se calculó la velocidad de corrosión. De acuerdo con la Figura 7, la tasa de corrosión calculada para muestras con y sin tratamiento térmico, mostró comportamientos en consonancia con la información micrográfica previamente comentada en la Figura 5.

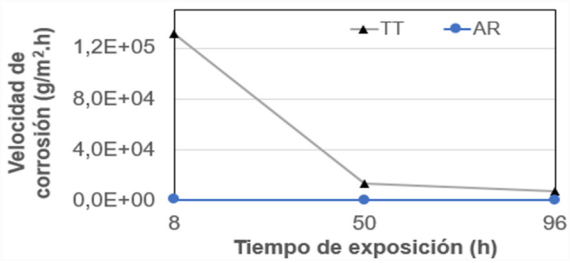


Figura 7. Tasa de corrosión en muestras de acero inoxidable AISI 316L, condición as received y con tratamiento térmico.

Esto es, en cuanto a las muestras en condición AR, la tasa de corrosión calculada para las 8 h, 50 h y 96 h de exposición, presentó valores muy bajos (valor medio 320 g/m^2.h), manteniéndose prácticamente constante durante toda la duración del ensayo. Este resultado se condice, con el bajo grado de avance de la corrosión calculado y expresado en la Figura 6. Ahora bien, las muestras TT exhibieron una tasa de corrosión máxima a las 8 h de ensayo respecto de las muestras AR, para luego disminuir hasta llegar a las 96 h (tiempo máximo de exposición al spray salino) de forma similar a lo experimentado por las muestras AR. No obstante, la velocidad de corrosión de estas muestras fue superior en todo momento a la que presentó el material sin tratamiento térmico (es decir, las muestras as-received). Estos valores dejarían en evidencia que, si bien las muestras TT no poseen sensibilización microestructural, el tratamiento de alta temperatura, seguido de un severo enfriamiento en agua, habrían generado las condiciones para que el material, resulte termodinámicamente más inestable y plausible de corroerse frente a exposiciones a una atmósfera agresiva de cloruros (atmósfera salina). En otros términos, además de generar sobre el material posibles tensiones residuales propias del tipo de enfriamiento (severo en agua), la redistribución de cromo a causa de la disolución incompleta de los carburos no habría sido homogénea (debido al corto tiempo de mantenimiento a 1100 °C), y todo esto sería la causa para que el material sea más susceptible a corroerse bajo las condiciones del trabajo, contrariamente a lo que sucede en las muestras AR. También se advierte que ya luego de las 50 h de exposición la velocidad de corrosión se torna aproximadamente constante.

3. Conclusiones

- El avance de la corrosión experimentado por aquellas muestras con tratamiento térmico previo y sometidas luego a una atmósfera salina, fue superior al evidenciado por sus pares en condición as-received.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- La disolución incompleta de partículas de carburos provocada por un corto tiempo de permanencia a 1100 ºC, y el posterior enfriamiento severo en agua que introduce tensiones en el material, dieron lugar a una microestructura propicia para el avance de la corrosión ante exposiciones a la solución salina en las muestras con tratamiento térmico.
- Esto quedó comprobado al calcular el grado de avance de la corrosión intergranular experimentado por las muestras con tratamiento térmico, que fue de 35 µm frente a los 7 µm que se determinaron para las muestras en condición as-received, esto es, para el total de horas del ensayo (96 h).
- En consonancia con lo expresado anteriormente, la velocidad de corrosión fue mayor en todo momento para las muestras con tratamiento térmico.
- Estos resultados resaltan la importancia de considerar adecuadamente las condiciones de servicio (tratamientos térmicos y ambientes de trabajo) a las que serán sometidas estos materiales para evitar posibles fallas causadas por la corrosión.

Como próximas actividades a realizar se plantea avanzar con estudios de caracterización microestructural empleando técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, e identificar la cristalografía de los carburos en las muestras.

Agradecimientos

Se desea expresar agradecimiento al Ing. Mariano N. Inés, tutor, y a la Dra. Graciela A. Mansilla, directora del Grupo de Investigación de Metalurgia Física, por el constante apoyo, seguimiento y confianza al brindar la oportunidad de participar en esta jornada para Jóvenes Investigadores Tecnológicos.

Referencias bibliográficas

Sedriks, A. J. (1996). Corrosion of Stainless Steel, Second ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
Forero M.A., (1982) Corrosión Intergranular en Aceros inoxidables. Ingeniería e Investigación, 1, 20-21.
Davis, J.R., (1994) Stainless Steels. ASM Specialty Handbook. ISBN**:** 978-0-87170-503-7.
Inés, M., Mansilla, G. A. (2023). https://doi.org/10.36547/ams.29.3.1803
Masoud, M., Amir, M., Niloofar, A., Hamid, K. (2017). Effect of quenching and tempering on microstructure and mechanical properties of 410 and 410 Ni martensitic stainless steels. Journal of Materials Research.
STM B117 – 07. (2003) Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
Bertucelli M. J., Inés, M. N., Delpupo M. N., Mansilla G. A. (2018). Corrosion Study in SAE 1016 Electrogalvanized Steel. XI Corrosion Latinamerican Congress, Latincorr, 031, (págs. 23- 25).
Abd Rashid, M. W., Gakim, M., Rosli, Z. M. & Asyadi Azam, M. (2012). Formation of $Cr_{23}C_6$ During the Sensitization of AISI 304 Stainless Steel and its Effect to Pitting Corrosion. *Int. J. Electrochem. Sci.,* (7), 9465 – 9477.
Afolabi, A., Peleowo, N. (2011). Effect of Heat Treatment on Corrosion Behaviour of Austenitic Stainless Steel in Mild Acid Medium. Anales de International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences.
Rodríguez, C. J., Figueroa, Y., Prin, J. (2013). Efecto de la Temperatura en el Comportamiento del Acero Inoxidable Austenítico 316L frente a la Corrosión Electroquímica. Universidad de Oriente, Venezuela, (25) 3, 302-308.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Materiales
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Análisis de porosidad en una componente de Al-Si inyectado usando tomografía computada

Porosity analysis of injected Al-Si component using computed tomography

Presentación 18/10/2024

Boris Riva

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Departamento de Ingeniería Industrial, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: boris_riva@hotmail.com

Resumen

En este trabajo, se presentan y discuten los resultados de caracterización y visualización de porosidad 3D obtenidos vía tomografía computada de rayos X (TC) en un acople de fundición por inyección de Al-Si correspondiente al sistema de frenos de vehículos pesados. La metodología utilizada incluye la reconstrucción 3D del sólido evaluado, la visualización de defectos en diferentes planos ortogonales, la visualización de defectos 3D vía transparencias y el estudio cuantitativo de parámetros de forma (esfericidad y compacidad). Finalmente, a partir de esta metodología fue posible correlacionar los principales parámetros del proceso de fundición por inyección llevado a cabo con los resultados obtenidos vía TC.

Palabras clave: Porosidad; Fundición por inyección; Tomografía computada

Abstract

In this work, the results of 3D porosity characterization and visualization, obtained via X-ray computed tomography (TC) in an Al-Si injection-cast coupling corresponding to the brake system of heavy vehicles, are presented and discussed. The methodology used includes 3D reconstruction of the solid, visualization of defects in different orthogonal planes, visualization of 3D defects via transparencies and quantitative study of shape parameters (sphericity and compactness). Finally, from this methodology it was possible to correlate the main parameters of the injection-casting process with the results obtained via TC.

Keywords: Porosity; Injection-cast; Computed tomography

1. Introducción

La tomografía computada (TC) de rayos X es una técnica de análisis de estructura interna no-destructiva. Esta utiliza un software especial para el modelado 3D del sólido evaluado y el post-procesamiento de datos (Yin, 2017; Mathew 2021). Esta técnica permite evaluar con suma exactitud la forma, tamaño, cantidad, distribución y tipos de defectos que tiene un sólido en su interior (Díaz, 2020; Interempresas, 2022; Ecured, 2020).

Los acoples utilizados en los camiones son producidos en base al material comercialmente conocido como ALCOA380. Estos acoples deben cumplir un rol fundamental para su correcto funcionamiento, que es preservar la estanqueidad. Esta propiedad se debe cumplir para que pueda transmitir, por ejemplo, la presión ejercida por un freno de mano y asegurar que este último va a funcionar correctamente. La existencia de poros en este tipo de piezas puede generar que la pieza resulte en

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

falla, en específico si los poros se presentan en la superficie, debido a que imposibilitan la existencia de la estanqueidad dentro del acople.
En este trabajo se utiliza la tecnología y la precisión que nos brinda la TC para analizar y estudiar el interior de una pieza de producción en serie, la cual fue catalogada como falla (Palacin, 2016). El objetivo es comprender las fallas del interior, combinando el estudio por TC y el estudio del proceso de producción; esto implica, comprender las fallas, áreas de mejora y lograr relacionar los problemas puntuales con el proceso de producción. El estudio se realiza sobre toda la pieza analizada, contando con un total de 25941 poros.

2. Metodología

2.1 Material

La pieza se obtiene a través de un proceso de inyección de aluminio. El aluminio es comercializado bajo la denominación ALCOA380.

Tabla 1. Composición química del ALCOA380

Composición química (% en peso)						
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Base	9	0,85	3,5	0,5	0,4	1,3

La Tabla 1 representa la composición química del ALCOA380. La pieza en particular no debe soportar grandes cargas, sino cumplir con las condiciones de estanqueidad. Para este caso en particular, se utilizó una pieza determinada como falla, debido a que no pasó las pruebas de pérdida de presión que se le realiza a cada pieza para corroborar su correcto funcionamiento.

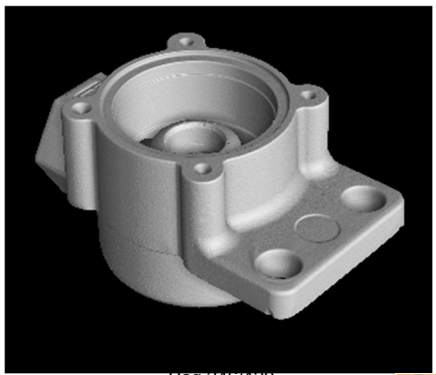
2.2. Tomografía

La pieza al ser de aluminio y tener dimensiones adecuadas, es apta para tomografiarla en su totalidad. El material es poco denso y eso permite realizar un análisis sobre toda la pieza sin la necesidad de cortarla. Junto con un módulo especial destinado al estudio de porosidad y el programa de post-visualización, se pudieron crear reconstrucciones reales de la pieza y de su estructura porosa interior, para el posterior análisis no solo visual, sino también gráfico, y su respectivo análisis de variables (Mathew, 2021).

Tabla 2. Parámetros utilizados para la tomografía

Voltaje	Corriente	Cantidad de imágenes	Magnificación	Tiempo	Tamaño de voxel
170 kV	100 µA	1000	x 2,04	60 min	97 µm

La Tabla 2 representa todos los valores pertinentes para comprender el tipo de tomógrafo utilizado. Es importante aclarar que es un micro tomógrafo, por lo que no alcanzará resoluciones por debajo de los 10µm, pero que resulta suficiente para el estudio actual.



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Figura 1. Representación 3D de la pieza evaluada, obtenida usando el visualizador myVGL 3.5.

La Figura 1 es una simple reconstrucción que realiza el software de todos los planos obtenidos por el tomógrafo durante el escaneo. Es una introducción a todas las posibilidades que ofrece esta técnica.

3. Resultados

3.1. Porosidad total

Los resultados finales son contundentes. El software analizó y detectó más de 25000 poros, que representan un 3,14% del volumen total tomografiado. Es una cantidad de poros muy elevada y por ello resulta muy conveniente para el estudio y el desarrollo de la técnica.

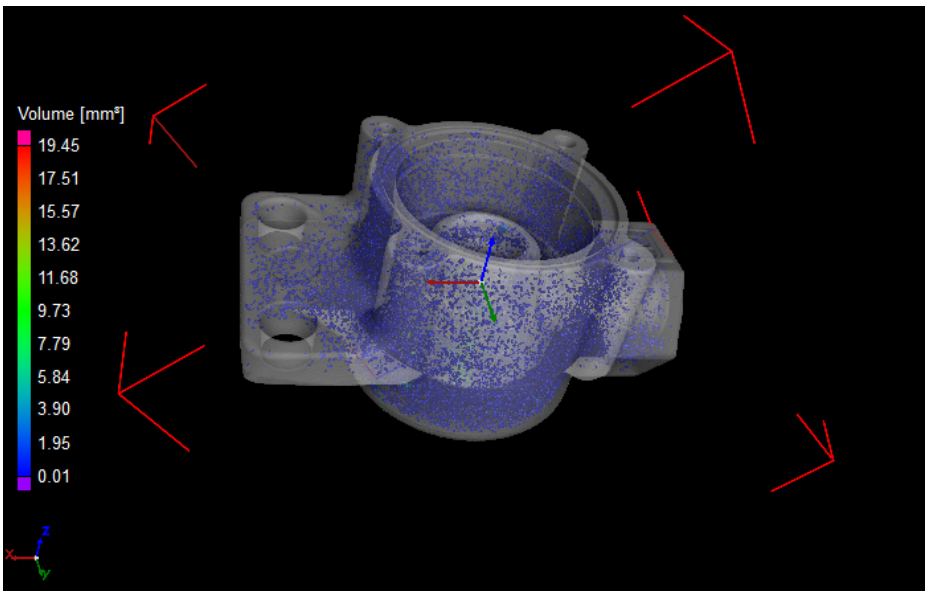


Figura 2. Representación 3D de los poros dentro de la pieza, difuminada para poder observar los poros.

Para comprender la gran cantidad de poros que posee la figura, representados en la Figura 2, primero se debe analizar por qué se forman los poros para luego compararlo con el proceso productivo. Los poros se pueden generar por las siguientes tres razones (Altra Innovation, 2023):
Porosidad por flujo: Es porosidad generada por la falta de presión a la hora de inyectar el aluminio fundido. No tener la presión ideal genera espacios en determinados lugares que luego se transforman de poros.
Porosidad por gases: La existencia de gases en la mezcla va a generar porosidad indudablemente. Cuando no se producen procesos de desgasificación en el caldo, esta porosidad es muy probable que se haga presente.
Porosidad por contracción: Es la más difícil de controlar, y es la generada por la propiedad de todo metal de contraerse cuando se enfría. Es muy complejo evitar este fenómeno, pero se puede controlar desviando material hacia lugares estratégicos.

3.2. Porosidad interior

Una vez determinada la cantidad de poros existentes, se procede a estudiar los tipos de poros generados en el interior y las distintas zonas de porosidad con la que cuenta la pieza. Para ello, primero resulta esencial caracterizar los tipos de poros con los que nos podríamos encontrar (Altra Innovation, 2023).

- Porosidad ciega: Es aquel poro que inicia en la superficie del material y termina en el interior del cuerpo. No suele tener efectos mecánicos negativos, pero si invita a la corrosión.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

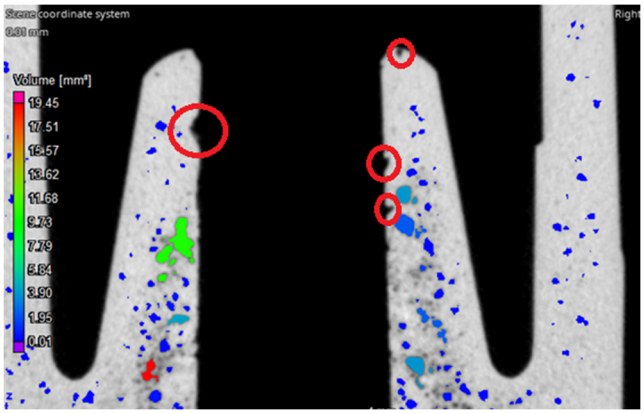


Figura 3. Corte en un plano específico que permite el estudio de los distintos poros en esa zona.

Como se puede ver, la tomografía muestra ejemplo de este tipo de poros. El software también permite realizar cortes en zonas específicas. Como la pieza debe contar con la propiedad de la estanqueidad, es importante lograr que la superficie sea lisa. La Figura 3 demuestra que la superficie no es lisa, sino que hay poros que nacen en esta misma. Los círculos rojos representan estos poros. Es importante tener en cuenta que el tomógrafo no los identifica como poros, sino que los considera como una continuación de la superficie.
Porosidad pasante: El poro inicia en la superficie de la pieza y genera un canal hasta el otro extremo. Provoca fugas y muchos problemas internos, por lo que es esencial sellar este tipo de poros.
Porosidad totalmente cerrada: Es la porosidad generada en el interior de la pieza. No sería realista pensar en mitigarla porque es parte del proceso, pero lo que se puede hacer es controlar y llevar esa porosidad hacia los lugares deseados.
El único poro que no se pudo detectar para este trabajo es el poro pasante, y resultaría raro encontrar uno de ellos porque supondría una falla enorme en el proceso productivo, debido a que es una pieza de gran espesor.

3.3. Zonas porosas

Una de las condiciones de la pieza que resultó interesante estudiar, fueron las zonas de mayor porosidad y la zona de menor porosidad. La posibilidad de ver en 3D y con detalle la porosidad interna de la pieza permite definir las zonas más afectadas por la porosidad, indicando que por allí se pueden estar generando la mayor cantidad de pérdidas, indicando un punto a estudiar y mejorar en el proceso productivo.

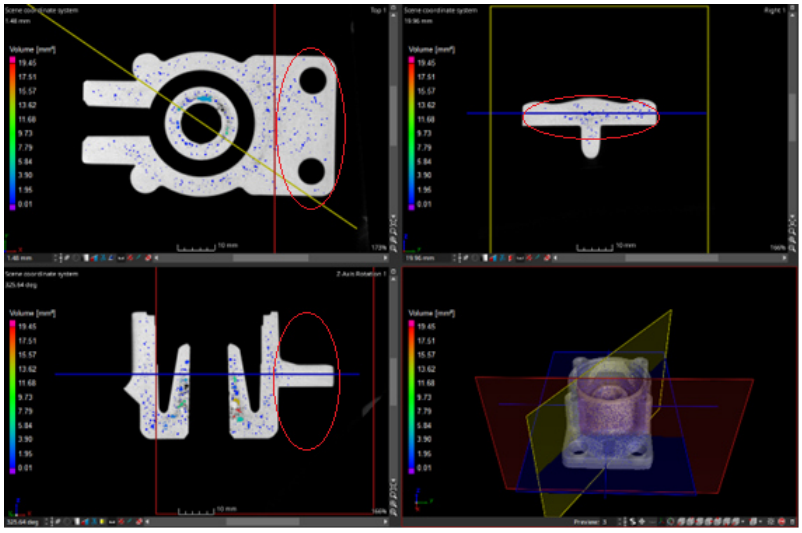


Figura 4. Zona de menor porosidad

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

En la Figura 4 podemos detectar la zona de menor porosidad. El resultado es intuitivo y predecible, dado que por allí inicia el proceso de inyección.

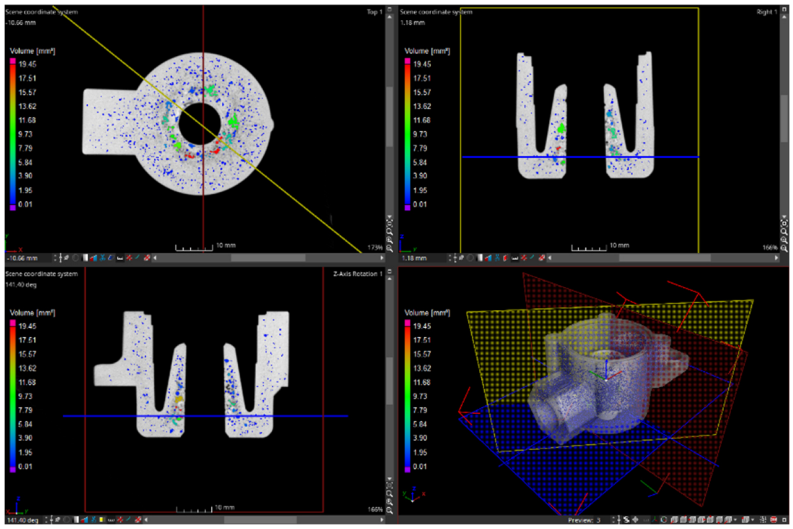


Figura 5. Zona de mayor porosidad.

La Figura 5 representa tres planos donde la porosidad es extremadamente elevada. Esta información puede resultar interesante para el fabricante. En este caso en particular, puede que se esté perdiendo mucha presión por esa zona, pero también puede significar un punto de rotura para piezas que estén sometidas a altas cargas.

3.4. Estudio de gráficos

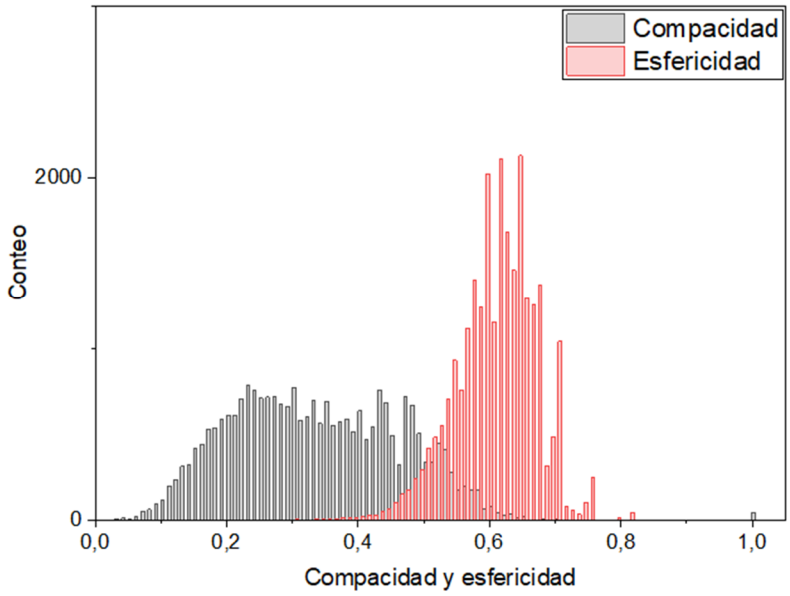


Figura 6. Representación de la distribución de compacidad y esfericidad de los poros.

La Figura 6, obtenida a partir de los datos brindados por el software de visualización, representa a gran escala dos parámetros de los poros que definen la forma que los mismos tienen. Por un lado, se describe la esfericidad, que resulta de la relación entre el volumen del poro, V_r, y la superficie de este, A_r. La ecuación es:

$$S_G = \pi^{0,33}(6V_r)^{0,67}/A_r. \quad (1)$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Siguiendo los valores obtenidos a partir de la utilización de la Ecuación (1), se observa que el grueso de los poros tiene una esfericidad cercana a 0,6 pero hay muchos valores por debajo de este, indicando que, a nivel general, la forma de los mismos se aleja de la esfera ideal (Wells, 2007).
Por otro lado, la compacidad es la relación entre el volumen real del poro y el volumen de la esfera que lo circunscribe, *Vs*, determinada por:

$$C = V_r/V_s.$$
(2)

La Ecuación (2) en el caso estudiado refleja una distribución gaussiana de la compacidad a lo largo de la gráfica. Los valores más bajos son poros de formas diversas, prevaleciendo los alargados en una dimensión. Acompañado de esto, podemos observar que la mayoría de los valores se encuentran por debajo de 0,6, indicando un grado de poro por debajo de lo esperado para cualquier tipo de estructura.

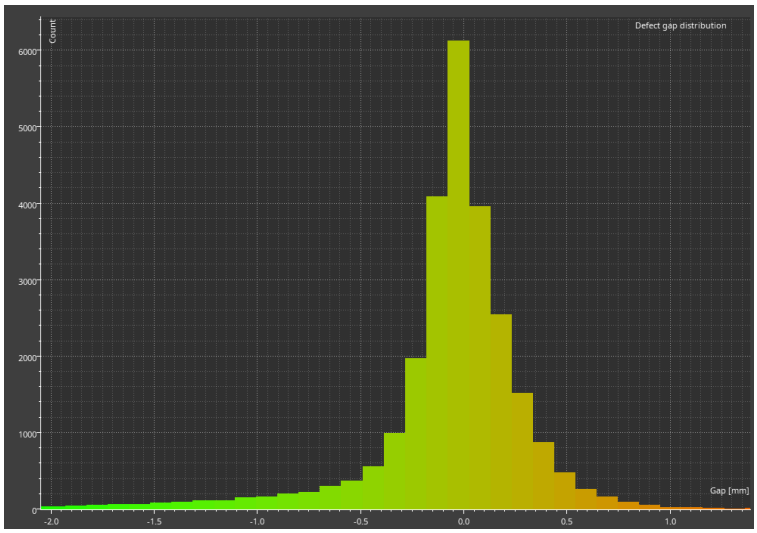


Figura 7. Distribución de la variable Gap.

La variable Gap representa la distancia que tiene un poro con su par más cercano. La existencia de valores negativos se debe a que el software construye una esfera que rodea todo el poro y utiliza esta misma para calcular la distancia con su par más cercano, por lo que en los casos en los que estas esferas se intersectan, los valores serán negativos. Esta variable tiene estrecha relación con la compacidad. Se entiende que, como los valores de compacidad se encuentran por debajo de lo esperado, la cantidad de poros deformes va a ser elevada, por lo que se pueden esperar valores de Gap por debajo de lo esperado (Fuchs, 2021). La gran cantidad de Gaps negativos representados por la Figura 7 ilustran acerca de la forma de los poros, la cual se aleja de la esfera ideal, contribuyendo a los resultados previamente mostrados.

4. Conclusiones

La utilización de la TC ayuda a comprender muchos de los aspectos interiores que tiene una pieza. En este caso en particular, es fundamental para estudiar la porosidad, y, en base a la teoría y la práctica, poder deducir dónde se encuentran las falencias en un proceso productivo real. El software de post-procesamiento permite comprender y evaluar no solo las zonas más comprometidas y potencialmente sometidas a mayor cantidad de poros, sino también, evaluar parámetros de forma como esfericidad, compacidad, distribución espacial, y tamaño de poro, con el objetivo de evaluar la estructura de la pieza. Para el presente caso, se pudo detectar un interior extremadamente poroso y, también, formas porosas alejadas de la esfera ideal, de lo cual es posible predecir fallas, perdidas de presión y problemas de estanqueidad.

Referencias bibliográficas

F. V. Díaz et al (2021). Study of Sphericity and Compactness Parameters in Spheroidal Graphite Iron Using X-Ray Micro-computed Tomography and Image Processing. Journal of nondestructive evaluation, 11, (1-10)

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Yajun Yin et al (2017). 3D Quantitative Analysis of Graphite Morphology in Ductile Cast Iron by X-ray Microtomography. Metallurgical and Materials Transactions A, 48, (3794-3803).
Atra Innovation (2023). Web: https://www.atriainnovation.com/como-medir-la-porosidad-de-los-materiales/
D. P. Palacín (2016). Web: https://core.ac.uk/download/pdf/288499455.pdf
J. Mathew et al (2021). X-ray Computed Tomography Studies on Porosity Distribution in Vacuum Induction Cast Al-7Si Alloys. JOM, 73, (3866-3872)
J. Wells (2007). Quantitative XCT Evaluation of Porosity in an Aluminum Alloy Casting. Proc. 2nd Int. Symp. On Shape Casting, Ed. By P.N. Crepeau, M. Tiryakioglu, and J. Campbell, TMS, (77-84).
P. Fuchs, T. Kröger, C. S. Garbe (2021). Defect detection in CT scans of cast aluminum parts: A machine vision perspective. Neurocomputing, 453, (85-96).
J. C. R. Giraldo et al (2008). Tomografía computarizada por rayos x: fundamentos y actualidad. Rev. ing. Biomed. vol 2 no.4, (1-12)
Interempresas (2022). Web: https://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/169021-Inspeccion-mediante-tomografia-computerizada-rayos-X-componentes-fabricados-aditivamente.html
Ecured (2020). Web: https://www.ecured.cu/Tom%C3%B3grafo Metal AM.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

JIT 24 ROSARIO

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Materiales
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

PRESENTACION ORAL

Prestaciones de tableros de partículas de residuos de desmote de algodón y resina urea-formaldehído con adición de hidrófobos

Performance of cotton gin waste and urea-formaldehyde resin particleboard with addition of hydrophobic agents

Presentación 18/10/2024

Florencia A. Benítez

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: fbenítez@frsf.utn.edu.ar

Emiliano Snaider

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: esnaider@frsf.utn.edu.ar

Luciano G. Massons

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: lmassons@frsf.utn.edu.ar

Valentín T. Mangoldt

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: vmangoldt@frsf.utn.edu.ar

Resumen

La etapa del procesamiento del algodón presenta inconvenientes relacionados con la generación de grandes volúmenes de residuos en la fase de desmote, por eso se propone revalorizarlos utilizándolos para fabricar tableros de partículas aglomerados con resina urea-formaldehído destinados a la construcción y mobiliario. Se evaluaron tableros monocapa formados por granulometrías de partículas, fina y gruesa, contenido de resina de 15,1%, presión de moldeo de 3,75 MPa y adición de agentes hidrófobos: emulsión de parafina y Emulsión Catiónica de Dímero Alquil Ceteno (AKD). Se evaluó la densidad, la resistencia a flexión y el hinchamiento y absorción de las muestras, saturadas durante 2 y 24 horas. Todos los tableros excedieron el límite normativo para hinchamiento, por lo cual no resultan aptos para ambientes húmedos; no obstante, se observa un mejor comportamiento para tableros de partículas finas y en aquellos que incorporan AKD hasta 2 horas de inmersión.

Palabras clave: Residuos de desmote; Tablero de partículas; Hidrófobo; Hinchamiento

Abstract

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

The cotton processing stage presents challenges related to the generation of large volumes of waste during the ginning phase. Therefore, it is proposed to valorize these residues by utilizing them to manufacture particleboards bonded with urea-formaldehyde resin, intended for construction and furniture. Single-layer boards formed by fine and coarse particle sizes, with a resin content of 15.1%, molding pressure of 3.75 MPa, and the addition of hydrophobic agents: paraffin emulsion and Cationic Alkyl Ketene Dimer (AKD) Emulsion, were evaluated. The density, flexural strength, swelling and absorption of the samples, saturated for 2 and 24 hours, were assessed. All boards exceeded the normative limit for swelling, making them unsuitable for humid environments. However, better performance was observed for fine particle boards and those incorporating AKD up to 2 hours of immersion.

Keywords: Ginning waste; Particleboard; Hydrophobic; T-Swelling

1. Introducción

La producción algodonera es una de las actividades productivas más representativas de nuestro país, especialmente para el noreste argentino, en dónde se concentra el cultivo. El algodón es la fibra natural más importante que se produce en el mundo y el segundo producto agrícola más comercializado (se exporta el 35% de su producción mundial), superado solo por la soja [1]. A partir de datos de cosechas anteriores, se sabe que, de la producción algodonera, más del 30% en peso son residuos de desmote, compuesto por carpelos, motas (fibras de algodón con semillas inmaduras o rotas), palos, partes de hojas y partículas finas [2,3]. La cantidad de residuo de desmote generado varía ampliamente y depende de factores, como método de cosecha, técnica de desmotado, origen y variedad del algodón [4,5].

Este residuo, sin un destino previsto, se acopia en grandes montañas a cielo abierto, conformando un hábitat excepcional para plagas y roedores, además de un peligro potencial para las comunidades aledañas por ser autoinflamable. Frente a la falta de soluciones efectivas para dicho residuo, las grandes desmotadoras optan por quemarlo, originando serios problemas de polución, malestares, afecciones respiratorias y riesgos asociados a la quema de biomasa contaminada con agroquímicos.

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 [4,5]. Investigaciones previas 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. Esto es relevante debido al creciente consumo de madera y materiales para aglomerados a base de biomasa, impulsado por el aumento poblacional. [4,5,6].

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.

La norma IRAM 9723 [7] exige para los tableros destinados a ser utilizados en ambientes húmedos un límite de hinchamiento del 17% en función de su espesor, pero el hinchamiento debido a su inestabilidad dimensional sujeta a cambios de humedad es un inconveniente que se muestra difícil de resolver debido a las complejas acciones que deben realizarse tanto para dotar a las partículas de impermeabilidad superficial como así a la resina para reducir su solubilidad, siendo importante destacar que el hinchamiento involucra muchos factores como ser la densidad del tablero, la especie de madera, el tipo y nivel de resina, las condiciones de prensado, la geometría de las partículas y los agentes hidrófobos [8]. Se estudia el uso de dos tipos de hidrófobos en diferentes dosis, por un lado, Emulsión de Parafina, el cual tiene un uso extensivo en la fabricación de tableros de partículas modernos [9,10], y por otro, Emulsión Catiónica de Dímero Alquil Ceteno (AKD), que se trata de un agente encolante con gran difusión en la industria del papel que podría generar esterificación de compuestos lignocelulósicos y resultar en una modificación de la superficie [11].

En el presente artículo se evaluaron tableros monocapa, enfocando el estudio en la incorporación de hidrófobos a la composición de los aglomerados con el fin de mejorar el comportamiento de estos frente al hinchamiento y la absorción, realizando comparativas con tableros de madera. Los tableros fueron confeccionados con dos granulometrías de cascarilla (fina y gruesa) y resina urea-formaldehido como ligante. Se emplearon dos tipos de hidrófobos: parafina y AKD.

2. Metodología

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

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.

El residuo fue molido con una moledora de granos LOYTO N°2, utilizando inicialmente una criba de 16 mm, generando una granulometría variable de polvo, partículas de diferentes tamaños y formas, y fibras de algodón. Para uniformar la morfología del material, se realizó un tamizado que permitió eliminar la fracción pasante del tamiz N°30 (compuesta principalmente de polvo e impurezas) y la fracción retenida en el tamiz de ½" (12,5 mm), compuesta en su mayoría por fibras de algodón con partículas enredadas. Luego se realizó una segunda molienda con una criba de 3,5 mm, logrando una distribución de partículas más uniforme. Se fabricaron tableros monocapa utilizando, por una parte, partículas gruesas retenidas entre los tamices N°30 y ½", y por otra, partículas finas obtenidas de la segunda molienda.

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), la cual presenta un contenido mínimo de sólidos del 65%, que luego fue diluida con agua hasta alcanzar un contenido de sólidos del 55%, y se empleó como catalizador una solución saturada de sulfato de amonio al 5%. El contenido de resina en los paneles, expresado en términos de sólido/sólido, fue del 15,1%, y la presión de moldeo fue de 3,75 MPa.

Luego de homogeneizar la mezcla, se colocó el material manualmente en un molde de platos calientes, y se prensó utilizando una prensa hidráulica hasta alcanzar la presión de 3,75 MPa con una temperatura de 150°C en ambos platos durante 5 minutos, generando tableros cuadrados de pequeño espesor con dimensiones nominales de 250 x 250 x 8 ± 2 mm.

En el proceso de impregnación, se utilizaron como aditivos hidrófobos una emulsión de parafina y una emulsión catiónica de AKD. Dado que no se disponía de dispositivos adecuados para su aplicación mediante pulverización, se preparó una solución en agua al 1,25% de sólidos del aditivo, donde se sumergieron las partículas durante 15 minutos para su impregnación. Luego, las partículas se curaron en estufa a 125°C durante 24 horas. Cabe aclarar que, para la impregnación, se calculó la cantidad exacta de solución necesaria para saturar las partículas, evitando que quedaran remanentes de la misma.

Para comparar los resultados obtenidos, se moldearon tableros de virutas de pino eliottis, trituradas y tamizadas bajo las mismas condiciones. Estos fueron elaborados bajo el mismo procedimiento que se utilizó para moldear los de partículas de cascarilla, sin ningún tipo de tratamiento previo, con el fin de verificar que la composición química de la cascarilla no genere interferencias en la acción de los hidrófobos por alguna reacción adversa.

Sobre los aglomerados se realizaron determinaciones de densidad, resistencia a flexión estática y resistencia al hinchamiento y absorción (ver figura 1). La densidad se determinó segun la norma IRAM 9705 [12]. La determinación de la resistencia a flexión se realizó de acuerdo a la norma IRAM 9706 [13], modificando la luz de ensayo a 140 mm en todos los casos. Para la realización del ensayo las probetas previamente se acondicionaron durante 48 a 72 horas, en un ambiente controlado a 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % de humedad relativa. La carga se aplicó en el centro de la luz entre apoyos, con una velocidad de deformación constante de 12 mm/min, hasta que se verificó la falla de la probeta. La determinación del hinchamiento y absorción se realizó de acuerdo con la norma IRAM 9720 [14], que especifica los lineamientos del hinchamiento del espesor luego de inmersión en agua. Para ello se cortaron 4 probetas de dimensiones nominales de 50 mm x 50 mm x 8 mm de cada placa moldeada, las cuales se midieron y pesaron. Luego se las sumergió completamente en agua a temperatura ambiente, aproximadamente 25ºC, durante 2 y 24 horas. Transcurrido ese tiempo fueron retiradas de la inmersión y se las volvió a medir y pesar.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025



Figura 1. Muestras ensayadas para hinchamiento y absorción a 24 horas de inmersión.

3. Resultados y discusión

En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos respecto a densidad, resistencia a flexión estática, resistencia al hinchamiento y absorción a 2 y 24 horas de inmersión (ver figura 1), evaluados en tableros de partículas de cascarilla con granulometría fina y gruesa, y en tableros de partículas de madera, efectuadas con el objetivo de comparación.

Tabla 1. Resultados obtenidos de densidad y resistencia a flexión estática.

Muestra	Composición		Presión (MPa)	Densidad seca (kg/m^3)	MOR (MPa)
	Resina (%)	Hidrófobo (%)			
H1 Fina 0% Hidrófobo	27,5	0	3,75	1230,27	9,96
H4 Fina 1,25% AKD	27,5	1,25% AKD	3,75	966,28	11,53
H5 Fina 1,25% Parafina	27,5	1,25% Parafina	3,75	1050,96	12,21
H2 Gruesa 0% Hidrófobo	27,5	0	3,75	1016,32	9,89
H4 Gruesa 1,25% AKD	27,5	1,25% AKD	3,75	1052,92	9,40
H5 Gruesa 1,25% Parafina	27,5	1,25% Parafina	3,75	931,49	6,76
Madera 0% Hidrófobo	27,5	0	3,75	913,22	-
Madera 1,25% AKD	27,5	1,25% AKD	3,75	910,16	-
Madera 1,25% Parafina	27,5	1,25% Parafina	3,75	916,50	-

Tabla 2. Resultados obtenidos de resistencia al hinchamiento y absorción a 2 y 24 horas de inmersión.

Muestra	Resultados a 2 horas de inmersión		Resultados a 24 horas de inmersión		Diferencia a 2 horas de inmersión		Diferencia a 24 horas de inmersión	
	Hinchamiento (%)	Absorción (%)	Hinchamiento (%)	Absorción (%)	Hinchamiento (%)	Absorción (%)	Hinchamiento (%)	Absorción (%)
H1 F 0% Hid.	20,96	29,76	39,34	31,20	0,00	0,00	0,00	0,00
H2 F 1,25% AKD	18,72	21,64	59,62	44,78	-2,24	-8,12	20,28	13,58
H3 F 1,25% Par.	23,44	26,70	57,03	40,14	2,48	-3,06	17,69	8,94
H4 G 0% Hid.	25,79	22,16	42,71	38,25	0,00	0,00	0,00	0,00
H5 G 1,25% AKD	19,25	18,72	68,17	46,38	-6,54	-3,44	25,46	8,13
H6 G 1,25% Par.	63,26	30,60	69,87	47,97	37,47	8,44	27,16	9,72
Madera	38,43	41,06	45,72	43,95	0,00	0,00	0,00	0,00

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

0% Hid								
Madera 1,25% AKD	20,66	21,05	68,99	47,19	-17,77	-20,01	23,27	3,24
Madera 1,25% Par.	7,13	13,67	36,64	39,86	-31,30	-27,39	-9,08	-4,09

A partir de analizar los valores provistos en las tablas, se observa que:

- Los resultados de hinchamiento sin hidrófobo están muy por encima del 17% que exige la norma IRAM 9720.
- Los resultados de hinchamiento correspondientes a 2 horas muestran ventaja frente a los de 24 horas, por lo que estima que el efecto de los hidrófobos pierde efectividad rápidamente con el paso de las horas.
- A 24 horas de inmersión, las placas sin hidrófobo tuvieron mejor comportamiento tanto en hinchamiento como en absorción que aquellas impregnadas con emulsión de parafina y AKD.
- Las muestras de cascarilla fina tienen siempre mejor rendimiento que las de cascarilla gruesa, en cuanto a resistencia a hinchamiento y absorción, cuyo motivo puede relacionarse con el aumento de densidad de los tableros.
- Las muestras de cascarilla gruesa tienen mejor rendimiento de absorción que las de cascarilla fina sin hidrófobo o con emulsión de AKD, pero no así con emulsión de parafina.
- A 2 horas de inmersión, las muestras de cascarilla con emulsión de AKD presentan mejor rendimiento que las muestras de cascarilla con emulsión de parafina. Sin embargo, a 24 horas de inmersión, las muestras de cascarilla con parafina demostraron mejor rendimiento que las muestras de cascarilla con AKD.
- Con respecto a las placas moldeadas con viruta de pino, éstas presentan mejor comportamiento a 2 horas (en particular la placa impregnada con parafina) que a 24 horas.
- En comparación, las placas de cascarilla presentan mejor rendimiento de hinchamiento y absorción que las placas de virutas de pino, sin la adición de hidrófobos.
- En cuanto a los valores obtenidos de resistencia a flexión, la adición de los agentes hidrófobos permitió aumentar la resistencia en las placas de cascarilla fina, aunque esta disminuyó en las placas de cascarilla gruesa. En particular, en las placas impregnadas con emulsión de parafina es donde más se observa esta diferencia.

Tomando como referencia estudios previos sobre la mejora de tableros aglomerados frente a la exposición al agua, Kwon et al. [15], evaluaron el uso de chips de madera con resina de isocianato y emulsiones de parafina. Aunque la resina de isocianato es conocida por su naturaleza hidrofílica, lograron reducir significativamente el hinchamiento de los tableros mediante la incorporación de emulsión de parafina, ya sea impregnando previamente las partículas o combinándola con la resina. En sus ensayos, la reducción del hinchamiento fue aproximadamente un 20% más efectiva, mientras que la absorción de agua disminuyó en un 30%, sin evidenciarse detrimento en las propiedades mecánicas de los tableros.
Por otro lado, Hua et al. [16], utilizaron chips de madera de caucho y resina de urea-formaldehído, variando los porcentajes de resina y emulsión de parafina. Sus resultados mostraron mejoras en el hinchamiento y la absorción de agua, proporcionales al incremento en los porcentajes de resina y parafina. No obstante, concluyeron que el límite óptimo de parafina es del 0,5%, ya que superar este valor compromete significativamente la resistencia mecánica. A pesar de estas mejoras, ninguno de los especímenes evaluados superó el límite de 12% de hinchamiento establecido por la norma japonesa JIS A 5908.
Asimismo, Hundhausen et al. [11], compararon tableros fabricados con resina de urea-formaldehído y evaluaron la efectividad de la emulsión de parafina frente al AKD (alquil ceteno dimero). Coincidiendo con nuestros resultados, encontraron una disminución en la efectividad de los hidrofugantes a las 24 horas respecto de las 2 horas iniciales. Sin embargo, reportaron que la parafina mostró un desempeño ligeramente mejor que el AKD. Las mejoras observadas con los hidrofugantes fueron del orden de un 80% en la reducción del hinchamiento a las 2 horas y un 55% a las 24 horas, mientras que la absorción de agua se redujo en un 90% a las 2 horas y un 75% a las 24 horas. No obstante, se observó una marcada disminución en la resistencia a flexión con la aplicación de AKD.
A partir de la evaluación de nuestros resultados y los de otros autores, se puede afirmar que tanto el tipo de resina, el porcentaje y el tipo de hidrofugante, así como su método de aplicación, juegan un papel crucial en el comportamiento de los tableros frente al agua. Aunque el uso de resinas como el isocianato ofrece mejores resultados en cuanto a la resistencia al agua, su elevado costo y su impacto ambiental limitan su aplicación. De manera similar, la modificación de la resina de urea-formaldehído con metilendifenil diisocianato, aunque mejora la resistencia al agua, representa un riesgo significativo para la salud debido a su alta toxicidad. Por lo tanto, sigue siendo necesario explorar alternativas que proporcionen una mayor resistencia al agua, sean accesibles y ambientalmente sostenibles.

4. Conclusiones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

A partir de los resultados obtenidos en la investigación, se puede concluir lo siguiente:

- La eficiencia de los hidrófobos sobre las placas de cascarilla en estado de saturación es de corta duración. Tiene influencia a las 2 horas de inmersión, pero no a las 24 horas.
- En los aglomerados de cascarilla gruesa los hidrófobos son menos efectivos, observándose mejor comportamiento en los tableros de partículas finas.
- Hasta 2 horas de inmersión, se observan mejores resultados en tableros de cascarilla con emulsión de AKD.
- A 2 horas de inmersión, las placas de virutas de pino presentaron mejor comportamiento que las elaboradas con cascarilla. Estos resultados podrían deberse a una menor compatibilidad entre la composición química de la cascarilla con los agentes hidrófobos.
- El detrimento en la adherencia de las partículas provocado por la emulsión de AKD y parafina es mayor en los aglomerados de cascarilla gruesa que en los de cascarilla fina, situación que se ve reflejada en la reducción de la resistencia a flexión.
- Aún con la incorporación de los hidrófobos, todos los tableros de cascarilla exceden el límite normativo para hinchamiento (17%) de acuerdo con la norma IRAM 9720, de manera que no resultan aptos para ambientes húmedos.

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, PROPEL SA, UNITAN SAICA, a la asesoría de varios profesionales y a la colaboración del Instituto de Tecnología Celulósica de la FIQ-UNL.

Referencias bibliográficas

[1] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2023). *Plan estratégico del algodón 2035*. https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/algodon/plan2035/plan-estrategico-del-algodon-2035.pdf
[2] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Situación del algodón en la Argentina - Informe campaña 19/20 - Comité Consultivo Internacional del Algodón. https://icac.org/Content/EventDocuments/PdfFilesf65365a1_cdae_46a2_ba9b_45d0295f4137/Argentina-2020_spanish.pdf.
[3] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Situación del algodón en la Argentina - Informe campaña 20/21 - Comité Consultivo Internacional del Algodón. https://icac.org/Content/EventDocuments/PdfFiles3a1693d0_59b4_42fb_8a4b_db438bcdab7b/Argentina_Country%20report%202021.pdf.
[4] Alma, M. H., Kalaycıoğlu, H., Bektaş, I., & Tutu, A. (2005). Properties of cotton carpel-based particleboards. *Industrial Crops and Products, 22*(2), 141-149.
[5] Mendez, L. I., & Sotelo, R. M. (2006). Reciclo del Marlo de Maíz. Tableros de Partículas. ISBN 950-42-0056-7. En: Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) y de residuos de procesos (RP) PROCQMA - Universidad Tecnológica Nacional (págs. 11-12). San Rafael, Mendoza.
[6] 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.
[7] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2021). *Tableros de partículas. Requisitos*. (IRAM 9723).
[8] Halligan, A. F. (1970). A review of thickness swelling in particleboard. *Wood Science and Technology, 4*, 301-312.
[9] Maloney, T. M. (1993). *Modern Particleboard and Dry-Process Fiberboard Manufacturing*. Hal Leonard.
[10] Cabrerizo Vílchez, M. A., Covián Sánchez, I., Hidalgo-Álvarez, R., Mujika Garai, R., Rodríguez Valverde, M. A. & Tejera García, R. (2005). Study on the Effect of Raw Material Composition on

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Water-Repellent Capacity of Paraffin Wax Emulsions on Wood. *Journal of Dispersion Science and Technology, 26,* 9-18.

[11] Hundhausen, U., Militz, H. & Mai, C. (2009). Use of alkyl ketene dimer (AKD) for surface modification of particleboard chips. *European Journal of Wood and Wood Products, 67*, 37-45.

[12] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2001). *Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad*. (IRAM 9705).

[13] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2015). *Tableros derivados de la madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión*. (IRAM 9706).

[14] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2021). *Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación del hinchamiento del espesor después de inmersión en agua*. (IRAM 9720).

[15] Kwon, J.-H. (1995). Effect of the Sequence of Wax Addition, Wax Level and Type on Properties of Isocyanate-Bonded Particleboard. Mokchae Konghak, 23(2), 70-76.

[16] Hua, L. S., Chen, L. W., Antov, P., Can, A., Fatriasari, W., Chotikhun, A. (2023). Influence of wax and resin content on the properties of three-layer rubberwood particleboard. Bioresources and Environment*, 1(2), 12-24.*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

JIT 24 ROSARIO

Influencia de variables en la determinación del coeficiente de conductividad térmica en probetas de poliestireno expandido y su aplicación en casos con temperaturas medias extremas	
Área prioritaria:	Materiales
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Influencia de variables dimensionales y térmicas en la determinación del coeficiente de conductividad térmica en probetas de poliestireno expandido y su aplicación en casos con temperaturas medias extremas

Influence of dimensional and thermal variables in the determination of the coefficient of thermal conductivity in expanded polystyrene specimens and its application in cases with extreme average temperatures

Presentación 02/09/2024

Francisco Ulibarrie

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: fulibarrie@frsf.utn.edu.ar

Maira Sosa

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: msosa@frsf.utn.edu.ar

Gonzalo Barrientos Santini

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: gbarrientossantini@frsf.utn.edu.ar

Resumen

Se ensayaron 4 probetas de poliestireno expandido variando superficies, espesores, temperaturas medias y deltas de temperatura para evaluar la conductividad térmica mediante la medición del flujo de calor utilizando un equipo HFM-446.
Se calcularon promedios de las conductividades térmicas según las temperaturas medias 0, 25 y 20°C ensayadas, comparando la de 20°C con la propuesta por la Norma IRAM 11601 observándose una diferencia del 6,33%.
Se definió un paquete constructivo tipo con una placa de poliestireno expandido en su interior y se lo ubicó en ciudades con las 3 temperaturas medias ensayadas, calculándose su resistencia térmica y las kilocalorías/frigorías necesarias en cada caso.
Se compararon resultados con los propuestos por la Norma y entre temperaturas medias extremas, resultando que las más bajas se adaptan mejor a la Norma y las más altas se adaptan menos. Sin embargo, esto no implicó una diferencia en el requerimiento de equipos de acondicionamiento térmico.

Palabras clave: conductividad térmica, poliestireno expandido, método de flujo de calor, resistencia térmica.

Abstract

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Four expanded polystyrene specimens were tested, varying surfaces, thicknesses, average temperatures and temperature deltas to evaluate thermal conductivity by measuring heat flow using HFM-446 equipment.
Thermal conductivity averages were calculated according to the average temperatures 0, 25 and 20°C tested, comparing the 20°C temperature with the one proposed by IRAM 11601 Standard, showing a difference of 6.33%.
A typical construction package with an expanded polystyrene plate inside was defined and placed in cities with the 3 average temperatures tested, calculating its thermal resistance and the kilocalories/frigories required in each case. Results were compared with those proposed by the Standard and between extreme average temperatures, with the result that the lowest ones adapt better to the Standard and the highest ones adapt less. However, this did not imply a difference in the requirement of thermal conditioning equipment.

Keywords: thermal conductivity, expanded polystyrene, heat flow method, thermal resistance.

1. Introducción

En los últimos años ha tenido lugar un mayor desarrollo de materiales aislantes y amigables con el medio ambiente buscando la sustentabilidad en la industria de la construcción. Asimismo, se ha dado un aumento de los requerimientos de eficiencia energética para las edificaciones buscando el ahorro de energía. Esta dualidad lleva a la necesidad de contar con mayores precisiones en cuanto a la evaluación de las propiedades térmicas de los materiales, principalmente la Conductividad (λ) y la Resistencia (R) Térmicas. (Hung Anh and Pásztory, 2021: 01-02) (Baldinelli et al., 2019: 01). Las propiedades térmicas de muchos materiales de construcción se encuentran indicadas en los datos brindados por las distintas normas técnicas. Sin embargo, la mejor manera de contar con datos precisos es realizar la medición de estas propiedades directamente sobre los materiales (Baldinelli et al., 2019: 01), teniendo en cuenta a su vez, que una estimación inexacta de la conductividad térmica de un material podría derivar en errores en el cálculo del desempeño energético de las edificaciones (Yang et al., 2022: 01).

En este sentido, es importante considerar que existen variables que influyen en la medición de la conductividad, siendo las siguientes algunas de las más relevantes: contenido de humedad, tamaño de la muestra, estructura interna del material (porosidad, distribución de poros), temperatura y humedad ambiente, densidad aparente, espesor, velocidad del flujo de aire, presión y envejecimiento (Yang et al., 2022: 01) (Hung Anh and Pásztory, 2021: 04).

El Laboratorio de Conductividad del Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI) cuenta con un Equipo de Medición de Conductividad y Resistencia Térmicas del tipo HFM-446 de la marca Netzsch. Su principio de operación es el de un Medidor de Flujo de Calor, HFM (Heat Flux Measurement), donde la muestra se coloca entre dos placas calentadas controladas según una temperatura media de la muestra y un gradiente de temperatura definidos por el usuario, para medir el calor que fluye a través de la muestra. El espesor de la muestra L se mide mediante un medidor de espesor interno. El equipo permite configurar además la presión ejercida sobre la muestra. El flujo de calor Q a través de la muestra se mide mediante dos transductores de flujo de calor calibrados que cubren una gran área de ambos lados de la muestra. Una vez alcanzado el equilibrio térmico, el equipo registra los valores de λ (W/m×K) y R (m^2×K/W). Para el cálculo de estos, se utiliza el flujo de calor promedio Q/A (W/m^2), el espesor de la muestra L (m) y el gradiente de temperatura ΔT (Kelvin), de acuerdo con la Ley de Fourier, ecuación [1]. El equipo, a su vez, garantiza que sus resultados tendrán un rango de exactitud de ±2% (NETZSCH-Gerätebau GmbH, 2023) (Baldinelli et al., 2019: 04). Este procedimiento tiene en cuenta los lineamientos provistos por la Norma IRAM 1860.

$$\boldsymbol{\lambda} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{A}} \times \frac{\mathbf{L}}{\boldsymbol{\Delta}\mathbf{T}} \qquad [1]$$

Teniendo en cuenta las prestaciones del Equipo utilizado y las variables que influyen en la obtención y cálculo de las propiedades térmicas de los materiales, se realizaron ensayos de conductividad térmica incorporando algunas de las variables mencionadas. En este mismo sentido, según (Hung Anh and Pásztory, 2021: 04-09) y (Barrientos Santini et al., 2023: 02) la conductividad térmica aumenta conforme lo hace la temperatura media de medición. Asimismo, la Norma IRAM 11601:2002 define valores de conductividad para una única temperatura media de 20°C correspondiente a una zona central de nuestro país.

Por lo expuesto, el presente trabajo busca comparar los valores definidos por la Norma con los resultados de los ensayos realizados considerando temperaturas medias distintas, correspondientes a localizaciones extremas de Argentina y analizar si existe alguna diferencia significativa y si su influencia se traduce en mayores costos en equipos de aclimatación de aire.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

2. Metodología

2.1 Confección de las Probetas

Se considerará como referencia para este trabajo, las metodologías de ensayos planteadas por (Baldinelli et al., 2019: 02-03) y (Barrientos Santini et al, 2023:02).
Se confeccionaron 4 probetas de Poliestireno Expandido, EPS (Expanded Polystyrene), material reconocido como muy aislante, combinando superficies y espesores máximos y mínimos según las limitaciones del Equipo. De esta manera se elaboraron probetas con superficies máximas de (305×305 mm) y mínimas de (105×105 mm) y espesores máximos de (105 mm) y mínimos de (25 mm). La densidad del material empleado fue de 27 kg/m^3, verificado mediante ensayos en los laboratorios del CECOVI.

De esta forma y luego de un proceso de cortado y pulido, se obtuvieron las cuatro probetas, que, según su largo x ancho x espesor, se denominaron 105×105×25, 105×105×105, 305×305×25 y 305×305×105.
Para las probetas de menor superficie (105×105 mm), se confeccionaron elementos de contención para colocarlos alrededor de las mismas dentro de la cámara del equipo y así garantizar que el volumen vacío dentro de la cámara y en contacto con la probeta se reduzca, minimizando el impacto del flujo de aire en la medición de λ. Estos elementos de contención se confeccionaron del mismo material que las probetas y con su mismo espesor.

2.2 Verificación de Tamaño de Muestra y Constancia de Masa

Se procedió a colocar todas las probetas en estufa a +50°C. Este valor se definió teniendo en cuenta que la temperatura a la cual se ven afectadas las propiedades del poliestireno expandido es de 80°C para exposiciones de larga duración. La permanencia en estufa se requirió para lograr la constancia de masa, considerándose inicialmente un período de 24 hs. Luego de alcanzada la constancia de masa, las probetas fueron colocadas en una cámara de estabilización con sílica gel durante aproximadamente 30 minutos y luego pesadas para la obtención de los pesos secos. Por último, se procedió a medir exactamente el largo, ancho y espesor de cada probeta, realizando un promedio entre 6 mediciones de cada lado, tomando valores de caras inferiores y superiores para lograr una mejor aproximación.

2.3 Ensayo en Equipo de Conductividad Térmica

Con los datos de dimensiones y pesos secos de cada probeta, se procedió a realizar los ensayos de conductividad térmica en el Equipo mencionado en la Introducción, según IRAM 1860. En esta etapa y en función de las prestaciones del Equipo, se sumaron las siguientes variables a los ensayos:

- Medición de tres Temperaturas Medias: 0, 20 y 25 (°C).
- Medición de cuatro Deltas de Temperaturas diferentes (variaciones de temperatura entre la placa superior y la inferior del equipo): 10, 20, 30 y 40 (°C).

La Tabla 1 permite identificar los 47 Ensayos realizados para este trabajo. Para cada uno de los 3 grupos de Temperaturas Medias, se realizó el cálculo de la Conductividad Térmica promedio. La desviación estándar de la Conductividad Térmica considerando los 47 ensayos fue de 0,00230 (W/m×K).

Tabla 1. Lista de Ensayos Realizados – Combinación de Variables.

TEMPERATURAS MEDIAS	SUPERFICIE	ESPESOR	DELTAS DE TEMPERATURA (Δ)	CANTIDAD DE ENSAYOS	SUBTOTAL	TOTALES
0	105x105	25	10;20;30;40	1 por cada Δ	4	21
		105	10;20;30;40	1 por cada Δ	4	
	305x305	25	10;20;30;40	2 para Δ 20, 30 y 40, 1 para Δ 10	6	
		105	10;20;30;40	2 para Δ 10 y 20, 1 para Δ 30 y 40	7	
20	305x305	25	20	2	2	6
		105	10;20	1 para Δ 10, 3 para Δ 20	4	
25	105x105	25	10;20;30;40	1 por cada Δ	4	20
		105	10;20;30;40	1 por cada Δ	4	
	305x305	25	10;20;30;40	2 por cada Δ	8	
		105	10;20;30;40	1 por cada Δ	4	

2.4 Elección de Ciudades-Casos a considerar

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

La Norma IRAM 11601:2002 define valores de conductividad térmica para el poliestireno expandido según su Densidad Aparente. Para este trabajo, la Densidad Aparente promedio de las probetas ensayadas se determinó en 27 (kg/m^3), por lo que se realizó una interpolación lineal para obtener el valor aproximado de Conductividad Térmica dado por la Norma, determinándolo en 0,03260 (W/m×K).

De igual forma, la Norma estipula que los valores definidos se consideren en condiciones de temperatura media y humedad de 20±1ºC y 60±10% respectivamente, establecidos en los métodos de ensayo de la Norma IRAM 11559. Siendo nuestro país el de mayor superficie de Hispanoamérica y el octavo a nivel mundial, las condiciones ambientales varían mucho conforme nos desplazamos de Norte a Sur. Para representar dos regiones con temperaturas extremas y distintas a la planteada en la Norma, se optó por elegir a las ciudades de Salta y Ushuaia, asignándoles temperaturas medias de 25 y 0°C respectivamente, verificando que estas se correspondan a su vez con las de los ensayos realizados (Servicio Meteorológico Nacional, 2020).

2.5 Definición del Paquete Constructivo y Cálculo de las Resistencias Térmicas

Se estableció como caso de estudio un paquete constructivo de pared típico conformado de la siguiente manera: revoque con terminación, ladrillo cerámico macizo, placa de EPS, ladrillo cerámico hueco y placa de yeso. Como se mencionó anteriormente, se consideraron en el análisis, dos espesores diferentes de placas de EPS dentro del paquete: 25 y 105 mm. Este paquete fue emplazado en las 2 ciudades elegidas y en una tercera ciudad con una temperatura media hipotética de 20°C.

El cálculo de la Resistencia Térmica total del paquete constructivo para cada caso considerado se realizó según el procedimiento estipulado por la Norma IRAM 11601 y teniendo en cuenta los niveles de confort establecidos por la Norma IRAM 11605. Se calculó también para cada caso la Transmitancia Térmica, entendida como la inversa de la Resistencia Térmica, valor que luego será utilizado en el cálculo de kilocalorías/frigorías necesarias para la aclimatación de cada ambiente.

2.6 Análisis y Cálculo de la Capacidad del Equipo de Acondicionamiento de Aire para cada Caso

Con el fin de evaluar como impacta de manera global la determinación del coeficiente de conductividad con el equipo, en contraste con el valor de Norma, se realizó el cálculo de pérdidas y ganancias de calor, para invierno y verano respectivamente. Se buscó determinar la cantidad de calorías/frigorías necesarias para acondicionar un ambiente tipo considerando muros con el paquete constructivo analizado. El cálculo se realizó mediante el procedimiento establecido por (Quadri, 1987: 01-333) complementándolo con lo estipulado por la Norma IRAM 11603.

3. Resultados

3.1 Comparación de los Resultados de Ensayos del Equipo con los Valores Propuestos por la Norma

El valor promedio de Conductividad Térmica de los 6 ensayos considerando 20°C como temperatura media fue de 0,03466 (W/m×K), según lo expresado en la Tabla 2. Este valor, en relación con el valor dado por la Norma, 0,03260 (W/m×K), presentó una diferencia de 6,33%. Se optó por realizar esta comparación únicamente con los 6 ensayos mencionados para poder hacerlo de manera directa bajo la misma temperatura media de la Norma.

Posteriormente, se amplió el análisis para observar el comportamiento con los valores promedios de conductividades térmicas calculados para las temperaturas medias de 0 y 25°C. La Figura 1 grafica esta situación, confirmando el crecimiento de la conductividad térmica a medida que aumenta la temperatura media. También puede observarse que la diferencia con el valor propuesto por Norma disminuye para casos con temperaturas medias cercanas a 0°C y aumenta para casos con temperaturas medias mayores, cercanas a 25°C.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

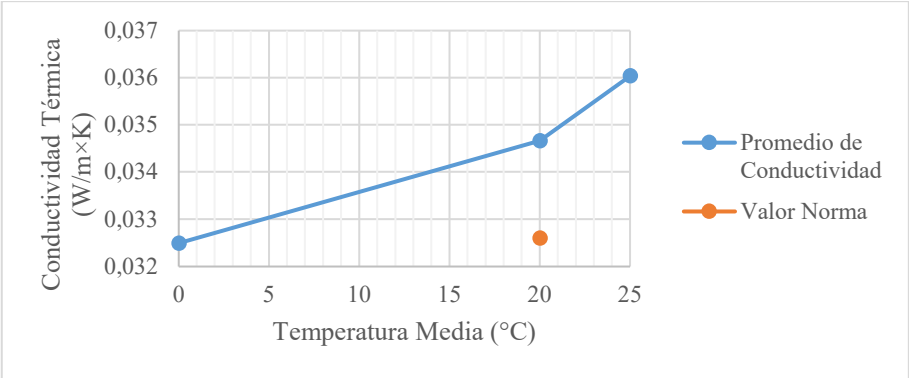


Figura 1. Gráfico Conductividad Térmica en Función de la Temperatura Media – Valores Ensayados vs Valor de Norma.

3.2 Comparación de las Resistencias Térmicas de los Paquetes Constructivos según distintos Espesores de EPS

La Tabla 2 presenta los valores de Resistencias Térmicas totales del paquete constructivo considerando las variables analizadas: Conductividad Térmica según Temperatura Media y Espesor de Placa de EPS. Puede observarse en ella que las variaciones de Resistencias Térmicas del paquete completo entre las Temperaturas Extremas representan un 6 y un 9%, correspondientes a los espesores de EPS de 25 y 105 mm respectivamente.

A su vez, queda en evidencia la influencia del espesor de la capa aislante de Poliestireno Expandido dentro del Paquete Constructivo, por la cual, al aumentar el espesor de esta única capa 4,2 veces, repercute en una Resistencia Térmica del paquete completo 2,67 veces mayor.

Tabla 2. Resistencias Térmicas Totales de Paquetes Constructivos – Diferentes Casos.

Temperatura media [ºC]	Conductividad Térmica [W/m×K]	Resistencia Térmica [m²×K/W]	
		Espesores Placa EPS [mm]	
		25	105
0	0,03249	1,36317	3,57145
20 (Norma)	0,03260	1,36061	3,66123
25	0,03604	1,28745	3,35856

Al comparar las Resistencias Térmicas totales considerando las temperaturas extremas y las Conductividades Térmicas correspondientes y aquellas calculadas siguiendo el valor de Conductividad Térmica propuesto por la Norma, se tendrá una variación similar a la expuesta en la Figura 1. Las diferencias porcentuales varían desde valores muy bajos para los 2 casos ubicados en Temperatura Media de 0°C en la ciudad de Ushuaia, hasta porcentajes mayores cuando se trata de los 2 casos localizados bajo una Temperatura Media de 25°C en la ciudad de Salta. Estas diferencias porcentuales pueden observarse en la Tabla 3.

Tabla 3. Diferencias entre Resistencias Térmicas calculadas con Temperaturas Medias Extremas y el valor propuesto por la Norma.

Temperatura media [°C]	Espesor Placa EPS [mm]	
	25	105
0	0,19%	0,28%
25	5,38%	7,99%

Estos resultados guardan relación con el análisis de las Conductividades Térmicas realizado en el apartado anterior dado que R es inversamente proporcional a λ, multiplicada por el espesor de cada capa. De esta manera se refuerza la idea de que el valor propuesto por Norma podría adaptarse mucho mejor a casos con temperaturas medias más bajas que a casos con temperaturas medias más altas.

3.3 Comparación Kilocalorías/Frigorías Necesarias según Valores de Temperaturas Medias Extremas y Aquellos Propuestos por Norma

En la Tabla 4 puede observarse que la mayor diferencia porcentual en el cálculo utilizando valores de Norma o valores de Ensayos, se presenta para la conductividad correspondiente a la mayor temperatura media. En este caso, la cantidad de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

frigorías necesarias resulta un 5,2% mayor respecto al demandado según el valor de Norma, por lo que podría estimarse que, utilizando los valores de Norma para dichas condiciones, las frigorías necesarias estarían subdimensionadas. No obstante, esta diferencia porcentual no resulta significativa dado que no implica un cambio del equipo para suministrar las frigorías o calorías necesarias.

Tabla 4. Cálculo de Frigorías/Kilocalorías necesarias para cada caso en estudio. Comparación con valores de Norma.

CÁLCULO DE FRIGORÍAS/KILOCALORÍAS NECESARIAS PARA CADA CASO											
Ubicación	**Valor**	**Estación**	**Conductividad**	**Espesor de PEX: 25 mm**				**Espesor de PEX: 105 mm**			
				Transmitancia	**Necesarias**	**Unidad**	**Dif.%**	**Transmitancia**	**Necesarias**	**Unidad**	**Dif.%**
Salta *(T 25°C)*	Ensayo	Verano	0,03604	0,77673	4411	Frig/h	-5,2%	0,29686	3790	Frig/h	-0,3%
	Norma		0,03260	0,73496	4191	Frig/h		0,27313	3779	Frig/h	
Ushuaia *(T 0°C)*	Ensayo	Invierno	0,03249	0,73358	5943	kcal/h	-0,1%	0,27237	5313	kcal/h	0,0%
	Norma		0,03260	0,73496	5947	kcal/h		0,27313	5315	kcal/h	

4. Conclusiones

A partir de lo desarrollado en el trabajo y en línea con el Objetivo expuesto en la Introducción, fue posible identificar que:

- Para el caso de poliestireno expandido con densidad aparente de 27 (kg/m^3), la diferencia entre la Conductividad Térmica propuesta por la Norma IRAM 11601 y el promedio de resultados ensayados en el CECOVI es de aproximadamente un 6,33% considerando una Temperatura Media de 20°C.
- En el análisis de λ y R de los ensayos realizados en el CECOVI, aquellos que implicaron temperaturas medias más cercanas a 0°C presentaron resultados próximos a los propuestos por la Norma, mientras que los ensayos que implicaron temperaturas medias más altas, cercanas a 25°C, presentaron diferencias más relevantes.
- Si bien se han observado variaciones en términos de λ y R, se puede concluir que, respecto a los valores propuestos por la Norma para el cálculo, no existe diferencia considerable en los resultados de calorías/frigorías necesarias para determinar los equipos necesarios de aclimatación de aire, por lo que las variables estudiadas para la determinación de λ no tiene un impacto significativo al momento de la aplicación de esta propiedad.

Derivado del análisis anterior, se pueden incluir dos conclusiones más:

- Las variables delta de temperatura, superficie y espesor de la probeta, no repercuten significativamente en el resultado del Ensayo de Conductividad Térmica arrojado por el equipo HFM-446 de la marca Netzsch que utiliza el CECOVI, dado que la desviación de la Conductividad Térmica considerando estas variables es de 0,00230 (W/m×K).
- Para un paquete constructivo con una placa de EPS en su interior, puede observarse que la incidencia en la resistencia total del paquete se incrementa al aumentar el espesor de la placa, como resultaría esperable. Esto indica que la exactitud con la que se determina el λ tiene una mayor incidencia en la determinación de la resistencia total del paquete cuando la presencia de este material es mayor.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración en el desarrollo de actividades al Ing. Mariano Suárez, a la Dra. Anabela Guilarducci, a la Ing. Dianela González, al Ing. Marcelo Avendaño, a la Ing. Loreley Beltramini, a Inés Anthony, Luciano Massons y Sebastián Vanney. Especialmente agradecemos a la Universidad Tecnológica Nacional por su financiación, al CECOVI (FRSF- UTN) por brindar los medios tecnológicos para realizar nuestra propuesta.

Referencias bibliográficas

Baldinelli, G.; Bianchi, F.; Gendelis, S.; Jakovics, A.; Morini, G.L.; Falcioni, S.; Fantucci, S.; Serra, V.; Navacerrada, M.A.; Díaz, C.; Libbra, A.; Muscio, A.; Asdrubali, F. (2019). “Thermal conductivity measurement of insulating innovative building materials by hot plate and heat flow meter devices: A Round Robin Test”, International Journal of Thermal Sciences, 139, 25–35.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Hung Anh L.D. and P´asztory, Z. (2021). “An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials”, Journal of Building Engineering, 44, 102604.
Yang, W.; Wang, Y.; Liu, J. (2022). “Optimization of the thermal conductivity test for building insulation materials under multifactor impact”, Construction and Building Materials, 332, 127380.
Quadri, N. (1987) Manual de cálculo de aire acondicionado y calefacción. Buenos Aires. Librería y editorial Alsina. 133.
Norma IRAM 1860:2002. Materiales aislantes térmicos. Método de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario, mediante el aparato de medición del flujo de calor.
Norma IRAM 11601:2002. Aislamiento térmico de edificios, Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.
Norma IRAM 11603:2012. Acondicionamiento térmico de edificios, Clasificación bioambiental de la República Argentina.
Norma IRAM 11605:1996. Acondicionamiento térmico de edificios, Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos.
NETZSCH-Gerätebau GmbH, Germany (2023). “HFM 446 lambda series - Heat Flow Meter for Testing Insulation Materials”. Disponible en <https://analyzing-testing.netzsch.com/es>.
Servicio Metereológico Nacional, Argentina, 2020. Web: https://www.smn.gob.ar/clima/vigilancia-mapas
Barrientos Santini G., Ulibarrie, F. & Vanney, S. (2023). Influencia de variables en la determinación del coeficiente de conductividad térmica en probetas de poliestireno expandido. Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos JIT2023.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Área prioritaria:	Materiales
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Estudio de la Hidratación del Cemento mediante Speckle Dinámico: Correlaciones con la Cinética de Reacción

Cement Hydration Study through Dynamic Speckle: Correlations with Reaction Kinetics

Presentación 2/09/2024

Francisco Oliva

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: foliva@frsf.utn.edu.ar

Dianela Gonzalez

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: dgonzalez@frsf.utn.edu.ar

María Valentina De Nardo Vincens

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda Santa Fe (CECOVI), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: mdenardovicens@frsf.utn.edu.ar

Resumen

El monitoreo del proceso de hidratación del cemento mediante la técnica de speckle dinámico ha evidenciado períodos de movilidad que podrían corresponder a las etapas de dicho proceso. El speckle es un fenómeno físico resultante de la interacción de fuentes de alta coherencia con superficies rugosas, mientras que el speckle dinámico ha sido documentado en estudios que involucran variaciones temporales de tal fenómeno. La hidratación del cemento es un proceso donde las reacciones de los compuestos anhidros provocan cambios físicos-mecánicos en la matriz a lo largo del tiempo. Aunque las etapas de hidratación están bien definidas, para la determinación de la evolución de las reacciones químicas se deben utilizar técnicas complementarias entre sí, que revisten cierta complejidad. Este expone el trabajo en proceso, cuyo objetivo es evaluar la correlación entre la variación del patrón de speckle dinámico y la evolución química del proceso de hidratación del cemento.

Palabras clave: Cemento, Speckle Dinámico, Hidratación

Abstract

Monitoring the cement hydration process using dynamic speckle technique has revealed periods of mobility that might correspond to different stages of the process. Speckle is a physical phenomenon resulting from the interaction of high-coherence light sources with rough surfaces, while dynamic speckle has been documented in studies involving temporal variations of this phenomenon. Cement hydration is a complex process where the reactions of anhydrous compounds induce physical and mechanical changes in the matrix over time. Although the stages of hydration are well-defined, determining the evolution of chemical reactions requires complementary and complex techniques. This ongoing work aims to evaluate

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

the correlation between variations in the dynamic speckle pattern and the chemical evolution of the cement hydration process.

Keywords: Cement, Dynamic Speckle, Hydration

1. Introducción

Se denomina hidratación al proceso en el que compuestos anhidros en contacto con agua se transforman en hidrato. Particularmente, se entiende por hidratación del cemento al desarrollo de reacciones que ocurren de manera simultánea y/o sucesiva cuando este (o uno de sus constituyentes) entra en contacto con agua, desencadenando cambios tanto químicos como físico-mecánicos del sistema (fraguado, endurecimiento), (Hewlett, 2004).

Dado que el cemento es un sistema de varios componentes (ver Tabla 1), su hidratación es un proceso complejo. Dos de las reacciones más importantes que ocurren son: 1) la reacción entre C3S (Alita) y β-C2S (Belita) con H2O (agua) para producir C-S-H (silicato de calcio hidratado) e CH (hidróxido de calcio) y 2) la reacción inicial de C3A (Celita) o C4AF(Ferroaluminato tetracálcico) con el sulfato de calcio y H2O para producir AFt (ettringita), el cual reacciona con el residuoC3A, después del consumo total de sulfato de calcio, para producir AFm (monosulfoaluminato de calcio) , (Hewlett, 2004).

Tabla 1. Compuestos principales del cemento portland.

Compuesto	Fórmula química	Formula abreviada	Forma impura
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S	Alita
Silicato bicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S	Belita
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al2O_3$	C_3A	Celita
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	
Sulfato de calcio dihidratado	$CaSO_4.2H_2O$	CSH_2	Yeso

Durante la hidratación se pueden distinguir distintos períodos. En los primeros 15 minutos se produce la hidrólisis de los silicatos y aluminatos, a partir de la cual se origina la precipitación de CH ($Ca(OH)_2$), ettringita ($3Ca.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$) y C-S-H ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) de acuerdo a lo indicado en las Ecuación (1), Ecuación (2) y Ecuación (3). La capa que se forma sobre los granos de cemento retarda la hidratación del mismo dando comienzo al período durmiente, caracterizado por una relati va inactividad donde la pasta del cemento permanece plástica y trabajable. La ruptura de la capa sobre los granos de cemento define el fin del periodo 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, que causan la rigidización, hasta que la concentración de hidratos limite 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).

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (1)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2)$$

$$[Al_2(SO_4)_3]_{aq} + 6CaO \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O \quad (3)$$

Si bien, las etapas asociadas a la hidratación han sido establecidas y consensuadas por la comunidad científica, para evaluar el desarrollo de las reacciones químicas que tienen lugar en la estructura, desde el momento en el que elcemento entra en contacto con el agua, se deben utilizar técnicas complementarias entre sí, cuya interpretación es dificultosa. .

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

De acuerdo con la bibliografía consultada las técnicas que pueden emplearse para el estudio de la evolución de la química de hidratación del cemento son: espectroscopia Raman de fibra óptica, difracción de rayos X, calorimetría isotérmica, espectrometría de absorción atómica, espectroscopia de fotoluminiscencia, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y microscopía electrónica de barrido. La mayoría de estas técnicas presentan un procedimiento de preparación de las muestras, siendo necesario detener la reacción de hidratación a las edades de interés, para obtener muestras en condiciones aptas de ser ensayadas. Se indica el uso de liofilización o de sustancias, como la butanona, para eliminar el agua de reacción, deteniendo así el proceso de hidratación, (Ylmén et al., 2009), (Santos et al., 2020), (Yue et al., 2020).

La interferometría es un campo de la óptica que tiene como principal objetivo la medición de algún parámetro físico mediante la aplicación del fenómeno de superposición de ondas. La interferometría de patrón de moteado dinámico o speckle dinámico es un área del conocimiento relativamente reciente, abordadas debido al avance de la tecnología y a la accesibilidad de la misma. El moteado es un fenómeno que se origina al iluminar la superficie de un objeto con luz coherente, provocando la superposición de luz en un punto del espacio proveniente de diferentes puntos del objeto que se traduce en un patrón de zonas claras y oscuras de apariencia granular que posee información sobre la superficie en estudio, a una escala superior a la longitud de onda utilizada (Montalvo et al., 2016). El patrón de moteado o patrón speckle es similar a una interferencia con una distribución aleatoria de máximos y mínimos de intensidad de la luz, (Caloca, 2005). La variación o evolución de un patrón con el tiempo, es decir, el patrón de moteado dinámico, permite un análisis de la superficie en estudio en el dominio temporal. El grado de actividad es lo que se llama actividad speckle (SA) y es cuantificada por el índice de movilidad (IM / MI). La actividad tiene lugar cuando la muestra cambia sus propiedades debido al movimiento aleatorio de los centros de dispersión, cambios en el camino óptico debido a variaciones del índice de refracción, cambios de configuración o combinación de estas situaciones. El estudio de la evolución temporal de los patrones de speckle puede ser una herramienta que proporcione información para caracterizar los parámetros involucrados en estos procesos, (Rabal et al., 2003).

En trabajos previos se obtuvieron resultados que indican la posibilidad de considerar al speckle dinámico como una técnica factible de aplicación para monitorear el proceso de hidratación del cemento, dado que se obtuvieron registros de actividad en las primeras 24 hs del proceso de hidratación, haciendo uso de un esquema óptico alternativo, indicando que el proceso de cambio en el material es detectado por la técnica. Del análisis de los registros, se identificaron períodos de movilidad que podrían corresponder con los tiempos de inicio y fin de fragüe, (Gonzalez, 2018), (Gonzalez et al., 2019). Además, se determinó que estos registros de movilidad no están directamente relacionados con el calor liberado durante la reacción, (Gonzalez et al., 2022). Tampoco se observó una asociación entre la variación en los patrones de movilidad y las variaciones volumétricas que experimenta el material después de los primeros 80 minutos de iniciado el proceso de hidratación (Gonzalez, 2018), (Gonzalez et al., 2019). Por otro lado, se confirmó que la técnica de speckle dinámico es sensible al tipo de cemento analizado, lo que sugiere una posible aplicación para caracterizar diferentes materiales cementicios, (Gómez et al., 2016). Estos resultados indican la relevancia de profundizar en el conocimiento de la técnica, dado que, tanto los tiempos de inicio como fin de fraguado son parámetros muy útiles para el transporte y colocación de los materiales cementicios, pero además son la clave en parámetros como la eliminación de los encofrados, el desarrollo de resistencias a edades tempranas y condiciones de durabilidad, (Kang et al., 2020).

Por otra parte, es relevante destacar que se exploró la posibilidad de replicar la técnica de speckle dinámico a partir del diseño de un prototipo que permitió obtener registros fuera del ámbito de laboratorio de física, (Zamateo et al, 2022), (Zamateo y Oliva, 2023),

Con el propósito de comprender a que parámetros está asociada la variación del patrón de speckle durante el proceso de hidratación del cemento se establece como objetivo evaluar la existencia de una correlación entre dicha variación en las primeras horas de iniciado el proceso de hidratación del cemento y la cinética de la reacción de hidratación. Debiendo concentrar esfuerzos en el estudio de los procedimientos que permitan determinar la evolución de los productos de reacción durante la hidratación a edades tempranas.

2. Metodología

A los fines de alcanzar el objetivo del presente trabajo se propone la siguiente metodología.

2.1 Caracterización del cemento empleado en el estudio

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Debido a las variaciones que presentan los cementos en su composición y a la complejidad del proceso de hidratación, es necesario determinar aquellos parámetros vinculados al fenómeno a evaluar. Es por ello, que se realizará la caracterización de las partidas de cemento que se emplearan en las siguientes instancias.

En esta etapa se registra el tipo de cemento indicado por el fabricante y la procedencia. Luego se realizan los siguientes ensayos:

- Determinación de la densidad según norma IRAM 1624, (IRAM, 2005).
- Agua para consistencia normal según norma IRAM 1612, (IRAM, 2006).
- Tiempo de inicio y fin de fraguado según norma IRAM 1619, (IRAM, 2006).
- Contracción por secado adaptado para pasta consistencia normal tomando como base la norma IRAM 1761, (IRAM, 2006).
- Resistencia mecánica a 28 días según norma IRAM 1622, (IRAM, 2006).
- Pérdida por calcinación, según norma IRAM 1504, (IRAM, 1986).
- Índice puzolanico según norma IRAM 1651, (IRAM, 2003).

2.2 Ejecución de ensayos ópticos

Se monitorea la hidratación de la pasta de cemento mediante la técnica de speckle dinámico, haciendo uso de un armado óptico alternativo provisto de una cámara CMOS de 1.3 Mpix con lupa estereoscópica Motic, incorporada a través de una conexión USB, y un láser semiconductor "Sting Ray" de 50 mW y 638 nm de longitud de onda, como fuente de luz (ver Imagen XXX). Para que los resultados sean comparables con el resto de las determinaciones, el ensayo se realizará en muestras moldeadas según norma IRAM 1619:2003, en condiciones controladas de temperatura y humedad. Los ensayos de monitoreo se realiza siguiendo el procedimiento establecido en trabajos previos, (Gómez et al., 2016), (Gonzalez, 2018).

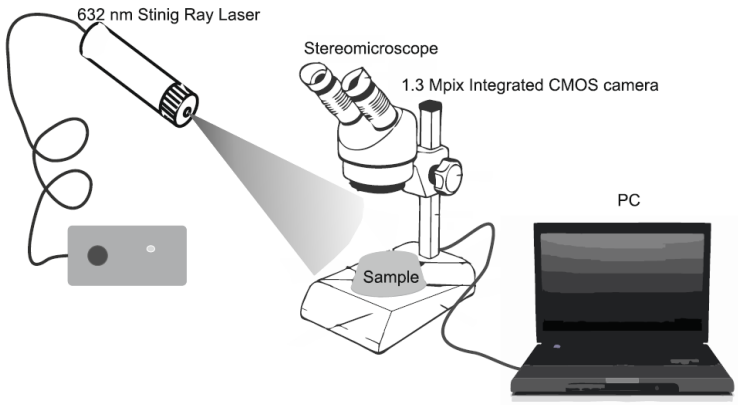


Figura 1. Armado óptico empleado en el ensayo de speckle dinámico

2.3 Detención de la reacción de hidratación

Con la finalidad de estudiar la evolución temporal de las reacciones químicas (cinética) durante el proceso de hidratación del cemento, es necesario detener el proceso en diferentes edades para obtener muestras que luego serán ensayadas mediante las técnicas contempladas en la siguiente etapa. La detención de la reacción de hidratación se logra eliminando el agua de la pasta, para lo cual se emplean distintas metodologías.

En esta etapa, se explora la posibilidad de detener la reacción utilizando dos técnicas recomendadas por la bibliografía para muestras que aún no han alcanzado el fin de fraguado. Estas técnicas son la liofilización, (Ylmén et al., 2009) y el uso de butanona, (Santos et al., 2020). La evaluación de estas técnicas permitirá determinar cuál de ellas es más adecuada para obtener muestras de pasta de cemento parcialmente hidratada, que luego podrán ser ensayadas con las diferentes técnicas previstas en la siguiente instancia.

Es importante aclarar que la detención del proceso de hidratación es necesaria para obtener muestras que puedan ser sometidas a ensayo, ya que la mayoría de las técnicas utilizadas para determinar composiciones químicas requieren procedimientos específicos de preparación de la muestra (dependiendo de la técnica de ensayo). Por esta razón, no es posible realizar determinaciones en tiempo real.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Una vez establecida la metodología para la obtención de muestras parcialmente hidratadas, se generarán la cantidad necesaria de muestra a distintas edades.

2.4 Determinación de la evolución de las reacciones químicas

En esta instancia se llevaran adelante las determinaciones que permitan caracterizar la evolución de la reacción de hidratación del cemento. Dada la complejidad del proceso en estudio y el alcance de las distintas técnicas usualmente empleadas para el análisis de compuestos, es necesario realizar determinaciones por distintos métodos para realizar una caracterización integral.

Como se mencionó anteriormente, la bibliografía consultada indica que las técnicas adecuadas para el estudio de la evolución química de la hidratación del cemento incluyen: espectroscopía Raman con fibra óptica, difracción de rayos X, calorimetría isotérmica, espectrometría de absorción atómica, espectroscopía de fotoluminiscencia, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y microscopía electrónica de barrido, (Ylmén et al., 2009), (Santos et al., 2020), (Yue et al., 2020). La selección de las técnicas a emplear y su posterior ejecución dependerán de las condiciones y posibilidades que ofrezcan las muestras obtenidas en la etapa 2.3.

En esta etapa se contempla por un lado, la selección de las técnicas adecuadas, la contratación de ensayos, la coordinación de envíos de muestras y toda la gestión asociada. Y por otro, la interpretación de resultados, que se estima que demandará gran parte del esfuerzo, ya que dependiendo de la técnica, la identificación de compuestos en cada una de las determinaciones suele ser una tarea dificultosa.

2.5 Análisis de correlación

Con los resultados obtenidos en las instancias 2.1, 2.2 y 2.4, se analiza si se encuentran patrones que correlacionen el desarrollo de los productos de reacción en el transcurso del proceso de hidratación del cemento y los registros de movilidad obtenidos mediante el ensayo de speckle dinámico.

3. Resultados

A partir del desarrollo de la metodología descripta se espera obtener una caracterización detallada del cemento a emplear en la investigación, incluyendo sus propiedades físicas y químicas, como densidad, consistencia, tiempo de fraguado, resistencia mecánica, entre otras. Se prevé monitorear el proceso de hidratación del cemento mediante la técnica de speckle dinámico, generando curvas que reflejen la variación del índice de movilidad (IM) a lo largo del tiempo. Esta técnica permitirá capturar y analizar los patrones de moteado dinámico, proporcionando información sobre los cambios en la superficie del cemento durante la hidratación.

Asimismo, se espera identificar la técnica más adecuada para detener el proceso de hidratación del cemento en diferentes etapas, antes de alcanzar el fin del fraguado. Esto facilitará la obtención de muestras de pasta de cemento en varios estados de hidratación, que podrán ser analizadas en detalle.

La ejecución de ensayos químicos para identificar los compuestos presentes en las muestras de cemento a distintas edades de hidratación proporcionará una visión integral del proceso de hidratación. Esto permitirá evaluar la evolución de los productos formados y entender mejor las interacciones entre ellos.

Finalmente, se espera identificar patrones y correlaciones entre la evolución de las reacciones químicas y los datos obtenidos mediante el monitoreo óptico. Esto contribuirá a validar la hipótesis de que la variación del índice de movilidad (IM) está asociada con la cinética de hidratación del cemento, proporcionando una herramienta adicional para el estudio y caracterización de este proceso.

4. Conclusiones

Este trabajo propone evaluar si la variación del patrón de speckle dinámico durante las primeras horas del proceso de hidratación del cemento proporciona información asociada a la cinética del proceso y al desarrollo de la microestructura del material. Determinar si esta técnica no destructiva tiene la aplicabilidad para controlar eficazmente la evolución de la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

microestructura de los materiales cementicios en sus primeras horas de hidratación, permitiría una mayor certeza en los tiempos de obra y el cumplimiento de los criterios de durabilidad.

Este enfoque tiene el potencial de mejorar la calidad y durabilidad del material, optimizando al mismo tiempo el uso de recursos, impactando positivamente tanto a la industria de la construcción como al medio ambiente.

Referencias bibliográficas

Hewlett, P.C. (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Londres: Butterworth-Heinemann.

Balzamo, H., Bascoy, D.A., Bonavetti, V., Cabrera, O.A., Carrasco, M.F. (2012). Cementos. En Esematerial llamado hormigón. Buenos Aires: AATH.

Ylmén, R., Jäglid, U., Steenari, B.M., Panas, I. (2009). Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM, and Vicat techniques. Cement and Concrete Research, 39, 433-439.

Santos, V., Denzin Tonoli, G.H., Mármol, G., Frías, M., Savastano, H. (2020). Monitoring the dynamics of Portland cement hydration through photoluminescence and other correlated spectroscopy techniques. *Construction and Building Materials*, 252, 119073.

Yue, Y., Wang, J.J., Basheer, P.A.M., Bai, Y. (2020). In-situ monitoring of early hydration of clinker and Portland cement with optical fiber excitation Raman spectroscopy. Cement and Concrete Composites, 112, 10364.

Montalvo, R.A., Asmad, M., Choque, I., Baldwin, G. (2016). Interferometría speckle para evaluar la flexión de una barra de aluminio. *Revista Mexicana de Física*, 62, 125-134.

Caloca Méndez, C. (2005). *Holografía endoscópica digital e interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI) aplicadas a mediciones de vibración en la membrana timpánica*. Tesis de maestría doctoral, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., León, Guanajuato, México, 92-96.

Rabal, H.J., Arizaga, R., Cap, N.L., Grumel, E., Trivi, M. (2003). Numerical model for dynamic speckle: An approach using the movement of the scatterers. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 5, 381-385.

González, D.G. (2018). Estudio del proceso de hidratación del cemento mediante interferometría. En *Jornada de Jóvenes Investigadores Tecnológicos 2018 (JIT)*.

González, D., Guilarducci, A., Vincitorio, F. (2019). Empleo de la interferometría digital para la caracterización del proceso de hidratación del cemento. En *1° Jornada de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Cemento y el Hormigón (JJI-TCH)*.

González, D., Guilarducci, A., Ulibarrie, N., Vincitorio, F. (2022). Monitoreo del proceso de hidratación del cemento Portland normal a edades tempranas. En *X Congreso Internacional y 24° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón* (pp. 455-462).

Gómez Arn, E., Bertoluzzi, L., Suri, F., Gervasoni, J., Freyre, C., Vincitorio, F., González, D., Yoris, A., Guilarducci, A., Ulibarrie, N. (2016). Study of cement setting by dynamic speckle pattern. En *IX Iberoamerican Optics Meeting / XII Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications*.

Kang, X., Lei, H., Xia, Z. (2020). A comparative study of modified fall cone method and semi-adiabatic calorimetry for measurement of setting time of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 248, 118634.

Zamateo, M., Oliva, F., Cabral, T. (2022). Speckle dinámico: evaluación de la reproducibilidad de ensayo para el monitoreo del proceso de hidratación del cemento e incidencia del entorno. En Jornada de Jóvenes Investigadores Tecnológicos 2022 (JIT).

Zamateo, M., & Oliva, F. (2023). Estudio del proceso de hidratación del cemento mediante la técnica de speckle dinámico: influencia del entorno y tipos de cemento. En 3° Jornada de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Hormigón y el Cemento (pp. 48-50).

IRAM. (2005). IRAM 1624: Cemento. Método de ensayo para la determinación de la densidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IRAM. (2006). IRAM 1612: Cemento. Método de ensayo para la determinación de la consistencia normal. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

IRAM. (2006). IRAM 1619: Cemento. Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
IRAM. (2006). IRAM 1761: Cemento. Métodos de ensayo de contracción por secado y de requerimiento de agua. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
IRAM. (1986). IRAM 1504: Cemento pórtland. Análisis químico. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
IRAM. (2003). IRAM 1651: Cementos. Método de ensayo de la puzolanicidad para los cementos puzolánicos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Análisis de materiales sustentables para estructura destinada a mitigar el estrés térmico en ganado bovino

Analysis of sustainable materials for a structure intended to mitigate thermal stress in cattle

Presentación: 15/08/2024

María V. MARTINEZ

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: mariavictoriamartinez2810@gmail.com

Resumen

El proyecto de investigación se centra en el desarrollo de una estructura destinada a ofrecer protección al ganado bovino para evitar el estrés térmico. Dentro del proyecto este equipo de trabajo se encarga de la búsqueda de materiales componentes de la estructura utilizando materiales reciclables. Este proyecto tiene como objetivo explorar el uso de materiales reciclables en la construcción de cubiertas para el ganado, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas. Este búsqueda de materiales no solo pretende contribuir al avance de prácticas ganaderas más sostenibles, sino que también busca servir como modelo para la actividad ganadera y aquellos productores que deseen incorporar materiales reciclables en sus estructuras.

Palabras clave: estructuras – reciclable – ODS

Abstract

The research project focuses on the development of a structure intended to offer protection to cattle to avoid thermal stress. Within the project, this work team is in charge of the search for component materials for the structure using recyclable materials. This project aims to explore the use of recyclable materials in the construction of covers for cattle, aligning with the United Nations Sustainable Development Goals. This search for materials not only aims to contribute to the advancement of more sustainable livestock practices, but also seeks to serve as a model for livestock activity and those producers who wish to incorporate recyclable materials in their structures.

Keywords: structures – recyclable – ODS

1. Introducción

La sostenibilidad en la producción ganadera es importante, más aún en la región del departamento Castellanos, donde se ubica la sede de la Facultad Regional Rafaela, dado que es una importante cuenca lechera donde se ubican lácteas Verónica SA, SANCOR e Ilolay, sumadas a otras pequeñas usinas lácteas de menor tamaño como Lácteos Vila, Lácteos Roca entre otros.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

El impacto ambiental de estas actividades y la creciente necesidad de prácticas más responsables demanda el uso de materiales que posean menor huella de carbono a los que se utilizan actualmente: acero.

En este contexto, el desarrollo de estructuras que utilicen materiales reciclables se presenta como una oportunidad para minimizar el impacto ambiental y avanzar hacia una explotación ganadera más sostenible.

Este proyecto de investigación se enfoca en la creación de un techo para ganado bovino, utilizando materiales reciclables y en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. La propuesta busca no solo ofrecer un refugio eficiente y seguro para el ganado, sino también promover la adopción de prácticas constructivas que reduzcan la huella ecológica de la actividad ganadera.

Los techos para ganado deben cumplir con ciertos estándares para asegurar la protección contra factores climáticos adversos y contribuir al bienestar animal. Tradicionalmente, estos techos se construyen con materiales que, si bien son efectivos, pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente debido a su producción y disposición final.

Este proyecto tiene como objetivo analizar diferentes alternativas de materiales reciclables, como la madera, el plástico, la paja, entre otros, con el fin de identificar las opciones que dejen la menor huella de carbono posible.

El análisis incluirá una comparación detallada de estos materiales en términos de su durabilidad, costos de producción y mantenimiento y el impacto ambiental asociado a su ciclo de vida completo.

De esta manera, se buscará una solución que cumpla con los requisitos funcionales y económicos de la ganadería bovina, que minimice el impacto ambiental, alineándose con los principios de sostenibilidad global. Al comparar y seleccionar materiales con menor huella de carbono, el proyecto busca fomentar un modelo de producción más responsable y reducir el impacto ambiental de la industria ganadera.

2. Desarrollo

Los objetivos de esta línea de investigación son:

- Buscar materiales que sean reciclables y puedan utilizarse en estructuras destinadas al ganado.
- Analizar las ventajas de cada uno de los materiales proponiendo al proyecto de investigación el más conveniente en términos de sustentabilidad.

¿Cómo comparamos los materiales para determinar cuál es el más conveniente?

Una posibilidad es determinar su impacto, mediante la huella de carbono. Esta es una medida de la carga que las actividades humanas tienen sobre el medio ambiente en términos de la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) producidos, medidos en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO_2). Se calcula considerando todas las emisiones directas e indirectas asociadas a un producto, que en nuestro caso serían las alternativas de los materiales propuestos.

El cálculo más sencillo consiste en recopilar los datos referentes a los consumos directos e indirectos de insumos materiales (por ejemplo: el papel) y energía (eléctrica y combustibles fósiles), y traducirlos en emisiones de CO_2 equivalentes, mediante el uso de Factores de Emisión.

Estructuras para construir: destino de los materiales investigados en esta línea de proyecto:

Este es un prototipo de estructura a desarrollar, para mitigar el estrés térmico en el ganado.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

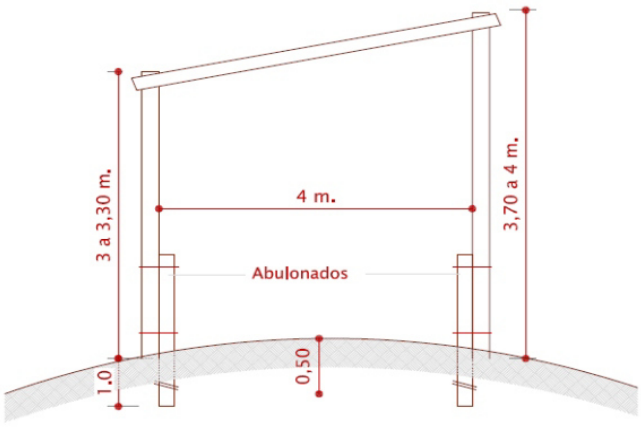


Imagen 1: ejemplo de estructura a construir (Fuente INTA)

Materiales propuestos para la cubierta.

Se propone el plástico del silo bolsa reciclado (a modo de flecos y esterillas). Otra alternativa es la paja que es abundante en zonas rurales, y finalmente la fibra de madera reciclada.

Estudio de los plásticos componentes del silo bolsa.

La mayoría de los silo bolsas están hechos de polietileno de alta densidad (HDPE) un derivado del petróleo, la conductividad térmica de este material es de 0,44 W/mK. La producción de polietileno implica la extracción de petróleo, su refinación y la polimerización para crear el material plástico, cada uno de estos pasos genera grandes emisiones de CO2.

Producción de polietileno: emisiones de CO2 de HDPE (producido desde cero): 1,92 CO2 por kg de HDPE . Las emisiones de CO_2 de rHDPE (reciclado): 0,24 CO_2 por kg de rHDPE. Estos valores pueden variar según la ubicación geográfica, la eficiencia de la producción y los métodos de eliminación.

Aunque la producción de polietileno de alta densidad a partir de polietileno reciclado genera menos emisiones, el polietileno que se utiliza de materia prima ya carga consigo grandes emisiones de carbono desde su producción, por lo que lo ideal para reciclar este material sería someterlo a menos procesos químicos. En el uso que proponemos se generan únicamente cambios físicos en el material, es decir no se afecta la estructura molecular del material y no se genera ningún tipo de combustión, la cual generaría más emisiones de carbono.

El segundo material propuesto es la paja.

La huella de carbono de los techos de paja es relativamente baja en comparación con otros materiales de construcción. Los valores son capacidad de absorción de CO_2 son de 2 kg CO_2 por cada kg de paja local usado. La paja absorbe más CO_2 del que emite durante su producción si se usa la materia prima sin procesar. En general, la huella de carbono de los techos de paja se debe a la huella de carbono producida por el transporte a la obra, y no la producción del material en sí.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela



Imagen 2: cubierta de paja (Fuente desarrollos sustentables ONU)

Un techo de paja puede durar (en buenas condiciones) entre 40 a 65 años, lo que reduce la necesidad de reemplazos frecuentes y las emisiones asociadas. Otro aspecto para considerar es que una vez que finaliza su vida útil se puede compostar, reduciendo aún más el impacto ambiental que genera. La conductividad térmica de entre 0,0337 y 0,086 W/mK.

Análisis de la fibra de madera.



Imagen 3: ejemplo de techo de fibras de madera (Fuente INTA)

La huella de carbono de la fibra de madera es tal que 1 m³ de madera absorbe el equivalente a 1,2 toneladas de CO_2, y su conductividad térmica es de 0,038 W/mK.

La fibra de madera se puede comprar en formato panel o placa, lo que facilita la instalación. Para la instalación de la fibra a granel, se utiliza una máquina de soplado para insuflarla en las cavidades de la estructura. Para la instalación de paneles, se pueden utilizar grapas, clavos o adhesivos para fijar los mismos a la estructura protectora del ganado.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que los materiales de origen vegetal (la fibra de madera y la paja) son convenientes para el alojamiento de insectos portadores de enfermedades para el ganado.

3. Resultados

De la investigación realizada, siguiendo con el objetivo de identificar las opciones que dejen la menor huella de carbono posible, y que no afecten la comodidad del ganado, observamos que existen a disposición del productor materiales totalmente reciclables, reutilizables y con baja huella de carbono. Las ventajas y desventajas de un material con respecto a otro no solamente se deben medir en función de su impacto ambiental, ya que alguno de estos materiales afecta en vez de contribuir a la sanidad animal. En el caso de los materiales compuestos por fibras y pajas, si bien absorben más carbono de el que generan, estos también sirven de alojamiento para diversos insectos que son portadores de enfermedades al ganado. Por lo que el plástico del silo bolsa resulta ser en términos sanitarios mucho más conveniente. Por otra parte, el productor agropecuario desconoce qué fin darle al plástico del silo cuando ha finalizado su vida útil, generalmente termina depositado en galpones acumulando alimañas y todo tipo de insectos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

4. Conclusiones

- El costo medioambiental de la producción de la silo bolsa es elevado si consideramos solamente su vida útil para el almacenamiento de granos.
- Los materiales fabricados a partir de materia prima vegetal suelen tener mucha menor conductividad térmica.
- La manera más eficiente de reciclar el polietileno de alta densidad es a través de procesos físicos, tales como el armado de cubiertas para techos o el corte en tiras para construir medias sombras.
- Los materiales de origen vegetal suelen absorber más carbono de lo que generan en su vida útil, sin embargo, son convenientes para el alojamiento de insectos portadores de enfermedades.

Referencias Bibliográficas

United Nations. (s. f.). Objetivos de desarrollo sostenible | Naciones Unidas. https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/page/objetivos-de-desarrollo-sostenible

Rubén, B. C., Josue, C. P. B., Antonio, E. G. M., Raúl, F. A. L., Jorge, A. O., Sergio, M. G., & Danny, E. G. (s. f.). Efecto de sombra en el corral de engorda en la respuesta productiva de toretes en finalización de la época calurosa. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692010000400008

Por qué construir con paja – Casas de Paja. (s. f.). https://www.casasdepaja.org/construir-con-paja/porque-construir-con-paja/

De Madera | Abriga Nature, F. (s. f.). Fibra de madera | Abriga Nature. https://www.abriganature.com/aislamientos-naturales-y-sostenibles/fibra-de-madera/

Profesional, R. (2022, 10 mayo). El HDPE reciclado reduce hasta un 88% la huella de carbono frente al material virgen. Residuos Profesional. https://www.residuosprofesional.com/hdpe-reciclado-reduce-huella-carbono/

Vergara-Lorduy, J., M, Á. G., Vivas, E. I., & Vivas-Reyes, R. (2020). Enfoque teórico de la conductividad térmica de cadenas simples de polietileno utilizando la función de green. https://www.redalyc.org/journal/1816/181671905007/html/#:~:text=A%20temperatura%20ambiente%2C%20las%20conductividades,densidad%20de%20Shen%20et%20al

Box, S. (2023, 4 marzo). Reducción de carbono y menos residuos -. Straw Box Chile. https://strawbox.cl/los-beneficios-de-construir-con-paneles-de-paja-menos-huella-de-carbono-y-menos-residuos/

Seoane Alvite, G. A. (2021).Siclo Rural: Recolección de Silo Bolsas en desuso. [Trabajo final de graduación, Universidad de San Andrés] https://repositorio.udesa.edu.ar/jspui/bitstream/10908/18554/1/%5BP%5D%20%5BW%5D%20MBA%20Seoane%20Alvite%2C%20Gustavo%20Andr%C3%A9s.pdf

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Reconquista

Diseño de máquina de ensayo de resistencia al impacto de granizo sobre paneles solares según IRAM 210013-8

Design of a hail impact resistance testing machine on solar panels according to IRAM 210013-8

Presentación 18/10/2024

Osvaldo Bertschi

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: bertschiosvaldo@gmail.com

Ignacio Molina

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: ignaciomolina16@hotmail.com

Resumen

Este trabajo se enmarca en el PID ENPPRQ0009863, el cual forma parte del proyecto final de carrera de dos estudiantes que, en el marco de dicho PID, están llevando a cabo la etapa de diseño conceptual de la máquina. Cabe destacar que, al momento de presentar este proyecto, el trabajo se encuentra en pleno desarrollo. El propósito de este proyecto es diseñar una máquina especializada para ensayar paneles fotovoltaicos frente al impacto de granizo, alineándose con los estándares establecidos en la norma IRAM 210013-8. Este trabajo incluye el análisis, cálculo y selección precisa de los materiales y componentes necesarios para su diseño, como tambien el programa que definirá la lógica que controlará cada una de las operaciones, además se diseñará una interfaz hombre-máquina que permita al operador interactuar con el sistema de manera intuitiva. El sistema consiste en un lanzador neumático capaz de disparar bolas de hielo de 25 [mm] de diámetro, perpendicularmente a la superficie del panel, a una velocidad de 23 [m/s] ± 5%. Este lanzador estará montado sobre un pórtico con movimiento en los ejes “X” e “Y”, vinculado a una estructura rígida que sostiene el módulo de prueba. La operación de la máquina es controlada mediante un PLC, garantizando una automatización y precisión óptimas en su funcionamiento. Como resultado se obtuvo un diseño solido capaz de realizar el ensayo de forma automatizada priorizando la seguridad de las personas en su cercanía.

Palabras clave: Modulo fotovoltaico; IRAM 210013-8; Impacto de granizo; Ensayo.

Abstract

This work is part of the PID ENPPRQ0009863, which is included in the final degree project of two students who, under the framework of this PID, are carrying out the conceptual design phase of the machine. It is important to note that, at the time of presenting this project, the work is still in progress. The purpose of this project is to design a specialized machine for testing photovoltaic panels against hail impact, in accordance with the standards established by the IRAM 210013-8 regulation. This work includes the analysis, calculation, and precise selection of the materials and components necessary for its design, as well as the program that will define the logic controlling each operation. Additionally, a human-machine interface (HMI) will be designed to allow the operator to interact with the system in an intuitive manner.The system consists of a pneumatic launcher capable of firing ice balls with a diameter of 25 mm, perpendicularly to the surface of the panel, at

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

a speed of 23 m/s ± 5%. This launcher will be mounted on a gantry with movement along the "X" and "Y" axes, connected to a rigid structure that holds the test module. The operation of the machine is controlled by a PLC, ensuring optimal automation and precision in its functioning. As a result, a solid design was achieved, capable of conducting the test in an automated manner while prioritizing the safety of nearby personnel.

Keywords: Photovoltaic module; IRAM 210013-8; Hail impact; Rehearsal.

1. Introducción

En el año 2021, la energía solar fotovoltaica se convirtió en la fuente de generación más económica a nivel mundial según IRENA (2022). Este escenario favorable ha propiciado que muchos fabricantes se dediquen a producir y comercializar diferentes componentes que son parte de las plantas de energía fotovoltaica, debiendo cumplir con diversos estándares y normativas nacionales e internacionales.

En Argentina, la norma IRAM 210013 establece estándares para ensayar los paneles solares fotovoltaicos, dentro de los diferentes tipos de ensayos que se proponen, la IRAM 210013-8 especifica los lineamientos para llevar a cabo el ensayo de resistencia al impacto de granizo. Sin embargo, no hay máquinas en el mercado nacional capaz de realizar este último. Por lo tanto, surge la necesidad de importarlas o desarrollarlas localmente para promover la sustitución de importaciones.

El proyecto se encuentra actualmente en proceso y tiene como objetivo desarrollar una máquina propia capaz de cumplir con los estándares que rige la norma.

Para el diseño de este artefacto, con el fin de aprovechar la experiencia y conocimientos previamente adquiridos en este campo, se utiliza como punto de partida una máquina de impacto de granizo construida por la marca comercial HOTOTECH.

2. Metodología

El presente trabajo se realizó en el marco de la norma IRAM 210013-8 "Ensayo de resistencia al impacto del granizo", con el objetivo de diseñar un prototipo de máquina capaz de llevar a cabo dicho ensayo. La metodología empleada para el desarrollo del proyecto se dividió en varias etapas, que abarcan desde la conceptualización y diseño hasta la automatización de la misma.

Fase 1: Conceptualización y Diseño

En primer lugar, se definieron los requisitos técnicos basados en los lineamientos de la norma IRAM 210013-8, estableciendo los parámetros críticos que el prototipo debía cumplir para asegurar la replicabilidad y validez del ensayo de impacto. Para el desarrollo del diseño, se utilizó el software de modelado 3D Inventor Autodesk en su versión estudiantil. Este software permitió la creación de un modelo detallado del prototipo, considerando aspectos como la distribución de cargas, resistencia de materiales y la integridad estructural.

Fase 2: Cálculos y Simulaciones

Posteriormente, se llevaron a cabo los cálculos necesarios para dimensionar correctamente los componentes del prototipo. Se utilizaron diversas herramientas de software para este propósito: Wolfram Mathematica 11 para cálculos matemáticos avanzados y simulaciones físicas, Microsoft Excel para el análisis de datos y la realización de cálculos de ingeniería, y FluidSIM de la empresa Festo para la simulación de los circuitos neumáticos. Estas herramientas permitieron optimizar el diseño, asegurando que el prototipo cumpliera con los requisitos funcionales.

Fase 3: Automatización del Sistema

Una vez completada la etapa de diseño y validación de cálculos, se procedió a la automatización del prototipo utilizando el software Codesys. Este paso fue crucial para garantizar que el sistema funcione de manera autónoma. Se programó y configuró el PLC para gestionar las secuencias de operación, asegurando la precisión y repetibilidad del ensayo.

Fase 4: Validación y ajustes

El proyecto se encuentra actualmente en proceso, siendo el objetivo final generar la planimetría de fabricación para un prototipo de la máquina, sumando a esto la selección de los instrumentos adecuados que formarán parte de la misma. Se prioriza una buena relación tecno-económica, así como la disponibilidad de los componentes en Argentina. Una vez

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

construido el prototipo, se planean pruebas adicionales para ajustar y validar el rendimiento del sistema, asegurando que cumpla con los parámetros especificados por la normativa.

3. Resultados

Esta sección se divide en las distintas partes que componen la maquina a desarrollar, explicando brevemente los cálculos y las selecciones de los instrumentos a utilizar.

3.1 Lanzador neumático

El principio de funcionamiento de este cañón neumáticos se fundamenta en la acumulación de aire a alta presión en un reservorio. Este aire comprimido se libera controladamente mediante una electroválvula, generando una fuerza que impulsa el proyectil a una velocidad deseada para luego impactar en el panel fotovoltaico a ensayar.

A continuación, en la Figura 1, se pueden ver todas las partes que lo componen y luego se realiza una breve descripción de cómo se calcula y selecciona cada una de estas partes.

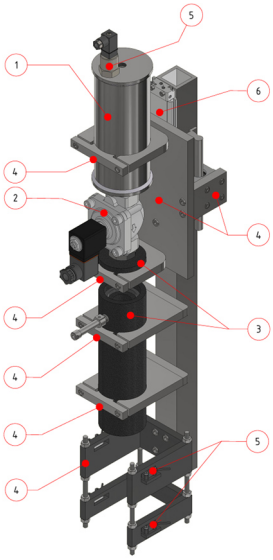


Figura 1. Partes del lanzador neumático.

1. Reservorio de aire comprimido.
2. Electroválvula.
3. Cañón.
4. Soporte, guías y elementos fijación.
5. Instrumentos de medición.
6. Cilindro neumático.

En primera instancia se parte de una expresión que permite modelar la velocidad del proyectil en función de la presión a la que se encuentra el aire en el reservorio y el volumen de este. Según Rohrbach et al. (2011) se puede modelar la velocidad del proyectil a partir de la Ecuación 1.

$$v_p = \sqrt{\frac{2}{m} \times \left(\frac{P_0 \times V_0}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{V_0}{A \times L + V_0} \right)^{\gamma - 1} \right) - A \times L \times P_{atm} - L \times f + L \times g \right)} \quad (1)$$

La expresión de la velocidad del proyectil está en función de la presión absoluta inicial P_0, el volumen inicial V_0, la longitud L, la masa m del proyectil, el área transversal del cañón A, las fuerzas de fricción f y de la gravedad g.

Con esta expresión se busca los valores de presión que permitan lanzar el proyectil a la velocidad de 23 [m/s]. Adoptando de esta manera una presión de 1,4 [bar], un volumen inicial de 0,7 [l] y una longitud de cañón de 20 [cm].

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Se adopta las dimensiones del reservorio para cumplir con ese volumen, y se selecciona de material acero inoxidable. Esta elección se fundamenta en su combinación de resistencia a la corrosión, durabilidad y disponibilidad.

Para el cañón a su vez el Delrin emerge como la elección óptima debido a varias características que se alinean perfectamente con los requisitos, por lo tanto, es el material a utilizar para esta pieza.

Entre el reservorio y el cañón se encuentra una electroválvula, la cual comandada por el PLC será la encargada de liberar el aire que luego impactará en el proyectil. Para la selección se basa básicamente en el coeficiente de flujo Kv, seleccionando una de la marca Festo, modelo VZWF.

Luego se diseñan las sujeciones necesarias para sostener el reservorio, la electroválvula, el cañón y los instrumentos de medición, permitiendo el desplazamiento vertical de una parte del sistema y posibilitando así la introducción del proyectil para el disparo.

Además, se selecciona un trasmisor de presión que tendrá la función de medir la presión en el reservorio y dos sensores ópticos que detecten el paso del proyectil, determinando la velocidad de salida del proyectil con ayuda del PLC. Por último, se selecciona un cilindro neumático capaz de elevar el conjunto reservorio y electroválvula para poder introducir el proyectil a disparar y un micro cilindro neumático que funcionará como asiento del proyectil para evitar que la bola de hielo caiga.

3.2. Mesa de apoyo de los módulos solares

Esta estructura sostiene los paneles solares durante las pruebas. Está equipada con un sistema de sujeción que asegura los paneles en su lugar, garantizando estabilidad y precisión durante los ensayos.

Para el diseño y análisis estructural del equipo se utiliza el software SolidWorks. Se ha desarrollado una mesa de apoyo para paneles fotovoltaicos diseñada para ensayar una amplia variedad de módulos disponibles en el mercado. Esta estructura cuenta con dimensiones de 2200 x 1300 [mm], lo que permite adaptarse a las diferentes configuraciones de módulos y asegurar la compatibilidad con las diversas especificaciones técnicas de los mismos.

Se selecciona perfilería de aluminio por sus ventajas significativas en comparación con los perfiles de acero convencionales, entre las cuales se destacan:

- Peso reducido
- Alta resistencia a la corrosión
- Facilidad en el montaje
- Excelente durabilidad
- Sostenibilidad y menor impacto ambiental

Especificaciones técnicas perfiles modulares de aluminio:

- Material: aleación de aluminio 6063 con temple T5, acabado anodizado natural mate
- Resistencia a la tensión: mínima: 260 N/mm^2
- Resistencia a la tensión: mínima: 260 N/mm^2
- Módulo de elasticidad: 70,000 N/mm^2
- Dureza: 75 HB 2.5/187.5

Se realiza el análisis de elementos finitos (FEA) en SolidWorks para predecir cómo reaccionará la estructura ante fuerzas, vibración, calor, flujo de fluidos y otros efectos físicos a los que estará sometido trabajando.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

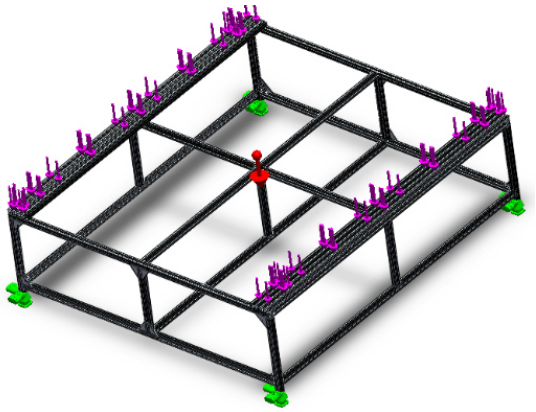


Figura 2. Análisis de elemento finito estructura.

3.3. Pórtico porta-lanzador

El pórtico contiene el lanzador de proyectiles y es el encargado de realizar el posicionamiento en los puntos de disparo especificados en la norma IRAM 210013-8.

En función de la masa del lanzador y los efectos debido a las cargas de la guía lineal, rodamiento lineal, placas de agarre y el peso propio del perfil de aluminio, se calcula los valores de las reacciones de vinculo y el momento flector máximo ejercido sobre el perfil travesaño.

Cálculo de tensiones: dimensionamiento por flexión recta simple

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_x} \leq \sigma_{adm} \rightarrow W_{nec} = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm}}$$
(2)

Donde:

- σ_{max} es la tensión máxima admisible del material.
- M_{max} es la solicitación de momento máximo.
- W_x es el momento resistente máximo.
- W_{nec} es el momento resistente necesario.

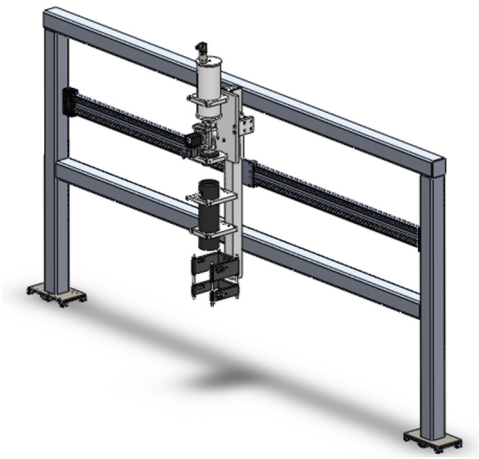


Figura 3. Pórtico porta-lanzador.

3.4. Controlador lógico programable PLC.

En primer lugar, se selecciona un PLC, para ello primero se definen los requisitos necesarios. Los requisitos en los que se basó para la selección de este equipo son los siguientes.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

1. Cantidad de entradas y salidas: la identificación precisa de las entradas y salidas (I/O) es el factor más importante en la selección del PLC, ya que define la capacidad del controlador para interactuar con el entorno y ejecutar el control del sistema
2. Tipos de entradas y salidas: es importante destacar que, para el correcto funcionamiento del sistema, se requieren dos entradas rápidas para cada sensor ópticos. De igual manera, se necesitarán tres salidas rápidas o de alto pulso para el control de los motores paso a paso que mueven el lanzador en los ejes “X” e “Y”.
3. Memoria: El programa del PLC para este proyecto no será relativamente complejo debido a la naturaleza del sistema y las funciones básicas que debe cumplir. La operación principal de la maquina a desarrollar involucra un conjunto sencillo de acciones, como el control de algunas válvulas, la activación de sensores para medir la presión y la velocidad del proyectil, y la gestión de motores para el movimiento del lanzador en los ejes X e Y.
4. Tiempo de escaneo: El scan time o tiempo de escaneo en un PLC se refiere al tiempo que tarda el controlador en completar un ciclo completo de operaciones para ejecutar el programa de control.
5. Entorno: Dado que se pretende realizar los ensayos en una sala, la selección del PLC no tendrá que enfrentarse a condiciones extremas como altas temperaturas, humedad elevada o vibraciones intensas.

Se selecciona teniendo en cuenta todos los requisitos anteriores un Controlador Lógico Programable de la marca Delta, modelo DVP-SV2.

En segundo y último lugar se realiza la programación del mismo en lenguaje Ladder de manera que cumpla con el siguiente ciclo.

1. Llenar el reservorio a la presión P_0.
2. Llevar el lanzador a la primera ubicación.
3. Al pulsar el pulsador switch 1 retraer Cilindro 1 y extender Cilindro 2.
4. Al pulsar el mismo pulsador switch extender Cilindro 1.
5. Al pulsar el pulsador switch 2 abrir electroválvula y retraer Cilindro 2 para realizar el disparo.
6. Medir velocidad del proyectil.
7. Volver a realizar el mismo ciclo en la ubicación 2.

El resultado se resume con la Figura 4.

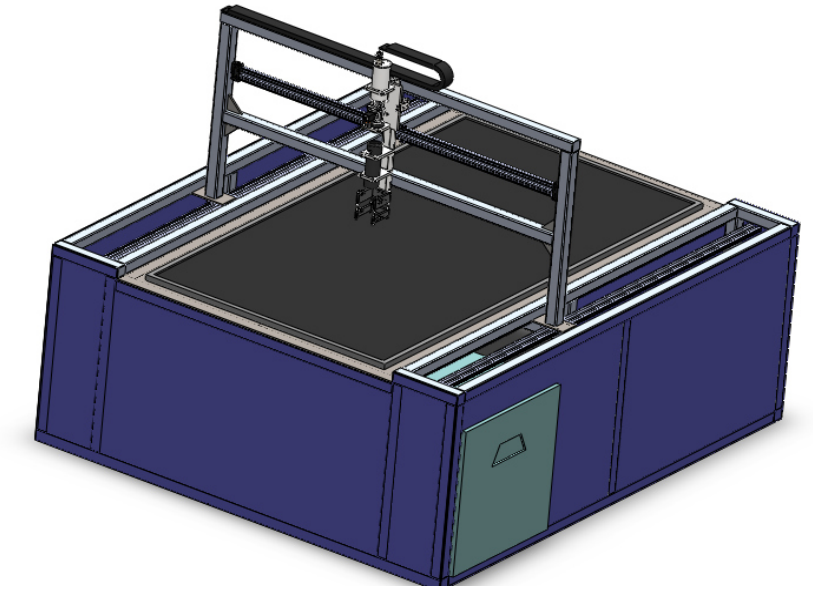


Figura 4. Máquina de ensayo al impacto de granizo sobre paneles solares.

4. Conclusiones

En primer instancia se profundizó en el estudio de la Norma IRAM 210013-8 lo que permitió entender en profundidad los estándares a cumplir. A partir de ello, se realizaron cálculos y una meticulosa selección de los materiales y componentes

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

utilizados en la construcción de la máquina, considerando factores como la resistencia mecánica y durabilidad. Finalmente, se diseñó un programa eficiente que facilita la ejecución de los ensayos automáticamente, cumpliendo con los parámetros técnicos de la norma y priorizando primordialmente la seguridad del operario. De esta manera se logró alcanzar con éxito el objetivo de crear un diseño preliminar sólido que cumple con los estándares normativos siendo apta para llevar a cabo el ensayo de impacto de granizo en paneles fotovoltaicos.

Referencias Bibliográficas:

IRAM. (2022). Ensayos de resistencia al impacto de granizo (IRAM 210013-8). Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
IRENA. (2022). Renewable power generation costs in 2021. Abu Dhabi.
Rohrbach, Buresh, and Madsen (2011). Modeling the Projectile Velocity of an Air Cannon [pdf]. Department of Physics, Wabash College. Vol. 80, No. 1, pp. 24-26 (2012). DOI: 10.1119/1.3644253.
Hototech. (2018). IEC 61215 Panel Solar Granizo Impigement Anti-Hail.
ASME. (2023). Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 1. New York.
Nicolás Serrano. (2009). Neumática Práctica (1a ed). Madrid.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

Análisis de las variables influyentes para Jet Fires generados a partir de Metano y Propano

Analysis of Influential Variables for Jet Fires Generated from Methane and Propane

Presentación 18/10/2024

Alamiro Allocca

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Rosario, Santa Fe, Argentina

E-mail de contacto: alamiro_09@hotmail.com

Facundo Esci

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Rosario, Santa Fe, Argentina

E-mail de contacto: facundonueve@gmail.com

Resumen

El estudio de las distancias seguras para Jet Fires, incendio que ocurre por la fuga de una sustancia inflamable a presión, es de vital importancia para la industria. En este trabajo se propone un análisis de la influencia de las variables de entrada como la presión del tanque al momento de la fuga, diámetros de orificio, tipo de sustancia (Metano - Propano), variables meteorológicas, ángulo y distancia al receptor, a uno de los modelos ampliamente empleados para la estimación de campo de radiación generado para determinar cuáles son las más influyentes en el cálculo de estas longitudes. Para esto, utilizamos un modelo semiempírico. Podemos inferir que a mayor presión de fuga y mayor diámetro de orificio mayor es la intensidad de radiación en un punto dado. A su vez, encontramos que la radiación generada es mayor para el Propano que para el Metano. Por último, se analiza la influencia del viento y la inclinación del jet a partir del campo de radiación generado.

Palabras clave: Jet Fire ; Intensidad de radiación; Metano; Propano

Abstract

The study of safe distances for Jet Fires, a fire that occurs due to the leakage of a pressurized flammable substance, is of vital importance for the industry. This work proposes an analysis of the influence of input variables such as tank pressure at the time of the leak, orifice diameters, type of substance (Methane - Propane), meteorological variables, angle, and distance to the receptor, on one of the widely used models for estimating the radiation field generated in order to determine which are the most influential in calculating these distances. For this, we use a semi-empirical model. We can infer that the higher the leakage pressure and the larger the orifice diameter, the greater the radiation intensity at a given point. Additionally, we found that the radiation generated is greater for Propane than for Methane. Finally, the influence of wind and jet inclination is analyzed based on the generated radiation field.

Keywords: Jet Fire; Radiation Intensity; Methane; Propane

1. Introducción

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

En la industria, la pérdida de contención de sustancias peligrosas (explosivas, inflamables y/o tóxicas) pueden ocasionar accidentes de leve magnitud hasta eventos catastróficos que pueden causar graves daños tanto al personal como al equipamiento industrial, además de afectar la producción y tener repercusiones económicas significativas. Entre estos eventos accidentales, uno de particular relevancia es el incendio a chorro conocido como "Jet fire". Aunque estos incendios suelen limitarse a radios pequeños, representan el 5% de los accidentes industriales y son especialmente peligrosos debido a su potencial para desencadenar efectos dominó, provocando daños aún mayores (Mashhadimoslem et al., 2023).

Para la estimación de las consecuencias ocasionadas por este fenómeno, existen tres tipos de modelos matemáticos: modelos semi-empíricos, modelos diferenciales implementados en códigos CFD, o modelos integrales. Los dos últimos se destacan por su precisión, pero como desventaja tienen un costo computacional significativo y requieren una gran cantidad de datos que en las primeras etapas del diseño del proyecto fabril se desconocen. Por otro lado, entre los modelos semi-empiricos algunos tienen una precisión aceptable y requieren menores cantidades de datos y esto al mismo tiempo son accesibles desde el diseño conceptual.

En la evaluación de las consecuencias ocasionadas por la ocurrencia de un jet fire, las variables más analizadas son la ubicación del posible receptor y la geometría del jet (Caetano et al., 2020). El conocimiento de la influencia de estas variables, para distintas condiciones de proceso, permitirían invertir el problema y estimar distancias seguras dada un nivel vulnerabilidad (intensidad radiación térmica). Este tipo de modelos facilitarían distintos aspectos asociados a la seguridad de una planta de procesos como el diseño de layout, la confección de planes de evacuación, etc.

Un paso en esa dirección se desarrollará en este trabajo con el análisis de todas las variables involucradas para la simulación de un jet fire empleando el modelo semi-empirico desarrollado por Chamberlain (1987) ampliamente aceptado por arrojar muy buenos resultados incluso para fugas de gran caudal.

Debido a que los Jet fires suelen ocurrir en almacenamiento o transporte de hidrocarburos o gases inflamables a altas presiones, se analiza el fenómeno para las situaciones más comunes de la industria que involucran metano y propano. En la actualidad, algunos trabajos que estudiaron los mismos tipos de compuestos encontraron que existe una relación directa entre el aumento del largo de la llama y el diámetro del agujero y las distancias estimadas (Caetano et al., 2020). Otros autores en estudios realizados para gas natural, hidrógeno y etileno, hallaron una relación entre la distancia segura y el aumento de la presión de operación debido al incremento de la densidad del gas y de la velocidad de fuga (Coccorullo & Russo, 2016).

2. Metodología

Para el análisis de la influencia de las variables de entrada se implementa el modelo de Chamberlain (1987) en MATLAB. Este modelo semiempírico asume que el jet fire es un cuerpo gris que emite energía radiante uniformemente desde toda su superficie. Para describir la llama, se adopta la forma de cono truncado. Para estimar el campo de radiación generada, se debe caracterizar al jet fire: velocidad de salida del jet y las dimensiones del cono truncado, estimar el poder emisivo por unidad de superficie, calcular el factor de visión, determinar la transmisividad atmosférica y finalmente calcular la intensidad de radiación dada una distancia desde la fuente de emisión. A continuación, se presentan las ecuaciones principales para cada etapa secuencial de cálculo y la parametrización de las variables de entrada a analizar.

2.1 Velocidad de salida del jet

La velocidad de salida u_j se calcula a partir del número de Mach (Mj) y la velocidad del sonido en el gas de salida como se muestra en la Ecuación (1).

$$u_j = M_j * \sqrt{\frac{\gamma * R * T}{PM}} \tag{1}$$

Siendo γ el coeficiente adiabático del gas, R constante de gases ideales, T temperatura en el interior del recipiente y PM el peso molecular. El cálculo del número de Mach depende del tipo flujo (supersónico, sónico o subsónico) y es función de las condiciones de P-T de la sustancia al momento de la fuga y el diámetro del orificio. Las condiciones P-T se determinan parametrizando la presión para propano [8.9 12 15 18 20 bar] para metano [7 9 11 bar], las demás propiedades se

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

determinan asumiendo almacenamiento de gas licuado (equilibrio L-V). Al mismo tiempo, el diámetro del orificio es parametrizado considerando los diámetros más frecuentes propuestos por la HSE [0.006 0.013 0.025 0.05 0.1 0.5].

2.2. Dimensiones de la llama

La longitud del jet (L_B) se obtiene mediante la ecuación empírica propuesta por Kalghatgi (1983, 1984):

$$L_B = Y * (0{,}51 * e^{-0{,}4*u_w} + 0{,}49) * \left[1 - 0{,}00607 * \left(\Theta_{jv} - 90\right)\right] * D_s \quad (2)$$

Representado u_w la velocidad del viento [1.5 3 5 8 m/s], Θ_{jv} la dirección del viento respecto al jet [0 45 90 135 180º], D_s el diámetro equivalente de orificio (Ecuación 3) e Y una variable a estimar por método iterativo (Ecuación 4).

$$D_s = \sqrt{\frac{4 * m}{\pi \ * \ \rho_{aire} * u_j}} \quad (3)$$

$$\left[0{,}024 * \left(\frac{g * D_s}{u_j^2}\right)^{\frac{1}{3}}\right] * Y^{\frac{5}{3}} + 0{,}2 * Y^{\frac{2}{3}} - \left[\left(\frac{2{,}85}{W}\right)^{\frac{2}{3}}\right] = 0 \quad (4)$$

Siendo m el caudal másico, ρ_{aire} la densidad del aire y W la mezcla estequiométrica de aire y combustible.
Luego se calcula el ángulo α entre el eje del orificio y el eje de la llama (Kalghatgi 1983, 1984) como una función de la relación entre la velocidad del viento y la velocidad del combustible en el jet ($R = \frac{u_w}{u_j}$). Para valores de R menores o iguales a 0,05 predominan las condiciones del jet y para valores mayores a 0,05 tiene mayor influencia en el cálculo del ángulo las condiciones del aire.

Para R ≤ 0,05

$$\alpha * Ri(Y * D_s) = 8000 * R + Ri(Y * D_s) * (\Theta_{jv} - 90) * (1 - e^{-25{,}6*R}) \quad (5)$$

Para R>0,05

$$\alpha * Ri(Y * D_s) = 1726 * \sqrt{R - 0{,}026} + 1334 + Ri(Y * D_s) * (\Theta_{jv} - 90) * (1 - e^{-25{,}6*R}) \quad (6)$$

Donde $Ri(Y * D_s)$ es el número de Richardson dado por:

$$Ri = (Y * D_s) * \left(\frac{g}{D_s^2 * u_j^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

Posteriormente se calcula la altura de despegue del tronco cónico (b) a partir de la relación geométrica.

$$b = L_B * \frac{sinsin\ (K*\alpha)}{sinsin\ (\alpha)} \quad (8)$$

Siendo $K = \frac{\alpha - \varphi}{\alpha}$ un parámetro empírico que se obtiene mediante la Ecuación (9):

$$K = 0{,}187 * e^{-20*R} + 0{,}015 \quad (9)$$

La longitud del tronco de cono R_L se puede calcular como:

$$R_L = \sqrt{L_B^2 - b^2 * sin^2(\alpha)} - b * cos(\alpha) \quad (10)$$

La anchura de la base del tronco cónico W_1 y del tope del cono W_2 se pueden calcular a través de las expresiones empíricas propuestas por Chamberlain (1987).

$$W_1 = D_s * (13{,}5 * e^{-6*R} + 1{,}5) * \left[1 - e^{-70*Ri(Ds)*\left(1000*e^{-100*R}+0{,}8\right)*R} * \left(1 - \frac{1}{15} * \sqrt{\frac{\rho_{aire}}{\rho_j}}\right)\right] \quad (11)$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

$$W_2 = L_B * (0{,}18 * e^{-1{,}5*R} + 0{,}31) * (1 - 0{,}47 * e^{-25*R}) \quad (12)$$

Siendo $Ri(Ds)$ el número de Richardson para D_S

$$Ri = D_S * \left(\frac{g}{D_S^2 * u_j^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Finalmente, el área superficial del tronco cónico A se estima empleando la Ecuación (14)

$$A = \frac{\pi}{4} * (W_1^2 + W_2^2) + \frac{\pi}{2} * (W_1 + W_2) * \sqrt{R_L^2 + \left(\frac{W_2 - W_1}{2}\right)^2} \quad (14)$$

2.3. Poder emisivo superficial

Se calcula despreciando la presencia de hollín dado que por tratarse de hidrocarburos livianos la superficie cubierta por hollín es muy pequeña:

$$SEP = \left(0{,}21 * e^{-0{,}00323*u_j} + 0{,}11\right) * \frac{m * \Delta H_C}{A} \quad (15)$$

Siendo m el flujo másico y ΔH_C el calor de combustión de la sustancia por unidad de materia.

2.4. Intensidad de radiación térmica

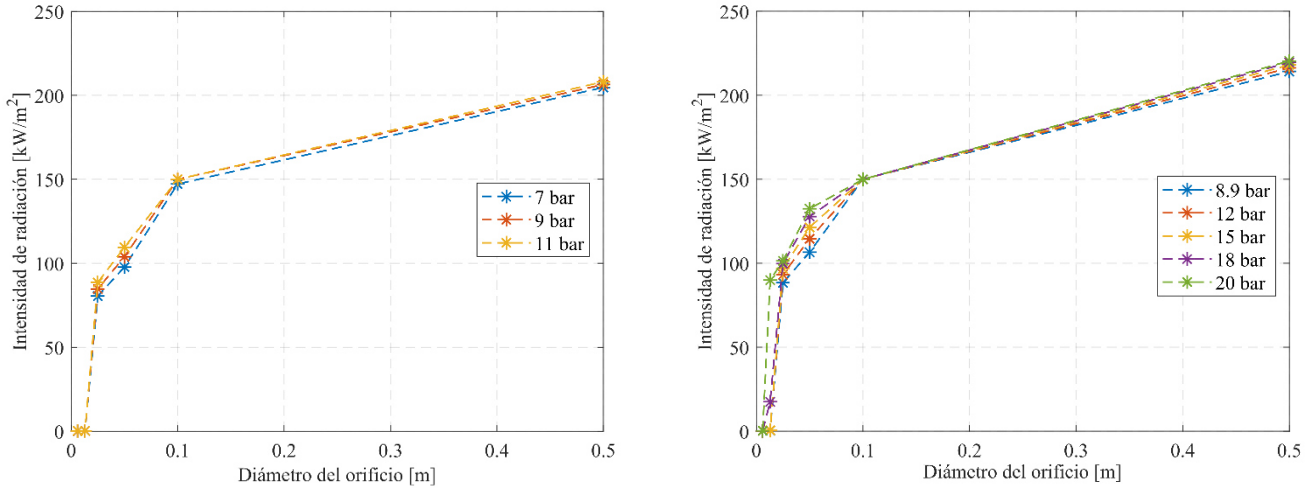
El campo de radiación generado se estima considerando el poder emisivo superficial (SEP), el factor de visión (F_v) y la transmisividad atmosférica (τ_a) como se muestra en la Ecuación (16).

$$IR = SEP * F_v * \tau_a \quad (16)$$

La transmisividad se calcula considerando la humedad relativa en el ambiente y el factor de visión considerando al cono truncado como un cilindro inclinado equivalente. Ambas variables requieren la distancia entre la llama y el receptor.

3. Resultados

La influencia de las variables de entrada al modelo seleccionado se infiere en esta sección. En la Figura 1, se muestra la radiación térmica que incide sobre un receptor ubicado a 10 m en la dirección del jet fire. En el eje de las abscisas se evalúa la variación del diámetro del orificio (variable del escenario accidental), además se observan distintas curvas paramétricas indicando la presión interna en el recipiente al momento de la fuga. La figura 1 está compuesta por dos gráficas, a la izquierda se analizan los jet fires originados por una fuga de metano (Caso a) y a la derecha se muestra el comportamiento del propano (Caso b).



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Figura 1. Evaluación de la influencia del diámetro de orificio considerando distintas presiones en el interior del recipiente. Caso a) metano, Caso b) propano.

Se observa que, a mayor presión interna en el recipiente, mayor será la velocidad de salida del jet y esto se traduce en una mayor intensidad de radiación en un punto. Al mismo tiempo, el incremento del diámetro del orificio somete al receptor a un impacto en aumento, esto se debe a que, a mayor tamaño de la fuga, mayor pérdida de contención ocasionada (masa de sustancia inflamable involucrada en el accidente). En términos relativos, puede inferirse una influencia importante de esta última variable sobre la intensidad de radiación, pudiendo asociarse diámetros de 0.013 a valores de intensidad de radiación inferiores a 1 kW/m^2, mientras que diámetros de 0.05 m alcanzan valores de 95 kW/m^2 (metano) y de 110 kW/m^2 (propano). Entre las sustancias también se presentan diferencias apreciables en la intensidad de radiación por lo que sería de interés hallar una propiedad adecuado que permita captar la influencia de la naturaleza de la sustancia.
En cuanto a las variables meteorológicas analizadas, se observa que la velocidad del viento parece tener importancia en la forma del campo de radiación generado. Este aspecto es evaluado en la Figura 2 simulando una fuga de propano por un orificio de 0.05 m en la dirección norte. La presión en el recipiente al momento de la fuga es de 18 bar y el jet originado es horizontal. De los diferentes casos presentados en la figura, se puede inferir que la velocidad del viento moldea al jet fire de la siguiente manera: para velocidades de 1.5 m/s y 3 m/s la pluma del jet es más amplia y está gobernada por la fuerza impulsora de la diferencia de presión entre el interior del recipiente y la presión atmosférica. Esto ocasiona, que el campo de radiación sea más abarcativo en el sentido transversal, pero con valores de intensidad de radiación no tan elevados en la dirección del jet fire comparando con velocidades de viento superiores. En estos casos, con velocidades de 5 m/s y 8 m/s, resultan jet fires con plumas más angostas, pero de mayor alcance en la dirección del jet, es decir con intensidades de radiación elevadas, como se observa de acuerdo a los mapas de calor presentados.

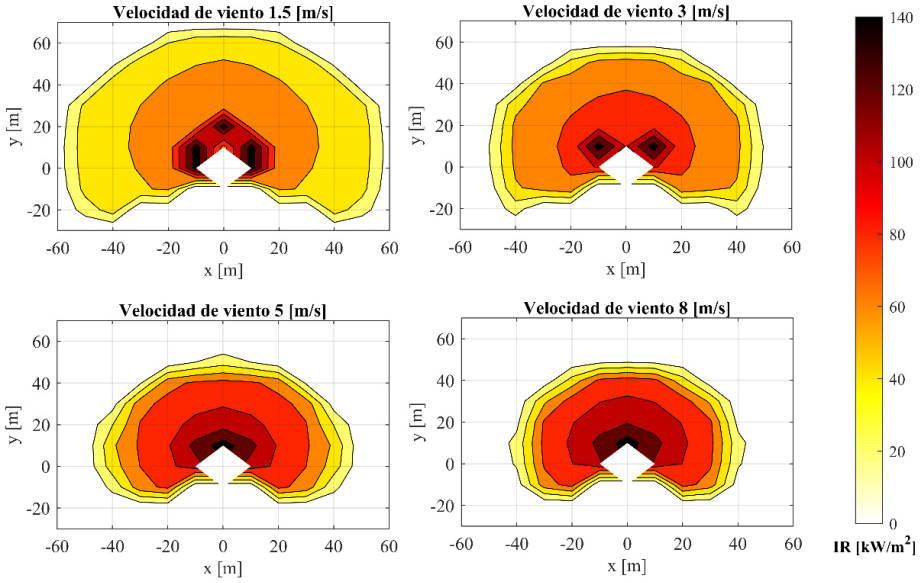


Figura 2. Mapas de calor para jet fires ocasionados por la fuga de propano considerando distintas velocidades de viento.

Otros aspectos importantes a tratar son la influencia de la dirección del viento y la inclinación de jet. Para ello se consideran como referencia los campos de radiación generados para las distintas inclinaciones de jet simuladas cuando la velocidad del viento es de 8 m/s, dado que se obtuvieron los mayores valores de intensidad de radiación. La máxima diferencia entre estos campos de radiación y los obtenidos para las demás direcciones consideradas, se expresan en términos de error absoluto y se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Errores absolutos (kW/m^2) considerando distintas direcciones de viento.

Dirección del viento	Inclinación del jet fire						
	0º	15 º	30 º	45º	60º	75º	90º
0º a 45 º	0.4262	0.2881	0.2057	0.1599	0.1349	0.1223	0.1185
0º a 90º	0.8778	0.6933	0.5538	0.4605	0.4033	0.3728	0.3632
0º a 135º	1.3548	1.1213	0.9203	0.7757	0.6839	0.6339	0.6181
0 a 180º	1.8573	1.4563	1.1556	0.9561	0.8345	0.7697	0.7494

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Con respecto a la inclinación de jet fire, se observa una mayor influencia en las cercanías del punto de fuga principalmente en los laterales y en ubicaciones donde un jet fire horizontal tendría un factor de visión nulo por ejemplo partes cercanas al lado posterior del tanque donde ocurre la fuga. En términos de errores absolutos la máxima diferencia de 113 kW/m^2 se halló comparando un jet vertical con un jet horizontal en los laterales cercanos a la fuga. Luego para jet fires intermedios ángulos entre 30º y 60º la máxima diferencia alcanzada fue de 24 kW/m^2. Las diferencias entre jet fires con distintas inclinaciones deja de ser significativa más allá de los 30 m de distancia desde el punto de fuga.

4. Conclusiones

En este trabajo, se ha llevado a cabo el análisis de la influencia de variables asociadas con el diseño del tanque (presión interna al momento de la fuga), variables relacionadas a datos históricos de accidentes (diámetro de orificio, inclinación del jet), variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento) y la ubicación del receptor respecto al punto de fuga. Al momento de invertir el problema y proponer un modelo para la estimación de distancias seguras, estas variables, excepto la dirección del viento, deberían tomarse en cuenta dado que demostraron influir en el cálculo de la intensidad de radiación térmica a una distancia dada.
Por otro lado, otro aspecto a tratar es la ubicación del orificio a través del cual ocurre la fuga. Ésta es una variable aleatoria, la fuga podría ubicarse en cualquier punto de la circunferencia del tanque. Este aspecto al momento de efectuar un análisis de riesgo debe considerarse, los campos de radiación térmica aquí obtenidos pueden emplearse efectuando una rotación respecto al norte, ahorrando ampliamente el tiempo de cómputo.

Agradecimientos

Agradecemos al Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), de la UTN-Rosario.

Referencias bibliográficas

Caetano, N. R., Lorenzini, G., Lhamby, A. R., Shah, Z., Klunk, M. A., & Rocha, L. A. O. (2020). Modelling Safety Distance from Industrial Turbulent Non-Premixed Gaseous Jet Flames. International Journal of Mechanical Engineering, 5(1).
Coccorullo, I., & Russo, P. (2016). Jet fire consequence modeling for high-pressure gas pipelines. 110007. https://doi.org/10.1063/1.4968714
Mashhadimoslem, H., Ghaemi, A., Palacios, A., Almansoori, A., & Elkamel, A. (2023). Machine learning modelling and evaluation of jet fires from natural gas processing, storage, and transport. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 101(8), 4416-4428. https://doi.org/10.1002/cjce.24805
Chamberlain G.A., 1987, "Developments in Design Methods for Predicting Thermal Radiation from Flares", Chem. Eng. Res. Des. 65:299-309.
Kalghatgi G.T., 1983, "The Visible Flame Shape and Size of a Turbulent Hydrocarbon Jet Diffusion Flame in a Crosswind", Comb. Flame 52:91-106.
Kalghatgi G.T., 1984, "Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air", Comb. Sci. Techn. 41:17-29.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Evaluación de la calidad del agua subterránea para riego en Rafaela y alrededores

Evaluation of the groundwater quality for irrigation in Rafaela and surrounding

Presentación 18/10/2024

Farías Marisol Belén

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Estudios de Medio Ambiente (GEM), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: mari_sol_farias@hotmail.com

Servan Marisa

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Estudios de Medio Ambiente (GEM), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: maru842001@hotmail.com

Resumen

El agua subterránea de Rafaela y alrededores es utilizada generalmente para riego y consumo animal, y en áreas rurales, puede incluso ser empleada para consumo humano. Con respecto a su aptitud para irrigación, se deben considerar parámetros vinculados al contenido de sales en el agua y la relación entre los principales cationes involucrados como sodio, calcio y magnesio. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es evaluar la calidad del agua de pozos para uso agrícola. Para ello, se muestrearon distintos puntos de la zona, los cuales fueron georreferenciados y se analizaron diferentes parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad, dureza, calcio, magnesio y sodio. A partir de los resultados obtenidos, se calcularon estimadores de la aptitud del agua para riego como la Relación de Adsorción de Sodio y Magnesio, y el índice Kelly. El estudio permitió demostrar que el 60% de las muestras analizadas es adecuada para el riego de cultivos.

Palabras clave: Aguas subterráneas, Riego, Indicadores de calidad.

Abstract

The groundwater in Rafaela and its surrounding areas is primarily utilized for irrigation and livestock consumption, and in rural regions, it may even be employed for human consumption. Regarding its suitability for irrigation, parameters related to the salt content in the water and the relationship among the primary cations involved, such as sodium, calcium, and magnesium, must be considered. Consequently, the aim of this study is to evaluate the quality of well water for agricultural use. Various sampling points in the area were georeferenced, and different physicochemical parameters were analyzed, including pH, conductivity, hardness, calcium, magnesium, and sodium. Based on the obtained results, estimators of water suitability for irrigation, such as the Sodium Adsorption Ratio (SAR) and the Kelly's index, were calculated. The study demonstrated that 60% of the analyzed samples are suitable for crop irrigation.

Keywords: Groundwater, Irrigation, Quality Index.

1. Introducción

La calidad del agua es importante no sólo desde el punto de vista de la población, como agua para consumo humano, sino también como agua de riego para alcanzar una adecuada producción de cultivos, ya que su aptitud está determinada principalmente por la cantidad y tipo de sales que la constituyen (Aumassanne & Fontanella, 2015). Además, es esencial para mejorar la productividad de los cultivos, debido a que afecta tanto los rendimientos de estos, así como a las

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

características físicas del suelo, incluso si todas las demás condiciones y prácticas de producción son favorables (Mérida & Urnicia, 2016). En cuanto a su idoneidad para su uso, se evalúa en función de la posible gravedad de los problemas que pueden surgir durante su uso a largo plazo (Ayers & Westcot, 1985; El Osta et al., 2022). Uno de los aspectos esenciales para alcanzar la sustentabilidad de los agroecosistemas irrigados, es la identificación del impacto potencial que el agua de riego ejerce sobre las propiedades del suelo (Aparicio et al., 2014). Los parámetros que determinan su aptitud para el uso en irrigación se dividen en tres categorías: químicos, físicos y biológicos. Los primeros se refieren al contenido de sales en el agua, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), relación de adsorción de sodio (RAS), la alcalinidad y la dureza del agua (Aumassanne & Fontanella, 2015).

El agua subterránea, en general, suele ser económica, de fácil acceso y resulta vital para un tercio de los riegos y el abastecimiento de la población mundial (Herraiz, 2009). Algunos autores explican que la calidad del agua subterránea en una región es una función de parámetros físicos y químicos que están fuertemente influenciados por procesos naturales como la química del agua en el área recargada, la mezcla de agua, la recarga de agua subterránea, la descarga y recarga de acuíferos, la trayectoria del flujo de agua y la interacción entre los minerales de las rocas del acuífero y el agua, proceso de oxidación-reducción, tiempo de residencia del agua, intercambio iónico, condiciones climáticas y estructuras geológicas (Singh et al., 2017; Soleimani et al., 2018; Azhdarpoor et al., 2019).

Las explotaciones agropecuarias utilizan el agua subterránea para consumo humano, pecuario y riego de cultivos (D'Elia et al., 2012). La idoneidad de ésta para el riego depende de la naturaleza de los elementos minerales presentes en el agua y de sus efectos tanto en el suelo como en las plantas (Rawat et al., 2018). El alto contenido de sales en el agua de irrigación genera un aumento de la presión osmótica en la solución del suelo, disminuyendo la absorción de agua por parte de las plantas. Las sales afectan la estructura del suelo, su permeabilidad y estructura, influyendo indirectamente en el crecimiento de la planta (Douchafour, 1984). Por lo tanto, es muy importante evaluar la calidad del agua subterránea para el riego agrícola sostenible y el bienestar humano.

En la región centro-oeste de la Provincia de Santa Fe, las aguas subterráneas presentan, en general, alta salinidad. Con respecto a su uso, el agua alojada en el acuífero libre, cuya calidad es variable, es utilizada generalmente para riego, estanques de ganado y consumo humano en el área rural (Tujchneider et al., 2013). Según Sosa (2017), es muy importante su análisis, debido a que son fácilmente utilizables por la población rural para el abastecimiento humano y ganadero.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la calidad del agua de pozos de los alrededores de Rafaela para uso agrícola. Con ese fin, se realizaron análisis fisicoquímicos a veinticinco muestras procedentes de distintos puntos del área en estudio. Los resultados obtenidos se usaron para el cálculo de diferentes estimadores de la aptitud del agua para riego: 1) Relación de Adsorción de Sodio (RAS), 2) Relación de Adsorción de Magnesio (RAM), 3) Índice Kelly.

Este trabajo se encuentra alineado con uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (ONU, 2018). Específicamente se toma como referencia el Objetivo N°6 "Agua limpia y saneamiento", en el cual se plantea mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminado el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y peligrosos, considerado el reciclado y reutilización sin riesgo a nivel mundial. Asimismo, otra de las metas es proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, así como apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora y la gestión del agua y el saneamiento.

2. Metodología

Para efectuar el presente estudio, se realizaron extracciones de muestras de aguas procedentes en pozos ubicados en diferentes zonas aledañas a Rafaela, Departamento Castellanos, en la región centro-oeste de la Provincia de Santa Fe (Figura 1 y 2).



Figura 1. Localización de la zona en estudio.

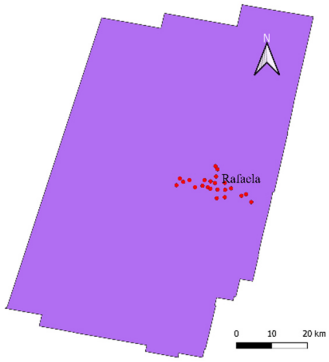


Figura 2. Localización de los puntos monitoreados.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos a veinticinco muestras de agua subterráneas y las determinaciones realizadas incluyeron pH, conductividad, dureza total, calcio (Ca), sodio (Na) y magnesio (Mg). Para ello, se emplearon las técnicas normalizadas propuestas por Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). Se calcularon indicadores de la calidad de agua para riego: RAS (Rawat et al., 2018), RAM (Khodapanah et al., 2009) e Índice Kelly (Kumar & Kumar, 2012; Ramesh & Elango, 2012).

Para el cálculo de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la Relación de Adsorción de Magnesio (RAM) y el Índice Kelly se utilizaron las ecuaciones 1, 2 y 3 respectivamente.

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca+Mg)}{2}}} \quad (1)$$

$$RAM = \left[\frac{Mg}{(Ca+Mg)}\right] \times 100 \quad (2)$$

$$Índice\ Kelly = \left[\frac{Na}{(Ca+Mg)}\right] \quad (3)$$

Donde las concentraciones de los iones se expresaron en meq/L.

3. Resultados

En la Tabla 1, se pueden observar los valores promedios obtenidos de los parámetros analizados en las muestras, incluyendo los máximos y mínimos correspondientes.

Tabla 1. Valores promedio, mínimos y máximos de los pozos monitoreados.

Parámetros	Promedio	Máximo	Mínimo
pH	7,5	8,6	6,6
Conductividad (mS/cm^2)	5,0	8,4	1,7
Dureza Total (mg $CaCO_3$ /L)	505,8	1.495,7	38,4
Calcio (mg/L)	106,8	323,4	7,7
Magnesio (mg/L)	58,1	167,4	3,4
Sodio (mg/L)	491,5	1.610,0	23,0

En cuanto al pH, se define como el nivel de alcalinidad o acidez de la solución y es una indicación de la reacción química del agua (Murhekar, 2011). El rango recomendado de pH para el agua de riego es de 6,5 a 8,4, valores fuera de este indican una advertencia de que el agua necesita una evaluación adicional (Ayers & Westcot, 1985). En este estudio, un 96% de las muestras analizadas presentaron un pH que se encuentra entre los valores adecuados para riego, mientras que el 4% obtuvo un valor superior a 8,4, siendo el valor promedio de 7,5.

Autores como Rodríguez et al. (2008) señalan que la conductividad eléctrica (CE) es un índice de la concentración total de sales disueltas en el agua dada y refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, ya que está directamente relacionada con la concentración y tipo de sales disueltas. Por lo tanto, su análisis es muy importante y fundamental porque puede informar su calidad, según los límites fijados por Ayers & Westcot (1985), las aguas de riego que poseen conductividades menores a 0,7 mS/cm son de muy buena calidad sin restricciones para su uso. Mientras que, aquellas con CE comprendidas entre 0,7 - 3,0 mS/cm presentan una buena calidad y las que tienen valores superiores a 3 mS/cm no son aptas para riego porque tienen muy alta salinidad. En este estudio, el 28% son aguas de buena calidad y el 72% restante superan los valores recomendables y no se consideran aptas para riego por presentar muy alta salinidad.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

La dureza del agua se debe principalmente a la cantidad de carbonato de calcio y magnesio (Sharifi & Safari, 2012). Por lo general, el agua subterránea es dura en comparación con el agua superficial y puede tener niveles superiores a los límites permisibles debido a la alta solubilización con componentes de la roca como dolomita, calcita y yeso. La escorrentía de los suelos de piedra caliza, textiles, materiales que contienen magnesio y aguas residuales son la principal fuente de dureza (Olumuyiwa et al., 2012). En este estudio, las aguas se clasificaron en moderadamente duras, duras y muy duras según los límites recomendados por diferentes autores (Sawyer et al., 2003; Sharifi & Safari, 2012). Un 8% de las muestras obtuvieron un valor menor a 75 mg/L, por lo que entran dentro de la categoría de aguas poco duras. Por otro lado, en base a los resultados, el 72% fueron calificadas como muy duras y el 20% restante como duras.

En la Tabla 2, se exhiben cada uno de los parámetros estudiados, incluyendo la clasificación respecto de su aptitud para riego según distintos autores.

Tabla 2. Calidad de agua para riego

Calidad del Agua para riego				
Criterio	**Clase de Agua**	**Rango**	**% muestras**	**Referencias**
Conductividad (Ec) (mS/cm^2)	Excelente	<0,7	0%	Ayers & Wescot, 1985
	Buena	0,7-3	28%	
	No apta	>3	72%	
Dureza Total (mg $CaCO_3$/L)	Poco dura	<75	8%	Sawyer, McCarty & Parkin, 2003; Sharifi & Safari, 2012
	Moderadamente dura	75 - 150	0%	
	Dura	150 - 300	20%	
	Muy dura	> 300	72%	
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	Excelente	<10	64%	Rawat, Singh & Gautam, 2018
	Buena	10 -18.	20%	
	Dudosa	18 - 26	8%	
	Inadecuada	> 26	8%	
Relación de Adsorción Mg (meq/L)	Recomendable	< 50	64%	Khodapanah et al., 2009
	No recomendable	> 50	36%	
Índice Kelly (meq/L)	Recomendable	< 1	28%	Kumar & Kumar 2012; Ramesh & Elango, 2012
	No recomendable	> 1	72%	

Elaboración propia.

Los resultados obtenidos permitieron clasificar las aguas en estudio según diferentes estimadores de la aptitud de su uso para riego.

Con respecto a la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), es un índice efectivo del peligro potencial de un agua en equilibrio con el suelo. Cuando las aguas de riego contienen cantidades considerables de sodio en solución, éste se acumula paulatinamente en el suelo y como consecuencia, el suelo pierde su estructura. Debido a esto, la permeabilidad del suelo al agua y aire disminuye, se favorece la formación de costras, todo lo cual afecta o impide el desarrollo normal de los cultivos (Rodríguez et al., 2008). El RAS también influye en el tiempo de percolación del agua en el suelo, por lo tanto, es deseable que el agua de riego tenga un valor bajo de RAS. En función del rango de RAS, el agua de riego se puede clasificar en cuatro clases: RAS < 10 (ideal o excelente), 10–18 (buena), 18–26 (dudosa) y > 26 (inadecuada) (Rawat et al., 2018). Según los resultados alcanzados un 64% de las aguas poseen una calidad excelente, 20% son “buenas”, 8% son de una calidad “dudosa”, mientras que el 8% restante se consideran inadecuadas para uso agrícola, tal como se presenta en la Figura 3.

La concentración excesiva de magnesio en las aguas subterráneas afecta la calidad del suelo al convertirlo en alcalino y disminuye el rendimiento de los cultivos (Singh et al., 2013; Gautam et al., 2015). Según los agricultores, la cantidad excesiva de iones magnesio en las aguas daña la calidad del suelo, lo que provoca una baja producción de cultivos (Ramesh & Elango, 2012; Narsimha et al., 2013). Se recomienda no utilizar con fines de riego un agua que posea un RAM > 50 (Khodapanah et al., 2009). Tal como se puede apreciar en la Figura 4, un 64% de las aguas subterráneas analizadas obtuvieron valores menores a 50 y serían apropiadas para riego, mientras que el 34% exceden el límite de RAM y, por lo tanto, no se recomienda su uso.

Kelly (1940) y Paliwal (1967) introdujeron otro factor para evaluar la calidad y clasificación del agua para riego basado en la concentración de sodio frente a calcio y magnesio (Rawat et al., 2018). El índice de Kelly se utiliza para indicar la idoneidad del agua subterránea para el riego en la agricultura; el agua de riego que contiene mayor contenido de sodio afecta la estructura del suelo, por lo tanto, reduce la velocidad con la que el agua se mueve hacia el suelo (Grattan, 2002). Cuando el índice de Kelly es mayor que 1 significa que el agua tiene un nivel excesivo de sodio y por lo tanto se considera no adecuada para fines de riego (Kumar & Kumar, 2012) debido a los riesgos alcalinos por lo tanto se recomienda para riego el uso de agua con un KI ≤ 1 (Ramesh & Elango, 2012). En la Figura 5 se puede observar que el 28% de las muestras

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

estudiadas obtuvieron valores que las hace aptas para riego según este índice, mientras que el 72% restante manifestaron un valor mayor a la unidad.

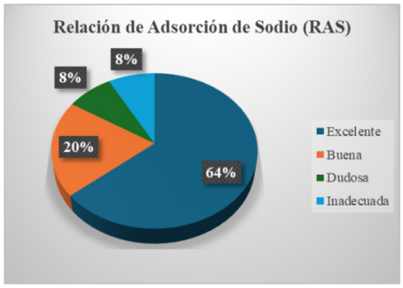


Figura 3. Calidad del agua según el valor de RAS.

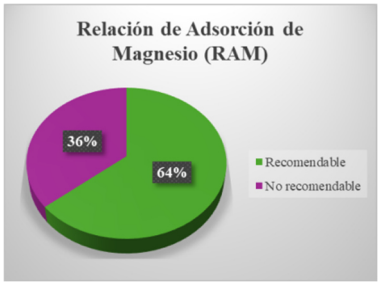


Figura 4. Calidad del agua según el valor de RAM.

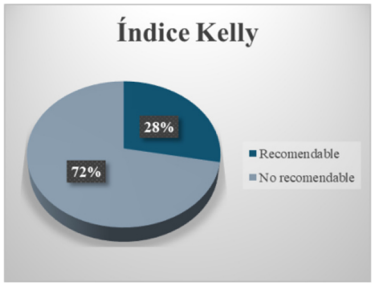


Figura 5. Calidad del agua según el valor del índice

La evaluación de la calidad del agua para riego, basada en diversos estimadores como la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la Relación de Adsorción de Magnesio (RAM) y el Índice de Kelly, revela información de relevancia respecto a su idoneidad para uso agrícola. En general, los resultados indican que un porcentaje superior al 60% de las muestras analizadas serían aptas para riego considerando los índices RAS y RAM, no obstante, debido a que las aguas estudiadas poseen un elevado contenido de sales totales, se consideran aptas sólo para riego de plantas que sean resistentes a la salinidad y en suelos con muy buen drenaje.

Estos hallazgos subrayan la importancia de un análisis detallado de la calidad del agua subterránea, ya que el uso inadecuado de aguas con altos índices de sodio y magnesio podría perjudicar significativamente la productividad agrícola y la salud del suelo. Por lo tanto, en una etapa posterior se pretende realizar el control de las concentraciones de metales pesados, ya que debido a su toxicidad pueden limitar la calidad del agua para riego. Asimismo, resulta relevante realizar el seguimiento de los indicadores considerando factores como la estacionalidad para evaluar la calidad del agua en los sistemas destinados a riego, para garantizar una mayor productividad y protección del cultivo.

Referencias bibliográficas

Aparicio, V. C., Barbacone, A., Costa, J. L. (2014). Efecto de la calidad de agua para riego complementario sobre algunas propiedades químicas edáficas. *Ciencia del suelo*, *32*(1), 94-104.
APHA (American Public Health Association) (2017). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition American Public Health Association.
Aumassanne, C., Fontanella, D. (2015). Variaciones en la conductividad eléctrica del agua para riego en la cuenca del río Colorado, Argentina. In *Congreso Nacional del Agua, Conagua 2015. 25, 15-19*.
Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture*. Rome: Food and agriculture organization of the United Nations.
Azhdarpoor, A., Radfard, M., Pakdel, M., Abbasnia, A., Badeenezhad, A., Mohammadi, A. A., Yousefi, M., (2019). Assessing fluoride and nitrate contaminants in drinking water resources and their health risk assessment in A semiarid region of southwest Iran. Desalin Water Treat 149, 43–51. https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23865
D´Elia, M., Tujchneider, O., Paris, M., Pérez, M., Pusineri, G. (2012). Acuífero de la cuenca baja del río Salado (Argentina). Metodologías de análisis y aplicación de tecnologías para el manejo sostenible de acuíferos en zonas rurales (58 pp.). En L. Ribeiro, T. Betancour, & M. D´Elia (Eds.). Lisboa: CYTED-Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
Douchafour, P. (1984) Edafogénesis y clasificación. Barcelona: Masson, 450 pp.
El Osta, M., Masoud, M., Alqarawy, A., Elsayed, S., Gad, M. (2022). Groundwater suitability for drinking and irrigation using water quality indices and multivariate modeling in makkah Al-Mukarramah province, Saudi Arabia. *Water*, *14*(3), 483. https://doi.org/10.3390/w14030483
Gautam S. K., Maharana C., Sharma D., Singh A. K., Tripathi J. K., Singh S. K. (2015). Evaluation of groundwater quality in the Chotanagpur Plateau region of the Subarnarekha River Basin, Jharkhand State, India. Sustain Water Qual Ecol, 6, 57–74. https://doi.org/10.1016/j.swaqe .2015.06.001
Grattan, S. (2002). Irrigation Water Salinity and Crop Production. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Herraiz, A. S. (2009). La importancia de las aguas subterráneas. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *103*(1), 97-114.
Kelly, W. P. (1940). Permissible Composition and Concentration of Irrigated Waters. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 66, 607-613.
Khodapanah, L., Sulaiman, W. N. A., Khodapanah, D. N. (2009). Groundwater quality assessment for different purposes in Eshtehard District, Tehran, Iran. Eur J Sci Res 36(4), 543–553
Kumar, M., Kumar, R. (2012). Assessment of Physico-Chemical Properties of Ground Water in Granite Mining Areas in Jhansi, U.P. International Journal of Engineering Research and Technology, 1, 1-9.
Murhekar, G. H. (2011). Determination of Physico-Chemical Parameters of Surface Water Samples. Akot City, India. International Journal of Current Research and Academic Review, 2, 31-41.
Mérida, S., Urnicia, J. (2016). Aptitud química del agua subterránea para el riego agrícola en el valle del Tulum, San Juan, Argentina. Tercer encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos.
Narsimha, A., Sudarshan, V., Swathi, P. (2013). Groundwater and its assessment for irrigation purpose in Hanmakonda Area, Warangal District, Andhra Pradesh, India. Int J Res Chem Environ 3, 195–199
Olumuyiwa, L. F., Otieno, F. A. O., Ochieng, G. M. (2012). Characteristics, Qualities, Pollutions and Treatments of Water in Durban. International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 4, 162-170.
Organización Naciones Unidas (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3)
Paliwal, K. V. (1967). Effect of Gypsum Application on the Quality of Irrigation Waters. The Madras Agricultural Journal, 59, 646-647.
Ramesh, K., Elango, L. (2012). Groundwater quality and its suitability for domestic and agricultural use in Tondiar River Basin, Tamil Nadu, India. Environ Monit Assess 184(6), 3887–3899
Rawat, K. S., Singh, S. K., Gautam, S. K. (2018). Assessment of groundwater quality for irrigation use: a peninsular case study. *Applied Water Science*, *8*, 1-24. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0866-8
Rodríguez, M., D'Urso, C., Rodríguez, G., Sales, A. (2008). Evaluación de la calidad de aguas para riego de la cuenca del río Calera, Tucumán, Argentina. *Ciencia*, *3*(7), 15-28.
Sawyer, C. N., McCarty, P. L. and Parkin, G. F. (2003). Chemistry for Environmental and Engineering Science. 5th Edition, McGraw Hill Inc., New York, 587-590.
Sharifi, Z., Safari Sinegani, A. A. (2012). Arsenic and other irrigation water quality indicators of groundwater in an agricultural area of Qorveh Plain, Kurdistan, Iran. *Am Eurasian J Agric Environ Sci*, *12*(4), 548-555.
Singh S. K., Srivastava P. K., Pandey A. C., Gautam S. K. (2013). Integrated assessment of groundwater influenced by a confluence river system: concurrence with remote sensing and geochemical modelling. Water Resour Manag 27(12), 4291–4313. https://doi.org/10.1007/s1126 9-013-0408-y
Singh, C., Kumar, A., Shashtri, S., Kumar, A., Kumar, P., Mallick, J. (2017). Multivariate statistical analysis and geochemical modeling for geochemical assessment of groundwater of Delhi, India. J. Geochem. Explor. 175, 59–71. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.01.001
Soleimani, H., Nasri, O., Ojaghi, B., Pasalari, H., Hosseini, M., Hashemzadeh, B., Kavosi, A., Masoumi, S., Radfard, M., Adibzadeh, A., Feizabadi, G. K. (2018). Data on drinking water quality using water quality index (wqi) and assessment of groundwater quality for irrigation purposes in Qorveh & Dehgolan, Kurdistan, Iran. Data In Brief 20, 375–386. https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.022
Sosa, D. (2017). El agua subterránea en los bajos submeridionales Santafesinos y su aprovechamiento en la producción ganadera. *Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias. Sección ciencias agrarias*, *16*(1), 115-129.
Tujchneider, O., Perez, M., Paris, M., D'Elía, M., Gualini, S., Musacchio, V. (2013). Indicadores de sustentabilidad de los recursos hídricos subterráneos en el área central de la provincia de Santa Fe, Argentina. En *VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea.*

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

JIT 24 ROSARIO

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rosario

TRABAJO EN DESARROLLO

Métodos de Optimización de Layout de Parques Eólicos: Revisión Bibliográfica

Optimization Methods for Wind Farm Layout: Bibliographic review

Presentación 18/10/2024

Constanza Morbidoni

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: constanzamorbidoni@gmail.com

Resumen

Durante la última década, se ha evidenciado que las energías renovables constituyen una alternativa crucial para la transformación de las economías, satisfacer los requerimientos energéticos y la disminución del impacto ambiental de la combustión. La energía eólica conforma una de las opciones más importantes para esta transición energética. Un aspecto fundamental para que esta tecnología sea viable es el diseño óptimo de su instalación, planteando layouts eficientes. En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica acerca de la optimización de layout de parques eólicos, dada la complejidad de la problemática, para detectar las desventajas de los algoritmos desarrollados hasta la fecha -implementándolos en GAMS- y proponer posibles enfoques para mejorarlos en futuros trabajos. Para esto, se analizan los principales modelos determinísticos más implementados en la bibliografía. Se incluye, además, un análisis comparativo con los algoritmos desarrollados para la optimización de layouts de procesos químicos, un campo relativamente más desarrollado.

Palabras clave: Energía Eólica, Optimización de Layout, GAMS, MILP.

Abstract

During the last decade, it has become evident that renewable energies are a crucial alternative for transforming economies, meeting energy requirements and reducing the environmental impact of combustion. Wind energy is one of the most important options for this energy transition. A fundamental aspect for this technology to be viable is the optimal design of its installation, proposing efficient layouts. In this work, a literature review is carried out on wind farm layout optimization, given the complexity of the problem, in order to detect the disadvantages of the algorithms developed to date -implementing them in GAMS- and to propose possible approaches to improve them in future works. For this purpose, the main deterministic models most widely implemented in the literature are analyzed. A comparative analysis with the algorithms developed for the optimization of chemical process layouts, a relatively more developed field, is also included.

Keywords: Wind Energy, Layout Optimization, GAMS, MILP.

1. Introducción

1.1. *Consideraciones Generales*

En la industria de procesos, la optimización del layout de planta es de vital importancia ya que el mismo genera un alto impacto en los costos y en el riesgo asociado al complejo para el medio circundante. La disposición espacial de las unidades de proceso toma gran relevancia a la hora de poder evitar accidentes, o poder reducir su magnitud o probabilidad de ocurrencia, así como la capacidad de éste para propagarse (Orellano, 2024). En las últimas décadas, esta problemática fue tomando relevancia y surgieron numerosos modelos de optimización de procesos. En el centro de investigación (Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería) fueron propuestos algunos avances novedosos. A partir del desarrollo

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

de esta problemática resulta de importancia investigar la posibilidad de aplicar estos modelos desarrollados, a otras áreas de estudio.

Por ejemplo, en las últimas décadas fue tomando importancia el desarrollo de tecnologías sustentables en la satisfacción de las demandas energéticas, buscando minimizar los gases de efecto invernadero y su impacto en el planeta por medio del reemplazo de la combustión como eje central. En este contexto, la energía eólica y/o la solar se destacaron por su factibilidad técnica y económica (Koc, 2022). Por otra parte, comienzan a desarrollarse procesos "híbridos" (resultantes de incorporar sistemas auxiliares de generación de energía por medio de este tipo de sistemas). Un ideal sería *la optimización simultánea* de la planta de generación de energía y el proceso al cual sirve.

Según la World Wind Energy Association, en 2023, el 10% de la energía eléctrica fue obtenida de fuentes eólicas. Las tecnologías empleadas se fueron desarrollando y se espera que constituya una fuente de suministro importante en el futuro. La potencia producida por un parque eólico es proporcional al número de turbinas instaladas, la velocidad del viento, y otros factores; pero el layout de las mismas tiene un papel fundamental en la potencia total generada debido al efecto estela. Este aparece por efecto de la turbulencia del viento en la parte posterior de las hélices. Luego, las turbinas afectadas por dicho efecto procesan una velocidad de viento inferior y, por ende, la potencia producida por ellas disminuye.

En el presente trabajo se realiza una revisión bibliográfica de la problemática de la optimización de layouts de parques eólicos, explorando la posibilidad de aplicar los conocimientos desarrollados para la optimización de layout en tal área y en la industria de procesos, a los efectos de mejorar la performance de los algoritmos de optimización existentes y avanzar en el área de diseño seguro de ambos tipos de procesos, y de los híbridos que surgen de sus combinaciones particulares.

1.2. *Abordaje de la Problemática*

La optimización de layout de parques eólicos constituye una problemática que fue abordada a partir de diferentes perspectivas; sin embargo, estos siguen presentando ciertas desventajas. Estas se deben principalmente a la complejidad de resolución y los tiempos que resultan muy elevados para ciertos casos de interés práctico. La gran mayoría de trabajos que se encuentran en la bibliografía implementan modelos heurísticos o determinísticos.

Uno de los primeros en desarrollar propuestas para esta problemática fueron Mosetti et al., (1994) implementando los modelos de estela desarrollados por Jensen, (1983) y optimizando la ubicación de las turbinas eólicas aplicando modelos genéticos, de búsqueda heurística. Posteriormente, Grady et al., (2005) aplicó los mismos casos planteados por Mosetti et al. (1994) obteniendo una mejora en los resultados, implementando también modelos genéticos. Los modelos heurísticos, luego fueron ampliamente aplicados -por ejemplo por Liu et al., (2021), Koc, (2022), Wen et al., (2022) -, entre otros. A lo largo del tiempo, también se fueron implementando otros enfoques, como la aplicación de Monte Carlo Bai et al., (2022), modelos evolutivos como el de González et al., (2010), algoritmos de búsqueda de gradientes Criado Risco et al., (2024), entre otros.

Por otro lado, Turner et al., (2014) desarrollaron una optimización por programación entera mixta en la cual, guiándose con el modelo de Mosetti et al, (1994), proponen una simplificación de la función objetivo y buscan reducir los amplios tiempos de procesamiento propios de estos modelos. Luego, Ulku & Alabas-Uslu, (2019) por medio de programación no lineal, implementaron el modelo de Turner et al. (1994) pero considerando las áreas de solapamiento entre la estela y la turbina que se ve afectada por ésta.

2. Metodología

2.1 Modelo de Estela

En la bibliografía pueden encontrarse diferentes formas para plantear el efecto estela, pero el más difundido y empleado es el modelo de Jensen (1983). Este es un modelo cinemático en el cual, para una estela de radio r_r, cuando el viento se dirige de izquierda a derecha con cierta velocidad U_0, se genera una estela como la que se representa en la Figura 1. A una distancia x de la turbina, denotamos la velocidad del viento -U- y el radio de la estela -r-.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

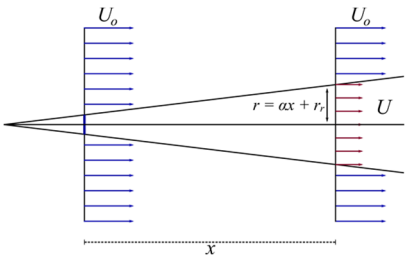


Figura 1. Dimensiones de la estela.

El déficit de velocidad (*vd*) que se genera como consecuencia de la estela a una distancia *x* en la dirección de viento se estima con la Ecuación (1). En esta, se identifica la localización de las turbinas a través de los índices *i* y *j*, obteniendo la velocidad de viento que recibe la turbina en j, como consecuencia de la estela generada por la turbina en i. La velocidad de viento en ese punto se computa con la Ecuación (2).

$$vd_{ij} = \frac{2a}{1+\alpha\left(\frac{x_{ij}}{rd}\right)^2} \tag{1}$$

$$U_j = U_0(1-vd_{ij}) \tag{2}$$

Siendo α la constante de arrastre que se calcula mediante la Ecuación (3), donde *z* es la altura del buje de la turbina y z_0 la rugosidad de la superficie. El parámetro *a* es el factor de inducción axial que puede estimarse a través de la Ecuación (4), donde C_T es el coeficiente de empuje y representa la proporción de energía obtenida cuando el viento atraviesa las palas de la turbina. El parámetro *rd* es el radio del rotor aguas abajo y puede estimarse mediante la Ecuación (5).

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \tag{3}$$

$$a = 0.5\left(1-\sqrt{1-C_T}\right) \tag{4}$$

$$rd = r_r\sqrt{\frac{1-a}{1-2a}} \tag{5}$$

Al instalarse múltiples turbinas, las estelas pueden cruzarse entre sí y afectar a más de una turbina a la vez. El déficit de velocidad total v^{def} sobre la turbina *j* está dado por la Ecuación (6).

$$v_j^{def} = \sqrt{\sum_i vd_{ij}^2} \tag{6}$$

González et al., (2010) mejoraron el modelo usado para considerar el déficit de velocidad por el efecto estela, considerándose los casos en los que la turbina no está completamente inmersa en la estela. El déficit de velocidad se modifica según la Ecuación (7). Ulku & Alabas-Uslu, (2019) implementaron este modelo de estela en la optimización del layout del parque eólico, afectando el déficit de velocidad que llega a la turbina por el área de solapamiento entre la estela y la turbina.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

$$vd_{ij} = \frac{2a}{1+\alpha\left(\frac{x_{ij}}{r_d}\right)^2}.\frac{A_O}{A_T} \tag{7}$$

El modelo es el mismo, pero se incorpora el término (A_O/A_T), que indica la relación entre el área de solapamiento de estelas - A_O- y el área total - A_T -. Para el cálculo del mismo, se implementan las expresiones presentadas por (González et al., 2010).

2.2. Modelo de Optimización

La potencia generada puede aproximarse a partir de la Ecuación (8)

$$P = \sum_{j=1}^{N} \frac{1}{3} U_j^3 \tag{8}$$

En el modelo de Turner et al., (2014), mediante la aplicación de las ecuaciones del modelo de Jensen, se define como función objetivo la maximización de la potencia a través de la Ecuación (9). Siendo N las posibles localizaciones de turbinas, y_j y y_i variables binarias iguales a 1 si hay una turbina ubicada en la posición j o i respectivamente y 0 en caso contrario.

$$\max \sum_{j=1}^{N} y_j \left(1 - \sqrt{\sum_{i=1}^{N} vd_{ij}^2 y_i}\right)^3 \tag{9}$$

Al ser ésta una ecuación no lineal, Turner et al. llevan a cabo una serie de transformaciones, a fin de disminuir la dificultad de resolución, resultando la Ecuación (10).

$$\min \sum_{j=1}^{N} y_j \left(\sum_{i=1}^{N} vd_{ij}^2 y_i\right) \tag{10}$$

Para poder representar el déficit de velocidad generado por el efecto estela -w_{ij}-, se introduce en el modelo la matriz de interacción presentada en la Ecuación (11). Luego, para los casos que involucran múltiples direcciones de viento puede reformularse esta matriz para incluir la probabilidad p_l de cada una de éstas -Ecuación (12) siendo D las direcciones de viento consideradas-. Así, la función objetivo final queda expresada por la Ecuación (13).

$$w_{ij} = vd_{ij}^2 \tag{11}$$

$$W_{ij} = \sum_{l=1}^{D} p_l w_{ij}^l \tag{12}$$

$$\min \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} W_{ij} x_{ij} \tag{13}$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

2.3. Casos de Estudio

En gran parte de los trabajos desarrollados sobre esta temática, se plantean los modelos de estela y de optimización para 3 casos diferentes según direcciones y velocidades de viento. Estos son:

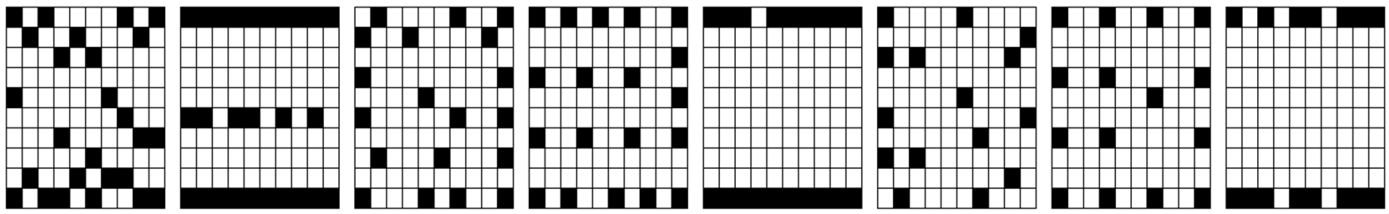
a. Una dirección de viento y una velocidad constante (de 12 m/s).
b. 36 direcciones de viento con la misma probabilidad y una velocidad constante (de 12 m/s).
c. 36 direcciones de viento con diferentes probabilidades y 3 velocidades de viento (de 8 m/s, 12 m/s y 17 m/s).

Para evaluar diferentes alternativas, aquí se han reproducido dichos problemas de optimización utilizando los modelos presentados anteriormente en GAMS (General Algebraic Modeling System), software diseñado para la formulación y resolución de problemas de optimización matemática. Para discretizar el terreno del campo eólico, se considera una grilla de 10x10 sectores iguales en la cual se ubicarán la cantidad de turbinas que se quieran optimizar para cada caso. Los valores de los parámetros de entrada requeridos por el modelo (radio del rotor, altura del buje, tamaño de cada celda en la grilla, coeficiente de empuje C_T) fueron los expuestos en los trabajos que se reproducen.

Los modelos fueron implementados en GAMS con el solver CPLEX –el cual utiliza algoritmos para encontrar soluciones óptimas en problemas de optimización- fijando las posiciones de las turbinas en el terreno que fueron reportadas en la bibliografía por Mosetti et al., Turner et al. y Ulku & Alabas-Uslu, para los casos mencionados.

3. Resultados

Los layouts reportados en los trabajos publicados que se tomaron como referencia se muestran en la figura 2.



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h)

Figura 2. Caso A (a) Mosetti, (b) Turner, Caso B. (c) Mosetti, (d) Turner, (e) Ulku. Caso C. (f) Mosetti, (g) Turner, (h) Ulku.

Los valores de potencia obtenidos aplicando los modelos presentados, para las posiciones de las turbinas de los casos explicados previamente son los reportados en la Tabla 1. Estos valores resultaron lo suficientemente cercanos a los reportados en la bibliografía; concluyéndose que el modelo y la estrategia de resolución utilizada es apropiada.

Tabla 1. Reproducción de los casos más relevantes.

Paper	*Caso*	*Nº de turbinas*	*Potencia [kW]*
Mosetti	*a*	26	12338,32
Turner			12648,34
Mosetti	*b*	19	10215,195
Turner			10280,94
Ulku			9740,35
Mosetti	*c*	15	13236,10
Turner			13365,02
Ulku			12943,51

La principal complejidad del problema se encuentra en la interacción entre las turbinas. En los modelos determinísticos, al liberar las posiciones de las turbinas fijadas previamente, se vuelve muy complicado abordar casos de gran dimensión. Los métodos de optimización propuestos en los casos de mucha interacción insumen tiempos de ejecución excesivamente elevados.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

En el caso de procesos químicos, esta problemática es compartida, ya que el problema es definido como un “hard problem”. En general, si se pretende una buena calidad en la solución óptima, los algoritmos publicados a la fecha presentan problemas a medida que aumentan las unidades de procesamiento a ubicar. No obstante, existe bibliografía importante publicada que permite para un tiempo determinado de ejecución, aumentar el número de unidades ubicadas en el layout; o bien, para un número dado de unidades, obtener muy buenas soluciones reduciendo en forma importante el tiempo de ejecución (Orellano, 2024).

4. Conclusiones

En los últimos años, el desarrollo de energías renovables fue aumentando significativamente su relevancia para con ciertas problemáticas actuales, en especial el uso de la energía eólica, ya que esta se encuentra ampliamente disponible y es parte de una fuente inagotable.

La ubicación de las turbinas dentro de un parque eólico tiene un papel fundamental al maximizar la potencia producida y minimizar los costos. La optimización de layout de parques eólicos ha sido ampliamente estudiada, pero es una problemática que aun presenta ciertas deficiencias. En particular el tiempo de cómputo, si se utilizan algoritmos determinísticos. En este trabajo se llevó a cabo una revisión bibliográfica y se ha implementado un algoritmo de optimización en GAMS, reproduciendo adecuadamente los resultados publicados correspondientes a una serie de problemas estándar para esta temática (benchmark).

Por otra parte, los resultandos preliminares obtenidos, muestran que implementando ciertas modificaciones al modelo aquí presentado -ya probadas en la optimización de layouts de procesos químicos de similar complejidad (Orellano, 2024)-; es posible lograr soluciones óptimas en tiempos de cómputo significativamente menores. En particular, para los casos en que la interacción de las estelas generadas entre turbinas es tal, que consume tiempos excesivos en la resolución de los modelos desarrollados hasta el momento para el layout de parques eólicos. Por último, para procesos híbridos en el sentido introducido aquí, el ideal es lograr la optimización simultánea del layout del parque y del proceso al cual sirve. Este es el objetivo final del proyecto del cual forma parte este trabajo.

Referencias bibliográficas

Bai, F., Ju, X., Wang, S., Zhou, W., & Liu, F. (2022). Wind farm layout optimization using adaptive evolutionary algorithm with Monte Carlo Tree Search reinforcement learning. Energy Conversion and Management, 252, 115047. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115047

Criado Risco, J., Valotta Rodrigues, R., Friis-Møller, M., Quick, J., Mølgaard Pedersen, M., & Réthoré, P.-E. (2024). Gradient-based wind farm layout optimization with inclusion and exclusion zones. Wind Energy Science, 9(3), 585-600. https://doi.org/10.5194/wes-9-585-2024

González, J. S., Gonzalez Rodriguez, A. G., Mora, J. C., Santos, J. R., & Payan, M. B. (2010). Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm. Renewable Energy, 35(8), 1671-1681. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.010

Grady, S. A., Hussaini, M. Y., & Abdullah, M. M. (2005). Placement of wind turbines using genetic algorithms. Renewable Energy, 30(2), 259-270. https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.007

Jensen, N. O. (1983). Risø-M. 2411: A note on wind generator interaction.

Koc, I. (2022). A comprehensive analysis of grid-based wind turbine layout using an efficient binary invasive weed optimization algorithm with levy flight. Expert Systems with Applications, 198, 116835. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116835

Liu, Z., Fan, S., Wang, Y., & Peng, J. (2021). Genetic-algorithm-based layout optimization of an offshore wind farm under real seabed terrain encountering an engineering cost model. Energy Conversion and Management, 245, 114610. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114610

Mosetti, G., Poloni, C., & Diviacco, B. (1994). Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 51(1), 105-116. https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90080-9

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Orellano, S. (2024). Metodología para la Optimización de Layout y Síntesis de Procesos Considerando el Riesgo Tecnológico. UTN Facultad Regional Rosario.

Turner, S. D. O., Romero, D. A., Zhang, P. Y., Amon, C. H., & Chan, T. C. Y. (2014). A new mathematical programming approach to optimize wind farm layouts. Renewable Energy, 63, 674-680. https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.023

Ulku, I., & Alabas-Uslu, C. (2019). A new mathematical programming approach to wind farm layout problem under multiple wake effects. Renewable Energy, 136, 1190-1201. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.085

Wen, Y., Song, M., & Wang, J. (2022). Wind farm layout optimization with uncertain wind condition. Energy Conversion and Management, 256, 115347. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115347

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Evaluación y comparación de la calidad del aire en la ciudad de Rafaela en base a actualizaciones de la norma US-EPA 2024

Evaluation and comparison of air quality in the city of Rafaela based on updates from the US-EPA 2024 standard

Presentación 18/10/2024

Mariana Carrel

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de investigación en aplicación de métodos numéricos en ciencia e ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: mcarrel99@gmail.com

Martina Costanzo

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de investigación en aplicación de métodos numéricos en ciencia e ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: marticostanzo77@gmail.com

Nain Schmidt

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de investigación en aplicación de métodos numéricos en ciencia e ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: 01nainschmidt@gmail.com

Ariana Castro

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de investigación en aplicación de métodos numéricos en ciencia e ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: arianacastro1510@gmail.com

Resumen

El aire es una mezcla de diferentes gases que rodea la Tierra en una capa de varios kilómetros de altura. La contaminación del mismo se debe a la presencia de gases de efecto invernadero (GEI) y el material particulado (PM), en altas concentraciones provocando afectaciones a la salud humana. El objetivo de este trabajo es la evaluación 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, en base a las actualizaciones de las normas US-EPA del presente año, muestran que la calidad del aire en la ciudad sigue perteneciendo a la categoría de 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 circulación vehicular.

Palabras clave: Calidad de aire, material particulado, Rafaela, evaluación.

Abstract

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Air is a mixture of different gases that surrounds the Earth in a layer several kilometers high. Its pollution is due to the presence of greenhouse gases (GHG) and particulate matter (PM), in high concentrations causing effects on human health. The aim of this work is the evaluation 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, based on updates to this year's US-EPA standards, show that air quality in the city continues to belong to the good to moderate category with seasonal peaks in concentration of particulate matter during the winter months coinciding with the increase in the use of firewood for heating and vehicular circulation.

Keywords: Air quality, particulate matter, Rafaela, evaluation.

1. Introducción

El aire es una mezcla de diferentes gases conformando una capa de varios kilómetros de altura que rodea al planeta denominada atmosfera (Ahrens y Henson, 2018). El aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humano. Sin embargo, su contaminación representa un importante riesgo ambiental para la salud, en especial para los sistemas respiratorios y cardiovasculares de la población en general (OMS, 2021). Aunque, la susceptibilidad a la contaminación puede variar de acuerdo a la edad y/o salud de cada individuo, los niños, niñas y las personas mayores son los grupos etarios más vulnerables (Clark et al., 2020).

De acuerdo al Daly y Cognuck González (2021) la contaminación del aire se observa como una neblina grisácea, es decir, la presencia de partículas, gases o materiales en el aire capaces de reducir su calidad y generar un riesgo, daño o molestia grave. En consecuencia, y 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.

La principal fuente de emisión de material particulado (PM) son las emisiones provocadas por la quema de combustibles fósiles para el transporte, los procesos industriales o la producción de energía, las actividades agrícolas y ganaderas, la quema de bosques y residuos sólidos y la energía doméstica (Shiva Nagendra et al., 2021). Las partículas de interés de la presente evaluación son $PM_{2.5}$, las cuales tienen 2.5 micras de diámetro, se consideran las más dañinas de todas ya que por su tamaño pueden ingresar en el torrente sanguíneo humano y son capaces incluso de llegar al cerebro (Suarez et al., 2014).

La concentración del material particulado es probable que varíe de manera sustancial entre las ciudades en todo el mundo, en función de la geografía, la meteorología y las fuentes específicas de material particulado de cada lugar (Daly y Cognuck González; Shiva Nagendra et al., 2021).

2. Metodología

El área de estudio donde se lleva a cabo el trabajo se encuentra ubicada en la ciudad de Rafaela, departamento Castellanos, en el centro oeste de la provincia de Santa Fe (Figura 1). 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.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

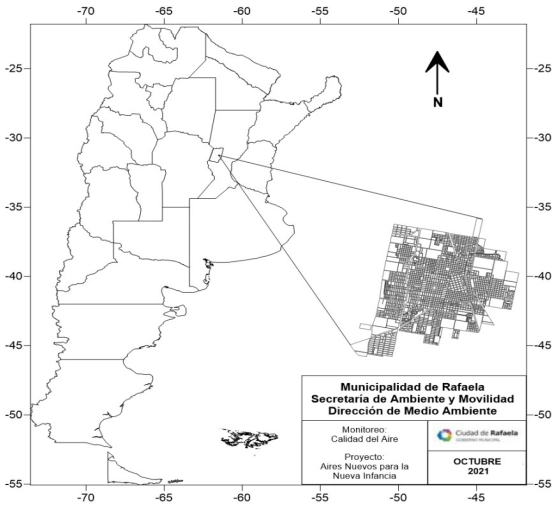


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio (ciudad de Rafaela).

La metodología utilizada para medir la calidad del aire urbano contempla la utilización de instrumentos digitales de medición continua de material particulado AirVisual Pro (IQAIR-AirVisual, 2019; 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).

El medidor AirVisual Pro permite medir la calidad de aire urbano en ambientes internos o externos mediante el conteo láser del material particulado ($PM_{2.5}$, PM_{10}) proveniente del flujo de aire que ingresa al mismo de manera controlada y el que luego es expresado en unidades de concentración ($\mu g/m^3$). Además, cuenta con componentes de auto calibración que consideran los factores como la temperatura, la humedad y el dióxido de carbono que actúan como variables soporte para el cálculo del Índice de Calidad de Aire, aunque en el presente trabajo no se evalúan dichos parámetros.

En el área de estudio se colocaron estratégicamente 2 (dos) medidores que abarcan un radio de acción de 5 km (Figura 3), la ubicación de un medidor es en una institución educativa de primera infancia y otra 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), en el mes de abril del año 2021. Los sensores registran una medición cada 15 minutos, aproximadamente, de las variables mencionadas anteriormente y son descargados vía web para luego ser procesadas estadísticamente de acuerdo con la concentración media mensual (en un futuro, está previsto analizar la calidad de aire a lo largo del día) a lo largo de los años de estudio.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

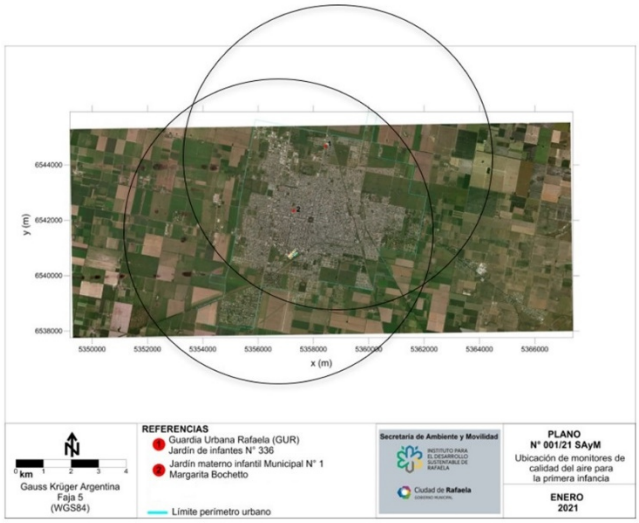


Figura 3. Mapa de ubicación de medidores en el área de estudio.

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).

$$AQI = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}}(C_i - BP_{LO}) + I_{LO} \qquad (1)$$

Donde:

AQI = Índice de calidad del aire
ILO = Valor del índice en el límite inferior de la categoría AQI
IHI = Valor del índice en el límite superior de la categoría AQI
BPLO = Punto de quiebre de la concentración en el límite inferior de la categoría AQI
BPHI = Punto de quiebre de la concentración en el límite superior de la categoría AQI
Ci = 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. A su vez, en la Tabla 1, se comparan los valores establecidos por las antiguas normas US-EPA 2018 y, las actuales, normas US-EPA 2024.

Tabla 1. Categorías correspondientes al Índice de Calidad del Aire AQI-2018 y AQI-2024

Categoría AQI	Rango AQI 2018	Rango AQI 2024	Significado
Buena	0 – 50	0 – 50	La calidad del aire se considera satisfactoria y la contaminación atmosférica presenta un riesgo escaso o nulo.
Moderada	51 – 100	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	101 – 200	101 – 150	Los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos en la salud. Probablemente no afectará a las personas en general.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Insalubre	201 – 300	151 – 200	Todos pueden comenzar a padecer efectos en la salud y los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos más graves.
Muy Insalubre	301 – 400	201 – 300	Advertencias sanitarias de condiciones de emergencia. Son mayores las probabilidades de que toda la población esté afectada.
Peligroso	401 – 500	> 301	Alerta sanitaria: todos pueden padecer efectos sanitarios más graves.

3. Resultados

De acuerdo con el registro continuo de la concentración de material particulado ($PM_{2.5}$) durante el período de 4 años (2021-2024), se puede observar que la media anual del Índice de Calidad del Aire (Figura 4) presenta una variación de buena a moderada en los puntos de monitoreo Boschetto y GUR. Además, se pueden observar un pico estacional para cada año, en ambos lugares de muestreo, en los meses de junio, julio y agosto, que se encuentran por encima de los límites admisibles (AQI 50), pero aun, sigue teniendo una categoría aceptable.

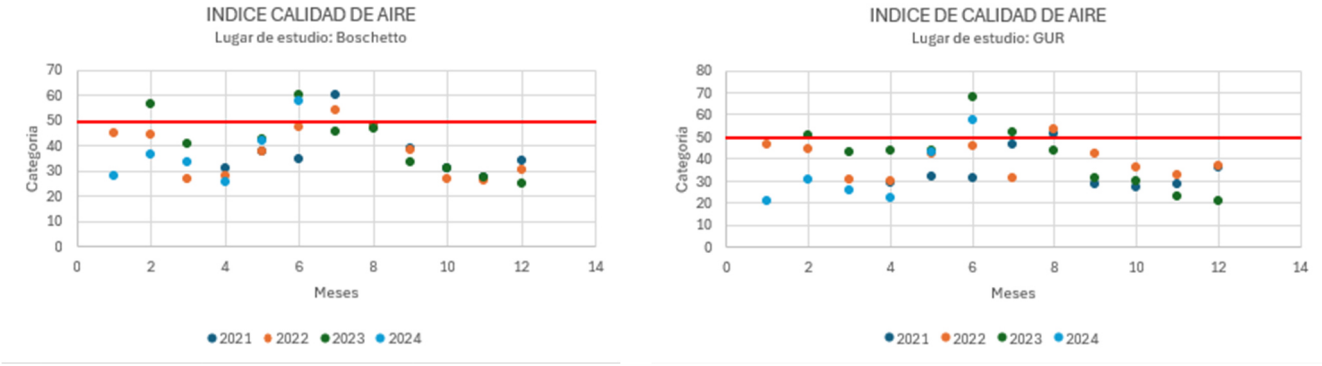


Figura 4. Evolución mensual del Índice de Calidad del Aire (US-AQI) para el periodo 2021-2024 en la ciudad de Rafaela

En relación con el material particulado 2.5 ($PM_{2.5}$) se observa (Figura 5) que se supera en todos los años de estudio el límite admisible de concentración establecidos por OMS (2021) (5 microgramos/m^3) y, meses puntuales que se encuentran por debajo de las limitaciones, con relación a US-EPA (2024) (9 microgramos/m^3), indicando así una situación crítica a mejorar. También, puede observarse los mismos meses con picos estacionales que se correlacionan con el AQI.

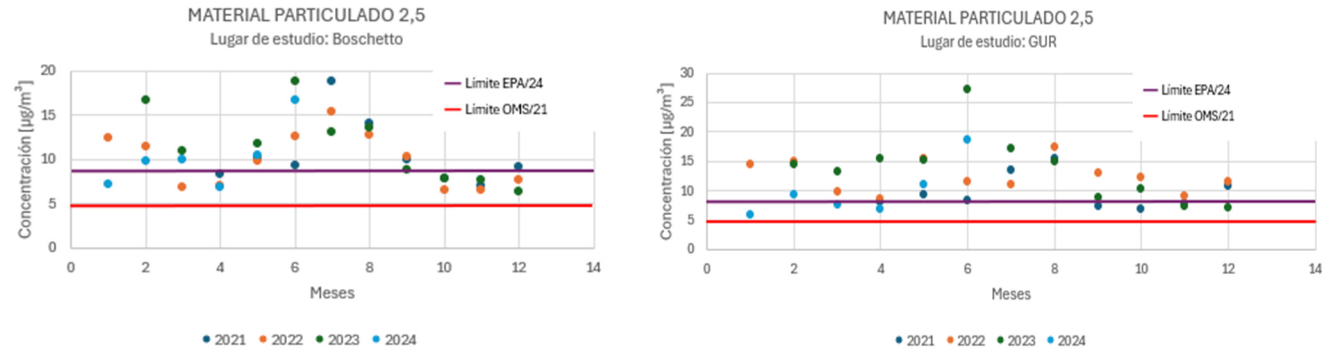


Figura 5. Evolución media mensual de la concentración de $PM_{2.5}$ (µg/m^3) en los sitios de monitoreo del área de estudio para el periodo 2021-2024

4. Conclusiones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

De acuerdo con los resultados observados, se puede concluir que la calidad del aire urbano en la ciudad de Rafaela, para el periodo 2021- 2024, en relación con el índice de Calidad de Aire (AQI) ha sido de buena a moderada con picos estacionales de concentración de material particulado durante los meses de junio, julio y agosto debido a que son meses de invierno donde los ciudadanos para garantizar su confort, calefaccionan sus hogares con el uso de leña, se movilizan con mayor frecuencia en vehículos motorizados; sumado a que en los últimos años se vivió situaciones de sequía provocando la permanencia de polvo en el ambiente en mayores concentraciones.

También, se puede observar que la ciudad de estudio está fuera de los límites de concentración media anual de $PM_{2.5}$, ya que los niveles recomendados en las Guías de Calidad de Aire de la OMS actualizadas (2021) son de 5 $\mu g/m^3$ para el material particulado 2.5 y 9 $\mu g/m^3$ según la nueva actualización de las normas US-EPA (2024), superando dichos valores pudiéndose deber a la falta de conciencia ambiental ciudadana.

Para revertir esta situación y prevenir futuros efectos adversos sobre la salud como ser la agudización de las enfermedades respiratorias, cardiovasculares y pulmonares entre otras, se debe comenzar con la concientización ciudadana, además de establecer Normas restrictivas y su implementación para las inversiones futuras, como ser, medios de transporte menos contaminantes, viviendas energéticamente eficientes, construcciones más limpias, generación de energías limpias y mejor gestión de residuos industriales y municipales permitirían reducir importantes fuentes de contaminación del aire.

Agradecimientos

Se Agradece especialmente al director del Proyecto Dr. Ing. Juan J. NIITMANN y al Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencia e Ingeniería (GIAMNCI), como así también 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.

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.
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.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Trabajo de investigación – estudiantes de grado.
Facultad Regional:	Facultad Regional de Rafaela

Integración de materiales innovadores en humedales construidos para tratamiento de efluentes: un enfoque desde la economía circular

Constructed wetlands with innovative materials for dairy industry effluent treatment: a circular economy approach

Presentación 18/10/2024

María Lourdes Martin

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Estudios de Medio Ambiente (GEM), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: lourdesmartin3112@gmail.com

Stefania Shaiel Comán

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Estudios de Medio Ambiente (GEM), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: stefanicoman159@gmail.com

Resumen

Los humedales construidos (HCs) imitan procesos naturales para el tratamiento de aguas, este trabajo a su vez se alinea con la Economía Circular, mediante el uso de materiales reciclados como Arqlite^{R}, y trozo de descarte de ladrillos RETAK^{R}. Los efluentes que se utilizaron fueron del relleno sanitario de la ciudad, una industria láctea y efluente cloacal proveniente de la planta de tratamiento de efluentes cloacales. Se analizó la eficiencia de remoción de contaminantes, DBO, DQO, SST, Amonio, PT, y NTK. Con un tiempo de retención hidráulica de 7 dias y utilizando *Typha domingensis* como macrofita, los HC han mostrado resultados prometedores. En condiciones de laboratorio, los HC demostraron mejoras significativas en las características fisicoquímicas de los efluentes. A escala piloto, el uso de RETAK^{R} en efluentes industriales lácteos también mostró efectividad. Estos resultados no sólo mejoran la eficiencia del tratamiento, sino que también impulsan la economía circular en la industria.

Palabras clave: Humedales construidos, economía circular, industria láctea, lixiviado, efluente cloacal.

Abstract

Constructed wetlands (CWs) mimic natural processes for water treatment, and this work aligns with the principles of the Circular Economy through the use of recycled materials such as Arqlite^{R} and discarded RETAK^{R} brick fragments. The effluents used were from the city's landfill, a dairy industry, and wastewater from the sewage treatment plant. The efficiency of contaminant removal, including BOD, COD, TSS, Ammonium, TP, and TKN, was analyzed. With a hydraulic retention time of 7 days and using *Typha domingensis* as a macrophyte, the CWs have shown promising results. In laboratory conditions, the CWs demonstrated significant improvements in the physicochemical characteristics of the effluents. At a pilot scale, the use of RETAKR in dairy industry effluents also showed effectiveness. These results not only improve treatment efficiency but also promote the circular economy in the industry.

Keywords: Constructed Wetlands, circular economy, dairy industry, landfill leachate, sewage.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

1. Introducción

El uso de agua a nivel mundial está incrementándose constantemente debido al crecimiento poblacional, el desarrollo económico, y los cambios en los niveles de consumo, a su vez, la industria está representando un significativo 20% de las extracciones (ONU, 2020). Estas actividades industriales producen grandes volúmenes de aguas residuales, las cuales, en muchos casos, se vierten sin tratamiento, incrementando la contaminación y afectando gravemente los recursos hídricos, la salud humana y el medio ambiente (Pimentel, 2017). En este contexto, este trabajo propone la aplicación de humedales construidos (HCs) para mejorar los sistemas de tratamiento de efluentes en industrias situadas en Rafaela.

Los HCs son la integración de un sustrato, plantas acuáticas y microorganismos para el tratamiento de efluentes.
Las plantas acuáticas o macrofitas aportan a los procesos de degradación de contaminantes y sus raíces, además de oxigenar el medio, sirven de soporte para los microorganismos que intervienen degradando compuestos. El sustrato, cumple múltiples funciones: Proporcionar soporte para el desarrollo de biofilms, ser el medio para el crecimiento de las plantas acuáticas y a su vez, actuar como absorbente de contaminantes (Wu et al, 2015)
Este trabajo busco alinearse con los principios de la Economía Circular, por lo que se incluyó como sustratos el uso de materiales reciclados, destacando su relevancia en la reutilización de residuos. Los materiales que fueron evaluados para su uso en el presente trabajo son Arqlite^{R} y residuos de RETAK^{R}. Estos, ofrecen una alternativa a los sustratos convencionales y podrían mejorar la eficiencia de los sistemas de tratamiento.

Los HCs han demostrado ser una tecnología adaptable para el tratamiento de una amplia variedad de aguas residuales, incluyendo las de sectores industriales, agrícolas y municipales, al replicar procesos naturales de depuración en entornos controlados (Parde et al., 2021). Estos autores a su vez señalan que el diseño de estos sistemas permite adaptar sus características a las necesidades de cada efluente, logrando una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes como nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos.

Particularmente para los efluentes de industrias lácteas, Nocetti (2021) sostiene que los HCs han demostrado ser una solución viable para el tratamiento de efluentes provenientes de la industria láctea, donde su implementación ha mejorado notablemente la calidad de los cuerpos de agua cercanos.

Aguilera et al. (2023) resalta que los HCs no sólo han sido efectivos en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, sino que también han promovido la reutilización de aguas tratadas para la agricultura, fortaleciendo la sostenibilidad del ciclo del agua. Asimismo, Liu et al. (2015) destacan que la combinación de humedales construidos con otros procesos de tratamiento puede potenciar significativamente la eficiencia en la remoción de contaminantes.

En la Figura 1 puede observarse una representación esquemática de un HC de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH). En este tipo de humedales, el agua residual a tratar fluye por debajo de la superficie del sustrato, siguiendo una trayectoria horizontal, tal como lo indican las flechas de la figura.

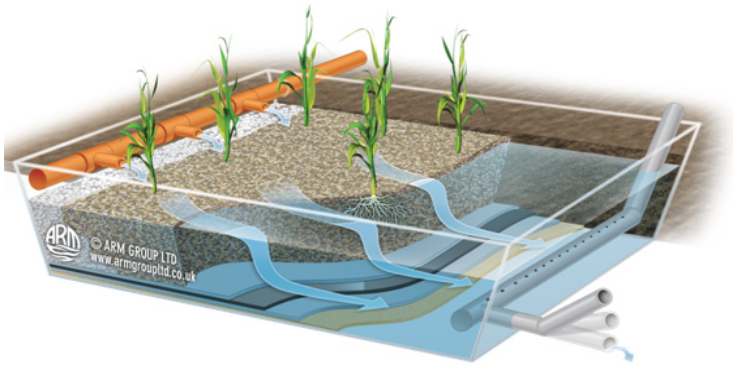


Figura 1. Representación esquemática de un Humedal de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño de HFSSHs utilizando los sustratos innovadores mencionados con anterioridad a varias escalas y para distintos tipos de aguas residuales. Este trabajo tiene como fin gestionar las aguas residuales de forma más eficaz y sostenible, con especial énfasis en la implementación de soluciones ecológicas. Se espera que los resultados proporcionen datos valiosos que ayudaran a optimizar la tecnología de tratamiento y permitirán la transferencia de estos logros al sector productivo para abordar de manera más efectiva los desafíos de la gestión de los recursos hídricos.

2. Metodología

2.1. Zona de estudio

Se trabajó con los efluentes generados en sistemas productivos e instalaciones típicos de la ciudad de Rafaela, Santa Fe. Éstos son el relleno sanitario de la ciudad, una industria láctea y efluente cloacal proveniente de la planta de tratamiento de efluentes cloacales. Dichos efluentes fueron seleccionados para estudiar su tratamiento a través de HCs, a causa de sus características variadas y representativas de distintas industrias con alta generación de aguas residuales. A breve descripción, los efluentes cloacales contienen una alta carga orgánica, los lixiviados de rellenos sanitarios por su parte, presentan una mezcla compleja de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Con respecto a la industria láctea, esta produce altos volúmenes de aguas residuales con grandes concentraciones de nutrientes y materia orgánica.

2.2. Diseño Experimental

Los experimentos se realizaron en diferentes escalas para poder evaluar la efectividad de los HCs en el tratamiento de efluentes, se puede ver en detalle en la Tabla 1. En el laboratorio, se utilizaron microcosmos plásticos con dimensiones de 0,25 m de ancho, 0,60 m de largo y 0,40 m de profundidad, operados en modo Batch para simular HFSSH. En el caso de a escala piloto, se utilizaron dos mesocosmos de hormigón armado, con dimensiones de 1.00 m de ancho, 2,50 m de largo y 0,80 m de profundidad, teniendo alimentación continua.

Como macrofita se utilizó *Typha domingensis* (totora), la cual es conocida por su capacidad para mejorar el tratamiento de efluentes mediante la absorción de nutrientes y el soporte a microorganismos descomponedores. (Maine, et al. 2016). Los sustratos que se utilizaron fueron el Arqlite^{R}, siendo este un material reciclado de residuos plásticos que facilita la filtración y promueve la actividad microbiana; RETAK^{R}, un subproducto de ladrillos de hormigón celular curado en autoclave (HCCA) que ofrece una buena superficie para la adherencia microbiana; y otro de los sustratos fue una mezcla de Arqlite^{R} con grava de rio, que permite retener los contaminantes y a su vez permitir una estabilidad estructural.



Figura 2. Humedales construidos en el laboratorio.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 1. Resumen de las experiencias realizadas y principales resultados obtenidos.

EFLUENTE	SUSTRATO	ESCALA/TIPO DE ALIMENTACIÓN	PERIODO DE EVALUACIÓN
Cloacal	Arqlite^{R}	Laboratorio/Batch	Octubre-Diciembre 2020
Lixiviado de Relleno Sanitario	Grava de río + Arqlite^{R}	Laboratorio/Batch	Noviembre 2021-Enero 2022
	RETAK^{R}	Laboratorio/Batch	Noviembre 2021-Enero 2022
Industria láctea	RETAK^{R}	Piloto/Continuo	Marzo-Mayo 2023

2.2 Extracción de muestras y análisis fisicoquímicos

Las muestras de efluentes fueron recolectadas en las entradas y salidas de cada sistema evaluado, después de un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 7 días. Luego, las muestras fueron trasladadas al laboratorio y mantenidas a 4 ºC hasta el momento de su análisis. Para determinar la eficiencia de los sistemas, se realizaron mediciones de ciertos parámetros fisicoquímicos, como Solidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxigeno (DQO), Demanda Biológica de Oxigeno (DBO), Nitrógeno Kjeldahl Total (NTK), Amonio (NH_4^+) y fosforo total (PT). Los análisis se realizaron siguiendo métodos normalizados según la American Public Health Association (APHA, 2017), que proporciona procedimientos estandarizados para asegurar la exactitud y consistencia en la evaluación de la calidad del agua.

3. Resultados

Para interpretar los resultados obtenidos se utilizaron gráficos en donde se puede visualizar rápidamente la eficiencia de remoción de contaminantes en cada efluente estudiado (Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8).
El tipo de efluente y el sustrato inciden en la capacidad de los humedales construidos para eliminar los contaminantes analizados.

Efluente cloacal + Arqlite^{R}: Se puede observar una alta eficiencia de remoción en la mayoría de los parámetros, con un 97% para DBO, 88% DQO, 89% para PT, 72% NTK y 87% Amonio. Hay que destacar que el efluente cloacal es más fácil de tratar en humedales construidos porque contiene contaminantes orgánicos y nutrientes (fosforo y nitrógeno) que son biodegradables. El sustrato Arqlite^{R}, al ser un material poroso, facilita la absorción de contaminantes y permite que se desarrollen microorganismos que ayudan en la degradación de la materia orgánica. La gran eficiencia en DBO y DQO indica que los compuestos orgánicos se están degradando eficazmente.

Lixiviado de relleno sanitario + Arqlite^{R}: A comparación del efluente cloacal, los resultados que se obtuvieron en este caso fueron más bajos. Teniendo una remoción de DBO del 66% y de DQO del 49%, aunque las remociones de los otros parámetros fueron más elevadas. El lixiviado es un líquido residual con un alto contenido en compuestos orgánicos recalcitrantes, metales pesados, y productos químicos que derivan de la descomposición de residuos sólidos, debido a esto es complejo de tratar. La eficiencia es menor debido a que los contaminantes que se encuentran en el lixiviado no son fácilmente biodegradables.

Lixiviado de relleno sanitario + RETAK^{R}: En este caso, podemos ver que, al cambiar de sustrato, los resultados son mejores. Hay una eficiencia del 63% en DBO y un 43% en DQO, y a su vez, vemos mejoras en el resto de los parámetros. Esto se debe a que RETAK^{R}, es un material a base de hormigón celular, pudiendo ofrecer una mayor superficie para la absorción de contaminantes, ayudando en la degradación de compuestos más resistentes.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Efluente de industria láctea + RETAK^{R}: En este caso, la eficiencia es más baja, con un 59% para DBO y 58% para DQO. El efluente de la industria láctea es rico en materia orgánica, pero su composición incluye grasas y proteínas que pueden dificultar la biodegradación. Aunque RETAK^{R} puede ayudar a la adsorción y neutralización de ciertos compuestos, los sólidos suspendidos y los compuestos orgánicos más complejos presentes en el efluente lácteo requieren más tiempo y condiciones específicas para su remoción efectiva, lo que explica las menores eficiencias observadas.

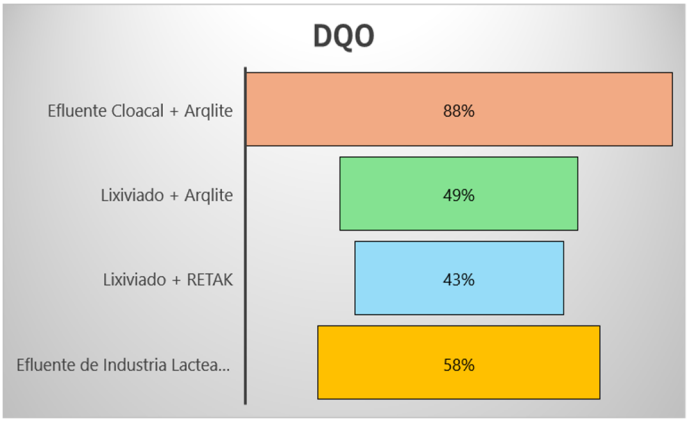


Figura 3. Eficiencia de remoción de DQO de los 4 tratamientos evaluados

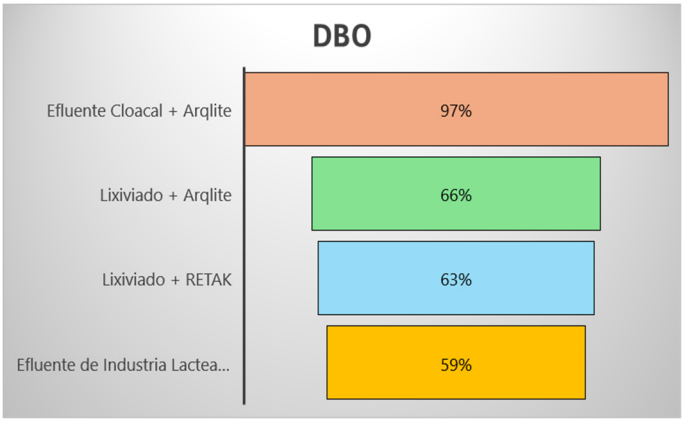


Figura 4. Eficiencia de remoción de DBO de los 4 tratamientos evaluados

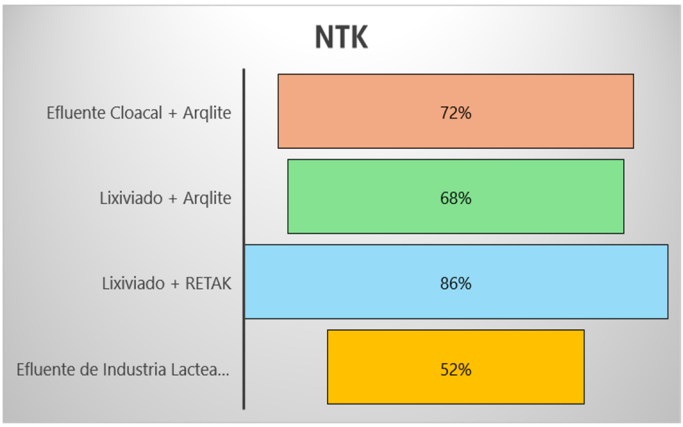


Figura 5. Eficiencia de remoción de SST de los 4 tratamientos evaluados

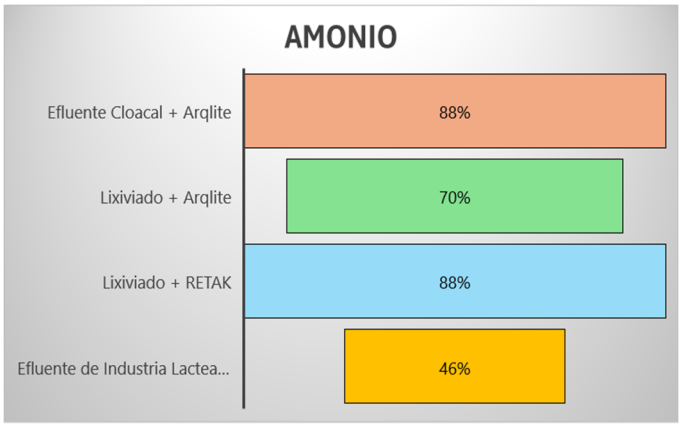


Figura 6. Eficiencia de remoción de Amonio de los 4 tratamientos evaluados

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

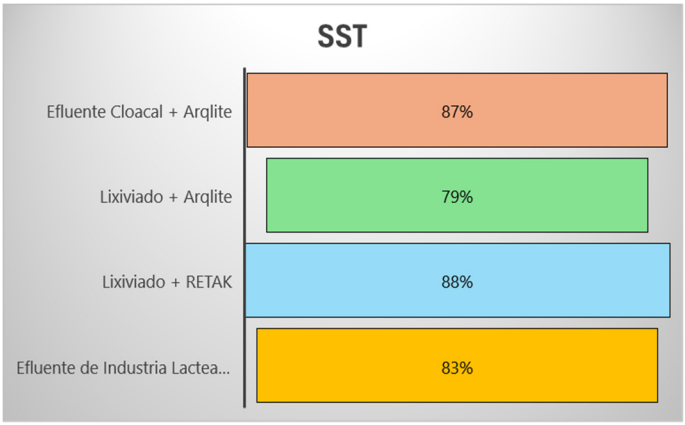


Figura 7. Eficiencia de remoción de SST de los 4 tratamientos evaluados

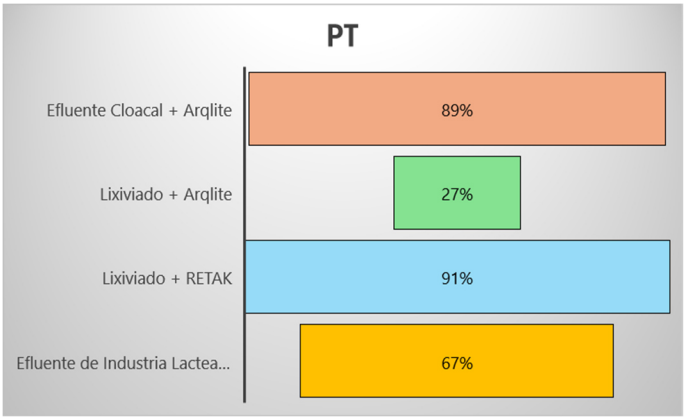


Figura 8. Eficiencia de remoción de PT de los 4 tratamientos evaluados

4.Conclusiones

El estudio realizado sobre la aplicación de HCs para el tratamiento de aguas residuales demuestra que estos sistemas son efectivos, variando su desempeño dependiendo del efluente y el sustrato que se utilice. Los mismos resultados indican que el sustrato Arqlite^{R} presenta una excelente eficiencia al momento de eliminación de contaminantes en efluentes cloacales (DBO: 97%, DQO: 88%, NTK: 72%, Amonio: 88%, SST: 87%, PT: 89%), mientras tanto el RETAK^{R} resulta una buena alternativa para la depuración de lixiviados, ya que el relleno sanitario es más complejo de tratar debido a la diversidad y persistencia de los contaminantes (DQO: 43%, DBO: 63%, NTK: 86%, Amonio: 88%, SST: 88%, PT: 91%). El efluente de la industria láctea presenta desafíos debido a su alto contenido en grasas y proteínas, lo que puede requerir más tiempo o condiciones específicas de tratamiento.

Referencias bibliográficas

Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., & Liu, H., (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. Bioresource technology, 175, 594-601

Nocetti, E. (2023). Sistema híbrido de humedales para el tratamiento final del efluente de una industria láctea. Jornada de Jóvenes Investigadores 2021. Universidad de Santiago de Chile.

Maine, M. A., Sánchez, G. C., Hadad, H. R., Caffaratti, Sandra Ester, Pedro, M.d.C., Luca, G. A., Di, & Mufarrege, M. (2016). Humedales construidos para tratamiento de efluentes de industrias metalúrgicas en Santa Fe, Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, *7*(1), 5-16.

Moreno Aguilera, D. F. (2023). Análisis e la calidad del agua presente en el Parque Ecológico Distrital de Humedal Jaboque en los meses de septiembre y octubre del 2022. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. https://hdl.handle.net/20.500.11839/9319

Liu, R., Zhao, Y., Doherty, L., Hu, Y., Hao, X. (2015). A review of incorporation of constructed wetland with other treatment processes. Chemical Engineering Journal. Pag: 220 – 230.

Pimentel, H.R. Las aguas residuales y sus efectos contaminantes. (2017). Web: https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes

Organizacion de Naciones Unidas. El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático. (2020). Web: https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732

Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D., Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. Environmental Technology & Innovation.

APHA, (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Estudiante de posgrado
Facultad Regional:	Rafaela y San Francisco

Modelo conceptual de colector eólico offgrid para calentar agua

Conceptual model of off-grid wind collector for heating water

Presentación 18/10/2024

Walter R. Tonini

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco, Depto. Electromecánica, San Francisco, Córdoba, Argentina.

E-mail de contacto: wtonini@sanfrancisco.utn.edu.ar

Ariel M. Rocchi

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: ariel.rocchi@frra.utn.edu.ar

Resumen

Este trabajo compara dos sistemas de generación de energía renovables sin conexión a línea (Offgrid) para el calentamiento de agua con fines de utilización doméstica, industrial o zonas aisladas. Se presenta una comparativa de rendimientos entre un sistema de base solar (específicamente un termotanque comercial) y otro de base eólica que es un modelo concepto de generador eólico de eje vertical (VAWT) tipo Savonius adaptado a vientos de la región centro de Argentina, concretamente la ciudad de San Francisco a 10 metros de altura. Analizando la mayor cantidad de eficiencias involucradas, se pretende obtener un rendimiento global se cada sistema renovable para realizar una comparación técnica y evaluar el costo-oportunidad de VAWT versus colectores solares según la zona específica de instalación, en este caso la ciudad de San Francisco, provincia de Córdoba en Argentina.

Palabras clave: Colector; VAWT; Eólico; Offgrid.

Abstract

This paper compares two off-grid renewable energy generation systems for heating water for domestic, industrial or isolated areas. A performance comparison is presented between a solar-based system (specifically a commercial water heater) and a wind-based system, which is a Savonius-type vertical-axis wind turbine (VAWT) concept model adapted to winds in the central region of Argentina, specifically the city of San Francisco at 10 meters high. By analyzing the largest number of efficiencies involved, the aim is to obtain an overall performance of each renewable system in order to make a technical comparison and evaluate the cost-opportunity of VAWT versus solar collectors according to the specific installation area, in this case the city of San Francisco, province of Córdoba in Argentina.

Keywords: Manifold; VAWT; Wind; Offgrid.

1. Introducción

1.1. *Consideraciones Generales*

La disponibilidad de viento nos llega a pensar diversas formas de poder aprovecharlo. En la zona de San Francisco los mismos son considerados de baja velocidad media que es de unos 3,3 metros por segundo (m/s) -a excepciones de tormentas fuertes- y de constancia poco regular según el factor k ~ 1,8 de la distribución de Weilbull para los años 2022 y 2023 (Tonini, 2023) en mediciones realizadas a 10 metros de altura. Igualmente, existe una necesidad de aprovechar estos viento

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

de alguna u otra forma, basado en la observación de la gente de molinos tipo americanos girar en las zonas rurales. Vemos una oportunidad de proponer un modelo de turbina eólica de eje vertical (en sus sigla es ingles VAWT) capaz de utilizar vientos en todas las direcciones como las tipo Savonius y compararlo con un colector solar ya que en ambos estaremos calentando agua para algún proceso o uso particular.

2. Metodología

Para poder realizar una comparación entre los sistemas, se fijan ciertos parámetros: la temperatura de entrada de agua es de 20 °C para ambos sistemas, el tanque de almacenamiento o reservorio tiene una capacidad de 50 litros, se establece un salto térmico de 10°C para los fines de comparación.

Por lo que el calor sensible es:

$$Q_{\Delta} = c\ m\ (T_{final} - T_{inicial}) \quad (1)$$

Donde:
c : Calor específico del agua 1 (kcal/°C·kg); 1 kilogramo de agua necesita 1 kilocaloría para que su temperatura aumente 1ºC, es decir, (1 kcal/°C·kg), 4190 (J/(kg·°C) o 1,163 (Wh/kg °C).
m : es la masa a calentar
T_{final} : es la temperatura final
$T_{inicial}$: es la temperatura inicial.

Para estos datos de entrada necesitamos $Q_{\Delta 10°c} = 581{,}5\ (Wh)$. En esquema de la figura 1 es un esquema del sistema de colector eólico modelo que se plantea.

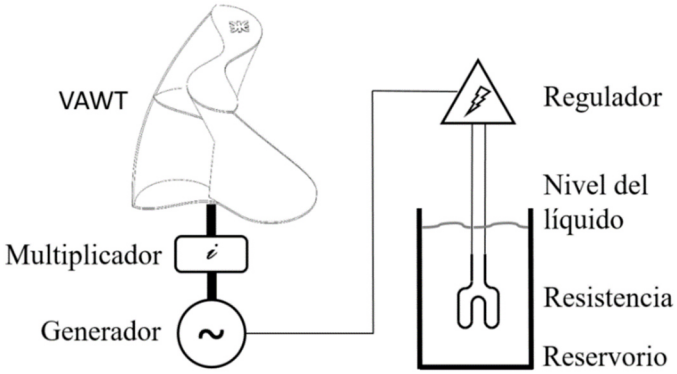


Figura 1. Esquema simplificado del sistema.

2.1 Velocidad del viento

Para el cálculo de las velocidades de viento promedio (V_p) y densidad promedio de potencia (N_p) se utilizan las ecuaciones básicas (1) y (2), donde ρ_i es la densidad del aire para cada medición i.

$$V_p = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} v_i \quad (2)$$

$$N_p = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}\rho_i (v_i)^3 \quad (3)$$

Refiriendo a unidades de superficie en metros cuadrados, la Densidad de Potencia Media considerada es de 48 (W/m^2) con un Contenido de Energía Medio de 416 (kWh/m^2/año) para los años 2022 y 2023 (Tonini et al., s. f.) (Tonini et al., 2023).

2.2 VAWT

En turbinas VAWT el eje de rotación se orienta verticalmente y son papaces de girar con vientos de cualquier dirección con una velocidad mínima (comparado con otras turbinas). Además, son más silenciosas que las turbinas de eje horizontal o por sus siglas en ingles HAWT, siendo buena opción para incorporarlas en zonas urbanas y semiurbanas (Ray et al., 2023). En

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

este trabajo se presume el diseño de una (o varias) turbina tipo Savonius de cierta envergadura (trabajo en proceso) que alcance un coeficiente de potencia mínimo CP~0,1 a 0,2 (GatotSumarno et al., 2022) para extraer de los vientos promedios una potencia de 750 (W) (Im & Kim, 2022). Por ello que no vamos a considerar la eficiencia de la turbina directamente.

2.3 Mecanismo multiplicador

Se utiliza un mecanismo simple de poleas y correas trapezoidales dentadas. Los factores intervinientes en el rendimiento de una transmisión por polea son: tensión, diámetro de la polea, velocidad de la correa, velocidad de flexión y composición del material. Adoptaremos un rendimiento de $\eta_m = 0{,}95$ según los estudios de (Peruri, 2021).

2.4 Generador/alternador

Cuando un generador debe girar a bajas revoluciones, es conveniente utilizar multipolos. Si se utiliza un generador asincrónico, no se puede controlar la velocidad del viento, velocidad de giro, etc. Y se perdiste una variable controlada para tener una onda pareja "normalizada" o "estándar". No es el fin de este trabajo el diseño de un generador que mejor se adapte al viento de la zona, por esto se pensó, en una primer instancia, utilizar un generador de tipo utilizado en los equipos electrógenos domiciliarios, de una potencia media 800W, con opciones de salida 220V o 12V con 8,3 A a 50 Hz (Motores Villa, s. f.) al evaluar las velocidades de giro, optamos por un alternador de automóvil, que tiene un rotor compuesto por un electroimán cuya bobina nos permite controlar la tensión para variar el campo magnético y en consecuencia la potencia de salida. El estator está compuesto por bobinas donde se induce las corrientes conectadas a tres terminales (trifásico) se conecta a puente de diodos (6) trifásicos y luego se conecta a las escobillas y salidas de pre excitación. Regula la tensión a la salida según las rpm de ingreso y las cargas que demandan energía. El rotor necesita una excitación en el arranque, y luego se autoexcita a unas 1200~1600 rpm. En condiciones de velocidad media, los alternadores modernos logran una eficiencia notable del 70 al 80%. Tomaremos un rendimiento del 70% descartando las caídas de rendimiento por efecto de temperatura (ensamble del motor de combustión) y las perdidas por ventilación propia.

2.6 Resistencias eléctricas

El comportamiento de la resistencia en los sistemas eléctricos está influenciado significativamente por las variaciones de voltaje y frecuencia. Las investigaciones indican que la resistencia puede aumentar o disminuir según el material y las condiciones del circuito. En los aparatos de calentamiento la corriente de fuga no debe ser superior a 0,75 (mA) por (KW) con un máximo de 5 (mA) para el aparato completo (IEC 60335-1, s. f.). Suponiendo una resistencia de 1000 W, la perdida de potencia ($P = I^2R$) es de 0.0005625 W dando una eficiencia de $\eta_R = 0{,}999$. Aunque la tensión y la frecuencia del generador no sean constantes, el rendimiento de la resistencia es prácticamente el mismo para ambos sistemas comparados.

2.7 Perdidas por efecto Joule en conductores

Para cables fabricados bajo norma («IRAM-NM 247-5», s. f.) de sección 1,5 mm2 la resistencia es de 13,30 ohm/Km a 20°C (Farina, 2020).

2.8 Perdidas de aislación del depósito de agua

En recipientes de almacenamiento térmico actuales, se utiliza aislamientos térmicos de unos 5 cm de poliuretano inyectado proporcionando un coeficiente global de transferencia de calor (U) de 0,6 W/m2·°C (Juanicó & Bove, 2020) (Iannelli & Gil, 2019). Por ejemplo, se mantiene a 30 °C un tanque de capacidad 50 litros (altura 500 mm y diámetro 360 mm, superficie S=0,769 m2) a temperatura ambiente de 20 °C, la pérdida en standby es de 4,61 W dada por la siguiente ecuación:

$$P_{perdida\ SB} = \mathrm{U}\, S_{reservorio}(T_{reservorio} - T_{ambiente}) \quad (4)$$

El rendimiento del reservorio lo podremos expresar en función del calor aportado $Q_{\Delta 10°c} = 581{,}5\ (Wh)$, quedando $\eta_{recervorio} = 0{,}992$.

2.9 Termotanque solar

(Kalair et al., 2022) evaluaron distintos sistemas de colectores solares para calentar agua, entre ellos los de tubos evacuados (ETC), colectores de placa plana (FPC), concentradores parabólicos compuestos (CPC) y sistemas accionados por termosifón, siendo el tipo ETC el más eficiente. La tecnología de fabricación de ETC ya es conocida y comercialmente instalada, por lo que adoptamos para la comparación de nuestro análisis este sistema. El rendimiento de un colector solar

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

ETC esta expresado en función de su flujo másico de agua ($\dot{m}$), Calor específico del agua (C_{pAgua}), Temperaturas de entrada (T_i) y temperatura de salida (T_f) del agua y de la Radiación incidente del sol (I_s):

$$\eta_{ETC} = \frac{Calor\ entrante}{Radiación\ incidente\ total} = \frac{\dot{m}\ C_{pAgua}(T_i - T_f)}{I_s} \quad (5)$$

La eficiencia máxima y mínima de transferencia de calor se encuentra en 69,16 % ~ 56,58 a una temperatura constante del agua de entrada de 29 °C, una radiación solar de 750 W/m2 y 250 W/m2 respectivamente, a una velocidad del viento de 2 m/s. (Shakya, 2023).

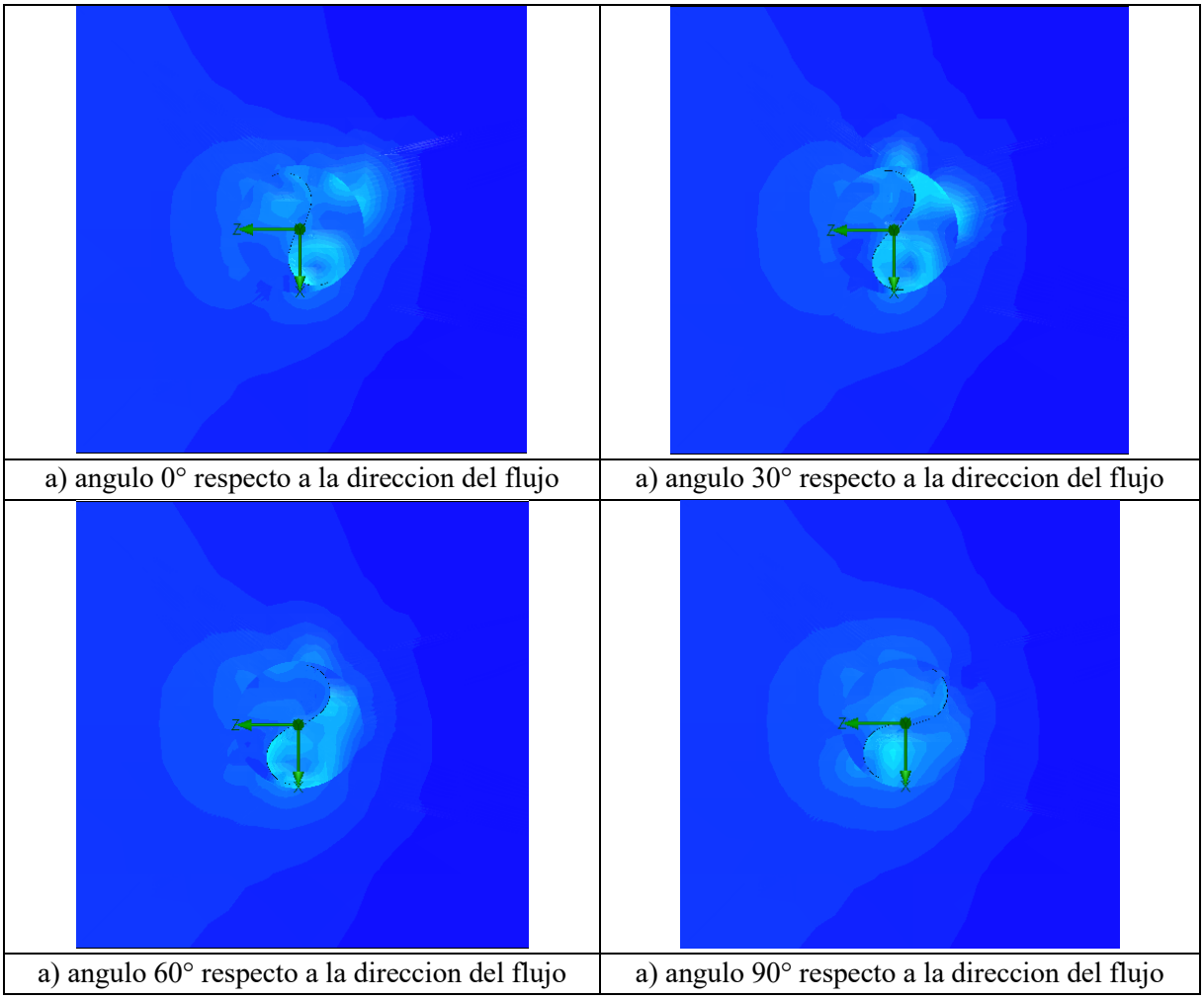
3. Resultados

3.1. Generación eólica disponible

Se realiza simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) para estimar teóricamente que el tamaño de la pala planteada pueda lograr acercarse a la producción de energía planteada, para viento de 3 (m/s). Como referencia se procede análogamente al estudio realizado por (Im & Kim, 2022). De las simulaciones se obtuvo un Cp (Coeficiente de potencia) bajo utilizando la ecuación:

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{N_p} = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2}\rho_i(v_i)^3} = 0{,}104 \quad (6)$$

Podemos estimar a grueso modo, que la potencia que se puede extraer anualmente con un solo HVAT propuesto es de unos $P_{rotor} \cong 5\ (W/m^2\ año)$. Esto nos da certeza que para aprovechar la energía eólica en la zona, son necesarios varias turbinas. La figura 2 muestra un mapa de las velocidades del fluido para distintos ángulos de la pala respecto a la dirección del viento.



a) angulo 0° respecto a la direccion del flujo	a) angulo 30° respecto a la direccion del flujo
a) angulo 60° respecto a la direccion del flujo	a) angulo 90° respecto a la direccion del flujo

Figura 2. Velocidad del fluido, simulación CFD (elaboración propia). Dirección del viento de izquierda a derecha.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

3.1. Rendimientos

La tabla 1 contiene los rendimientos de cada parte del sistema del colector eólico mostrado en la figura 1. Como rendimiento global teórico del sistema modelo colector eólico propuesto se obtiene un rendimiento total de $\eta_{eolico} = 0{,}659$ referido a la energía "generada" por la pala; independiente del tiempo y velocidades instantáneas del viento.

Tabla 1. Rendimientos de los componentes.

	Rendimiento (%)
VAWT	1*
Multiplicador	0,950
Generador + regulador	0,700
Resistencia	0,999
Reservorio	0,992
Total del sistema	0,659

* Referencia energía entrante

En condiciones normales de la zona definida para este análisis, vemos que el colector eólico y el solar se asemejan en rendimiento. Pero el poder calorífica del colector eólico es mucho menor que el solar, requiriendo instalar varios de los primeros para poder disponer de un significativo ahorro energético en el conjunto.

4. Conclusiones

El 65,9% de la energía eólica transformada en eléctrica se puede utilizar para calentar agua en como sistema de apoyo a otro sistema de calefacción, en zonas con baja velocidad de viento (San francisco, Córdoba y alrededores) donde su promedio es de 3 a 3,5 (m/s); aportando un ahorro energético al conjunto y a largo plazo.
Este modelo conceptual de colector eólico puede ser de utilidad para dar apoyo a sistemas offgrid que necesiten calentar agua para procesos en industrias y hogares. Su rendimiento puede ser similar al de colectores solares instalados en la zona mencionada.

Referencias bibliográficas

Farina, A. L. (2020). Estudio del viento para generación eólica a 10 m de altura durante tres años en San Francisco, Córdoba Corriente continua. https://www.editores-srl.com.ar/. https://www.editores-srl.com.ar/autor/alberto_farina/20201130_corriente_continua

GatotSumarno, F., WidyaLarassanti, S., & Hanif, D. N. (2022). Savonius Turbine Performance Type – S Variation of Rotor Sweep Diameter and Air Gap. 18(2).

Iannelli, L., & Gil, S. (2019). EFICIENCIA EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA PARA USO RESIDENCIAL EN ARGENTINA. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20740.88962

IEC 60335-1:2020. (s. f.). Recuperado 28 de agosto de 2024, de https://webstore.iec.ch/en/publication/61880

Im, H., & Kim, B. (2022). Power Performance Analysis Based on Savonius Wind Turbine Blade Design and Layout Optimization through Rotor Wake Flow Analysis. Energies, 15(24), 9500. https://doi.org/10.3390/en15249500

IRAM-NM 247-5. (s. f.). IRAM. Recuperado 28 de agosto de 2024, de https://www.iram.org.ar/busqueda-avanzada-de-normas-iram/

Juanicó, L. E., & Bove, I. (2020). Eficiencia Energética en el Hogar: El Calentador Eléctrico con Tanque de Agua. Revista Tecnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia, 43(2), 58-64. https://doi.org/10.22209/rt.v43n2a01

Kalair, A. R., Seyedmahmoudian, M., Saleem, M. S., Abas, N., Rauf, S., & Stojcevski, A. (2022). A Comparative Thermal Performance Assessment of Various Solar Collectors for Domestic Water Heating. International Journal of Photoenergy, 2022, 1-17. https://doi.org/10.1155/2022/9536772

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Motores Villa. (s. f.). Manual de Uso y Mantenimiento Generadores. https://villa.com.ar/wp-content/uploads/2024/08/Manual-de-Uso-y-Mantenimiento-Generadores-V.0114.pdf. www.villa.com.ar
Peruri, V. N. L. (2021). Study of energy efficiency comparison between smooth V-belt and cogged V-belt for power transmission [M.S., University of Missouri--Columbia]. https://doi.org/10.32469/10355/90120
Ray, S. B., Banerjee, A., Ranjan, R., Maiti, T., & Ganguly, R. (2023). Recent Advancement in Savonius Wind Turbine- A Review. Journal of Environmental Impact and Management Policy, 31, 28-36. https://doi.org/10.55529/jeimp.31.28.36
Shakya, Y. (2023). Thermal Performance Characterization of Evacuated Tube Collector Solar Water Heater with Constant Inlet Water Temperature. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 11(5), 5869-5883. https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.53040
Tonini, W. R., Mina, H. O., Bailo, A. H. A., & Giordano, E. A. (s. f.). Vientos disponibles para generación eólica a 10 metros de altura en San Francisco, Córdoba. 340-345. https://doi.org/10.33414/ajea.1301.2023
Tonini, W. R., Mina, H. O., Bailo, A. H. A., & Giordano, E. A. (2023). Estudio del viento para generación eólica a 10 m de altura durante tres años en San Francisco, Córdoba. AJEA, AJEA 30, 44. https://doi.org/10.33414/ajea.1316.2023

Sistemas de información e informática



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Sistemas de información e informática
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Hoja electrónica para determinar solicitaciones de viento en estructura mitigadora del estrés calórico en ganado bovino

Electronic spreadsheet to determine wind loads on a heat stress mitigating structure in cattle

Presentación //2024

Aldana Ortiz

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: aldanaortiz@gmail.com

Paula Farandato

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: aldanaortiz@gmail.com

Resumen

La línea de investigación de proyecto se enfoca en el desarrollo de una hoja electrónica de cálculo para obtener las solicitaciones de viento que afectan al diseño de una estructura para mitigar el estrés calórico al ganado bovino, que es un problema significativo en la cuenca lechera donde se ubica la Facultad Regional Rafaela. Este estrés disminuye la capacidad de producción de leche, ya que los animales destinan gran parte de su energía a mantener su temperatura corporal en niveles aceptables. En la actualidad, las estructuras construidas, carecen de cálculos dinámicos y colapsan ante determinadas cargas de viento. Con esta hoja electrónica, basada en el Reglamento CIRSOC 102 se podrá optimizar el diseño estructural que ofrezca la menor carga de viento.

Palabras clave: hoja electrónica; CIRSOC 102, estrés calórico

Abstract

The project's line of research focuses on the development of an electronic spreadsheet to obtain the wind loads that affect the design of a structure to mitigate heat stress in cattle, which is a significant problem in the dairy basin where the Rafaela Regional Faculty is located. This stress reduces the milk production capacity, since the animals use a large part of their energy to maintain their body temperature at acceptable levels. Currently, the structures built lack dynamic calculations and collapse under certain wind loads. With this electronic spreadsheet, based on CIRSOC Regulation 102, it will be possible to optimize the structural design that offers the lowest wind load.

Keywords: electronic spreadsheet; CIRSOC 102, heat stress

1. Introducción

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El estrés calórico es un fenómeno que afecta negativamente la producción en las principales cuencas lecheras de la región, como la del Centro Oeste de la provincia de Santa Fe, donde se ubica la Facultad Regional Rafaela.
Este fenómeno ocurre cuando el ganado bovino se exponen a altas temperaturas y niveles elevados de humedad, lo que obliga a los animales a destinar gran parte de su energía a regular su temperatura corporal, disminuyendo significativamente su capacidad de producción lechera (Roca Cedeño, 2011) .
El cambio climático ha intensificado este problema, ya que las temperaturas han aumentado en la región, exacerbando los efectos del estrés calórico y afectando directamente la productividad ganadera (Vélez Marín, 2010).
Ante esta situación, se deben implementar soluciones efectivas, como proporcionar sombra mediante estructuras adecuadas. Estas construcciones permiten que los animales se mantengan en condiciones térmicas óptimas, favoreciendo su bienestar y mejorando la producción, tal como se ilustra en la Figura 1 (Callejo Ramos, 2014).



Figura 1. Estructura mitigadora de estrés calórico bovino

Muchas de las estructuras existentes en la actualidad no están diseñadas para soportar las cargas dinámicas del viento, lo que genera sus colapsos y fallos estructurales bajo condiciones adversas.
Esta situación subraya la necesidad de un enfoque más riguroso en el diseño de dichas estructuras, utilizando métodos de cálculo que consideren las solicitaciones del viento de manera precisa.
En este contexto, la presente investigación se centra en el desarrollo de una hoja de cálculo electrónica que permita determinar las presiones de viento en estructuras destinadas a mitigar el estrés calórico en ganado bovino.
Basada en el Reglamento CIRSOC 102, esta herramienta proporcionará una metodología confiable para el cálculo de cargas de viento, considerando tanto las presiones estáticas como dinámicas y facilitará la optimización del diseño estructural.
De esta manera, se busca no solo mejorar la resistencia de las estructuras ante eventos climáticos extremos, sino también contribuir a la sostenibilidad y eficiencia del sector lechero en la región.



Figura 2. Estructura colapsada por el viento

2. Metodología

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El desarrollo de este trabajo inició con el diseño de una hoja de cálculo específica para analizar las solicitudes del viento en una estructura destinada a mitigar el estrés calórico en ganado bovino.

El primer paso fue identificar las variables y coeficientes que se utilizarían en los algoritmos, tales como la velocidad del viento, la dirección predominante y los coeficientes de presión determinados por el Reglamento CIRSOC 102.

La estructura de la hoja de cálculo fue diseñada y luego corrida para validar los resultados, asegurando que su funcionalidad y precisión fueran confiables.

Una vez que se desarrolló la estructura base, se organizaron las variables de entrada y se definieron los parámetros de salida de datos.

Para garantizar que los diagramas de flujo diseñados fueran correctos, se modelaron ejemplos sencillos para validar los resultados con ejemplos del Reglamento. Durante el proceso de diseño este proceso, se consultaron bibliografías de Manuales de Excel, Reglamento de viento y videos educativos disponibles en plataformas como YouTube. Estas fuentes proporcionaron el marco teórico.

La hoja de cálculo definitiva fue organizada en varias secciones, lo que facilita su uso, la visualización de los resultados y la interpretación de los datos.

En una de la primera sección, se introducen variables como la luz de cálculo y las alturas mínima y máxima de la estructura, para determinar el cálculo del ángulo de inclinación óptimo de la cubierta.

También se incorpora una opción para seleccionar la dirección del viento, lo que permite realizar los cálculos necesarios bajo diferentes escenarios, considerando la presencia o ausencia de bloqueos que puedan afectar la distribución de las presiones sobre la estructura. Se refiere a bloqueo, cuando un animal o equipo se encuentra bajo la estructura “bloqueando” el flujo del aire.

Luego de varios prototipos, se optimizó la hoja de cálculo para identificar las situaciones más críticas en las que la estructura estaría sometida a las máximas solicitudes, asegurando que las soluciones de salida sean claras y que se correspondan a las cargas de viento en distintos escenarios. El diseño modular de la hoja de cálculo permite su futura expansión.

Tabla 1. Ingreso de datos generales y salida de resultados

DATOS GENERALES	
L=	8,0 m
h=	2,8 m
H=	3,5 m
Θ=	10 °

Direccion del viento	Ciento_ochenta
Referencia	Sin bloqueo

RESULTADOS	
Referencia	Sin bloqueo
CNW	
CNL	

En la Tabla 1, se muestran las celdas de ingreso de datos y salida de los resultados: luz de cálculo y altura mínima y máxima, dando como resultado el ángulo de la inclinación de la cubierta, además de seleccionar la opción de la dirección de viento con la selección de cálculo con bloqueo o sin bloqueo de estructuras bajo la cubierta.

El valor del la dirección del viento, se indica como 180° (ciento ochenta grados). Tal es así como lo menciona el Reglamento, ya que ese ángulo corresponde a Sotavento. El valor de 0° (Cero grados) corresponde a Barlovento. No se indican los puntos cardinales, ya que estos pueden no coincidir con los ejes en planta de la estructura.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

La condición “con bloqueo” o “sin bloqueo” se define en el Reglamento CIRSOC (Centro de investigación de los Reglamentos de Seguridad para las Obras Civiles). (INTI CIRSOC, 2018)

Cada celda se define con un nombre particular que define su tarea, para facilitar el ingreso en el algoritmo.

Para determinar el ángulo de inclinación de la cubierta, se diseñó la ecuación a partir de la geometría (forma) de la estructura:

$$\varphi = tan\text{^}(-1) * [\,(H - h)/(0{,}5 * L)] \qquad (1)$$

Luego se convierten los valores de radianes a grados sexagesimales.

Para las celdas de dirección del viento se ejecutó la opción de ordenar los datos en lista según corresponda con sus respectivos rangos.

La Tabla 2 nos muestra los índices que tiene cada ángulo de cubierta (techo) según su grado de inclinación y su estado: con bloqueo y sin bloqueo.

Tabla 2: Coeficientes de presión neta según CIRSOC -102

Ángulo techo	Caso de carga	DIRECCION DEL VIENTO							
		Cero				Ciento_ochenta			
		Sin bloqueo		Con bloqueo		Sin bloqueo		Con bloqueo	
		CNW	CNL	CNW	CNL	CNW	CNL	CNW	CNL
0	A	1,2	0,3	-0,5	-1,2	1,2	0,3	-0,5	-1,2
7,5	A	0,6	-1	-1	-1,5	0,9	1,5	-0,2	-1,2
15	A	-0,9	-1,3	-1,1	-1,5	1,3	1,6	0,4	-1,1
22,5	A	-1,5	-1,6	-1,5	-1,7	1,7	1,8	0,5	-1
30	A	-1,8	-1,8	-1,5	-1,8	2,1	2,1	0,6	-1
37,5	A	-1,8	-1,5	-1,5	-1,8	2,1	2,2	0,7	-0,9
45	A	-1,6	-1,8	-1,3	-1,8	2,2	2,5	0,8	-0,9

La hoja electrónica genera una interpolación lineal dinámica entre los ángulos que se requiere para el tipo de proyecto.

Se diseñaron las tablas que son la base de datos de la general de coeficientes. Se aplica la ecuación y asigna a la celda el nombre de la función, la variable o la constante para mejorar la optimización del cálculo.

En el Reglamento CIRSOC 102 los acrónimos CNW y CNL que se aprecian en la hoja de cálculo, se utilizan para referirse a los coeficientes de presión del viento en direcciones específicas en relación con la estructura. Estos acrónimos son utilizados cuando se analizan cargas de viento sobre edificios y estructuras. CNW es el "Coeficiente de Presión Neta de Barlovento" o Coeficiente de Presión Neta en la Fachada a Barlovento, representa la presión que el viento ejerce directamente sobre la superficie de la estructura que está orientada hacia el viento. Por otra parte, CNL es el "Coeficiente de Presión Neta de Sotavento" o Coeficiente de Presión Neta en la Fachada a Sotavento, corresponde a la presión ejercida en el lado opuesto de la estructura, es decir, la cara alejada del viento.

Tabla 3: Tablas dinámicas de interpolación lineal según sus coeficientes de viento y dirección

INTERPOLACION LINEAL CNW		
VALOR X		VALOR Y
10 °		#¡DIV/0!

INTERPOLACION LINEAL CNL		
VALOR X		VALOR Y
10 °		#¡DIV/0!

La formula que se diseñó en la celda: “resultado” (de la interpolación), es la siguiente:

$$= ((V_VALORX - V_VALOR1) * (V_COEF2 - V_COEF1)/(V_VALOR2 - V_VALOR1)) + V_COEF1 \qquad (2)$$

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

INTERPOLACION LINEAL CNW		
VALOR X		VALOR Y
10 °		=((V_VALORX-V_VALOR1)*(V_COEF2-V_COEF1)/(V_VALOR2-V_VALOR1))+V_COEF1

INTERPOLACION LINEAL CNL		
VALOR X		VALOR Y

Tabla 5: Ilustración de la formula con las denominaciones de las celdas

3. Resultados

Esta línea de investigación ha avanzado en el desarrollo de los algoritmos para obtener los resultados finales relacionados con las presiones ejercidas por el viento sobre la estructura diseñada para mitigar el estrés calórico en ganado bovino. Durante el proceso, se ha validado la metodología de cálculo implementada en la hoja de cálculo, comparando los resultados obtenidos con los ejemplos provistos en el Reglamento CIRSOC 102 lo que ha permitido corroborar la precisión de los modelos y las fórmulas aplicadas.

4. Conclusiones

La implementación planillas de cálculo permite a los ingenieros y diseñadores obtener resultados inmediatos de presiones de viento en estructuras similares.

Referencias Bibliográficas

Roca Cedeño, A. (2011). Efecto del estrés calórico en el bienestar animal, una revisión en tiempo de cambio climático. *Revista ESPAMCIENCIA ISSN 1390-8103*, *2*(1), 15-25.
Vélez Marín, M.; Uribe Velásquez, L. (2010). ¿Cómo afecta el estrés calórico la reproducción? *Revista Biosalud*, 9 (2), 83-95.
Callejo Ramos, A. (2014). ¿Cómo combatir el estrés calórico? *Entorno ganadero*, (67), 75-83.
Cox, K. (2023). *Excel 2022 - Manual de usuario para principiantes*. Ed. Tektime.
Balbastro, GC y Natalini, MB (2018). *Reglamento argentino CIRSOC 102: Actualizaciones propuestas* . Universidad Tecnológica Nacional; Universidad Nacional del Nordeste. Recuperado de https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar
Natalini, B. y Balbastro, GC (2018). El CIRSOC 102 y su actualización. *Ingeniería Estructural*, 63, 36-40. Asociación de Ingenieros Estructurales. Recuperado de https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/97693
Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). (2005). *Reglamento CIRSOC 102-05: Acción del viento sobre las construcciones*. Centro INTI-CIRSOC. Recuperado de https://www.inti.gob.ar

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Sistemas de información e informática
Categoría:	Graduado
Facultad Regional:	Rosario

Módulo de análisis estadísticos de parámetros meteorológicos

Statistical analysis module for meteorological parameters

Presentación 18/10/2024

Lucas Nehuén Vacchino

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: lnvacchino@gmail.com

Resumen

Este trabajo tiene como fin aportar una nueva funcionalidad al software CEIBO dedicado al estudio de riesgo tecnológico de una planta a instalar o ya instalada. Para esto, se desarrolló un módulo que brinda valores estadísticos de un conjunto de parámetros meteorológicos a partir de datos obtenidos del proyecto POWER-NASA. Este módulo hecho en código Python realiza la obtención, integración, limpieza y filtrado de datos, el procesamiento de los mismos y la producción de los resultados. En una primera evaluación, se ejecutó el programa para obtener valores estadísticos de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad y dirección del viento sobre un punto geográfico cercano a Rosario medidos entre el 21/12/2023 y el 20/03/2024, tomando únicamente aquellas mediciones realizadas sobre las horas diurnas. Como resultado se obtiene un archivo JSON, utilizado luego por el sistema CEIBO, y un conjunto de gráficos para poder visualizar fácilmente los resultados.

Palabras clave: Variables Meteorológicas; NASA POWER; Seguridad de Procesos; Riesgo Industrial

Abstract

This work aims to provide a new functionality to the CEIBO software dedicated to the study of technological risk of a plant to be installed or already installed. For this, a module was developed that provides statistical values of a set of meteorological parameters from data obtained from the POWER-NASA project. This module written in Python code performs the acquisition, integration, cleaning and filtering of meteorological data, processing them and then the result presentation. In a first evaluation, the program was executed to obtain statistical values of temperature, relative humidity, atmospheric pressure, wind speed and direction on a geographical point near Rosario measured between 12/21/2023 and 03/20/2024, taking only those measurements made during daylight hours. The result is a JSON file, later used by the CEIBO system, and a set of graphics to easily visualize the results.

Keywords: Meteorological Variables; NASA POWER; Process Safety; Industrial Risk

1. Introducción

1.1. *Consideraciones Generales*

El desarrollo industrial en las últimas décadas impulsado por el crecimiento de la demanda de diversos productos demostró la necesidad de mejora en diferentes aspectos tales como tratamiento de efluentes, logística de la cadena de producción y seguridad de procesos. En este último, se propuso una gran variedad de metodologías para la prevención de la ocurrencia de accidentes como incendios, explosiones y dispersión de tóxicos (Alileche et al., 2017; Bonilla et al., 2019; Quiroz-Pérez et al., 2021). Un factor importante en las metodologías más rigurosas es la evaluación de la influencia de las condiciones

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

meteorológicas en la zona donde se localiza el proyecto fabril sobre las consecuencias ocasionas por posibles accidentes (Cen et al., 2018; Lin et al., 2023)

En el centro de investigación CAIMI de la Facultad Regional Rosario de la Universidad Tecnológica Nacional se está desarrollando un software denominado CEIBO que posibilitaría al usuario el estudio de riesgo tecnológico de una planta a instalar o ya instalada (Ponzone et al., 2015). Un módulo relevante para complementar este sistema es aquel que obtenga automáticamente valores de las condiciones meteorológicas en un determinado punto geográfico para un determinado rango de tiempo. En la Figura 1 se ilustra como dicho módulo se complementaría con el software CEIBO. Las variables ambientales más influyentes en estos análisis son la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, la radiación solar y la dirección y velocidad del viento.

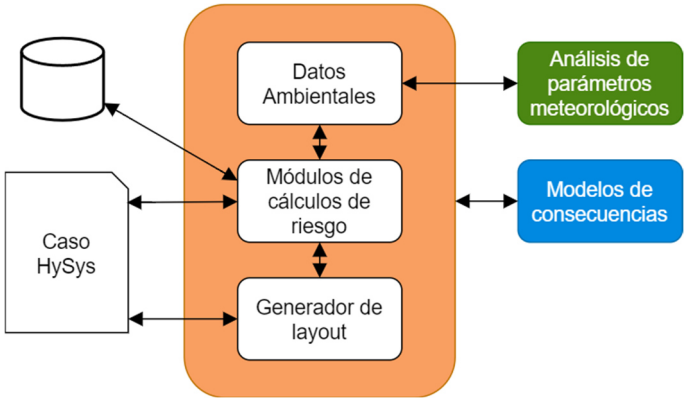


Figura 1. Estructura de CEIBO con la integración del nuevo módulo

Hasta este momento, CEIBO contaba únicamente con el módulo Datos Ambientales donde el usuario ingresaba manualmente los parámetros meteorológicos. El nuevo módulo (indicado en la Figura1 en color verde) además permite que estos datos sean tomados a partir de la generación de valores estadísticos en base a un conjunto relevado de éstas variables sobre un punto geográfico y rango de fechas determinado que se encuentra disponible gracias al aporte de distintas instituciones dedicadas a la medición, obtención, procesamiento y publicación de datos de múltiples variables meteorológicas. Estos datos se pueden obtener y procesar de diversas maneras dependiendo de la fuente de datos utilizada, el tipo de procesamiento temporal requerido y los filtros que se pueden/necesitan aplicar.

2. Materiales y Métodos

2.1 Datos Meteorológicos

En primer lugar, se realizó una búsqueda sobre las diversas fuentes de datos meteorológicos que existen. Entre ellas se tomaron como candidatas la fuente de datos publicada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina y los datos provistos por el 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. Luego, se efectuó un análisis de las ventajas y desventajas que tienen cada una de estas fuentes.

En el primer caso, los datos publicados por el SMN son recabados directamente en las distintas estaciones meteorológicas de la institución que se encuentran distribuidas en todo el país; mientras que los datos aportados por POWER son resultado del procesamiento de un conjunto de datos tomados de otros proyectos como el Sistema de Observación de la Tierra Goddard (GEOS) y Nubes y Sistema de Energía Radiante de la Tierra (CERES), entre otros; luego son mediciones estimadas que pueden resultar diferentes al valor real. Además, los datos del SMN se publican al momento de realizar las observaciones, en cambio el proyecto POWER, debido al procesamiento de datos que se realiza; la publicación de los datos puede tener demoras de varios días e incluso meses de acuerdo al parámetro solicitado.

Por otro lado, el SMN solamente publica la temperatura, la humedad, las precipitaciones y la velocidad y dirección del viento y el acceso de estos datos es menos directo y más dificultoso. Por el contrario, POWER ofrece una gran cantidad de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

parámetros meteorológicos que se pueden consultar a través de las múltiples interfaces de programación de aplicaciones (APIs, por sus siglas en inglés) que se disponen; posibilitando la comunicación de este sistema con el nuevo módulo a desarrollar, logrando así realizar de manera más versátil variadas peticiones de datos.

Por último, los datos del SMN se limitan a las observaciones de los centros meteorológicos que posee, lo que dificulta obtener valores para otras ubicaciones geográficas. En cambio, POWER aporta valores meteorológicos para cualquier punto geográfico con una resolución de 1º latitud/longitud e incluso de hasta ½º latitud/longitud para algunos parámetros.

En conclusión, tomando en cuenta los puntos aquí tratados, para este módulo se usó el sistema POWER del LaRC de la NASA. A pesar de no presentar valores reales de medición, los datos que aporta son lo suficientemente fiables como para usarlos en el análisis estadístico. La fiabilidad de estos datos está respaldada por una serie de investigaciones que demostraron que la base POWER-NASA manifestó una buena correlación con datos in situ, validando exitosamente la precisión y consistencia en diversos escenarios (García Bu Bucogen et al., 2022; Orte et al., 2023; Gusmerotti et al., 2024). Además, la extensa gama de parámetros meteorológicos que proporciona, junto con la disponibilidad de una API, convierte a esta herramienta en una fuente de datos altamente útil y accesible. Incluso, al aportar valores para cualquier punto del globo terráqueo, permite que cualquier región geográfica pueda ser tratado como caso de estudio.

2.2 Lenguaje de Programación y Librerías

El módulo está desarrollado en código Python y utiliza un conjunto de librerías estándares y externas. A continuación, se detallan las librerías externas utilizadas y su función principal:

- requests: permite enviar peticiones HTTP.
- 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.
- pysolar: permite simular la irradiación del sol en cualquier punto de la tierra.
- windrose: permite visualizar por medio de gráficos la velocidad y dirección del viento.

2.3 Estructura del Programa

El módulo desarrollado consta de una función donde, a partir de un conjunto de valores, se devuelve un conjunto de datos de salida. La función tiene como principales parámetros de entrada las fechas de inicio y fin del plazo de tiempo requerido, la coordenada del punto geográfico a analizar definida a partir de la latitud y longitud del punto, si se desea utilizar solamente los datos asociados a las horas diurnas o nocturnas, siendo clave al momento de definir la estabilidad atmosférica, y el conjunto de parámetros que se desea estudiar (el código de los parámetros se obtiene desde la sección Resources/ Parameter Dictionary de la página oficial del proyecto POWER-NASA). El detalle de todos los parámetros que admite la función y de cómo se deben indicar puede verse en la Tabla 1.

Tabla 1. Definición y especificación de parámetros de entrada de la función.

Nombre	Tipo	Formato	Ejemplo	Límites	Predet.	Obligatorio
start	Texto	AAAAMMDD	20240806			SI
End	Texto	AAAAMMDD	20240906			SI
Latitude	Real	[-]#.##	-60.53	[-90;90]		SI
Longitude	Real	[-]#.##	-35.55	[-180;180]		SI
Parameters	Texto	PAR1{,PARn}	T2M,H2M			SI
Solar	Texto	[day | night]			None	NO
Comunity	Texto	[ag | re | sb]			ag	NO
Time_std	Texto	[utc | lst]			utc	NO

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Como resultado de la ejecución, se obtiene un archivo de texto en formato de Notación de Objetos de JavaScript (JSON, por sus siglas en inglés) con valores estadísticos para cada uno de los parámetros indicados. De cada parámetro se muestra cantidad de valores obtenidos, valor mínimo, valor máximo, promedio y desvío estándar. El único caso particular es el de la dirección y velocidad del viento, ya que los valores de la velocidad son estratificados en 16 grupos según la dirección de la cual proviene. También, se incluye el listado de los parámetros ingresados como entrada, junto a la descripción y la unidad de medida. Sumado a esto, se brinda como salida un conjunto de gráficos aportando para cada parámetro un histograma, a excepción de los parámetros referidos a la dirección y velocidad del viento; generando para este caso una rosa de los vientos que indica la frecuencia e intensidad para cada una de las 16 direcciones estratificadas.

2.4 Procedimiento

La función programada realiza una serie de actividades, como se muestra en la Figura 2. A continuación, se indica detalladamente qué realiza cada una de estas actividades:

1- **Solicitud y obtención de datos.** Para obtener la información requerida, se utiliza la API publicada por POWER-NASA. Luego de realizar la petición junto a los parámetros solicitados, se obtiene como resultado un archivo en el formato solicitado. Para este trabajo, se utilizó el formato JSON.
2- **Integración, limpieza y filtración de datos.** Una vez obtenido el conjunto de datos, se realiza la preparación del mismo para el tratamiento posterior. Esta preparación consta de los siguientes pasos:
   - Integración de Datos: El conjunto de datos de los parámetros meteorológicos solicitados incluidos en el archivo JSON son extraídos y transformados en formato “tabla”.
   - Información de Datos: como información adicional, se extraen del archivo JSON los detalles de los parámetros solicitados para incluirlos en el archivo de salida y en las descripciones de los gráficos a generar.
   - Limpieza de Datos: Como se indica en la documentación de la API de POWER-NASA, en caso de existir valores faltantes serán indicados con el valor -999. En estos casos, estos valores no serán considerados en el análisis univariable de los parámetros.
   - Creación de nuevo parámetro: A fin de cumplir con lo requerido por los diversos proyectos de investigaciones a los cuáles está dirigido este trabajo, se crea un nuevo atributo para indicar en cada registro si la hora se encuentra en el período diurno o nocturno del día.
   - Filtrado de datos: Según lo requerido en la llamada de la función, se puede realizar el filtrado del conjunto total de datos para obtener así un subconjunto correspondiente a alguna condición en particular, como por ejemplo los datos medidos en períodos diurnos o nocturnos.
3- **Procesamiento y análisis de datos.** Una vez preparado el conjunto de datos, se realiza un análisis univariable de cada uno de los parámetros requeridos, obteniendo así los valores estadísticos requeridos.
4- **Generación y almacenamiento de resultados.** Al finalizar el procesamiento de los datos, se generará y almacenará un archivo JSON con la información resultante y una carpeta con todos los gráficos creados.

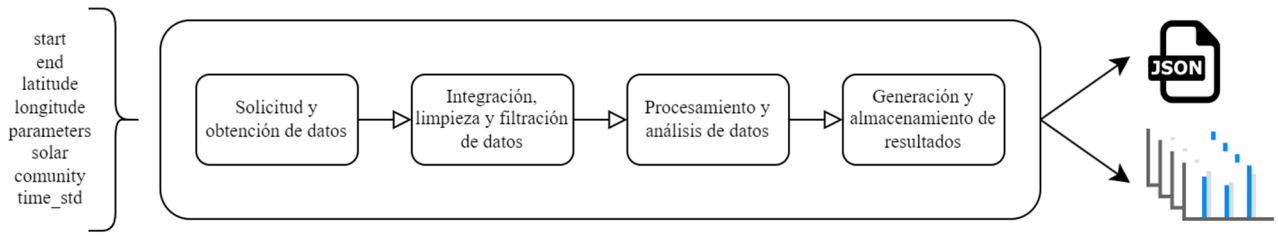


Figura 2. Diagrama de flujo de la función.

3. Resultados y Discusión

Como ejemplo de ejecución, se muestra la siguiente llamada de la función:

```
Python temporal_hourly_point.py start=20231221 end='20240320' latitude=-
32.54 longitude=-60.46 parameters='T2M,RH2M,PS,WS2M,WD2M' solar='day'
```

Esta llamada aporta los siguientes parámetros:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- Start / end: se solicita las mediciones realizadas entre las fechas 21/12/2023 y 20/03/2024.
- Latitud / longitud: se define el punto geográfico ubicado sobre el Aeropuerto Internacional Rosario "Islas Malvinas", cuya ubicación es 32,54º S 60,46º O.
- Parameters: se solicitan las mediciones de la temperatura (T2M), humedad relativa (RH2M), presión atmosférica (PS) y velocidad y dirección del viento (WS2M y WD2M respectivamente).
- Solar: se solicita que la función tome únicamente aquellas mediciones realizadas sobre las horas diurnas.

El sistema devuelve los resultados tal como se muestran en la Tabla 2. Allí se puede observar para cada parámetro meteorológico indicado en la entrada de la función la cantidad de valores evaluados, el valor mínimo, el valor máximo, el promedio del conjunto de valores y el desvío estándar. Cabe aclarar que la velocidad del viento se desagrega en 16 grupos según la dirección del viento, siendo solamente indicadas cuatro de éstas (Norte, Este, Sur y Oeste) en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados arrojados por el módulo para el caso definido.

Parámetro	Cantidad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Estándar
T2M	2184	13.25	41.91	26.35	5.58
RH2M	2184	17.5	99.75	63.60	21.63
PS	2184	99.2	102.11	100.82	0.42
WS2M (N)	149	0.09	5.75	2.73	1.27
WS2M (E)	276	0.34	5.27	2.35	0.96
WS2M (S)	116	0.21	8.85	3.31	1.79
WS2M (O)	8	0.34	4.99	2.20	1.56

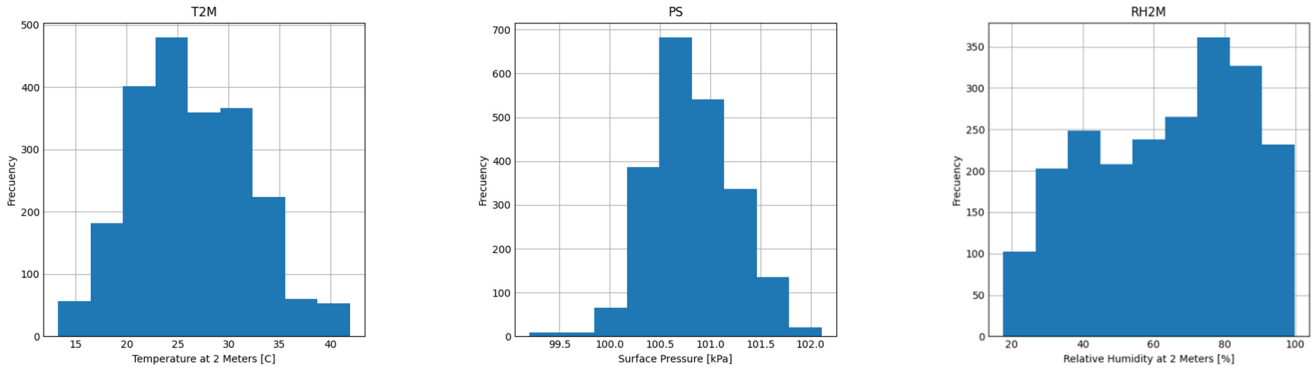


Figura 3. Histograma de la temperatura (T2M), la presión (PS) y la humedad (RH2M) sobre los resultados arrojados por el módulo para el caso definido.

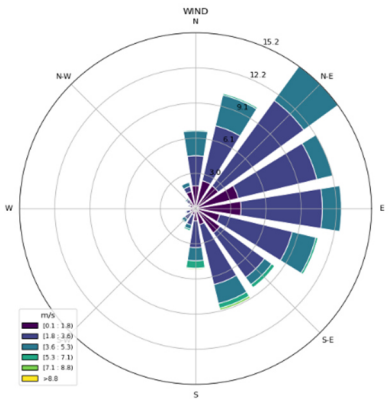


Figura 4. Rosa de los vientos sobre los resultados arrojados por el módulo para el caso definido.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Además, devolvió un conjunto de gráficos: para los parámetros de temperatura, humedad y presión se generaron 3 histogramas, tal como se observa en la Figura 3, y para los parámetros de velocidad y dirección del viento obtuvimos una rosa de los vientos, presentado en la Figura 4. En este último se indica la proporción de la frecuencia de ocurrencia en cada dirección y las intensidades de los vientos para cada una de ellas.

4. Conclusiones

El módulo desarrollado logra satisfacer los requerimientos propuestos para complementar el software CEIBO, ya que aportando los parámetros de entrada que la función requiere puede utilizar los valores estadísticos de parámetros meteorológicos que genera como salida para la generación de resultados más eficaces que ayuden al desarrollo del estudio de riesgo tecnológico de una planta industrial.
Como trabajo futuro se puede agregar mayores funcionalidades al módulo pudiendo realizar cálculos estadísticos sobre regiones en lugar de un punto geográfico, utilizar las demás APIs que ofrece el proyecto POWER-NASA, definir como parámetro de entrada el tipo de archivo de salida que se desea, configurar el tipo de gráfico a generar, entre otras mejoras, logrando de esta manera ser una herramienta útil para cualquiera que lo necesite.

Agradecimientos

Se agradece al CAIMI, a Nicolas Jose Scenna, a Romina Kraft y a Diego Ponzone por el aporte que realizaron al trabajo final presentado.

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
Bonilla, J. M., Àgueda, A., Muñoz, M. A., Vílchez, J. A., & Planas, E. (2019). Thermal radiation model for dynamic fireballs with shadowing. Process Safety and Environmental Protection, 128, 372-384. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.029
Cen, K., Yao, T., Wang, Q., & Xiong, S. (2018). A risk-based methodology for the optimal placement of hazardous gas detectors. Chinese Journal of Chemical Engineering, 26(5), 1078-1086. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.10.031
García Bu Bucogen, G., Piccolo, M. C., & Bohn, V. Y. (2022). Implementación de datos meteorológicos modelados en el norte patagónico argentino (1982-2017). Investigaciones Geográficas, n.º 78 (pag 67-87). https://doi.org/10.14198/INGEO.21449
Gusmerotti, L. A., Mercau, J. L., Gattinoni, N. N. & Di Bella, C. M. (2023). Evaluación del producto NASA-POWER para estimar la evapotranspiración de referencia en el sudeste de Córdoba. In Congreso Argentino de AgroInformática (CAI 2023)-JAIIO 52.http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/165448
Lin, Z., Gong, L.-Q., Xu, J.-J., Jiang, J.-J., & Jiang, J.-C. (2023). Multi-objective optimization of chemical process plant layout considering economy and inherent safety. Process Safety and Environmental Protection, 176, 817-830. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.060
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 (págs. 667-673). https://bdigital.uncu.edu.ar /11337
Quiroz-Pérez, E., de Lira-Flores, J. A., Gutiérrez- Antonio, C., & Vázquez - Román, R. (2021). A new multiple-risk map approach to solve process plant layout considering safety and economic aspects. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 72, 1-19. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104524
Orte, F., Carmona, F., Lusi, A., Wolfram, E., Luccini, E., Nollas, F., D'Elia, R. & Pallotta, J. (2024). Comparison of NASA-POWER surface solar UVA irradiance with ground-based measurements in

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Argentina. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2988, No. 1). AIP Publishing. https://doi.org/10.1063/5.0182750

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Sistemas de información e informática
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Evaluación de la Madurez en Ciberseguridad: Un Enfoque para Pequeñas y Medianas Empresas

Cybersecurity Maturity Assessment: An Approach for Small and Medium Enterprises

Presentación 18/10/2024

Jimena Denise Flecha Alfaro

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: flechaajimena@gmail.com

Resumen

En un mundo digital, las pequeñas y medianas organizaciones enfrentan el desafío creciente de proteger sus activos digitales frente a amenazas cada vez más sofisticadas. Lo que antes era una preocupación de las grandes empresas, la ciberseguridad, se ha convertido en una necesidad fundamental para organizaciones de todos los tamaños. Sin embargo, muchas de estas carecen de los recursos y conocimientos requeridos para evaluar y mejorar su postura de seguridad. El objetivo del proyecto es analizar los distintos modelos y herramientas que existen para evaluar la madurez de la ciberseguridad, particularmente de las organizaciones pequeñas y medianas, y desarrollar una herramienta que integre las características y aspectos más distintivos de estas, en un conjunto de preguntas. Esto permitirá identificar sus niveles de madurez y definir las estrategias y acciones necesarias para alcanzar el siguiente nivel de madurez, fortaleciendo sus defensas y asegurando su continuidad.

Palabras clave: ciberseguridad; madurez; evaluación; amenazas

Abstract

In today's digital landscape, small and medium-sized organizations face an increasing challenge in safeguarding their digital assets from increasingly sophisticated threats. Cybersecurity, once a concern primarily for large corporations, has become a fundamental necessity for organizations of all sizes. However, many of these organizations lack the resources and expertise needed to assess and enhance their security posture. This project aims to evaluate various models and tools available for assessing cybersecurity maturity, with a particular focus on small and medium-sized enterprises, and to develop a tool that incorporates the unique characteristics of these organizations into a set of questions. This will facilitate the identification of their maturity levels and the definition of strategies and actions required to advance to the next level, thereby strengthening their defenses and ensuring their continued operation.

Keywords: cybersecurity; maturity; evaluation; threats

1. Introducción

1.1. *Contexto*

Actualmente, las empresas y organizaciones, independientemente de su tamaño, enfrentan riesgos y amenazas que comprometen su ciberseguridad. Debido al gran crecimiento global de los ataques cibernéticos se reconoce en todas las organizaciones la importancia de la ciberseguridad; empresas pequeñas y medianas comienzan a invertir en esta área (Boehm et al., 2022). A pesar de esto, las estadísticas de ISACA (2020) muestran que muchas de estas fallan en asegurar que sus organizaciones están gestionando eficiente y eficazmente los riesgos cibernéticos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Al igual que en la mayor parte del mundo, en Argentina, los ciberataques ocupan el segundo lugar entre los riesgos más importantes para las empresas (Di Lucca, 2024). Las pequeñas y medianas empresas (PYMEs), a menudo con recursos limitados, son particularmente vulnerables a una variedad de amenazas cibernéticas. Entre las amenazas más comunes se encuentran los ataques de malware, como virus y ransomware, que pueden detener el funcionamiento de las operaciones al robar o cifrar datos críticos. Además, el pishing, que engaña a los empleados para que revelen información o realicen cierta operación maliciosa, y los ataques de denegación de servicio (DoS), que sobrecarga los sistemas y los deja inoperativos. A esto se suman las amenazas internas, que se originan dentro de la organización por empleados que, intencional o accidentalmente, pueden comprometer la seguridad (Eunetic, 2023). Todas estas amenazas no solo ponen en peligro la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información, sino que también pueden tener un gran impacto en la continuidad del negocio y la reputación de la empresa.

La solución para mitigar los riesgos es evaluar la madurez de la ciberseguridad de las organizaciones. El concepto de "madurez" en ciberseguridad se refiere al grado de desarrollo y sofisticación de las prácticas y capacidades de una organización en cuanto a la protección de sus activos digitales. La idea es que, a medida que una organización avanza en la implementación y mejora de sus controles de seguridad, alcanza niveles más altos de madurez. Esto implica que la organización no solo ha implementado medidas de seguridad, sino que también las ha integrado en sus procesos y ha establecido una cultura sólida de ciberseguridad.

De esta forma, los niveles de madurez van desde una etapa inicial, donde recién se comienza a considerar la ciberseguridad, hasta una etapa final, donde la organización logra adaptarse a los cambios en las amenazas, los riesgos y las vulnerabilidades. Conocer el nivel de madurez permite a una organización conocer sus vulnerabilidades, anticiparse a las amenazas y tomar acciones para protegerse ante posibles ataques. A medida que la organización crece, los ataques y amenazas a los que se enfrenta cambian y se vuelven más complejos, por lo que la revisión y mejora de sus políticas y estrategias de ciberseguridad deben ser una práctica continua.

La importancia de implementar modelos de madurez de ciberseguridad radica en la complejidad de los riesgos y ataques cibernéticos y, sobre todo, en el valor de los activos digitales que estos protegen. Contar con un modelo de madurez se convierte en una herramienta fundamental para entender y gestionar la ciberseguridad, ya que estos modelos proveen una visión amplia de la ciberseguridad y permiten determinar el nivel de desarrollo de controles de seguridad en distintos puntos claves de la organización. Asimismo, proveen estrategias y acciones para fortalecer las defensas y prevenir la explotación de vulnerabilidades, asegurando así que las organizaciones estén preparadas para enfrentar los desafíos actuales y futuros (Christopher, 2018).

Básicamente, todo modelo de madurez es un conjunto de atributos o características que indican el estado y progreso de una organización en un área particular, en este caso, la ciberseguridad. Estos modelos establecen objetivos, metas e incorporan procesos, prácticas y normas a seguir permitiendo a las organizaciones utilizarlos como referencia para realizar una evaluación y planificar mejoras. Los distintos niveles del modelo deben permitir a una organización conocer su estado actual, determinar su estado objetivo y planear las acciones a realizar para alcanzar dicho estado objetivo, esto incluye los requerimientos y capacidades que debe alcanzar (Le et al., 2016). Es decir que no solo permiten medir y evaluar el estado en que se encuentra la organización, fundamental para comenzar a implementar medidas, sino que además proveen una guía para gestionar la ciberseguridad.

1.2. Problemática

Hoy en día existen numerosos modelos de madurez de ciberseguridad que toman como referencia otros modelos y los adaptan a sus necesidades, algunos enfocados en sectores particulares de la industria. De acuerdo con Rea-Guaman et al. (2017), todos los modelos se basan en el Modelo de Madurez de Capacidad (CMM, Capability Maturity Model), y señalan que la mayoría de los modelos no están diseñados ni se enfocan en resolver la problemática de la ciberseguridad. El CMM fue creado en la universidad de Oxford, para evaluar la capacidad y madurez de los procesos de desarrollo de software de una organización. Este modelo está dividido en cinco niveles, cada uno definido en términos de áreas de proceso y prácticas clave. Una organización debe avanzar por todos los niveles para alcanzar el nivel de optimización, que es el nivel 5. Esto implica pasar desde el nivel inicial sin organización ni gestión, a la definición de procedimientos básicos, documentación y la medición de procesos hasta llegar a perfeccionar y optimizar estos procedimientos.

Gracias a los modelos de madurez, las organizaciones pueden medir su progreso evaluando sus capacidades, tecnologías, procesos de gestión de riesgos y medidas de seguridad. Sin embargo, esto no es una tarea fácil, en particular para aquellas

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

que no cuentan con profesionales especializados en esta área. Un gran porcentaje de las organizaciones no aplican medidas para establecer el nivel de madurez de su organización y aquellas organizaciones con un alto nivel de ciberseguridad son, en su mayoría, empresas grandes (Eiden et al., 2021).

Ante esta necesidad existen diversas herramientas que brindan un marco teórico para analizar la ciberseguridad en una organización, atendiendo a riesgos y amenazas generales. No obstante, muchas de ellas deben ser utilizadas por especialistas en esta área para poder tomar decisiones a la hora de implementarlas y, para llevar a cabo una implementación adecuada, se necesita realizar una auditoría o análisis exhaustivo previo para poder conocer las debilidades y puntos más importantes a proteger; actividades que pequeñas y medianas empresas no pueden realizar fácilmente. Mas aún, muchas de estas herramientas están diseñadas para sectores particulares, como el sector energético, de salud, las telecomunicaciones y el gobierno, entre otros; lo que limita su aplicabilidad en organizaciones fuera de esos sectores, dejando a muchas PYMEs sin soluciones adaptadas a sus necesidades.

A partir del escenario planteado, en este proyecto se propone analizar y evaluar los distintos modelos y herramientas que existen para evaluar la madurez de una organización, enfocándose en las organizaciones pequeñas y medianas. Además, se propone crear una herramienta que abarque las características y los aspectos más representativos de dichas organizaciones, lo que posibilitará determinar en qué niveles de madurez pueden encontrarse y qué estrategias y medidas de acción deberían llevar a cabo.

El resto del documento se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, dividida en dos etapas principales; en la Sección 3 se describen los resultados de las primeras actividades del proyecto y los resultados que se esperar obtener; finalizando con la Sección 4 donde se realizan conclusiones del trabajo, destacando las implicancias y aportes del proyecto en el ámbito de la ciberseguridad para pequeñas y medianas empresas.

2. Metodología

El proyecto se dividirá en dos etapas: la primera se enfocará en la investigación, mientras que la segunda se centrará en el diseño de la herramienta.

Primera etapa: Investigación

La etapa de investigación se centrará en actividades de lectura bibliográfica. Se comenzará un estudio relacionado a normas de ciberseguridad, luego se evaluarán modelos de madurez y herramientas existentes para diagnóstico y, por último, será necesario realizar una investigación en materia de tecnologías, las cuales facilitarán las actividades a desarrollar en la segunda etapa del proyecto. Para llevar a cabo esta etapa se realizará una búsqueda exhaustiva de información. A continuación, se detallan los métodos a utilizar en esta etapa:

- Estudio de las Normas de Ciberseguridad
    - Revisión documental: Se realizará una revisión de documentos oficiales de organismos y entidades reconocidas en el ámbito de la ciberseguridad, tales como ISO (International Organization for Standardization), NIST (National Institute of Standards and Technology), ENISA (European Union Agency for Cybersecurity) y otros. Se identificarán, analizarán y resumirán las normas y estándares más relevantes a considerar en el desarrollo del proyecto, como ISO/IEC 27001.
    - Búsqueda en sitios web oficiales: Se realizarán búsquedas en los sitios web de las organizaciones previamente mencionadas para acceder a la versión más actualizada de las normas y sus guías de implementación.
- Investigación de los modelos de madurez en Ciberseguridad
    - Análisis comparativo: Se identificarán y analizarán modelos de madurez existentes, tales como Cybersecurity Capability Maturity Model (C2M2), NICE Capability Maturity Model (NICE-CMM), Systems Security Engineering Capability Maturity Model (SSE-CMM), entre otros. Se realizará una comparación de sus características y criterios de evaluación.
- Relevamiento de Herramientas existentes para Diagnóstico

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- Búsqueda en sitios web oficiales: Se buscarán herramientas de diagnóstico y evaluación de ciberseguridad en organizaciones especializadas en ciberseguridad. Además, se investigarán las funcionalidades, ventajas y limitaciones de cada herramienta.

Segunda etapa: Diseño y desarrollo de una herramienta informática para la evaluación de la madurez en ciberseguridad de organizaciones

Esta etapa se centrará en el desarrollo del sistema de evaluación de la madurez en ciberseguridad, siguiendo la investigación previa realizada. Esta fase incluirá el diseño conceptual del sistema, la definición de tecnologías y estrategias para su implementación y el diseño de las interfaces de usuario. El objetivo es definir una base sólida para el desarrollo de la herramienta.

Se utilizará un enfoque de desarrollo iterativo e incremental, asegurando una mejora continua y una adaptación ágil a los requerimientos definidos. Un aspecto fundamental para el desarrollo iterativo e incremental es la priorización de los objetivos y requisitos. Este enfoque consiste en definir iteraciones cortas con objetivos específicos, mediante las cuales se puede observar la evolución de la herramienta y realizar cambios con el fin de planificar mejor la siguiente actividad del proyecto. Además, luego de cada iteración se presentarán los avances del proyecto a la directora con una frecuencia establecida para recibir feedback y asegurar el alineamiento con los objetivos del proyecto.

A continuación, se mencionan las actividades que se llevarán a cabo para la ejecución del proyecto, organizadas de acuerdo con las etapas previamente definidas.

Primera etapa:

- Realizar una investigación de las vulnerabilidades y ciberataques más comunes en las pequeñas y medianas organizaciones
- Realizar un estudio de las normas de ciberseguridad
- Realizar una investigación de los modelos de madurez existentes en el área de ciberseguridad
- Realizar una comparación de los modelos de madurez más relevantes
- Realizar un relevamiento de herramientas existentes para diagnóstico
- Analizar y evaluar herramientas de evaluación
- Definir preguntas de evaluación

Segunda etapa:

- Definir y priorizar los requerimientos de la herramienta informática
- Diseño de la arquitectura del sistema
- Desarrollar, en función de la investigación previa, un diseño conceptual del sistema
- Definir las tecnologías y estrategias a utilizar
- Proponer una herramienta informática preliminar que implemente el modelo de madurez que fue seleccionado y adaptado
- Validar la herramienta con organizaciones reales

3. Resultados

A partir de la investigación acerca de los ciberataques en las pequeñas y medianas empresas, se destacan el malware, el phishing y las amenazas internas como las principales amenazas. La frecuencia de estos ataques continúa en aumento ya que los atacantes aprovechan las vulnerabilidades y los recursos limitados de estas organizaciones. Entre las vulnerabilidades más comunes, que explotan los atacantes, se encuentran: software desactualizado, falta de concientización y capacitación, uso de contraseñas débiles, ausencia de copias de seguridad (backups), antivirus desactualizado, carencia de firewalls y políticas de control de acceso, entre muchas otras.

Por otro lado, del estudio y análisis de las normas ISO/IEC 27001 y 27002, las NIST SP 800, particularmente la SP 800-53, y los Controles CIS se considera que, para el enfoque de este trabajo, los Controles CIS son el marco adecuado para comenzar a implementar controles de seguridad en una empresa pequeña o mediana. Este conjunto de medidas permite que las empresas se concentren en los controles más críticos, priorizando aquellos con mayor impacto en la seguridad. Además, proporciona guías prácticas y ejemplos claros para facilitar la implementación de cada control. Al utilizar un lenguaje

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

sencillo, evita términos excesivamente técnicos, lo que facilita su comprensión por parte de equipos con conocimientos limitados en seguridad. Con las actividades que siguen de la primera etapa se espera proponer un modelo de madurez de ciberseguridad adaptado a las características particulares que presentan las PYMEs de la región.

Con este proyecto se pretende además alcanzar el diseño conceptual y la arquitectura detallada de una herramienta informática que implemente el modelo de madurez propuesto. La herramienta permitirá diagnosticar un nivel de madurez en ciberseguridad en organizaciones y proponer un plan de acción o roadmap preliminar que permita a la organización identificar cuáles son los controles de seguridad que debe implementar para mitigar sus principales vulnerabilidades, teniendo en cuenta el tamaño y recursos actuales y futuros de la misma.

Como resultado de este proyecto, se espera que el modelo de madurez de ciberseguridad propuesto se convierta en un referente para las PYMEs de la región, facilitando un enfoque práctico y escalable para mejorar su postura de ciberseguridad. Además, se espera que la herramienta informática diseñada sea adoptada ampliamente por estas organizaciones, permitiéndoles evaluar su situación actual y planificar mejoras de manera eficiente.

4. Conclusiones

En conclusión, este trabajo tiene como objetivo principal contribuir a mejorar la ciberseguridad de las pequeñas y medianas empresas mediante el diseño de una herramienta de evaluación de madurez personalizada. Al analizar los modelos y herramientas existentes, se busca identificar las características más relevantes para las PYMEs y diseñar una herramienta que les permita conocer su nivel de madurez actual y definir un plan de mejora. Se espera que esta herramienta no solo facilite la identificación de vulnerabilidades, sino también el establecimiento de acciones concretas para fortalecer la seguridad de la información.

Además, este proyecto aspira a aumentar la conciencia sobre la importancia de la ciberseguridad en las organizaciones y, en consecuencia, la necesidad de implementar controles de seguridad, particularmente en aquellas que carecen de un área de TI especializada, como son las PYMEs. Al mismo tiempo, se pretende fomentar una cultura de seguridad más fuerte en el ámbito empresarial, ayudando a prevenir amenazas y garantizar la continuidad del negocio.

La recomendación de acciones específicas como resultado de la evaluación de ciberseguridad, proporcionará a las organizaciones una guía concreta para fortalecer sus defensas contra ciberataques. Al implementar estas medidas sugeridas, las empresas podrán reducir su exposición a riesgos y mejorar la detección y mitigación de posibles amenazas. En futuras investigaciones, se plantea implementar y validar la herramienta a través de casos de estudios y ampliar su alcance para incluir otros aspectos.

Por último, este proyecto también permitirá profundizar el conocimiento relacionado tanto a las distintas amenazas y ataques cibernéticos como a las normas, técnicas y herramientas que existen para mitigar estos. Esto beneficiará a las organizaciones que utilicen la futura herramienta y se espera que contribuya al avance del área de ciberseguridad. En futuras investigaciones, se plantea implementar y validar la herramienta a través de casos de estudios y ampliar su alcance para incluir otros aspectos.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto PID UTN SIECFE0010213TC “Marcos de trabajo para realizar defensa en profundidad en sistemas de software”. Directora: María Luciana Roldan.

Referencias bibliográficas

Boehm, J., Lewis, C., Li, K. (2022). Cybersecurity trends: Looking over the horizon. McKinsey & Company
ISACA (2020). Managing Cybersecurity Risk: A Crisis of Confidence. ISACA.
Di Lucca, F. (2024). Los ciberataques, uno de los principales riesgos que preocupan a las empresas en Argentina. Forbes AR
EUNETIC. (2023). Guide to cyber security for small and medium-sized enterprises. EUNETIC.
Christopher, J. (2018). The Cybersecurity Maturity Model: A Means To Measure And Improve Your Cybersecurity Program. Forbes.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Le, N., Hoang, D. (2016). Can maturity models support cyber security?. University Technology of Sydney, Faculty of Engineering & IT.
Rea-Guaman, A. M., Sanchez-Garcia, I. D., Feliu, T.S., Calvo-Manzano, J. A. (2017). Modelos de Madurez en Ciberseguridad: una revisión sistemática. Iberian Conference of Information Systems and Technologies
Capability Maturity Model. Oxford Reference. Retrieved 20 Aug. 2024, from https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095547264.
Eiden K., Kaplan, J., Kazimierski, B., Lewis, C., Telford, K. (2021). Organizational cyber maturity: A survey of industries. McKinsey & Company.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Sistemas de información e informática
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Aplicación del software Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con la herramienta Open Foam

Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) software with the Open Foam tool

Presentación 26/08/2024

Ligia Molina

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: ligiabril010@gmail.com

Juan Cruz Schmit

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: juancruzschmit@gmail.com

Paula Farandato

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: paula.farandato@gmail.com

Resumen

La línea de investigación presentada en este avance tiene como objetivo comprender el funcionamiento de la herramienta de modelado OpenFOAM para, en un trabajo posterior, analizar las presiones que el viento ejerce sobre superficies curvas, como las cubiertas de galpones rurales, utilizando Dinámica de Fluidos Computacional. (CFD). Para familiarizarnos con el programa, se modeló un volumen en OpenFOAM con el fin de ajustar y determinar los parámetros de diseño requeridos por el software. Los resultados preliminares indican que la CFD es una herramienta efectiva para predecir las presiones del viento en superficies curvas, proporcionando información valiosa para optimizar el diseño y mejorar su resistencia al viento. Esta investigación contribuye al campo de la dinámica de fluidos al ofrecer una herramienta que permite una comprensión más detallada de la interacción viento-estructura para geometrías curvas, más allá de lo que ofrecen los reglamentos actuales.

Palabras clave: Open Foam; Viento; superficies curvas; CFD

Abstract

The line of research presented in this advance aims to understand the functioning of the OpenFOAM modeling tool in order to, in a subsequent work, analyze the pressures that the wind exerts on curved surfaces, such as the roofs of rural sheds, using Computational Fluid Dynamics (CFD). To familiarize ourselves with the program, a volume was modeled in OpenFOAM in order to adjust and determine the design parameters required by the software. Preliminary results indicate

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

that CFD is an effective tool to predict wind pressures on curved surfaces, providing valuable information to optimize the design and improve its wind resistance. This research contributes to the field of fluid dynamics by offering a tool that allows a more detailed understanding of the wind-structure interaction for curved geometries, beyond what is offered by current regulations.

Keywords: Open Foam; wind; curves surfaces; CFD

1. Introducción

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una disciplina donde se resuelven las ecuaciones que modelan el flujo de fluidos. No es un software. Por otra parte la herramienta OpenFoam es un software que permite el estudio y análisis del comportamiento de fluidos mediante simulaciones computacionales. (Stoevesandt, 2020)

A través de CFD, es posible modelar y resolver problemas complejos de flujo de fluidos, transferencia de calor y otras interacciones físicas, utilizando métodos numéricos y algoritmos. CFD trabaja resolviendo de manera aproximada las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen cómo se relacionan la velocidad, la presión, la temperatura y la densidad de un fluido en movimiento. Estas ecuaciones son una extensión de las ecuaciones de Euler, e incluyen los efectos de la viscosidad en el flujo, proporcionando una descripción completa del comportamiento de los fluidos bajo diversas condiciones. La capacidad de resolver estas ecuaciones de manera precisa y eficiente hace que CFD sea especialmente importante en el diseño y optimización de estructuras sometidas a condiciones ambientales adversas, como el viento, ya que permite prever las cargas y presiones ejercidas sobre diferentes superficies, facilitando el desarrollo de estructuras más seguras y eficientes.

La correcta simulación que provee el CFD depende en gran medida del número de Reynolds. A medida que el fluido afecta y pasa por un volumen sólido, las moléculas de gas de la atmósfera cerca del objeto se alteran y se mueven alrededor de él, generándose fuerzas aerodinámicas entre el gas y el objeto. La magnitud de estas fuerzas depende de varios factores, como la forma del objeto, la velocidad del fluido, la masa del gas que pasa por el objeto, la viscosidad y la compresibilidad. Para modelar adecuadamente estos efectos en una simulación, se utilizan parámetros de similitud, que son proporciones que comparan estos efectos con otras fuerzas presentes en el problema. Si dos experimentos presentan los mismos valores para estos parámetros de similitud, entonces la importancia relativa de las fuerzas se está modelando correctamente. Este concepto se expresa mediante el número de Reynolds, que es esencial para garantizar que la simulación CFD represente con precisión el comportamiento del flujo en situaciones reales.

En este contexto, OPEN FOAM (Open Field Operation and Manipulation) es un software de código abierto creado en el Imperial College de Londres, que proporciona una amplia gama de herramientas para la simulación de problemas de dinámica de fluidos. Su naturaleza de código abierto permite a los usuarios personalizar y adaptar el software a sus necesidades específicas, lo que lo hace especialmente útil para aplicaciones de investigación y desarrollo.

Para interpretar la metodología de simulación y comprender conceptualmente los parámetros que el software solicita como variables, hemos modelado un volumen básico en CFD. Esta aproximación inicial nos permite ajustar los parámetros de entrada y entender cómo influyen en los resultados, asegurando la obtención de datos precisos y confiables. Esto es lo que presentamos en este avance de trabajo.

2. Metodología

Para trabajar con el software se debe realizar la configuración inicial. En este caso es muy importante generar las copias de respaldo. Esta práctica es fundamental para asegurar que cualquier modificación o ajuste realizado no afecte los archivos originales del software, permitiendo revertir cambios o comparar resultados de manera eficaz. Armado de la estructura de las carpetas: para el armado el software requiere un etiquetado denominado "constant" y "system", que lo desarrolla para gestionar adecuadamente los archivos de entrada y salida de las simulaciones. El tutorial de la cavidad es un caso básico utilizado para familiarizarse con las configuraciones y el flujo de trabajo en OPEN FOAM. Este caso consiste en una cavidad de 0,1 metros de profundidad y 0,1 metros de ancho, proporcionando un ejemplo simple pero efectivo para entender los principios de simulación de fluidos en geometrías cerradas. Armado de las condiciones de frontera de la simulación. Luego, se deben ingresar las condiciones de contorno específicas. El Software genera una serie de condiciones que las

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

denomina Paredes fijas (“FixedWalls”): Estas paredes se consideran inmóviles, lo que implica que la velocidad del fluido en su superficie es cero.

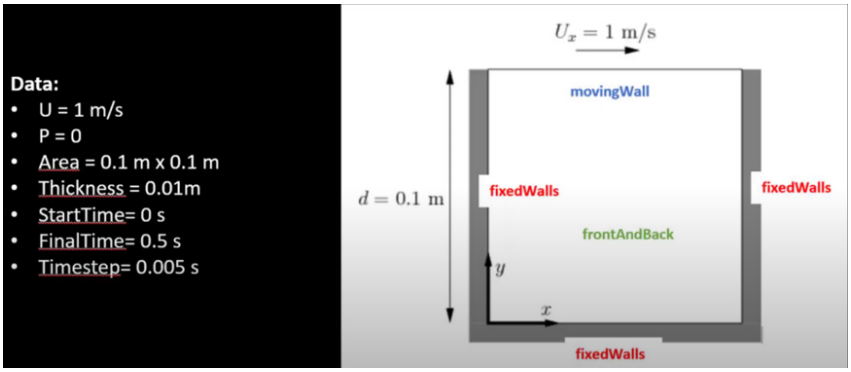


Figura 1. Captura de pantalla del ingreso de datos y las tipologías de las paredes



Figura 2. Captura de pantalla del bloque MeshDict que contiene la información de la geometría

Luego establece las paredes móviles (“MovingWall”): esta pared simula un flujo de fluido impulsado en la dirección de la velocidad asignada, creando un patrón de circulación dentro de la cavidad.
Se deben establecer los parámetros de la simulación. Simulación transitoria: se especifican los parámetros necesarios para realizar una simulación transitoria, que incluye el tiempo inicial, el tiempo final y el intervalo de tiempo (paso de tiempo) utilizado.
Estos parámetros determinan la duración de la simulación y la resolución temporal de los resultados. Espesor de la cavidad y generación de malla: el espesor de la cavidad se define para reflejar las condiciones tridimensionales del modelo. Es fundamental generar una malla adecuada para la simulación, que consiste en dividir el volumen de la cavidad en elementos más pequeños donde se resolverán las ecuaciones de flujo.
Este bloque brinda información crucial de la figura a analizar cómo son vértices (líneas 19 – 29), número de elementos por bloque (líneas 31 – 34), es decir, información del mallado y por último, condiciones de frontera (líneas 40 – 69).
La calidad y el tamaño de la malla influyen significativamente en la precisión y el tiempo de cómputo de la simulación.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Existen una serie de comandos específicos utilizados en cada paso del proceso. Esto abarca desde la creación de la malla con herramientas como blockMesh, hasta la ejecución de la simulación con comandos como icoFoam y la visualización de los resultados mediante herramientas como paraFoam.
IcoFoam resuelve problemas de flujo laminar incompresible. En el control del tiempo aparece información como tiempo inicial (línea 22), tiempo final (línea 26), delta tiempo (línea 28). Además, se puede establecer cada cuántas iteraciones se guarda la información (en este caso, cada 20 iteraciones → línea 32). El resto de la información se deja por defecto.

3. Resultados

Una vez establecidos los parámetros previos, se procede a abrir el terminal "blueCFD" a modo de ejecutar la simulación.

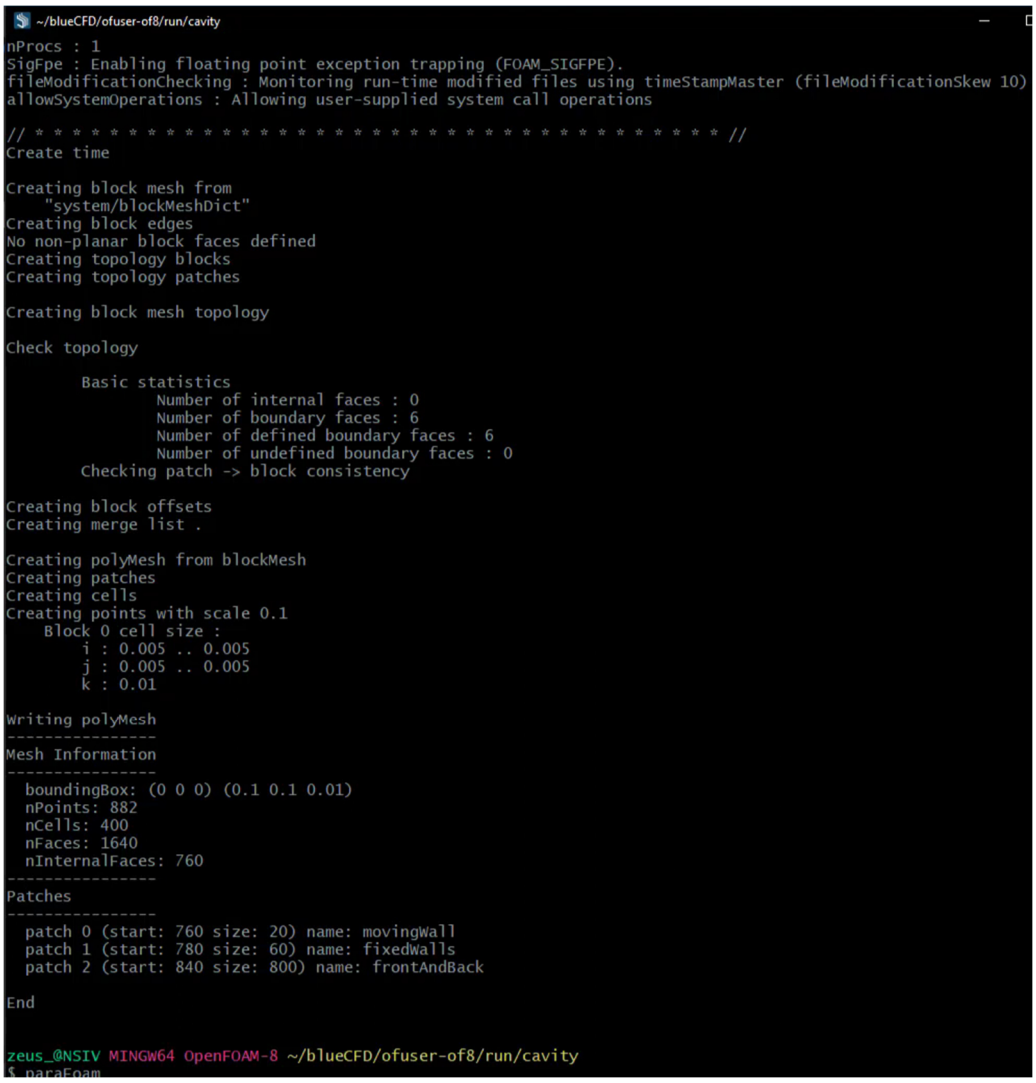


Figura 4. Captura de pantalla del ingreso de datos (archivo cavity) previo a ejecutar

Una vez corrido el programa, se muestra la superficie a analizar.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

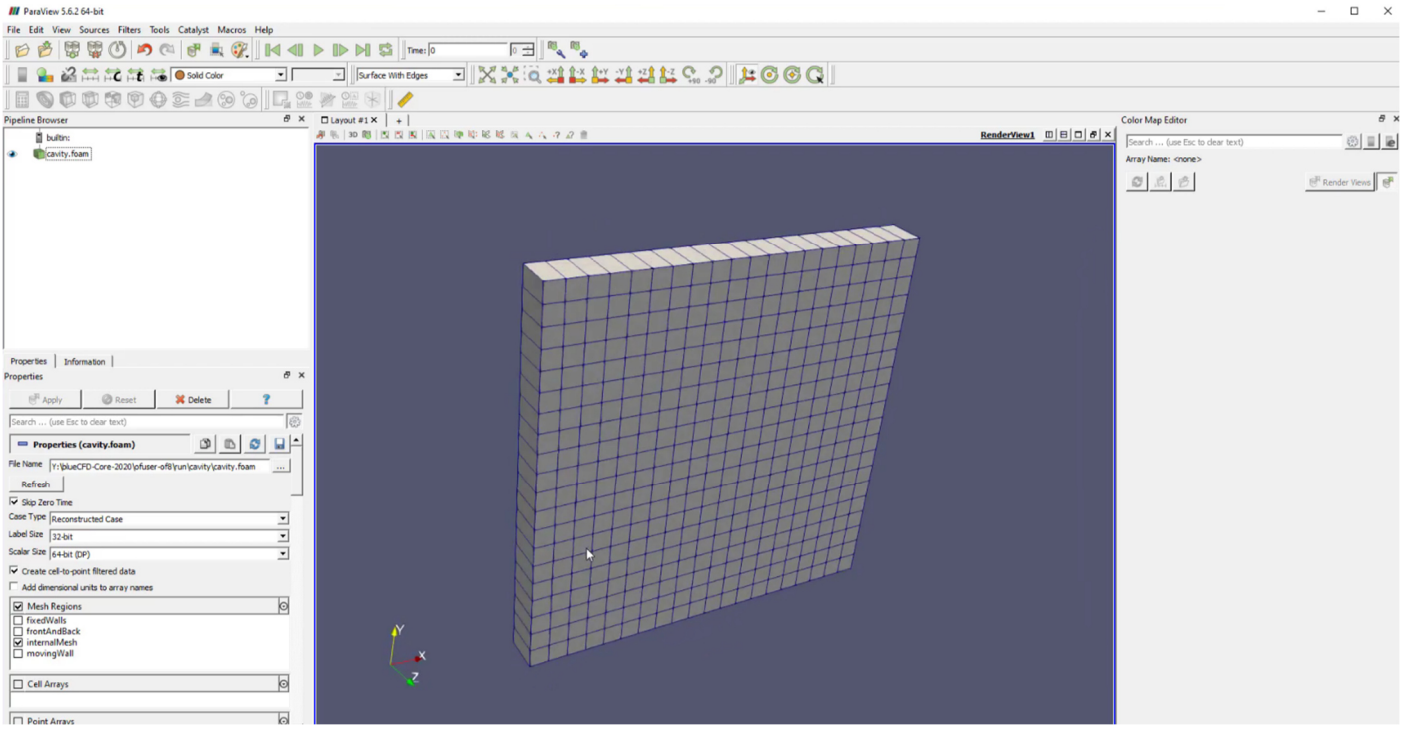


Figura 5. Captura de pantalla ParaView con la superficie mallada de estudio

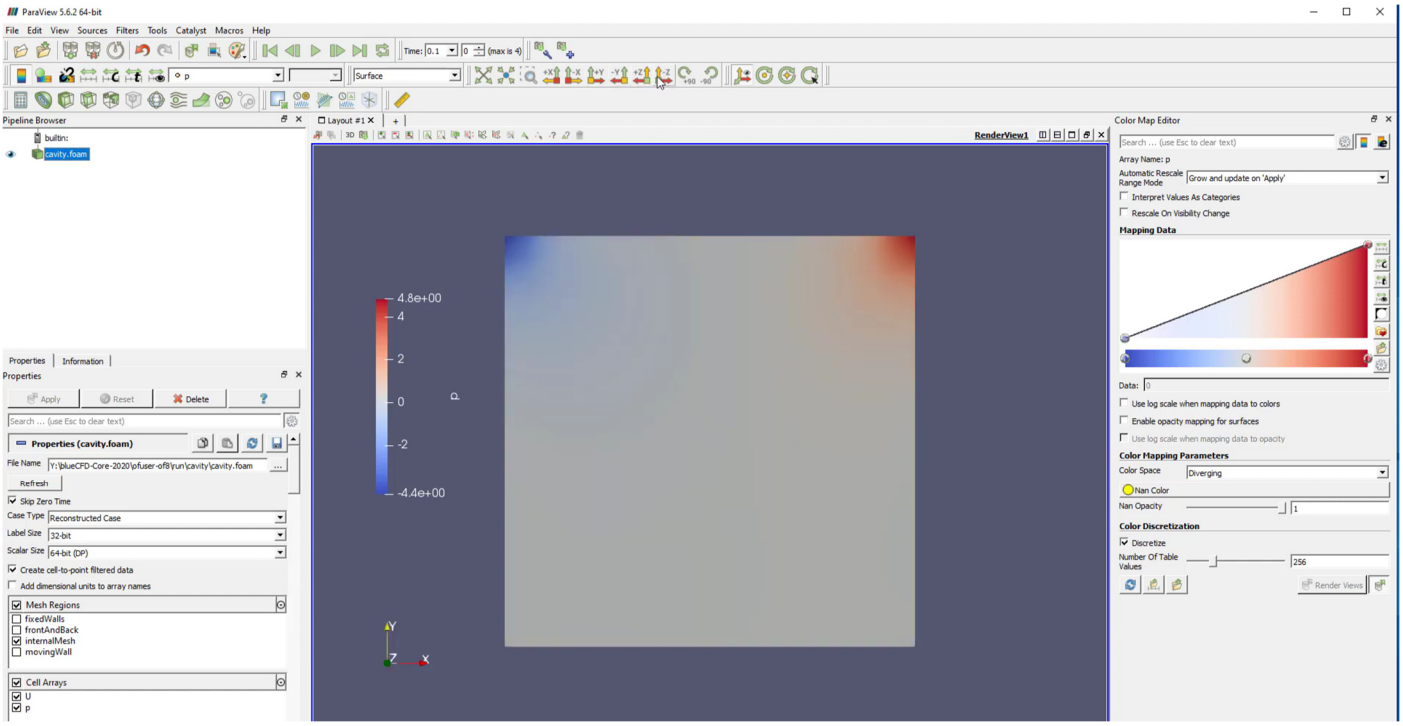


Figura 5. Captura de pantalla ParaView con el análisis de presiones de la superficie de estudio

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

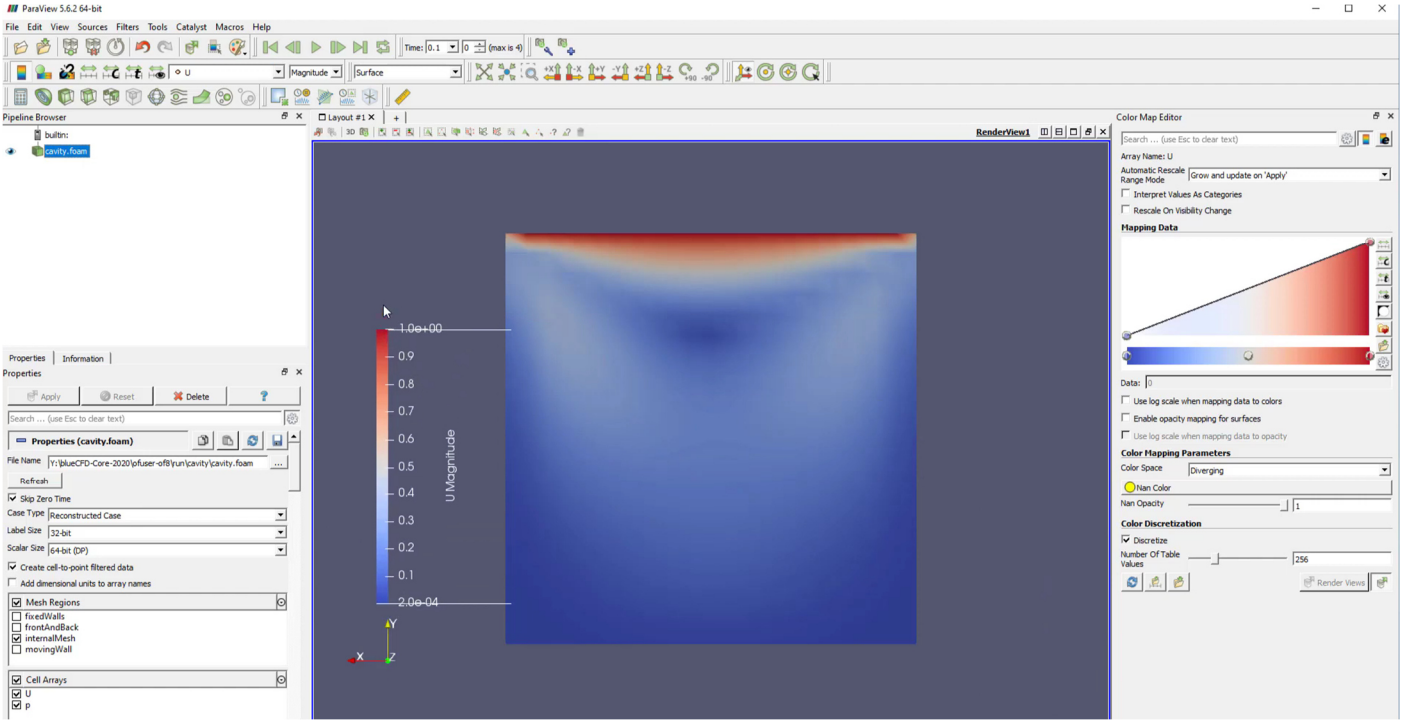


Figura 6. Captura de pantalla ParaView con el análisis de velocidades de la superficie de estudio

Como se puede observar en la figura 6, la velocidad en la pared superior (en el eje x) corresponde a 1 (m/s) como estaba establecido en el código.
Las velocidades en la superficie analizada son de: 1,3 m/s para los vértices a barlovento mientras que a sotavento la velocidad disminuye casi el 80% a valores 1,02 m/s. Estos valores coinciden con los indicados en el reglamento CIRSOC 102 (relación entre barlovento y sotavento.

4. Conclusiones

La simulación detalló un perfil de velocidad bien definido dentro de la cavidad, con un flujo circulatorio inducido por la pared móvil superior. Este flujo se caracteriza por una velocidad máxima cerca de la pared móvil, moviéndose hacia abajo por las paredes laterales y convergiendo en el centro de la cavidad para formar un vórtice dominante. Este fenómeno demuestra la capacidad del software para modelar dinámicas de fluido, proporcionando una base para explorar efectos similares en geometrías más complejas.

La capacidad de modificar y adaptar el código libre permite a los usuarios personalizar las simulaciones para satisfacer necesidades específicas. Esta flexibilidad es especialmente beneficiosa en situaciones específicas no contempladas por los Reglamentos.

Referencias bibliográficas

Stoevesandt, B., et all (2020). OpenFOAM for Wind Energy Engineering: How to Use the Open-Source Toolbox for Wind Energy-Related CFD Simulations. Reino Unido: Elsevier Science.
Holmes, J. D. (2007). *Wind Loading of Structures*. Ed.:Taylor & Francis.
Stafford, T. E., Reinhold, T. A. (2023). *Wind Loads: Guide to the Wind Load Provisions of ASCE 7-22*. Ed.: American Society of Civil Engineers.
Simiu, E. (2011). *Design of Buildings for Wind: A Guide for ASCE 7-10 Standard Users and Designers of Special Structures.* Ed.: Wiley.
Gaspar, J. (2017). *Google SketchUp Pro 8 paso a paso en español.* Ed.:ProBooks.
Selvam, R. P. (2022). *Computational Fluid Dynamics for Wind Engineering.* Ed.: Wiley.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Sistemas de información e informática
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Modelación del estacionamiento de la Facultad Regional Rafaela de la Universidad Tecnológica Nacional para someterla a cargas de viento

Modeling of the Rafaela Regional Faculty parking to subject it to wind loads

Presentación 30/08/2024

Juan Cruz Schmit

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: juancruzschmit@gmail.com

Ligia Molina

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: ligiabril010@gmail.com

Paula Farandato

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Grupo de Investigación de Aplicaciones de Métodos Numéricos en Ciencias e Ingeniería (GIAMNCI), Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: paula.farandato@gmail.com

Resumen

Esta línea de investigación modeló el estacionamiento de la facultad utilizando el software SketchUp, con el objetivo de analizar las interacciones de viento entre las estructuras del estacionamiento. Luego fue importado a OPEN FOAM, un software avanzado de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para simular y estudiar las presiones de viento y las velocidades. El enfoque principal del estudio fue determinar cómo las diferentes estructuras del estacionamiento afectan y son afectadas por la interacción entre las estructuras. La dificultad principal fue la de importar modelos de SketchUp a OPEN FOAM. Las diferencias en los formatos de archivo y las especificaciones de modelado entre estos dos programas presentaron obstáculos técnicos que requirieron soluciones específicas para asegurar una transferencia precisa y funcional del modelo 3D.

Palabras clave: OPEN FOAM; SketchUp; CFD, Cargas de viento.

Abstract

This line of research modeled the faculty parking lot using SketchUp software, with the goal of analyzing wind interactions between the parking structures. This was then imported into OPEN FOAM, an advanced Computational Fluid Dynamics (CFD) software, to simulate and study wind pressures and velocities. The main focus of the study was to determine how the different parking structures affect and are affected by the interaction between the structures. The main difficulty was in importing SketchUp models into OPEN FOAM. Differences in file formats and modeling specifications between these two programs presented technical obstacles that required specific solutions to ensure an accurate and functional transfer of the 3D model.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Keywords: OPEN FOAM; SketchUp; CFD, Wind loads.

1. Introducción

En el campo de la ingeniería estructural comprender la interacción entre las estructuras construidas y las acciones dinámicas del viento, es importante para asegurar la integridad, seguridad y funcionalidad de las infraestructuras. De esto se ocupa el Reglamento CIRSOC (Centro de investigación de los reglamentos de seguridad para las obras civiles) sin embargo no reglamenta interacciones entre estructuras. Este proyecto de investigación abarca el estacionamiento de la facultad donde se encuentran varias estructuras.

El modelado combinó el uso de los softwares SketchUp y OPEN FOAM. SketchUp es un software de modelado 3D destinado a crear diseños arquitectónicos y estructuras, utilizado principalmente en arquitectura e ingeniería. Con este programa se levantaron los volúmenes actuales y futuros del estacionamiento. Posteriormente, este modelo fue importado en OpenFOAM, el cual es un software de simulación de fluidos dinámicos computacionales (CFD) de código abierto, que se emplea para analizar y modelar fenómenos físicos como el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las presiones del viento en estructuras

Modelar edificios sometidos al viento en OpenFOAM permite un análisis del flujo del viento alrededor de las estructuras, proporcionando información sobre patrones de flujo de aire, turbulencias y zonas de presión, lo que ayuda a comprender mejor cómo el viento interactúa con el edificio.

Además, estas simulaciones facilitan la optimización del diseño estructural, identificando áreas que pueden mejorarse para aumentar la resistencia al viento, reducir posibles daños y garantizar la estabilidad estructural.

Uno de los desafíos técnicos enfrentados durante el proyecto fue la integración entre SketchUp y OPEN FOAM, debido a las diferencias en los formatos de archivo y los requerimientos de modelado. Este aspecto del estudio subrayó la importancia de conseguir programas que puedan desarrollar la interoperabilidad entre estas herramientas de diseño y simulación.

Al ser un trabajo en proceso, actualmente estamos simulando diferentes situaciones. Estos nuevos escenarios no han sido cargados a este proyecto pues aún no están terminados.

2. Metodología

Modelado en SketchUp y creación del modelo: la primera etapa consistió en la creación de un modelo 3D detallado de los volúmenes del estacionamiento utilizando SketchUp. Se prestaron especial atención a las dimensiones, incluyendo alturas, longitudes y características arquitectónicas específicas que podrían influir en la dinámica del viento.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

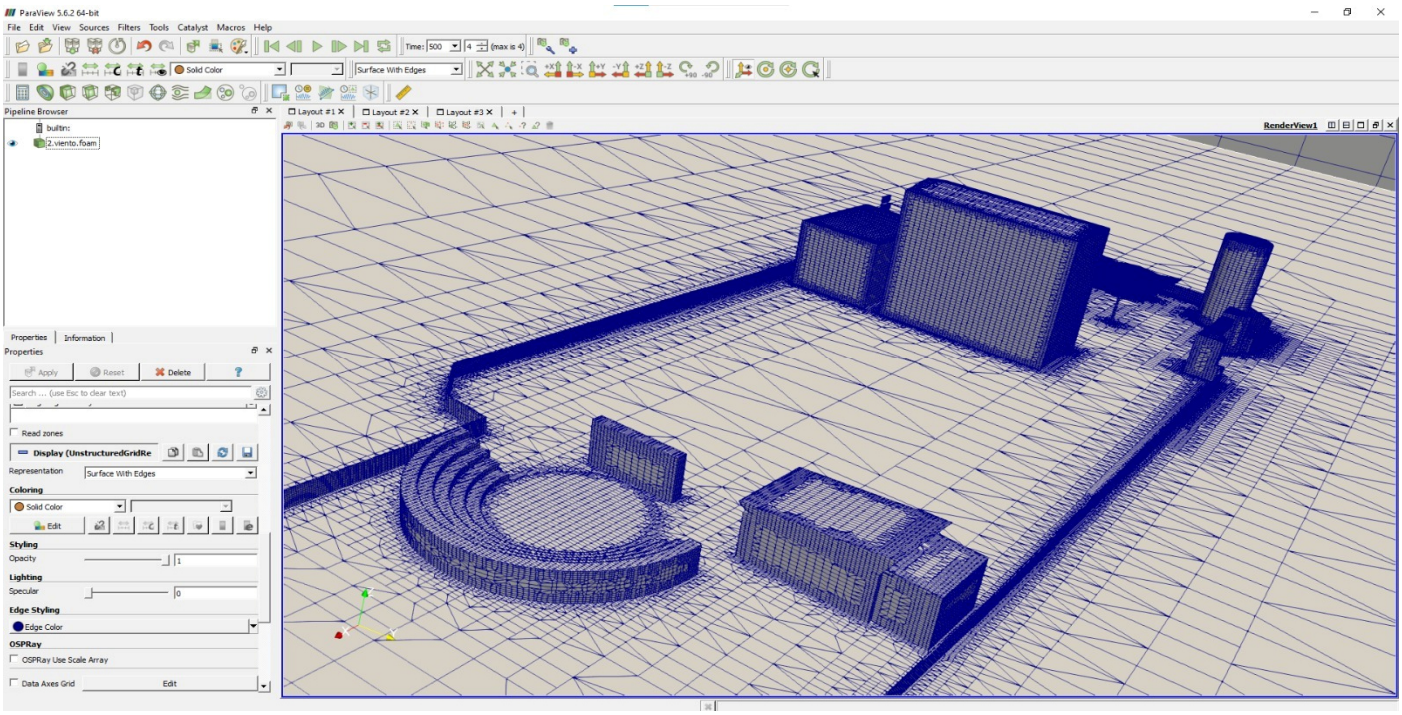


Figura 1. Modelado de los volúmenes existentes y futuros a emplazarse en el estacionamiento

Detallado de Estructuras Adyacentes: Además del estacionamiento, se modelaron estructuras adyacentes y elementos del paisaje que podrían alterar o desviar los flujos de viento, como edificios cercanos y vegetación.

Modelado para la simulación CFD: se procede posteriormente a la exportación y conversión de datos. Una vez completado el modelo en sketchup, se exporta y convierten los datos al formato adecuado para su uso en OPEN FOAM. Esto requirió la utilización de herramientas y scripts para asegurar la integridad del modelo durante la transferencia.

Proceso de generación de malla. En OPEN FOAM, se generó una malla que discretizó el espacio alrededor y dentro del estacionamiento, permitiendo la simulación de flujos de aire y la evaluación de interacciones específicas entre el viento y la estructura.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

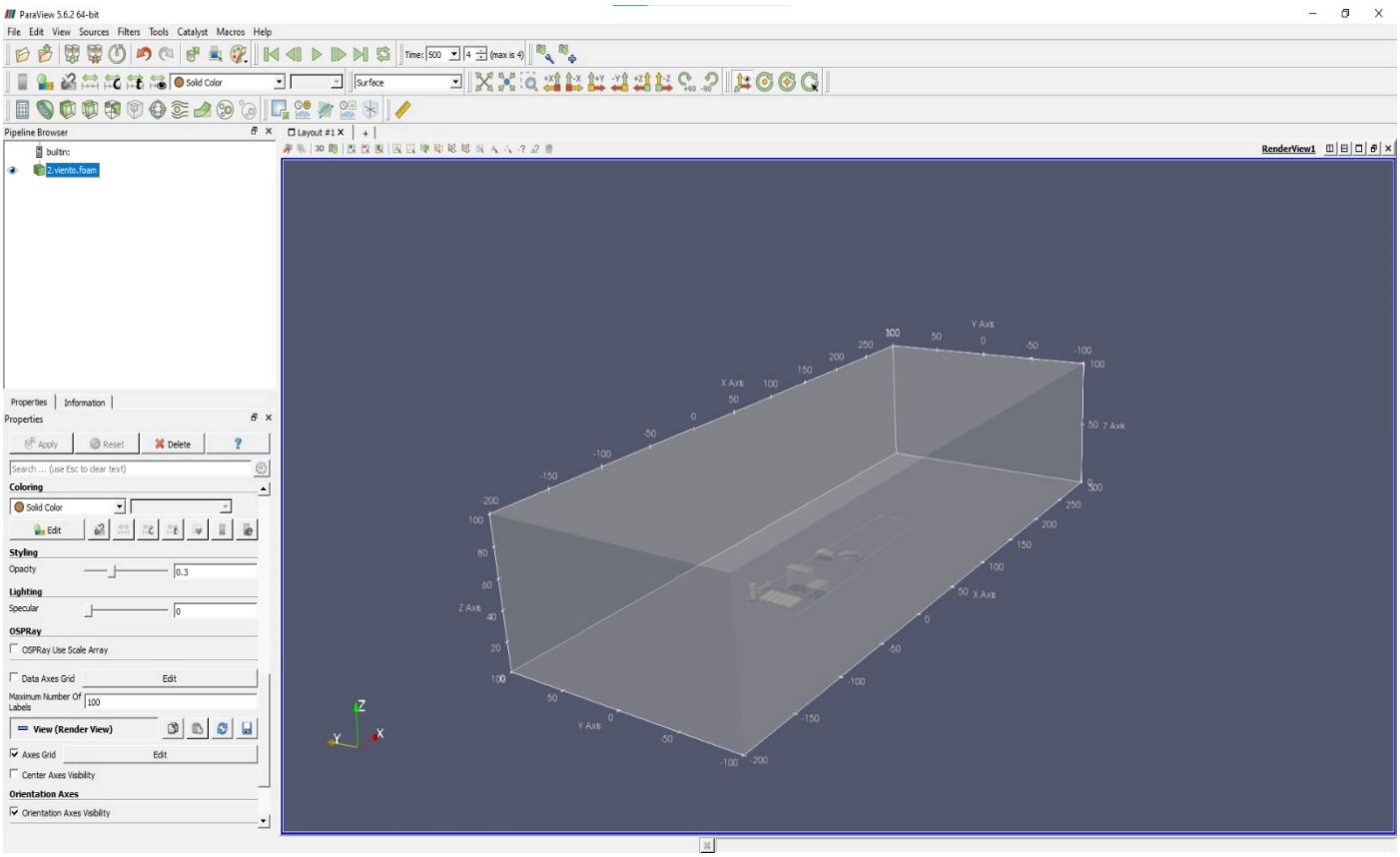


Figura 2. Modelado del mallado del entorno en OPEN FOAM

Simulación de Dinámica de Fluidos Computacional. Se procedió a la configuración de la simulación, para ello se determinaron las condiciones de borde y las propiedades del fluido. Se realizaron corridas de simulación para capturar una serie vientos de los distintos cuadrantes. Cada simulación proporcionó datos sobre las presiones y velocidades del viento en varios puntos de la estructura de las estructuras.

3. Resultados

Las simulaciones revelaron una distribución variada de presiones en las diversas estructuras, con las presiones más altas registradas en las áreas expuestas directamente a los vientos predominantes. Notablemente, las esquinas y los bordes mostraron una acumulación de presiones más altas debido a la turbulencia generada por el flujo de aire que interactúa con las esquinas agudas de la estructura.
Se observaron valores de presión más bajas en las áreas protegidas y en zonas resguardadas por otras construcciones.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

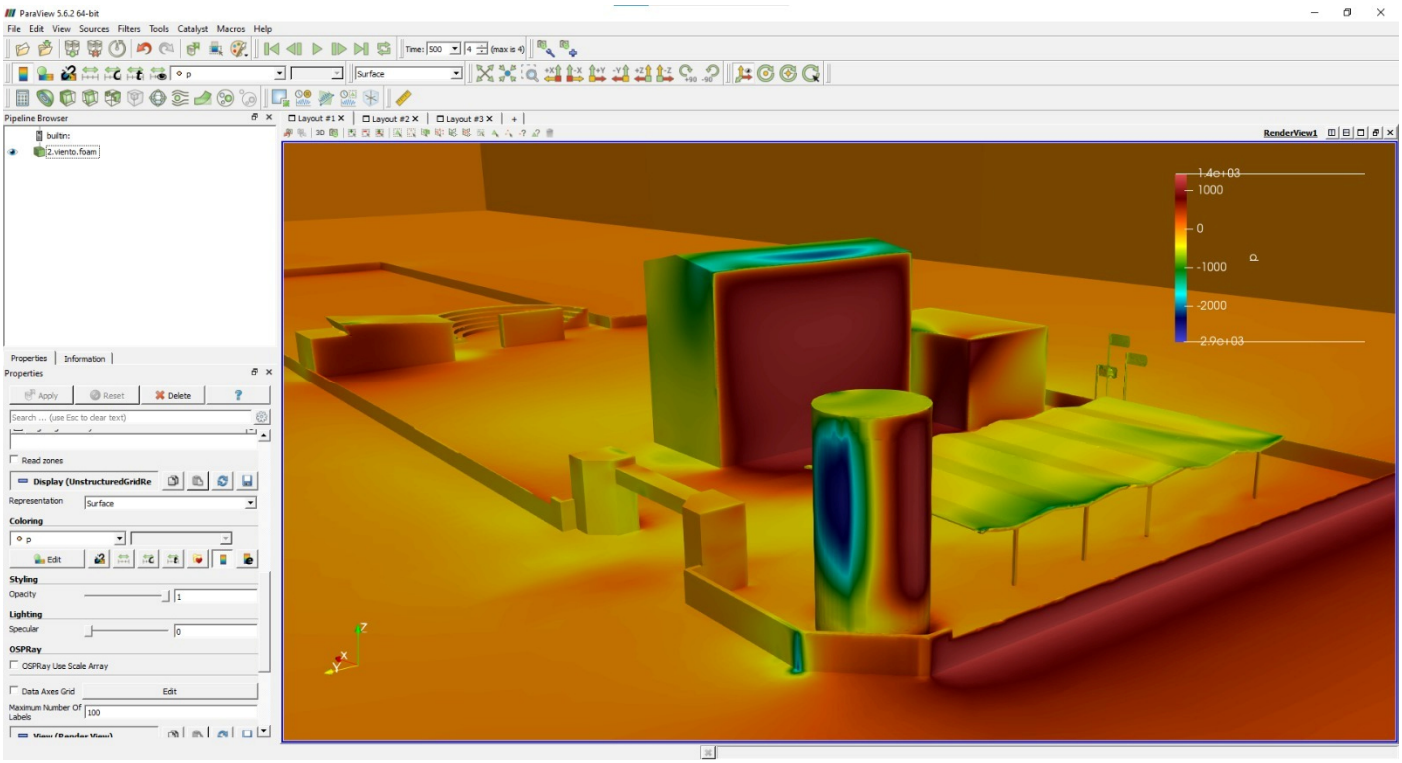


Figura 3. Resultados de presiones que ofrece el programa OPEN FOAM

4. Conclusiones

Los resultados del estudio demuestran cuán importante es considerar el efecto de canalización entre las estructuras que provocan zonas de alta presión no consideradas en los Reglamentos vigentes.
La transferencia de modelos entre SketchUp y OPEN FOAM, resultó compleja, resaltando la necesidad de mejorar la interoperabilidad entre diferentes herramientas de software.
Al momento de iniciar un trabajo es importante que los programas utilizados, sean compatibles para favorecer la capacidad de migrar modelos.
Como futura línea de investigación, dada la complejidad y el potencial de OPEN FOAM en simulaciones de dinámica de fluidos computacional, se propone desarrollar una línea de investigación que se enfoque en mejorar la comprensión, análisis de las variables de esta herramienta.

Referencias bibliográficas

Valencia Clement, G. (2002). Acción del viento sobre las estructuras. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.
Simiu, E. (2011). Design of Buildings for Wind: A Guide for ASCE 7-10 Standard Users and Designers of Special Structures. Alemania: Wiley.
INTI CIRSOC (2005) Acción del viento sobre las estructuras. CABA. Editorial INTI.
Holmes, J. D. (2007). *Wind Loading of Structures*. Ed.:Taylor & Francis.
Stafford, T. E., Reinhold, T. A. (2023). *Wind Loads: Guide to the Wind Load Provisions of ASCE 7-22*. Ed.: American Society of Civil Engineers.
Simiu, E. (2011). *Design of Buildings for Wind: A Guide for ASCE 7-10 Standard Users and Designers of Special Structures.* Ed.: Wiley.
Gaspar, J. (2017). *Google SketchUp Pro 8 paso a paso en español.* Ed.:ProBooks.
Selvam, R. P. (2022). *Computational Fluid Dynamics for Wind Engineering.* Ed.: Wiley.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Sistemas de información e informática
Categoría:	Graduado
Facultad Regional:	Rafaela

Integración de BIM en el Diseño y Análisis de Estructuras Sismorresistentes

Integration of BIM in the Design and Analysis of Seismic-resistant Structures

Presentación 27/09/2024

Luciana Ferrero

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.
E-mail de contacto: ing.lucianaferrero@gmail.com

Resumen

El objetivo de este trabajo es investigar la integración de BIM en el diseño de estructuras sismorresistentes en Argentina, lo cual es crucial en regiones propensas a sismos. Se analizan las características y principales ventajas de la metodología BIM, especialmente al momento de elegir una estructura metálica por sobre otra, evaluando aspectos como constructibilidad y presupuesto.

Palabras clave: BIM; Estructura sismorresistente; Cypecad; Revit

Abstract

The aim of this study is to investigate the application of Building Information Modeling (BIM) in the design of seismic-resistant structures in Argentina, which is essential in regions that are at risk of earthquakes.
This study examines the characteristics and benefits of the BIM methodology, particularly in the context of selecting and financially evaluating one metal structure over another.

Keywords: BIM; Seismic-resistant Structures; Cypecad; Revit

1. Introducción

Debido al auge en tecnología y al infinito acceso a información, definir el fenómeno BIM puede resultar un proceso complejo. A diferencia de lo que comúnmente se cree, BIM no radica en el uso de un único software, sino de la capacidad de utilizar múltiples herramientas y metodologías para construir una estructura digitalmente, antes de proceder a construirla en forma física.
Como menciona Hardin y McCool (2015), “BIM permite a los participantes del proyecto diseñar, analizar, secuenciar y explorar un proyecto a través de un entorno digital donde es mucho menos costoso hacer cambios que en el momento de la ejecución del proyecto, donde los cambios son exponencialmente más costosos. Hoy, esta promesa se está convirtiendo en realidad”.
En la última década, la tecnología de Modelado de Información de Construcción (BIM) ha revolucionado la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción, proporcionando una plataforma integral para la creación, gestión y análisis de modelos digitales de edificios, obras de infraestructura, obras civiles, entre otras.
Por otra parte, la necesidad de diseñar estructuras sismorresistentes es importante y obligatoria en ciertas regiones de Argentina. La presente línea de investigación tiene como objetivo explorar la integración de las tecnologías BIM en el diseño y análisis de estructuras sismorresistentes, evaluando su impacto en la precisión, eficiencia y seguridad de los proyectos de construcción.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El marco conceptual se centra en el Modelado de Información de Construcción (BIM), mencionando a las estructuras sismorresistentes, dejando para una próxima etapa el desarrollo de este último tópico.

1.1 BIM – Definición y características

BIM es una metodología que permite la creación y gestión de representaciones digitales de las características físicas y funcionales de un edificio. Incluye:

- Modelado 3D. Como se puede observar en la siguiente figura, los estándares BIM separan diferentes niveles de detalle de creación de modelos BIM, en función a su etapa constructiva:

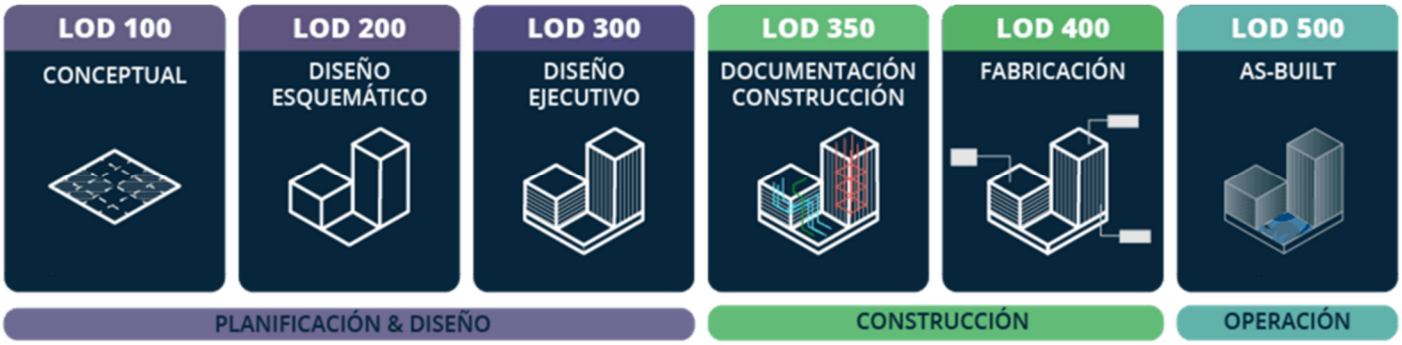


Figura 1. Niveles de desarrollo en construcción (LOD, por sus siglas en inglés).

- Coordinación interdisciplinaria.
- Generación automática de documentación (ya sea utilizando planos 2D, modelos aptos para realidad aumentada, nube de puntos para utilizar con estaciones totales en campo, entre otras).
- Análisis de costos (5D), cómputo y presupuestos detallados.
- Simulación real de la construcción, evaluando su desarrollo en tiempo (utilizando diagramas de Gantt, por ejemplo) vs el coste que implica esa etapa.
- Control de avance de obra y generación de documentación conforme a obra.
- Análisis de ciclo de vida, análisis de iluminación, de eficiencia energética, análisis estructurales, planificación ante catástrofes y eventualidades.
- Facility Management (FM) del Proyecto: gestión y seguimiento continuo de la edificación.

1.2 BIM – Beneficios y aplicaciones

De acuerdo con el BIM Forum Argentina, los beneficios en el uso de BIM son los siguientes:

- Los modelos BIM se utilizan a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio, empezando en el diseño inicial, continuando durante la construcción e incluso más allá, hasta el uso del edificio y la gestión de equipamiento (mundialmente conocido como FM, por sus siglas en inglés, Facilities Management) una vez que el proyecto de construcción ha finalizado.
- Mejora la comunicación entre las partes interesadas; brinda la oportunidad de involucrar a clientes, contratistas, y todos los interesados de una manera temprana en el proceso de diseño.
- Al ser modelos digitales, los datos pueden almacenarse y transferirse fácilmente, pudiendo ordenarlos y filtrarlos según sea necesario.
- La posibilidad de realizar cambios permite explorar y optimizar diferentes opciones de diseño dando soporte a las decisiones de inversión, comparando la funcionalidad, el alcance y los costes de las soluciones.
- Los modelos BIM mejoran la calidad de la construcción, mejoran la planificación y la seguridad en sitio.

1.3 BIM – Herramientas y softwares

Los softwares más actualizados en la metodología BIM son los que se muestran en la siguiente Figura 2, siendo los más utilizados Revit, Navisworks, Civil 3D y Tekla. Para el presente Proyecto de investigación, los softwares potencialmente elegidos serán Revit, Cypecad y Navisworks.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025



Figura 2. Softwares del entorno BIM.

1.4 Estructuras Sismorresistentes:
De acuerdo con CIRSOC 103, una estructura o sistema sismorresistente "es el conjunto de elementos estructurales capaces de resistir cargas gravitatorias y cargas provenientes de la acción sísmica".

2. Metodología

La metodología de esta investigación se desarrollará en 2 etapas:

1. Revisión Bibliográfica: análisis de literatura existente sobre BIM y estructuras sismorresistentes, identificando estudios previos.

2. Selección de Herramientas BIM: Elección de los programas BIM más adecuados para el análisis y diseño de estructuras sismorresistentes.

3. Estudio de Caso: Creación de un proyecto para aplicar la metodología BIM en su diseño sismorresistente. Se realizarán 2 tipologías de pórticos metálicos, introduciendo cargas horizontales.

4. Simulación Sísmica: Integrar herramientas de análisis estructural con el modelo BIM para simular respuestas sísmicas. La premisa será analizar ventajas que otorga arriostrar una estructura con cruces de San Andrés, especialmente a lo que refiere cargas horizontales generadas por sismo.

Próximas líneas de investigación del proyecto:

5. Análisis de materiales y costos en Revit. Cómputo de nudos a partir del modelo obtenido en CYPECAD.

6. Optimización del Diseño: Iterar y optimizar el diseño basado en los resultados de la simulación. Aplicar dentro del software Revit, códigos de Dynamo para facilitar el cálculo iterativo.

7. Evaluación de Resultados: Comparar los resultados obtenidos con los métodos tradicionales de diseño sismorresistente, evaluando mejoras en precisión, eficiencia y seguridad.

8. Validación: Validar los resultados mediante consultas a expertos y comparación con proyectos similares realizados sin BIM.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

3. Resultados

Trabajar en el entorno BIM abre un mundo de posibilidades a la hora de concebir, evaluar, computar y presupuestar proyectos. Al aprender a utilizar el software Revit, se observa que se puede modelar rápidamente una estructura metálica compleja, obtener planos y cómputos detallados, e incluso geolocalizar un proyecto para ayudar a materializarlo en obra.
Sin embargo, al intentar vincular dicho software con dos softwares existentes en el mercado (Tekla y CYPECAD) mediante formatos IFC, aparentemente compatibles entre sí, resultó en una pérdida de geometrías e información en ambos casos, dificultando el cómputo de piezas metálicas en Revit.
En consecuencia, se decidió realizar una primera aproximación en el uso de un único software BIM, como lo es CYPECAD, para simular modelos sísmicos. La prueba consistió en modelar en el software, dos estructuras conformadas por cuatro pórticos cada una.
Como se observa en la siguiente Figura 3, ambas poseen los mismos perfiles estructurales: HEB 300. La diferencia entre una y otra, es el arriostramiento materializado por barras de acero conformando cruces de San Andrés.

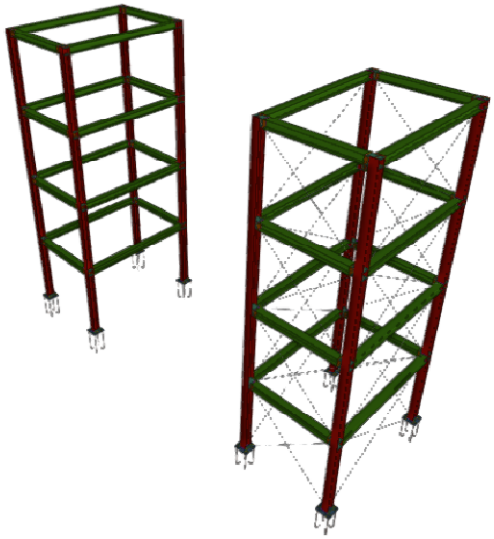


Figura 3. Estructura sin arriostramiento (detrás) y estructura arriostrada con cruces de San Andrés (frente).

Un aspecto a tener en consideración, el software genera automáticamente las uniones, cumplimentando los reglamentos de estructuras metálicas AISC 360.

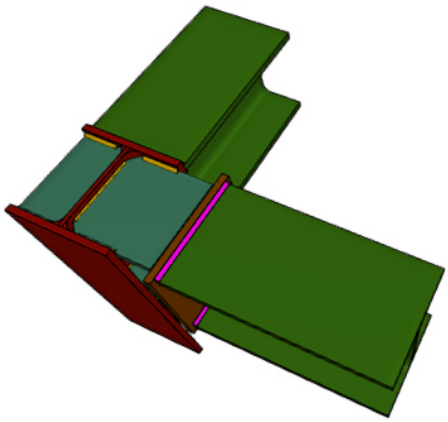


Figura 4. Uniones generadas automáticamente por el software CYPECAD.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Se logró realizar una simulación de ambas estructuras sometidas a las siguientes acciones, detalladas en la Figura 5.

Listados

Pórticos JIT 2024 - Ing Ferrero — Fecha: 22/09/24

1.3.- Sismo

Norma utilizada: CIRSOC 103-2013
Reglamento INPRES - CIRSOC 103 - Parte I - 2013
Normas Argentinas para Construcción Sismorresistente

Método de cálculo: Análisis modal espectral (CIRSOC 103-2013, 7.2)

1.3.1.- Datos generales de sismo

Caracterización del emplazamiento
Zona sísmica (CIRSOC 103-2013, 2.2): 4
Clasificación del sitio (CIRSOC 103-2013, 2.3): A

Sistema estructural

R_x: Factor de reducción (X) (CIRSOC 103-2013, 5.1)	R_x : 6.00
R_y: Factor de reducción (Y) (CIRSOC 103-2013, 5.1)	R_y : 6.00
C_{dx}: Factor de amplificación de deformaciones (X) (CIRSOC 103-2013, 5.1)	C_{dx} : 4.00
C_{dy}: Factor de amplificación de deformaciones (Y) (CIRSOC 103-2013, 5.1)	C_{dy} : 4.00
ξ: Razón de amortiguamiento estructural (CIRSOC 103-2013, 3.5.1.2)	ξ : 5.00

Importancia de la obra (CIRSOC 103-2013, 2.4): A

Parámetros de cálculo
Número de modos de vibración que intervienen en el análisis: Según norma

Fracción de sobrecarga de uso	: 0.50
Fracción de sobrecarga de nieve	: 0.50
Factor multiplicador del espectro	: 1.00

Efectos de la componente sísmica vertical
Considerados según norma (CIRSOC 103-2013, 3.7.1)

No se realiza análisis de los efectos de 2º orden

Direcciones de análisis
Acción sísmica según X
Acción sísmica según Y

Figura 5. Configuración de datos del sismo solicitante en CYPECAD.

Posteriormente, se obtuvo un primer indicador de cómo quedará la deformada para ambas estructuras solicitadas a los mismos esfuerzos.

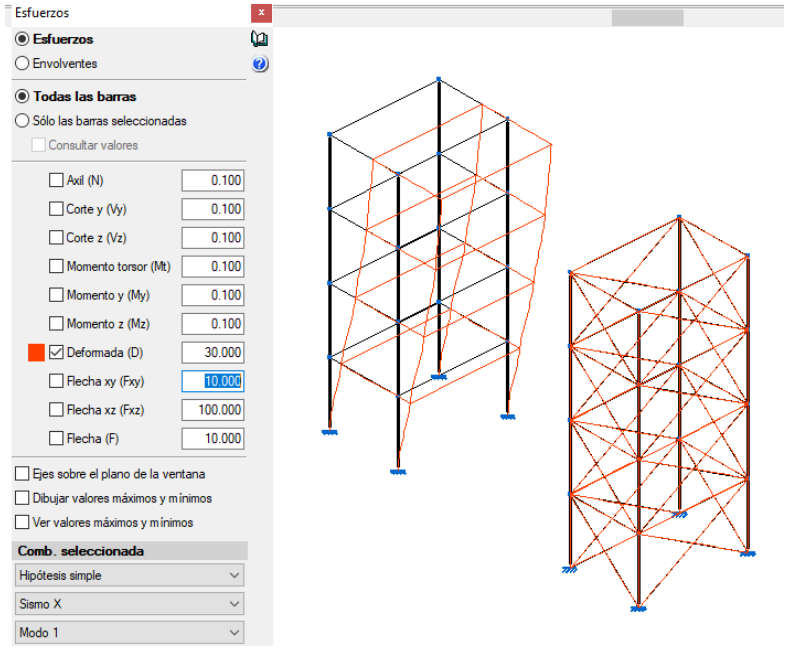


Figura 6. Resultados obtenidos gráfica y numéricamente para ambas estructuras sometidas a la misma acción sísmica.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos por el software CYPECAD demuestran que la utilización de cruces de San Andrés para una estructura sometida a sismo es altamente eficaz para impedir grandes desplazamientos en los ejes X e Y, provocado por solicitaciones horizontales (sismo). De esta forma, las siguientes etapas en la investigación radicarán en su uso, enfocándonos en la optimización estructural y ahorro de material.

Por otra parte, luego de revisión bibliográfica se concluye que la utilización de BIM es un aspecto necesario en la vida diaria del Ingeniero, fomentando a su vez la participación interdisciplinaria, con Arquitectos, Electricistas, Fontaneros y demás rubros de la construcción.

Las próximas líneas de investigación constarán en seguir investigando con expertos acerca de compatibilidad entre softwares e integrar modelos tanto de Tekla como Cypecad, analizando materiales en Revit y evaluando un aspecto tan crucial como lo es el peso de la estructura y su costo de materiales. En adición, se utilizará el software Navisworks con el objetivo de visualizar el desarrollo de la construcción del Proyecto elegido, alineando etapas constructivas con su respectivo diagrama de Gantt.

Por último, englobando todos los conceptos mencionados anteriormente, se realizará un análisis dinámico de la estructura elegida, considerando frecuencias y aceleraciones, para luego ensayar un modelo a escala en una mesa de ensayo sísmica en la UTN FR-Rafaela.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rafaela (UTN-FRRa).

Referencias bibliográficas

CYPE Ingenieros, S.A (2024). CYPECAD Manual del usuario. Madrid: CYPE Ingenieros.

Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J. (2018). Building Information Modeling. Switzerland: Springer Nature.

Hardin, B., McCool D. (2015). BIM and Construction Management. Indianápolis: Wiley.

Hong Guan, X. (2021). Earthquake Disaster Simulation of Civil Infrastructures. Singapur: Springer Nature.

Tickoo, S. (2023). Exploring Autodesk Revit 2024 for Structure, 14th Edition. Schererville: CADSIM Technologies.

BIM Forum Argentina (2024). https://bimdocs.bimforum.org.ar/

ENECA Engineer and consulting Company (2024). https://eneca.nl/blog/best-bim-software

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Elija un elemento.
Categoría:	Elija un elemento.
Facultad Regional:	Elija un elemento.

Desarrollo de un Prototipo de Sistema Recomendador para el Diseño de Objetos de Aprendizaje en Carreras de Ingeniería

Development of a Prototype Recommender System for the Design of Learning Objects for Engineering Education

Presentación 18/10/2024

Pilar Novillo Saravia

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: pilar.novillosaravia@gmail.com

Resumen

En este trabajo, se presenta una evaluación exhaustiva de plataformas y herramientas de autor de código abierto y licencia libre para garantizar la funcionalidad de un prototipo de sistema recomendador que dé soporte técnico y pedagógico a los docentes de Ingeniería para la producción según el enfoque por competencias de recursos educativos digitales. Se fundamenta la selección de Moodle junto a H5P por su flexibilidad en la creación de objetos de aprendizaje, complementado con la conversión a SCORM para asegurar compatibilidad con los estándares LMS. Se mencionan detalles sobre la implementación de la interfaz del sistema de recolección de datos, así como la integración de una ontología y los resultados esperados para lograr recomendaciones precisas y personalizadas. Este enfoque busca mejorar la eficiencia en la creación y gestión de materiales educativos y promover una enseñanza más personalizada y efectiva, asegurando que el sistema recomendador sea innovador y compatible con los estándares educativos actuales.

Palabras clave: Objetos de aprendizaje, Sistema Recomendador, H5P, Moodle, Ontología.

Abstract

Open source and free license authoring platforms and tools were thoroughly evaluated to ensure the integration and functionality of a prototype recommender system that provides technical and pedagogical support to engineering teachers to produce digital educational resources according to the competency-based approach. The selection of Moodle together with H5P is based on its flexibility in the creation of learning objects, complemented with the conversion to SCORM to ensure compatibility with LMS standards. Details of the implementation of the data collection system interface and the integration of an ontology and expected outcomes are mentioned for accurate and personalized recommendations. This approach seeks to improve efficiency in the creation and management of educational materials and to promote more personalized and effective teaching, ensuring that the recommender system is innovative and compatible with current educational standards.

Keywords: Learning Objects, Recommender System, H5P, Moodle, Ontology.

1. Introducción

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

En carreras de Ingeniería es habitual encontrar docentes que, si bien exhiben experticia en su disciplina, carecen de formación pedagógica y en contadas ocasiones hacen capacitación e investigación en el centro universitario como parte de su condición docente.

A su vez, la universidad está experimentando cambios en la forma en que se imparten las clases, con la aparición de nuevas modalidades de enseñanza que complementan o alternan con la enseñanza presencial. Estas modalidades incluyen la enseñanza remota, la enseñanza híbrida y combinaciones de ambas. En este contexto, es esencial que se preste atención al uso de recursos y materiales educativos que sean efectivos para el proceso de aprendizaje y que influyen en la calidad de la educación.

Durante la última década del siglo XX, surgió una tecnología capaz de satisfacer esas necesidades llamada Objetos de Aprendizaje (OA), diseñada para mejorar y potenciar el e-learning (Wiley, 2000). En estos recursos educativos, al funcionar en computadoras para guiar el aprendizaje de los estudiantes, se vinculan de manera indisociable dos dimensiones: la tecnológica y la pedagógica (Coll et al., 2008).

Como respuesta a estas necesidades detectadas surge la idea de desarrollar un prototipo de Sistema Recomendador (SR), mediante el uso de herramientas de Inteligencia Artificial, que dé soporte técnico y pedagógico a los docentes de Ingeniería para la producción según el enfoque por competencias de recursos educativos digitales como los OA.

La elección de una plataforma de licencia libre para desarrollar la herramienta se sustenta en principios éticos fundamentales. En una universidad pública y gratuita, no sería ético requerir a los estudiantes algo que la institución no puede proporcionar debido a limitaciones presupuestarias, como la adquisición de licencias de Software privativo.

El artículo se organiza como sigue. En la sección de Metodología se presenta la evaluación de plataformas para la generación de OA, junto con los fundamentos para seleccionar una de ellas y los resultados que se esperan alcanzar. Finalmente, se exponen las conclusiones.

2. Metodología

2.1 Evaluación de plataformas

Las particularidades del producto de software que se plantea en este trabajo requieren de una plataforma específica para la generación de OA, con soporte para exportar los mismos junto a sus metadatos en formato reutilizables como SCORM (Sharable Content Object Reference Model). Se especificó, además, que cumpliera el requisito de licencia libre y gratuita. A continuación, en la tabla 1 se consigna información general de dos plataformas que fueron evaluadas para la posterior selección de una de ellas.

Tabla 1: Moodle vs eXeLearning.

	Moodle	**eXeLearning**
Versión	4.2.2	2.9
SO	Windows/Mac/Linux	Windows/Mac/Linux
Licencia	GNU Public License	GNU Public License
Lenguaje	PHP	Python 2.7
Web	https://moodle.org/	https://exelearning.net/

En la tabla 2 se resume el estudio comparativo entre Moodle – junto a H5P (HTML5 Package)– y eXeLearning, evaluando diversas características y funcionalidades utilizando un sistema de colores. Este sistema ayuda a identificar rápidamente qué funcionalidades están disponibles en cada plataforma y el nivel de esfuerzo necesario para implementarlas:

- Verde: La funcionalidad está disponible de manera directa en la plataforma, sin necesidad de configuraciones adicionales ni plugins externos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- Amarillo: La funcionalidad no está disponible de manera nativa, pero puede implementarse utilizando extensiones, plugins adicionales, o configuraciones extra.
- Rojo: La funcionalidad no está disponible en la plataforma.

Tabla 2: Funcionalidades de las plataformas.

Criterio de benchmarking	Plataforma		Moodle junto a H5P	eXeLearning
Ayuda	Foros/tutoriales/manuales			
Instalación	Se libera al docente de la instalación de la aplicación			
Facilidades para el Diseño de GUI	Tipo de Contenido	Presentaciones Interactivas		
		Opción múltiple		
		Verdadero/falso		
		Contenidos Multimedia		
		Líneas de Tiempo		
		Ventanas Emergentes		
		Caminos Diferentes		
Exportación de contenido	Exportación en formato SCORM			
Definición de metadatos	Incluye modelos de metadatos			
Extensión	Desarrollo de nuevas funcionalidades			
	Integración con otras plataformas			

2.2. Fundamentos de la selección

2.2.1. Moodle vs eXeLearning: generación de OA

Moodle es una plataforma de aprendizaje diseñada para proporcionar a educadores, administradores y estudiantes un sistema integrado único, robusto y seguro para crear ambientes de aprendizaje personalizados. Es un sistema de gestión del aprendizaje (LMS, por su sigla del inglés Learning Management System) completo, proporciona herramientas para evaluar el desempeño de los estudiantes, como calificaciones, informes y análisis.

Moodle tiene la confianza de instituciones y organizaciones grandes y pequeñas, incluyendo la UTN FRSF. El número de usuarios de Moodle a nivel mundial, tanto en uso académico como empresarial, lo hace la plataforma de aprendizaje más usada del mundo.

Moodle proporciona un conjunto de herramientas para la creación de OA, entre ellos destacamos el recurso Lección, el cual le permite a los profesores crear ejercicios 'ramificados' donde le presentan contenido a los estudiantes y entonces, dependiendo de sus respuestas, son dirigidos hacia páginas específicas. El contenido puede ser texto o multimedia. Asimismo, Moodle se integra con H5P, permitiendo a los educadores crear contenido, como por ejemplo presentaciones, exámenes y videos interactivos. El contenido H5P puede ser creado en Moodle, o en el sitio h5p.com o con la aplicación LUMI (https://lumi.education/) para escritorio, y añadido al curso como una Actividad H5P o incrustado dentro de cualquier otra actividad o recurso.

Al mismo tiempo, Moodle es compatible con paquetes SCORM, lo que permite la importación y ejecución de OA empaquetados según este modelo. Esto es útil para reutilizar contenido de aprendizaje de otras plataformas.

eXeLearning es una herramienta de software gratuita que se utiliza para crear contenidos web educativos interactivos, en formato XHTML (eXtensible HiperText Markup Language) o HTML5 (HyperText Markup Language, versión 5) y permite crear páginas web fácilmente navegables que incluyen texto, imágenes, actividades interactivas, galerías de imágenes o clips multimedia. Todos los materiales educativos generados con eXeLearning se pueden exportar en diferentes formatos digitales como SCORM, para utilizarlos de forma independiente o integrarlos a un LMS como Moodle.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Una de las características clave de eXeLearning es la capacidad de definir metadatos para los OA, lo cual es esencial para su reutilización y gestión efectiva. Permite clasificar o catalogar contenidos educativos según diferentes modelos de metadatos como Dublin Core, LOM, LOM-ES.

Sin embargo, no ofrece una gestión avanzada de la interacción con los estudiantes ni seguimiento del progreso, no es una plataforma LMS completa y carece de funciones de gestión y comunicación. Aunque es fácil de usar, puede requerir tiempo para dominar las características más avanzadas.

A su vez, en su versión tradicional, no es una herramienta basada en línea, esto significa que requiere descargar e instalar el software en un dispositivo para poder utilizarlo y crear materiales educativos. Actualmente, está disponible para GNU/Linux, Microsoft Windows y Mac OS X.

2.2.2. Moodle vs. eXeLearning: implementación del SR

Moodle es proporcionado gratuitamente como software de Código Abierto. Cualquiera puede adaptar, extender o modificar Moodle, tanto para proyectos comerciales y no-comerciales, sin cargos por licenciamiento. Uno de sus principios fundamentales es su extensibilidad, y esto se consigue principalmente mediante el desarrollo de plugins, extensiones adicionales que permiten agregar nuevas características y capacidades que no están disponibles en la instalación base de Moodle. Hay varios tipos de plugins disponibles, cada uno diseñado para una funcionalidad específica:

- Actividades: son tipos esenciales de plugins en Moodle ya que proporcionan actividades que los profesores pueden incluir en los cursos. Por ejemplo: Foro, Cuestionario y Tarea.
- Bloques: pequeñas pantallas de información o herramientas que pueden desplazarse por las páginas. Por ejemplo: Bloque de calendario, que muestra un calendario con eventos del curso.
- Locales: permiten añadir funcionalidades específicas a nivel de sitio que no están directamente relacionadas con los cursos o usuarios individuales. Los plugins locales se utilizan en casos en los que ningún plugin estándar es adecuado.

Si uno no está familiarizado con la administración de Moodle y conocimientos de PHP y HTML, podría requerir tiempo y esfuerzo adicional. Sin embargo, Moodle cuenta con una amplia documentación segmentada por temas, lo cual facilita el acceso a información específica y detallada. Esta documentación incluye numerosos ejemplos prácticos que ayudan a los desarrolladores a comprender y aplicar diversas funcionalidades del sistema, ofrece guías detalladas sobre cómo crear plugins y extensiones. Al mismo tiempo, la API de Moodle para la manipulación de formularios, archivos y base de datos está bien documentada, lo que facilita la integración de nuevas funcionalidades y servicios.
Asimismo, Moodle cuenta con una gran comunidad de usuarios y desarrolladores muy activos en blogs y foros, donde comparten sus experiencias, plantean dudas y ofrecen soluciones. Esto crea un entorno de colaboración que facilita la resolución de problemas y el intercambio de conocimientos.
Por su parte, eXeLearning, al ser también de código abierto, da libertad a los usuarios para modificar y mejorar el software según sus necesidades. Sin embargo, se puede personalizar en cierta medida, la flexibilidad para adaptarse a casos muy específicos puede ser limitada, ya que eXeLearning enfrenta un desafío significativo: la falta de documentación específica para la creación de extensiones. La ausencia de tutoriales detallados y recursos educativos adecuados hace que este proceso sea complejo y desalentador, especialmente para aquellos sin sólidos conocimientos de programación en JavaScript y Python.

2.2.3. SCORM vs. H5P

Las herramientas tradicionales para la creación de OA están basadas en el modelo SCORM, un conjunto de especificaciones para estandarizar la creación y distribución de OA. Su objetivo principal es asegurar la interoperabilidad, accesibilidad y reusabilidad de los contenidos educativos en diferentes LMS. Los paquetes SCORM se crean generalmente con herramientas específicas, como pueden ser exeLearning, Adobe Captivate o Lectora, y se exportan como archivos ZIP que pueden ser importados en cualquier LMS compatible con SCORM. SCORM permite un seguimiento detallado del progreso del estudiante, incluyendo puntuaciones, tiempos de acceso y completitud de los módulos.

H5P es una herramienta relativamente reciente que permite a los usuarios crear, compartir y reutilizar contenido interactivo utilizando HTML5 de una manera muy sencilla y sin costo. Esta herramienta se distribuye bajo el licenciamiento de tipo MIT (Massachusetts Institute of Technology) de software libre.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

H5P permite un seguimiento más detallado y sofisticado del comportamiento del usuario, incluyendo actividades fuera de línea, ya que utiliza el estándar Experience API (xAPI) con el cual, es posible utilizar los OA en diferentes plataformas permitiendo así el registro y almacenamiento de las actividades de los usuarios con el recurso (Torrance y Wiggins, 2016), aunque su capacidad en este aspecto puede variar dependiendo del LMS y de cómo se haya implementado.

Los contenidos creados con H5P son muy variados, incluyendo cuestionarios, presentaciones interactivas, videos enriquecidos, juegos educativos, y más.

Aunque H5P está ganando popularidad, no todos los LMS lo soportan nativamente, por lo que para crear OA con la herramienta H5P a través de un LMS, hay que incorporar H5P a la plataforma educativa mediante el plugin disponible en el portal www.hp5.org.

En resumen, H5P representa una alternativa moderna y accesible para crear contenido educativo interactivo que puede usarse en LMS. Sin embargo, SCORM sigue siendo el estándar más utilizado en la creación de OA debido a su amplia adopción y compatibilidad con la mayoría de los LMS. Por lo tanto, es razonable implementar una solución que convierta contenido H5P a SCORM para aprovechar lo mejor de ambos mundos.

3. Resultados

El objetivo previsto es implementar un prototipo del SR que ayude a los docentes de ingeniería a crear sus materiales educativos. Actualmente, se está desarrollando un plugin local de Moodle con una interfaz que permite al docente seleccionar los resultados de aprendizaje de la asignatura a los cuales el OA refina. Esta interfaz también permite seleccionar la unidad de la asignatura y los tópicos que el OA desarrollará, estableciendo un orden específico para ellos.

Además, se definen las cuatro componentes del resultado de aprendizaje del OA: el verbo, el objeto de conocimiento, la condición y la finalidad. Posteriormente, se crean los archivos H5P, ya sea para contenido, actividades, ejemplos o evaluación, determinando a qué tópico ayuda a comprender.

Todos los datos necesarios para la visualización en la interfaz se obtienen del preprocesamiento de los diseños curriculares de carreras de ingeniería y de los planes de cátedra de sus asignaturas. La extracción de datos se realiza mediante técnicas de procesamiento de lenguaje natural (NLP, por su sigla del inglés Natural Language Processing), campo de la inteligencia artificial que se enfoca en la capacidad de las computadoras para entender, interpretar y generar lenguaje humano de manera natural (Jurafsky y Martin, 2019). En este contexto, las técnicas de NLP se emplean para analizar los textos de los diseños curriculares y los planes de cátedra, identificar los elementos clave de manera que puedan ser utilizados por el SR. Estas técnicas permiten automatizar el proceso de extracción de información relevante y asegurar que los datos sean precisos y consistentes, facilitando así la creación de materiales educativos alineados con los objetivos curriculares.

Como se representa en la Figura 1, la información extraída junto con la información ingresada a través de la interfaz, que incluye todas las componentes de los OA, se almacena en una ontología siguiendo el modelo arquitectónico propuesto en Bertossi y otros (2023). Esta ontología es gestionada mediante los servicios de Apache Jena Fuseki, que permite almacenar, consultar y gestionar datos RDF (Resource Description Framework) de manera eficiente. Esto asegura que la información esté organizada de forma coherente y accesible para el SR.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

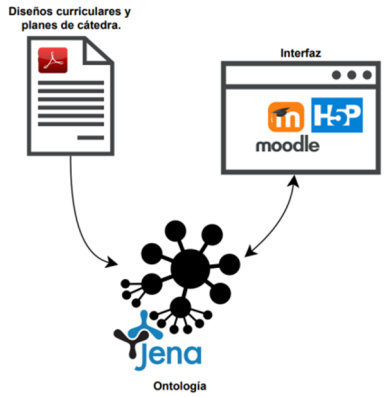


Figura 1: Diagrama de Almacenamiento de Información en la Ontología

Por su parte, los archivos H5P generados se almacenan en la base de datos correspondiente de Moodle. Esto se debe a que Moodle ya cuenta con un sistema robusto y eficiente para la gestión y almacenamiento de estos archivos, asegurando su correcta integración y acceso dentro del entorno de aprendizaje.

4. Conclusiones

En la etapa de análisis de las plataformas de desarrollo de OA, se ha llevado a cabo una evaluación exhaustiva de las plataformas y herramientas disponibles para garantizar la mejor integración y funcionalidad de un SR que asista a los docentes mientras construyen sus OA. La elección de Moodle junto a H5P como tecnología para crear OA representa un avance significativo en cuanto a flexibilidad y riqueza de los recursos educativos. Sin embargo, dado que SCORM sigue siendo el estándar más ampliamente utilizado en muchos LMS, se ha decidido implementar una conversión a SCORM para asegurar una máxima compatibilidad y facilidad de integración con herramientas existentes.

La implementación de la interfaz del SR, que permite a los docentes seleccionar y organizar los OA, se ha diseñado para ser intuitiva y efectiva. Esta interfaz está integrada con una ontología gestionada a través de los servicios de Apache Jena Fuseki, que facilita la organización y consulta de datos educativos.

Los próximos pasos en el desarrollo del SR incluyen una integración más profunda con la ontología mediante consultas SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language), lenguaje de consulta y protocolo utilizado para buscar y manipular datos almacenados en formatos RDF. Estas consultas permitirán razonar sobre las reglas de inferencia definidas en la ontología, facilitando la obtención de recomendaciones precisas y personalizadas.

Esta combinación de tecnologías modernas permitirá desarrollar un prototipo de SR que no sólo mejore la eficiencia en la creación y gestión de materiales educativos, sino que también impulse una enseñanza más personalizada y efectiva. Este enfoque integral asegura que el SR sea tanto innovador como compatible con los estándares y prácticas actuales en el ámbito de la educación.

Referencias bibliográficas

Bertossi, V; Romero, L y Gutiérrez, M. (15-17 de setiembre 2023). Una arquitectura de sistema recomendador para el desarrollo de objetos de aprendizaje para ingenierías bajo el enfoque por competencias. XXVI Congreso Internacional EDUTEC.

Coll, C., Mauri, T. y Onrubia, J. (2008). Los entornos virtuales de aprendizaje basados en el análisis de casos y la resolución de problemas. En C. Coll y C. Monereo (Eds.), Psicología de la educación virtual. Morata.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Jurafsky, D. y Martin, J. (2019). Speech and Language Processing. https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/

Torrance, B. Y. M., y Wiggins, C. (2016). “What Is xAPI ?” TD Talent Development, 70(2), 28-31.

Wiley, D. A. (2000). Connecting learning objects to instructional design theory: A definition, a metaphor, and a taxonomy. En D. A. Wiley (Ed.), The instructional use of learning objects, 2830(435), 1-35. https://members.aect.org/publications/InstructionalUseofLearningObjects.pdf

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Sistemas de información e informática
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Reconquista

Herramienta para el control en tiempo real de procesos de manufactura aditiva

Real-time productivity control tool for additive manufacturing processes

Presentación 18/10/2024

Ezequiel Agustín Robert

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: erobert3122@comunidad.frrq.utn.edu.ar

Resumen

Actualmente, los procesos de manufactura atraviesan un cambio de paradigma; crece la tendencia de fabricar componentes cada vez más sofisticados e intricados, a la vez que entran en acción las tecnologías de la Industria 4.0. Las técnicas de fabricación aditiva juegan un papel esencial en este cambio. No obstante, estos procesos emergentes carecen de repetibilidad y reproducibilidad para la fabricación de piezas a gran escala porque no se comprende del todo las relaciones entre resultados y parámetros de fabricación. También, las máquinas suelen fallar inesperadamente, interrumpiendo un proceso. En este trabajo se diseñó un software, programado con Python, para monitorear de forma remota y en tiempo real, el proceso de manufactura de una impresora 3D de polímeros. Como resultado, se obtuvieron imágenes cada cinco minutos de la máquina en funcionamiento a través de una webcam, se enviaron a la nube de OneDrive y se descargaron en un dispositivo móvil.

Palabras clave: Manufactura aditiva; Python; Monitoreo en tiempo real; Industria 4.0.

Abstract

Manufacturing processes are currently undergoing a paradigm shift; there is a growing trend to manufacture ever more sophisticated and intricate components, while Industry 4.0 technologies are coming into play. Additive manufacturing techniques play an essential role in this shift. However, these emerging processes lack repeatability and reproducibility for large-scale part manufacturing because the relationships between outputs and manufacturing parameters are not fully understood. Also, machines often fail unexpectedly, interrupting a process. In this work, a software, programmed with Python, was designed to monitor, remotely and in real time, the manufacturing process of a polymer 3D printer. As a result, images were obtained every five minutes of the machine in operation through a webcam, sent to the OneDrive cloud and downloaded to a mobile device.

Keywords: Additive manufacturing; Python; Real-time monitoring; Industry 4.0.

1. Introducción

Durante las últimas 4 décadas, se han estado desarrollando distintas tecnologías de manufactura aditiva o Additive Manufacturing (AM) las cuales poseen ciertas ventajas sobre los procesos de manufactura tradicional o Traditional Manufacturing (TM), como son la capacidad de producir piezas con geometrías complejas, la generación de estructuras internas reticuladas o de tipo *lattice* (permiten resistir las solicitaciones pero con menor cantidad de material) y la obtención de partes con forma casi final o Near Net-Shaped (NNS) (reducen la necesidad de maquinado adicional). Por lo que, con estas técnicas se obtienen menores tiempos y costos en los procesos de manufactura, una mayor durabilidad y eficiencia en

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

los productos. Estas cualidades son de vital importancia en industrias como la aeroespacial, la automotriz, la biomedicina, la herramental y la construcción (Armstrong et. al., 2022).
En cuanto a los materiales empleados en la manufactura aditiva, estos comprenden los metales, polímeros, cerámicos y compuestos.
Sin embargo, esta tecnología presenta desafíos relacionados con la comprensión de los efectos de la estructura y los parámetros de impresión (velocidades, trayectorias de las herramientas, temperaturas, condiciones del entorno, relleno, espesor de capas, etc.) sobre las propiedades mecánicas del producto. Esto significa que, al contrario de lo que ocurre con la manufactura tradicional, existe una incertidumbre sobre los resultados del proceso que dificulta la reproducción de piezas con características estables y consistentes en el tiempo (Armstrong et. al., 2022).
Asimismo, en la manufactura aditiva de polímeros es frecuente que se presenten inconvenientes durante la impresión que derivan en la suspensión del proceso, con las consecuentes pérdidas de material y tiempo; como por ejemplo, el impacto de la boquilla sobre la pieza puede hacer que ésta se desprenda de la cama de impresión, o incluso es posible que se generen incendios menores en las máquinas debido a instalaciones deficientes de control. Por otra parte, es usual que un operario trabaje sobre varias impresoras a la vez y a distancia.
Con el objetivo de ayudar a resolver los inconvenientes descritos, se propone implementar una herramienta de monitoreo en tiempo real de procesos de manufactura, aplicada a una impresora con tecnología de modelado por deposición fundida o Fused Deposition Modeling (FDM) de piezas de plástico. No obstante, no quita que el uso de esta herramienta se extienda a otros procesos de manufactura tanto aditiva como tradicional.
La propuesta consiste en desarrollar un software que permita tomar fotografías (cada cierto intervalo de tiempo) de la impresora por medio de una webcam conectada a una computadora, y almacenar la imagen obtenida en un directorio que, a su vez, se halla sincronizado en la nube de OneDrive. Luego, mediante un smartphone se accede a la misma nube y se descarga la imagen tomada, permitiendo el monitoreo del proceso y generando un historial visual del funcionamiento de la máquina.
En cuanto a la literatura actual, se puede citar el trabajo de Cai et al. (2023), en el cual se resumen los sistemas de monitoreo y control in-situ que más recientemente se aplican en procesos de manufactura aditiva de metal por láser, haciendo énfasis en los principios de los mecanismos de formación de defectos, análisis de señales y estrategias de control en lazo cerrado. También, se tienen estudios como el de AbouelNour y Gupta (2022), donde se recopilan estrategias de monitoreo in-situ visuales y acústicas, para detectar fallas sub-superficiales y defectos internos en manufactura aditiva de metales o Metal Additive Manufacturing (MAM). En Malik et. al. (2019), se desarrolla una herramienta para monitorear en tiempo real con realidad aumentada, un modelo en 3D de la pieza que se genera a medida que se imprime, escaneando capa por capa. A su vez, existe una herramienta de código abierto llamada OctoPrint (Häußge, 2024) que, por medio de una interfaz web, permite controlar y monitorear una o varias impresoras (aquellas de uso personal y que trabajan con materiales a base de polímeros). Actualmente, cuenta con una serie de plugins que permiten conectarse de forma remota a la máquina, por medio de Internet. Sin embargo, está diseñado para ser instalado, generalmente, en un sistema embebido de bajo costo (Raspberry Pi, Orange Pi, etc.), el cual se conecta a la impresora y actúa como servidor.
El resto de este trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se da la metodología, donde se desarrolla la propuesta describiendo el funcionamiento de los componentes del sistema y las funciones principales utilizadas en el código del programa realizado en el lenguaje de programación Python; en la sección 3 se muestran los resultados obtenidos para una prueba realizada; finalizando con la sección 4, donde se dan algunas conclusiones y se discuten posibles extensiones y futuras líneas de investigación.

2. Metodología

En esta sección se describen los elementos del sistema propuesto, y a su vez se brinda precisiones sobre conceptos y herramientas empleadas para su desarrollo.

2.1 Elementos del Sistema Implementado

La herramienta se compone de un sistema de elementos de hardware (webcam, computadora) y de software (programa y nube de sincronización).

Como computadora se utiliza una notebook con sistema operativo Windows 10, la cual tiene instalada el paquete de software libre y código abierto Anaconda, que incluye una distribución de Python (versión 3.9.7) y de Spyder, un entorno de desarrollo integrado o Integrated Development Environment (IDE) donde se escribe el código y se genera y testea el

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

programa. A su vez, cuenta con la sincronización de directorios con la nube de OneDrive por lo que, al guardar las imágenes tomadas en una carpeta sincronizada, se sincronizan también las capturas para simplificar su acceso y visualización de forma remota. En la prueba realizada, se accede a las imágenes a través de la aplicación de OneDrive de un smartphone con Android.

La webcam utilizada se conecta por puerto USB a la computadora. Cabe aclarar que la laptop ya cuenta con una cámara integrada por encima de la pantalla, pero se opta por utilizar una externa con el fin de facilitar el ajuste del encuadre de la imagen a obtener.

La nube de sincronización solamente envía las capturas de forma unilateral, es decir, de la notebook al dispositivo móvil. La tarea de sincronizar los archivos de los directorios con la nube es realizada por la aplicación de OneDrive instalada en la computadora.

Por su parte, el programa informático se escribe en lenguaje Python y se desarrolla en el IDE mencionado. La aplicación compilada se ejecuta en la consola de comandos (CMD) de Windows en la misma computadora a la cual se conecta la webcam. Al iniciar el programa, se le indica al usuario que especifique la duración del proceso a monitorear en horas y el tiempo del intervalo entre capturas en minutos. Para la prueba realizada, se eligen diez horas de seguimiento, y se opta por establecer cinco minutos entre captura de imágenes con el fin de conseguir un equilibrio entre el almacenamiento del disco a consumir y la rapidez de la respuesta del usuario ante eventuales inconvenientes.

En la Figura 1 se aprecia un esquema del sistema implementado, donde se puede observar los elementos descritos.

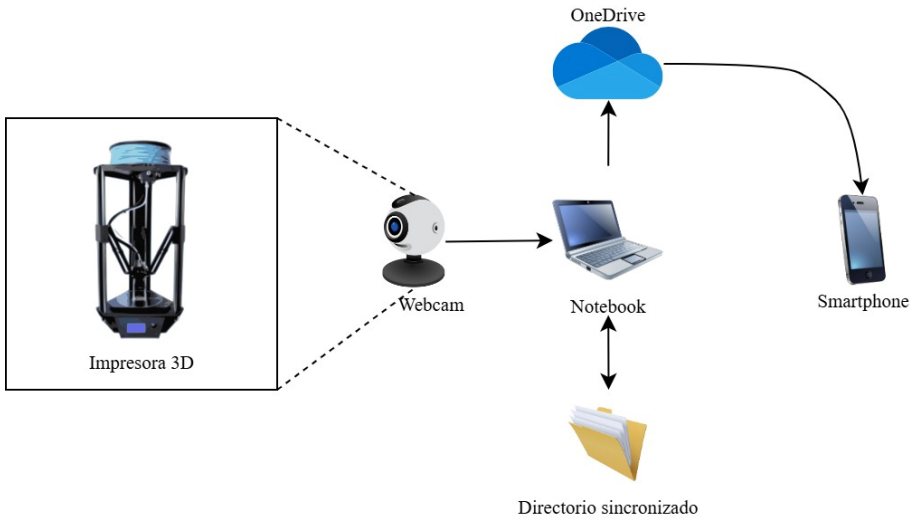


Figura 1. Esquema del sistema planteado.

2.2. Representación del Tiempo en Informática

En los sistemas informáticos, una de las formas de representar el tiempo es mediante un número que cuenta los segundos desde el epoch, el cual es una época informática que se toma como el punto cero de referencia del inicio del tiempo (Python Software Foundation, 2024). El epoch se ubica en el primero de enero de 1970 a las 00:00:00 (UTC). En el código realizado para este trabajo, las variables de tiempo se manejan en segundos desde el epoch.
Otro formato estándar para representar el tiempo consiste en una lista de nueve enteros, cada uno de los cuales almacena un atributo del tiempo, como son la hora (0 a 24), el día de la semana (el 0 es lunes), el día del año (1 a 366), el año, entre otros. En este programa, se utiliza este formato para indicar la hora y el día en que se tomó una captura. Ambas representaciones del tiempo son posibles de controlar en Python gracias a la librería time.

2.3. Funciones Principales del Código

Las funciones principales definidas en el código del programa son: countdown (cuenta regresiva) y takePicture (tomar imagen). A su vez, otras funciones que cumplen un rol fundamental, pero son propias de sus respectivas librerías, son imwrite (escribir imagen) y read (toma una captura de la webcam).
La función countdown (ver Figura 2) es, en síntesis, un temporizador doble. Por una parte, en un ciclo while, va disminuyendo la variable (tI) que almacena el tiempo restante (en segundos) para que se tome una captura. Cuando llega a

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

cero, se llama a la función takePicture para tomar una captura de la webcam y guardarla en el directorio sincronizado. Por otra parte, una vez terminado este primer ciclo, se verifica si el tiempo actual supera a la duración del proceso, caso en que se termina el programa. Caso contrario, se vuelve a llamar a la función countdown con la variable que contiene la duración de intervalos original (iTIntervalo) y se vuelve a iniciar el ciclo while.

```
#Esta función posee un loop que, cuando termina, toma una foto
def countdown(tI, indice):

    #El ciclo while se ejecuta hasta que termine el temporizador de tI
    while tI:
        #divide tI/60, el cociente se guarda en mins, el resto en secs
        mins, secs = divmod(tI, 60)
        #imprime el tiempo en formato minutos:segundos
        timer = '{:02d}:{:02d}'.format(mins, secs)
        print(timer, end="\n")
        #espera 1 segundo
        time.sleep(1)
        tI -= 1

    #Cuando termina el intervalo, se toma una foto y se vuelve a llamar a
    #la función
    indice += 1
    #Se mide el tiempo actual
    tiempoActualSeg = int(time.time())
    #Se convierte el formato de tiempo para adjuntarlo al nombre de la imagen a capturar
    tiempoActualFormato = time.strftime("%H-%M-%S", time.localtime(tiempoActualSeg))
    #Se toma una foto y se guarda con el nombre del tiempo
    takePicture(tiempoActualFormato, indice)
    print('Reiniciando por '+str(indice)+'º vez...')

    #Si el tiempo actual es mayor que el tiempo final, se termina el programa
    if(tiempoActualSeg > tiempoFinalSeg):
        print("Programa terminado")
    else:
        #Si todavía no terminó el tiempo del proceso, se vuelve a
        #llamar a esta función
        countdown(iTIntervalo, indice)
```

Figura 2. Código de la función countdown.

Para tomar capturas con la webcam y guardar la imagen obtenida, se utiliza la librería cv2, que es el módulo de OpenCV (visión por computadora de código abierto) para Python. Las imágenes se manejan en forma de arreglos binarios.
La función takePicture (ver Figura 3) tiene como parámetros el tiempo en que se toma la captura y el índice. Dentro de la misma, la cámara web externa se selecciona al tomar como 1 el parámetro en la función VideoCapture.

```
#Esta función se encarga de tomar una foto y guardarla en un directorio
def takePicture(sTFormato, iIndice):
    #Abre la cámara conectada por USB
    cap = cv2.VideoCapture(1)

    #Se establecen las dimensiones de la foto
    cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, 2560)#Ancho
    cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, 1440)#Alto

    #Se toma una imagen
    ret, frame = cap.read()

    #Se asigna el nombre de la imagen
    #Este if sirve para modificar el nombre según el indice, para mejor orden
    #de las imágenes
    if(iIndice < 10):
        sNombreImagen = 'D:/Usuario/OneDrive - UTN Reconquista/Python/Imagenes/Imagen-N0' + str(iIndice) + '-'+ sTFormato +'.jpg'
    else:
        sNombreImagen = 'D:/Usuario/OneDrive - UTN Reconquista/Python/Imagenes/Imagen-N' + str(iIndice) + '-'+ sTFormato +'.jpg'
    #Se guarda la imagen
    print(sNombreImagen)
    cv2.imwrite(sNombreImagen, frame)
    #Se libera la cámara
    cap.release()
```

Figura 3. Código de la función takePicture.

La función read es la que se encarga de obtener una captura de la webcam, y la imagen queda almacenada en la variable frame. En caso de que se haya tomado de forma incorrecta, como por desconexión de la cámara, la función read devuelve

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

una imagen vacía (OpenCV, 2024). La variable ret sirve como flag o bandera para evaluar si hubo errores en la captura (read devuelve False y ret es cero).
Una vez obtenida la imagen, se guarda en el directorio sincronizado (cuya ruta se almacena en la variable sNombreImagen) mediante el comando imwrite, al cual se le especifican los parámetros de imagen y dirección de guardado.

3. Resultados

En las Figuras 4 y 5 se muestran algunas de las capturas obtenidas para un proceso de manufactura en una impresora 3D con tecnología FDM.

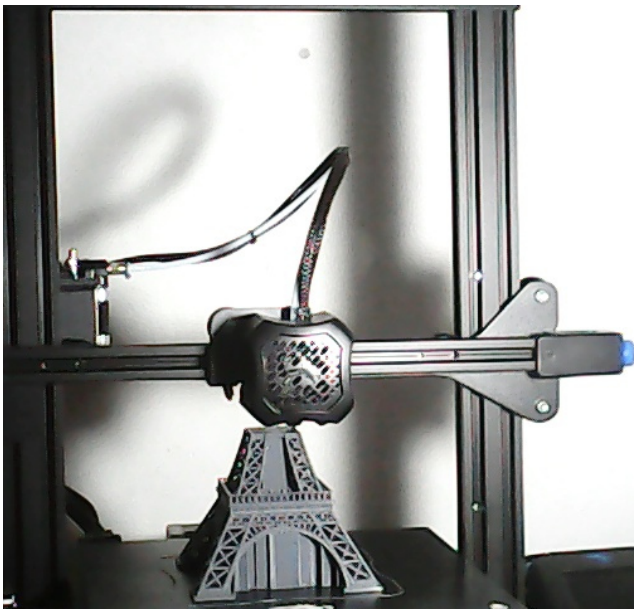


Figura 4. Captura de la prueba realizada en la impresora 3D.

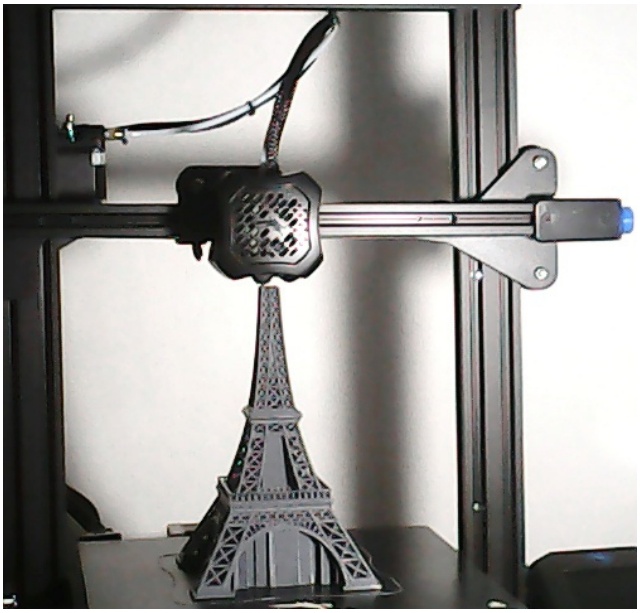


Figura 5. Captura de la prueba realizada en la impresora 3D.

De igual forma, en el dispositivo móvil se visualizan las mismas imágenes mediante la aplicación de OneDrive, como se aprecia en la captura de pantalla en la Figura 6.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

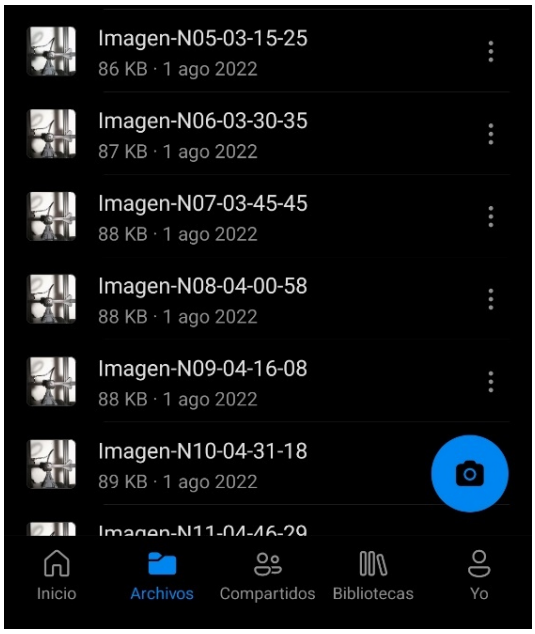


Figura 6. Captura parcial de pantalla del smartphone de la carpeta sincronizada.

4. Conclusiones

En este trabajo, se implementó una herramienta de monitoreo visual para procesos de manufactura aditiva. Con este objetivo, se utilizó un lenguaje de programación de alto nivel para desarrollar un software con funciones capaces de tomar capturas de una impresora 3D desde una cámara web y almacenarlas en un directorio sincronizado con la nube de OneDrive. Posteriormente, se pudo acceder de forma remota a las imágenes obtenidas del proceso mediante la aplicación de OneDrive de un dispositivo móvil.

En cuanto a las futuras líneas de investigación, se propone aplicar el uso de herramientas de inteligencia artificial, para integrarla con el módulo de visión por computadora para reconocer eventuales fallas que pueda tener la impresora y ajustar los parámetros de proceso de forma autónoma. También, podría incrementarse el rango de monitoreo de la herramienta para capturar una mayor cantidad de variables del proceso, aumentando los datos obtenidos con el fin de analizarlos y, así, tratar de identificar correlaciones entre los parámetros de impresión y los defectos del material. A su vez, y como en todo sistema basado en el Internet de las Cosas, se deben evaluar posibles riesgos relacionados con la ciberseguridad del flujo de información y su acceso, garantizando que la herramienta no preste lugar a posibles fallas e intromisiones.

Agradecimientos

Se agradece al profesor Dr. Martín Alarcón por la disposición y la orientación brindada para confeccionar este trabajo.

Referencias bibliográficas

Armstrong, M., Mehrabi, H., Naveed, N. (2022). An Overview of Modern Metal Additive Manufacturing Technology. Journal of Manufacturing Processes, 84, 1001-1029.

Cai, Y., Xiong, J., Chen, H., Zhang, G. (2023). A review of in-situ monitoring and process control system in metal-based laser additive manufacturing. Journal of Manufacturing Systems, 70, 309-326.

AbouelNour, Y., Gupta, N. (2022). In-situ monitoring of sub-surface and internal defects in additive manufacturing: A review. Materials & Design, 222, 111063.

Malik, A., Lhachemi, H., Ploennigs, J., Ba, A., Robert, S. (2019). An Application of 3D Model Reconstruction and Augmented Reality for Real-Time Monitoring of Additive Manufacturing. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, 346-351.

Python Software Foundation. (2024). Web: https://docs.python.org/3/library/time.html.

OpenCV. (2024). Web: https://docs.opencv.org/4.x/d8/dfe/classcv_1_1VideoCapture.html.

Häußge, G. (2024). Web: https://octoprint.org/

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

JIT 24 ROSARIO

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Sistemas de información e informática
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

TRABAJO EN DESARROLLO

Desarrollo y Resultados Preliminares de un Paquete de Optimización de la Producción en Python

Development and Preliminary Results of a Python-Based Production Optimization Package

Presentación 18/10/2024

Araceli Sarina

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Depto. Ingeniería en Sistemas de Información, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: asarina@frsf.utn.edu.ar

Resumen

Este trabajo presenta resultados iniciales en el desarrollo de un paquete de software en Python para la optimización de la programación de operaciones (scheduling) en entornos industriales. Los problemas de scheduling se caracterizan por su alta complejidad y amplia variedad de características, y para su resolución se han desarrollado múltiples metodologías basadas en programación matemática mixta-entera lineal (MILP) y no lineal (MINLP). Sin embargo, la implementación práctica de estos métodos sigue siendo limitada por los altos costos y la necesidad de personal especializado. Este trabajo se enmarca en un proyecto que busca superar estas barreras mediante la creación de un paquete de software flexible y reutilizable, basado en Pyomo, una herramienta para la definición de modelos de optimización en Python. Se describe brevemente el diseño inicial del paquete, junto con sus componentes principales, y se presentan ejemplos de aplicación como resultados preliminares que demuestran el potencial impacto en distintos contextos industriales.

Palabras clave: Optimización de la producción; Programación de operaciones; Paquete de software; Pyomo

Abstract

This paper presents initial results in the development of a Python-based software package for optimizing production scheduling in industrial environments. Scheduling problems are characterized by their high complexity and wide variety of features, and multiple methodologies based on mixed-integer linear programming (MILP) and nonlinear programming (MINLP) have been developed to solve them. However, the practical implementation of these methods remains limited due to high costs and the need for specialized personnel. This work is part of a project aimed at overcoming these barriers by creating a flexible and reusable software package, based on Pyomo, a tool for defining optimization models in Python. The initial design of the package and its main components are briefly described, and application examples are presented as preliminary results that demonstrate its potential impact in various industrial contexts.

Keywords: Production optimization; Scheduling; Software package; Pyomo

1. Introducción

La optimización de la programación de operaciones, comúnmente conocida como scheduling, es fundamental para la eficiencia y sostenibilidad de los procesos industriales. En un mercado cada vez más competitivo, donde la rentabilidad de

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

una planta industrial está estrechamente vinculada al uso óptimo de los recursos de producción disponibles, las empresas se enfrentan al desafío de garantizar una producción ágil, gestionar los recursos de manera sostenible y cumplir con las demandas de los clientes en tiempo y forma.

Al especificar un problema de scheduling, es necesario identificar adecuadamente sus características. Entre los aspectos a considerar se encuentran la estructura de las recetas de producción, la topología del proceso, la selección del equipamiento y su conectividad, las políticas de almacenamiento intermedio, la transferencia de materiales, el tamaño y tiempo de procesamiento de los lotes, los tiempos de transición entre tareas, la utilización y disponibilidad de recursos adicionales, los patrones de demanda, los costos asociados a cada tarea, etc.

Dada la complejidad y diversidad de características de estos problemas, se han desarrollado numerosos métodos para su representación y resolución. Entre ellos, los modelos matemáticos de programación mixta-entera lineal (MILP) y no lineal (MINLP) destacan como métodos exactos que permiten capturar con precisión las restricciones y objetivos de los sistemas productivos, ofreciendo soluciones óptimas cuando se resuelven adecuadamente. En las últimas décadas, se han propuesto diversas formulaciones y enfoques en la literatura que abordan problemas de scheduling en distintos contextos industriales (Méndez et al., 2006; Maravelias, 2021). Sin embargo, su implementación práctica sigue siendo limitada debido a la necesidad de personal especializado, los altos costos, y el tiempo requerido para desarrollar soluciones a medida (Harjunkoski et al., 2014).

Ante estas limitaciones, este trabajo presenta los resultados iniciales del proyecto PID SIECFE0010230TC, cuyo objetivo es desarrollar un paquete de software en Python, diseñado para modelar y resolver problemas de scheduling de manera flexible y con componentes reutilizables. Este paquete se basa en Pyomo, una herramienta para la definición y resolución de modelos de optimización en Python. En este artículo se describe el diseño inicial del paquete y sus principales componentes, junto con ejemplos de aplicación, código fuente y resultados preliminares.

2. Metodología

2.1 Herramientas utilizadas

El desarrollo del paquete de software se basa en el modelado y programación orientada a objetos (POO), una metodología que facilita la creación de componentes reutilizables y extensibles. El lenguaje de programación elegido es Python, conocido por su simplicidad y flexibilidad, y ampliamente utilizado para desarrollar aplicaciones científicas y de ingeniería. Para el modelado matemático se utiliza Pyomo, un paquete de Python que permite formular problemas de optimización de manera flexible y expresiva. Pyomo soporta una amplia variedad de modelos matemáticos, incluyendo programación lineal, no lineal, mixta-entera lineal, y otros, lo que lo hace especialmente adecuado para las necesidades del proyecto. Además de Pyomo, se emplean otros paquetes como Pandas, que facilita la manipulación y análisis de datos, y Openpyxl, utilizado para la gestión de datos en hojas de cálculo Excel. Para la resolución de los modelos matemáticos se utiliza el solver Gurobi, reconocido por su alta eficiencia en la resolución de problemas de programación mixta-entera lineal (MILP) y disponible bajo licencia académica para propósitos de investigación.

2.2 Diseño preliminar del paquete de Scheduling

Se presenta el diseño preliminar del paquete de Python desarrollado, el cual está estructurado en varios subpaquetes que facilitan su uso y organización. Los principales subpaquetes incluyen `problems`, `features`, `models`, `model_components`, `data` y `test_cases`. A través de la importación del paquete `scheduling`, el encargado de la programación de la producción (scheduler) podrá acceder a los componentes definidos en cada uno de ellos, lo cual le permitirá modelar, resolver y analizar resultados de problemas de interés de manera eficiente. En la Figura 1 se presenta un diagrama que ilustra la estructura del paquete.

El paquete se basa en distintas jerarquías de clases, con componentes ya sea genéricos o concretos, que permiten el modelado de distintos problemas de optimización de la producción. A continuación, se explican las clases principales, que representan conceptos abstractos, y sus funcionalidades (ver también la Figura 2):

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

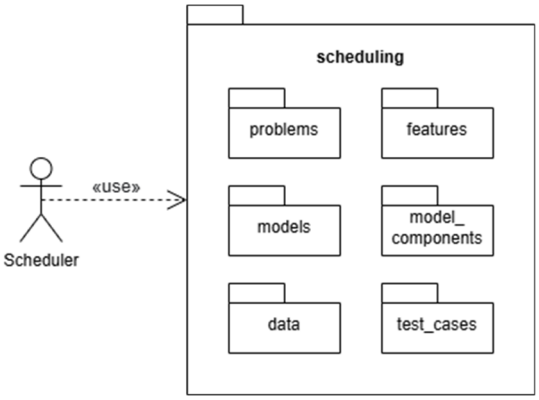


Figura 1. Diagrama del paquete de software.

- **Problem:** es la clase abstracta que representa un problema de optimización. La misma contiene como atributos los conjuntos (‘sets’), parámetros (‘parameters’), características asociadas al problema (‘features’), función objetivo (‘objective’) y cargadores de datos (‘loaders’). Esta clase proporciona los métodos clave para agregar fuentes de datos, cargar los conjuntos y parámetros correspondientes y poder validar los datos del problema.
- **Feature:** representa una característica modular que puede ser aplicada en un problema de optimización, pudiendo asociarse varios ‘features’ a un mismo problema. Las características permiten modificar o extender la funcionalidad base del problema, proporcionando mayor flexibilidad en su definición.
- **Model:** es la clase abstracta que representa un modelo o formulación disponible para un problema. Está asociado con el problema que se desea resolver y, a partir de este, genera los componentes necesarios (‘ModelComponent’), para luego construir el modelo en Pyomo y resolverlo.
- **ModelComponent:** se encarga de agregar restricciones y otros elementos necesarios a un modelo matemático asociado para resolver una característica específica.
- **DataLoader:** utilizada para gestionar la carga de datos de manera eficiente a partir de diferentes fuentes. Permite obtener los conjuntos y parámetros necesarios para definir los problemas de scheduling.
    - **ExcelDataLoader:** subclase del DataLoader, diseñada para cargar datos desde archivos Excel. Utiliza celdas nombradas dentro de las hojas de cálculo para identificar la información necesaria.

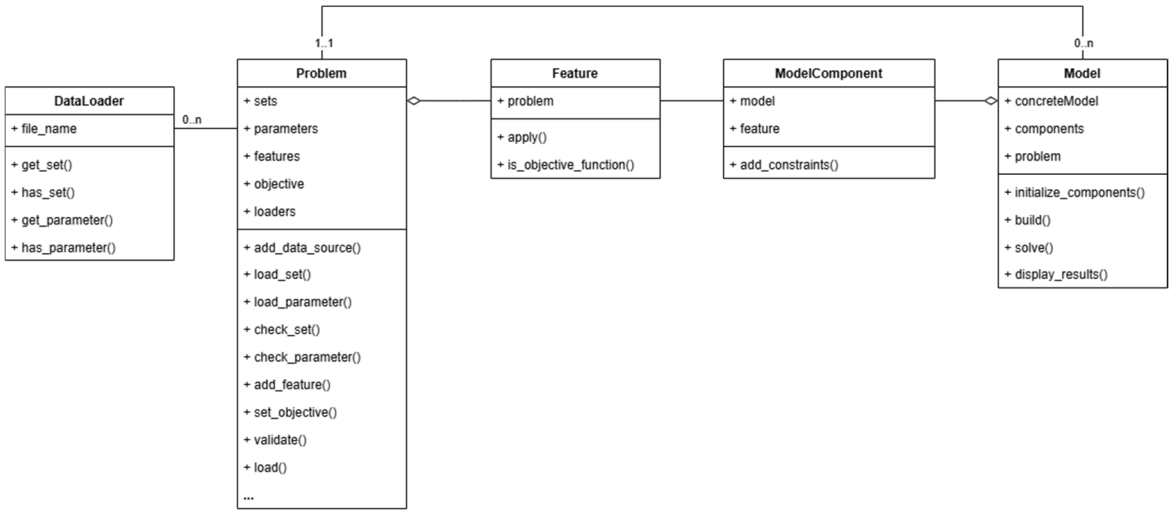


Figura 2. Principales componentes genéricos del paquete propuesto.

El subpaquete `problems` incluye una jerarquía que representa la clasificación genérica de los problemas de optimización de la producción. Se describen a continuación algunas de las clases incluidas en la Figura 3:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- **SingleStageProblem:** modela los procesos en donde todas las operaciones se realizan en una única etapa.
- **MultiStageProblem:** representan los procesos que involucran múltiples etapas. Es útil para modelar cadenas de producción secuenciales donde existen dependencias entre etapas consecutivas y cada etapa puede tener múltiples opciones de asignación de recursos.
    - **FlowShopProblem** y **JobShopProblem:** son problemas específicos dentro del contexto de producción secuencial. Los problemas de FlowShop son aquellos que consideran que todas las tareas deben pasar por las mismas máquinas en el mismo orden, mientras que en el caso de un JobShop se permiten rutas más flexibles y personalizadas para cada tarea.
- **STNProblem** y **RTNProblem:** modelan problemas con estructura de red, cuyos procesos están representados indicando las interacciones entre tareas y estados (STN – state task network) o tareas y recursos (RTN – resource task network).

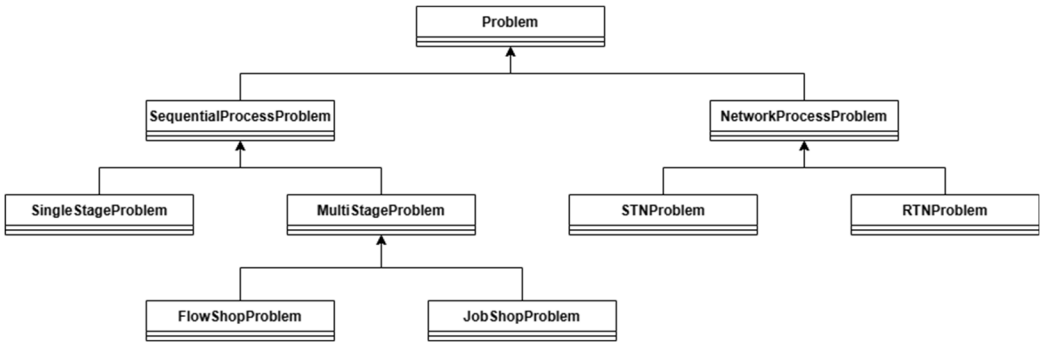


Figura 3. Jerarquía de clases de problemas de optimización – propuesta inicial.

Además, en el subpaquete `models` se define una jerarquía de modelos que permite a los usuarios definir tanto modelos de tiempo continuo como de tiempo discreto, para que pueda adaptarse a diferentes necesidades y restricciones temporales en la optimización de producción:

- **ContinuosTimeModel:** el tiempo se representa de forma continua, lo que permite una mayor precisión en la programación de eventos y la asignación de recursos. Este tipo de modelos es ideal para procesos que requieren más detalle y control, donde las tareas pueden comenzar y finalizar en cualquier momento.
    - **PrecedenceBasedModel:** se centra en las relaciones de precedencia entre tareas, asegurando que ciertas tareas deben completarse antes de que otras puedan comenzar.
    - **TimeSlots** y **GlobalTimePoints:** se basa en la asignación de tareas a ranuras o instantes de tiempo, incorporando conjuntos adicionales para representar estos conceptos.
- **DiscreteTimeModel:** el tiempo está representado de forma discreta, es decir se divide en intervalos fijos. Este enfoque simplifica el modelado y es útil en situaciones donde los eventos ocurren a intervalos regulares o donde la precisión temporal no es crítica.

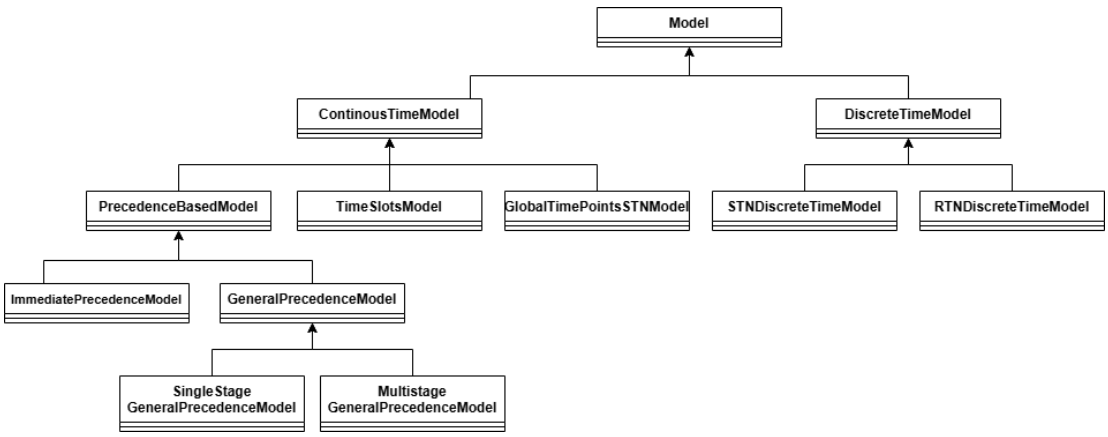


Figura 4. Jerarquía de clases de modelos de optimización – propuesta inicial.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

3. Resultados preliminares

3.1. Descripción de casos de estudio

Para evaluar el paquete de software en desarrollo se plantearon algunos casos de estudio representativos, que abarcan diferentes configuraciones de problemas de optimización.

El primer caso de estudio aborda un problema de scheduling de una planta monoetapa con 4 equipos operando en paralelo. En este escenario, la función objetivo es minimizar el makespan, es decir, el tiempo total requerido para completar todas las tareas. Se considera una restricción de fecha límite fija, que determina que todas las tareas deben ser completadas antes de una fecha específica y restricciones de fechas de entrega de cada tarea. Además, se consideran los tiempos de setup de los equipos, es decir el tiempo de preparación del equipo antes de comenzar una nueva tarea.

El segundo caso de estudio plantea un problema multietapa con múltiples equipos en paralelo, donde los equipos están asignados a diferentes etapas del proceso (12 equipos distribuidos en 5 etapas). Como en los ejemplos anteriores, la función objetivo se mantiene, así como las restricciones de tiempo de setup, fechas de entrega y fecha límite. A su vez, se consideran los tiempos de transición dependiente de la secuencia, donde el tiempo de transición varía según el orden en que se realizan las etapas.

3.2. Utilización de la herramienta

Para demostrar el uso del paquete desarrollado, se presenta un ejemplo del código utilizado para generar y resolver un modelo de precedencia general monoetapa, descripto como el primer caso de estudio. El modelo se configuró para optimizar el scheduling en una planta batch, utilizando los datos de un archivo Excel previamente configurados para su correcta lectura.

En el código de la Tabla 1 pueden observarse las interfaces propuestas para la definición de problemas, y la construcción y resolución de modelos matemáticos basados en los mismos, logrando abstraer la complejidad de todo el proceso para el usuario. Cada tipo de modelo (este ejemplo utiliza GeneralPrecedenceModel) se encargará de crear las variables y ecuaciones necesarias para el problema, utilizando además los ModelComponent que necesite para cada Feature asociado al problema.

Tabla 1. Ejemplo de script de usuario para el caso de estudio 1.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

```
from scheduling.problems import SingleStageProblem, constants
from scheduling.models import GeneralPrecedenceModel

excel_file_name = 'ejemplo-planta-batch-monoetapa.xlsx'

# Creación del problema de scheduling
problem = SingleStageProblem()
problem.add_data_source(excel_file_name)
problem.add_parameter('time_horizon', 60)

# Adición de características y función objetivo al problema
problem.add_feature(constants.FIXED_DUE_DATE)
problem.add_feature(constants.UNIT_DEPENDENT_SETUP_TIMES)
problem.set_objective(constants.MAKESPAN)

# Carga de datos
problem.load()

# Construcción del modelo
model = GeneralPrecedenceModel(problem)
model.build()

solver_options = {}
model.solve(solver='gurobi', options=solver_options)

figure = model.gantt_chart()
```

En el ejemplo del código anterior, el modelo fue resuelto utilizando el solver Gurobi, que proporcionó los siguientes detalles:

- Tiempo de resolución: 43.63 segundos
- Número de variables: 156 (124 binarias y 32 continuas)
- Número de restricciones: 335

A continuación, se representa el programa de operación obtenido representado con un diagrama de Gantt.

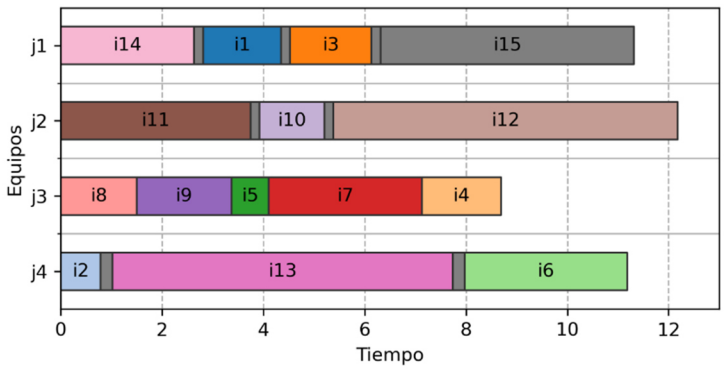


Figura 5. Diagrama de Gantt – Resultado del modelo.

4. Conclusiones

El ejemplo presentado demuestra la capacidad del paquete de software desarrollado para abordar problemas de scheduling en entornos industriales. El uso del paquete permitió transformar los datos provenientes de un archivo Excel en un modelo de optimización funcional, que fue resuelto de forma efectiva. Los resultados obtenidos ilustran la capacidad esperada del paquete para ofrecer una interfaz sencilla e intuitiva, facilitando la definición de problemas y modelos, y permitiendo resolver problemas de optimización de manera eficiente.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

De cara al futuro, se espera ampliar el paquete para incluir la resolución de otros problemas de scheduling y la implementación de modelos más avanzados. Esto incluirá la optimización de procesos más complejos, la integración de nuevos “features”, y la adaptación a diferentes problemas. El paquete tiene el potencial de convertirse en una herramienta para la comunidad de investigadores y profesionales contribuyendo al avance de las prácticas de optimización en la industria.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Pablo Marchetti, mi director de beca, por su orientación y apoyo durante el desarrollo de este proyecto. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para la realización de este trabajo. También deseo reconocer al Departamento de Sistemas de la UTN Santa Fe por proporcionar los recursos y el entorno necesario para llevar a cabo esta investigación.

Referencias bibliográficas

Harjunkoski, I., Maravelias, C. T., Bongers, P., Castro, P. M., Engell, S., Grossmann, I. E., Hooker, J., Méndez, C., Sand, G., Wassick, J. (2014). Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. Computers and Chemical Engineering, 62, 161-193.

Maravelias, C, T. (2021). Chemical Production Scheduling: Mixed-Integer Programming Models and Methods. Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-15475-9.

Méndez, C. A., Cerdá, J., Grossmann, I. E., Harjunkoski, I., Fahl, M. (2006). State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. Computers and Chemical Engineering, 30, 913-946.

Tecnologías de las organizaciones



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Tecnologías de las organizaciones
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Análisis del uso de agua industrial bajo el enfoque de Industria 4.0

Analysis of industrial water use under the Industry 4.0 approach

Presentación 18/10/2024

Sheila Favole

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.
E-mail de contacto: sheilafavole13@gmail.com

Micaela Lozer

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.
E-mail de contacto: mica.lozer45@gmail.com

Dirección: Dr. Pedro Querini; Dra. Erica Fernandez

Resumen

Este trabajo se centra en la digitalización del agua de pozo en una planta industrial mediante el modelo RAMI 4.0. Utilizando caudalímetros y un sistema SCADA, se mide y analiza en tiempo real el flujo de agua para optimizar su uso en diferentes procesos industriales, como limpieza, riego y producción. Esta digitalización permite no solo una mejora significativa en la eficiencia operativa, sino también en la sostenibilidad ambiental, al reducir el desperdicio y asegurar un uso responsable del agua. Los datos obtenidos facilitan la identificación de patrones de consumo y la detección temprana de anomalías, lo cual contribuye a una gestión más eficiente del recurso hídrico. A través de este enfoque, se demuestra cómo la digitalización puede ser una herramienta clave para la toma de decisiones estratégicas, mejorando no solo la operación interna, sino también cumpliendo con las normativas ambientales y fortaleciendo el compromiso con la sostenibilidad en la industria.

Palabras clave: Transformación digital; Industria 4.0; RAMI 4.0; Análisis en tiempo real

Abstract

This work focuses on the digitalization of well water in an industrial plant using the RAMI 4.0 model. Using flow meters and a SCADA system, the water flow is measured and analyzed in real time to optimize its use in different industrial processes, such as cleaning, irrigation and production. This digitalization allows not only a significant improvement in operational efficiency, but also in environmental sustainability, by reducing waste and ensuring responsible use of water. The data obtained facilitates the identification of consumption patterns and the early detection of anomalies, which contributes to more efficient management of water resources. Through this approach, it is demonstrated how digitalization can be a key tool for strategic decision-making, improving not only internal operations, but also complying with environmental regulations and strengthening the commitment to sustainability in the industry.

Keywords: digital transformation; Industry 4.0; RAMI 4.0; Real-time analytics

1. Introducción

En un entorno global cada vez más competitivo y dinámico, la transformación digital se presenta como un elemento crucial para que las empresas mantengan y mejoren su posición en el mercado. Aunque la mayoría de las organizaciones han comenzado a experimentar con la transformación digital, el verdadero impacto de estos esfuerzos no se deriva

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

exclusivamente de las tecnologías adoptadas, sino del enfoque estratégico aplicado en su implementación (Mariam H Ismail et al.). En contraste, la digitalización de procesos no solo implica la implementación de nuevas tecnologías, sino también la adaptación de modelos de negocio flexibles y adaptativos que respondan a las cambiantes demandas del mercado (Ulas, 2019). Este trabajo se centra en la digitalización de los datos del agua de pozo en la utilizando el estándar RAMI 4.0 ("DIN SPEC 91345:2016-04, Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)," 2016) como marco de referencia, se desarrolló una metodología específica para transformar digitalmente los procesos de negocio en el sector industrial aceitero, adaptando los ecosistemas industriales a nuevos modelos de negocio (Schumacher et al., 2016). A través del monitoreo en tiempo real de los datos de consumo de agua, se busca no solo mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad, sino también contribuir al avance de la industria regional mediante la implementación de tecnologías innovadoras que apoyen la toma de decisiones basada en datos (SCHALLMO et al., 2017). La digitalización del agua de pozo, basada en el modelo RAMI 4.0, ha generado nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental en la industria. Este enfoque permite un control preciso del recurso hídrico, optimizando su uso en diversos procesos industriales. La integración de tecnologías avanzadas, como caudalímetros y sistemas SCADA, habilita la recopilación y análisis de datos en tiempo real, lo que facilita la gestión operativa y permite identificar oportunidades de negocio derivadas del uso eficiente del agua. Mediante un caso de estudio en una planta aceitera, se exploran los diferentes usos y destinos del agua digitalizada, demostrando cómo la información generada influye en la toma de decisiones estratégicas. Se presentan visualizaciones de los datos recolectados y se analizan los indicadores clave que permiten evaluar el impacto de estas medidas en la gestión ambiental.

2. Metodología

2.1. Digitalización de Datos

La digitalización de las corrientes de agua de pozo en la empresa se enmarca dentro del modelo RAMI 4.0, que organiza la transformación digital en una estructura de capas interrelacionadas, tal como se observa en la Figura 1.

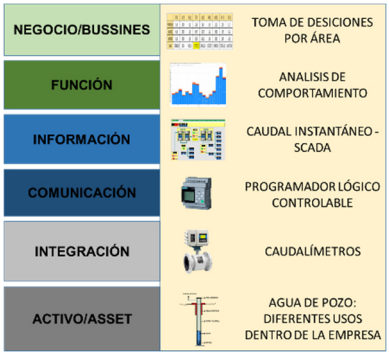


Figura 1. Capas de digitalización de la RAMI 4.0 aplicada.

En este contexto, el agua de pozo es identificada como el activo clave ("asset"), esencial para diversos procesos industriales. La digitalización de este recurso comienza con la implementación de caudalímetros, dispositivos de alta precisión encargados de medir el caudal instantáneo del agua. Estos caudalímetros se comunican directamente con un Controlador Lógico Programable (PLC), que actúa como el cerebro del sistema, integrando y procesando la información capturada de manera continua. El flujo de datos se actualiza cada 5 segundos, lo que permite un monitoreo en tiempo real de las corrientes de agua. Esta información se envía al sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), una plataforma centralizada que recopila, supervisa y analiza los datos de flujo. El SCADA no solo almacena la información, sino que también la presenta de manera accesible para los operadores, permitiendo la visualización de tendencias, la detección de anomalías y la toma de decisiones basadas en datos. La digitalización según las capas del RAMI 4.0 no solo facilita un control eficiente y preciso del agua de pozo, sino que también habilita la integración de estos datos con otros sistemas empresariales, como la gestión de recursos y la planificación de la producción. Este enfoque integral asegura que el agua de pozo se utilice de manera óptima y sostenible, adaptándose a las necesidades específicas de cada proceso industrial y contribuyendo a una mayor eficiencia operativa en toda la empresa.

2.2. Gestión de los Datos y Capa de Negocio

Los objetivos que se buscan alcanzar con la digitalización de los datos extraídos de los caudalímetros son tales como ahorro de costos, medición precisa del consumo y optimización del agua, monitoreo inteligente en tiempo real, alertas y

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

mantenimiento de los mismos, disminución de costos (mediante el consumo eléctrico de las bombas y la vida útil de las mismas), seguridad en el funcionamiento, disminución de las pérdidas , análisis del comportamiento de uso del agua (estacionalidad, horas de mayor/menor consumo), planificación del consumo de agua respecto del área o análisis del comportamiento del caudalímetro.

La digitalización del consumo de agua es muy importante para las empresas debido a que es posible obtener una visión precisa y en tiempo real del uso del agua, permitiendo la mejora de la eficiencia en su utilización como también la disminución del impacto ambiental. El impacto de la digitalización de los datos resulta de interés para varios sectores dentro de la jerarquía empresarial de diferentes formas.

Impacto en el área de medio ambiente: La digitalización de los datos de consumo de agua permite un monitoreo en forma precisa y en tiempo real, facilitando la detección de fugas o pérdidas para reducir desperdicios y minimizar la extracción innecesaria de dicho recurso. Además, permite implementar prácticas sostenibles que cumplan con las regulaciones medioambientales. Algo no menos importante, es que los usuarios al visualizar su consumo, toman conciencia sobre el uso responsable de este recurso e intentan adoptar hábitos más sostenibles. **Producción:** Al contar con datos precisos, se pueden ajustar los procesos para que sean más eficientes, y así, reducir costos y mejorar la productividad. Un beneficio de contar con los datos en tiempo real es que se pueden detectar anomalías y dar respuesta a estos problemas. **Finanzas:** Los datos digitales ayudan al control y la reducción de los costos operativos asociados al uso del agua, permitiendo que el personal de finanzas, a través del mismo, pueda analizar y elaborar presupuestos más precisos y detallados, y planificar ahorros potenciales. **Mantenimiento:** Los datos ayudan a predecir y prevenir fallos relacionados con el uso del agua. Al ser detectados de manera temprana, asegura una disminución de costos de reparación y, además, previene desperdicios. **Marketing:** La empresa puede utilizar los datos como una ventaja competitiva, para mostrar su compromiso con la sostenibilidad y la gestión eficiente de recursos, mejorando su reputación y atractivo ante clientes y socios.

La recopilación y análisis de datos de consumo de agua no solo mejora la eficiencia interna, sino que también puede transformarse en una fuente de ingresos. La empresa podría ofrecer estos datos a otras organizaciones interesadas, por ejemplo, crear aplicaciones o plataformas en la nube que ayuden al proceso de monitoreo en tiempo real del consumo de agua, con alertas para detectar fugas y anomalías, ofrecer servicios de consultoría basados en los datos recopilados, ayudando a otras empresas a optimizar su consumo de agua y mejorar sus prácticas ambientales, crear aplicaciones móviles que permitan a los usuarios monitorear su consumo de agua, recibir recomendaciones de ahorro y comparar su uso con estándares sostenibles y hasta vender los datos a instituciones de investigación, organismos gubernamentales, o empresas de tecnología que desarrollan soluciones para la gestión del agua.

2.3. Descripción de la Empresa

La planta aceitera Colibrí está ubicada en la comuna de Franck, en el departamento Las Colonias, a 40 km de Santa Fe y a 15 km de Esperanza, en la Ruta Provincial 6, km 57,5. Esta planta es una de las tres grandes unidades de negocio que operan en el sector agropecuario del predio. Las principales actividades de Colibrí incluyen el procesamiento de granos de soja para obtener aceite crudo, el refinado del aceite, y la producción de goma, expeler y borra. El predio, con una superficie de 2,25 hectáreas, aloja todas las etapas de producción de aceite crudo, expeler y aceite refinado de soja. Colibrí produce expeler y aceite crudo mediante extrusión y prensado, sin el uso de aditivos ni solventes, además de producir aceite refinado. La planta cuenta con aproximadamente 50 empleados distribuidos entre las tres unidades de negocio: 20 en producción (extracción de aceite crudo y refinado del crudo), 6 en mantenimiento, 3 en calidad, 20 en administración y 1 en transporte.

2.4. Distribución de Caudalímetros

La empresa cuenta con diversas fuentes de agua: agua de red, agua envasada y agua de pozo. En el presente trabajo se hace hincapié en el agua de pozo, que es extraída mediante bombas y almacenada en dos tanques. En la Figura 2, se puede observar las diferentes fuentes de agua en la empresa.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

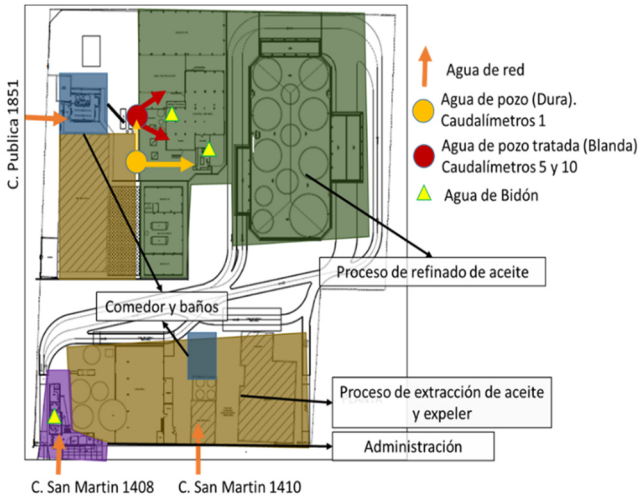


Figura 2. Fuentes de agua y usos en la empresa.

Una vez almacenada, el agua puede ser utilizada de dos maneras. La primera es su uso directo para diversos tipos de limpieza y riego de las instalaciones. La segunda opción es someterla a un proceso de ablandamiento a través de ablandadores que contienen resinas de intercambio, las cuales permiten obtener agua con bajo contenido de dureza (agua blanda). Esta agua tratada tiene diferentes aplicaciones, como en equipos de centrífuga, calderas, oficinas, sanitarios, procesos de neutralización de aceites, chiller, torres de enfriamiento, y también para limpieza. Todos estos usos se encuentran dentro de la zona marcada en verde de la Figura 2.

Para monitorear el agua de pozo y sus diferentes usos, la empresa cuenta, actualmente, con 9 caudalímetros actuadores ubicados estratégicamente funcionando. Los caudalímetros tienen una salida de pulsos o frecuencia, donde un determinado caudal corresponde a una cantidad de pulsos que se leen en una entrada de conteo rápido del PLC. En el programa, se cuenta la cantidad de pulsos por segundo y se escala según la relación pulsos/caudal. Para totalizar, se va sumando el caudal en el tiempo también en el PLC. El tratamiento dentro del PLC es escalar la señal del valor que entrega el caudalímetro a l/h. La comunicación entre los PLC y SCADA se realiza mediante Modbus TCP. En la Figura 3 se muestran los caudalímetros y los destinos que tienen cada uno de los caudalímetros.

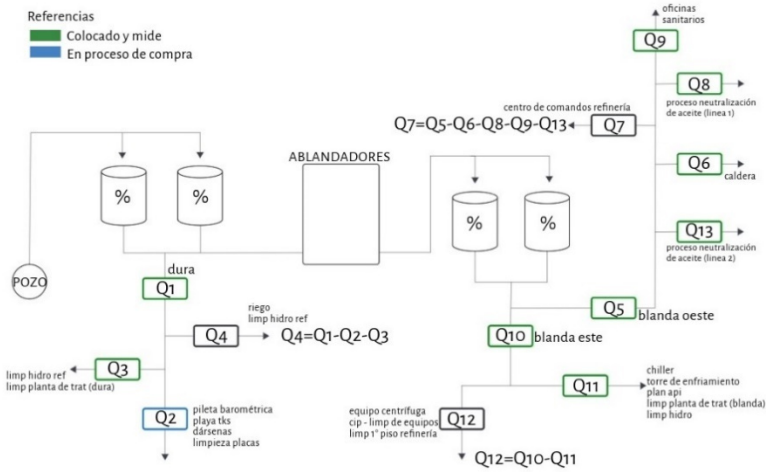


Figura 3. Diagrama de caudalímetros.

2.5. Consumo de Caudalímetros

El análisis fue realizado a través de datos recolectados por los caudalímetros desde el 23/05/2024 hasta el 14/06/2024. En la Tabla 1 se observa la información obtenida. Se registra la fecha y hora, cada 5 segundos, de cada caudalímetro. Los valores registrados en las columnas de cada caudalímetro muestran el flujo de agua que atraviesa el caudalímetro en ese momento. Los caudalímetros Q que se muestran, son los que actualmente están colocados y midiendo.

Tabla 1. Ejemplo de tabla resumen de datos.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

DATE	TIME	Q1	Q2	Q3	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q13
23/05/2024	00:00:00	0.92	0.00	0.00	4.92	4.42	0.00	2.00	1.92	0.26
23/05/2024	00:00:05	0.92	0.00	0.00	5.00	4.42	0.00	2.17	1.83	0.26
23/05/2024	00:00:10	0.92	0.00	0.00	4.92	4.50	0.00	1.92	2.08	0.26
23/05/2024	00:00:15	0.92	0.00	0.00	4.92	4.50	0.00	2.00	1.92	0.26

3. Resultados

3.1. Resultados Experimentales

A través del procesamiento de los datos obtenidos, se realiza un análisis de promedios de consumo, el máximo y mínimo caudal en litros, así como también la suma total de los litros que atravesaron los diferentes caudalímetros entre el 23 de mayo de 2024 y el 14 de junio de 2024.

Tabla 2. Análisis de datos.

-	Q1	Q2	Q3	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q13
TOTAL CONSUMO	578808.33	0.00	9182.83	1115765.75	238904.59	10327.67	899082.42	793791.58	104377.49
PROMEDIO	1.49	0.00	0.02	2.88	0.62	0.03	2.32	2.05	0.27
MÁXIMO	6.08	0.00	3.25	6.67	45.17	2.42	6.08	3.92	0.42
MÍNIMO	0.00	0.00	0.00	0.00	-42.61	0.00	0.00	0.00	-0.02

Se puede observar, en la Tabla 2, que el mayor valor se encuentra en el caudalímetro 5, que representa la cantidad de agua que se usa en la refinería, principalmente en el sector productivo que contempla el agua que se usa para caldera y para el proceso de neutralización del aceite. En escala decreciente, el caudalímetro 10, es quien posee el segundo mayor consumo y es debido al consumo constante de los equipos como chiller y torre de enfriamiento. Finalmente, el caudalímetro 1, tiene su mayor contribución en el consumo de agua de la pileta barométrica. Si bien este caudalímetro no se encuentra colocado, se puede inferir esta contribución de que el caudalímetro 3 resulta insignificante respecto a la contribución de caudalímetro 4 y 2 juntos. El caudal usado en 2 es continuo en el proceso mientras que el de 4 no.
Otro análisis que se pudo realizar fue visualizar en qué horario se da el máximo consumo de agua en litros. La tabla 3 muestra, para cada día, la hora en que se observa un pico de consumo por cada caudalímetro instalado. Los caudalímetros presentan diferentes horarios de máximo consumo en el mismo día, lo que sugiere que la demanda no es uniforme y podría depender de las funciones específicas de cada uno de ellos.

Tabla 3. Horas de máximo consumo.

DÍA	Q1	Q3	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q13
23	16	12	11	11	15	6	6	18
24	3	12	5	5	19	21	18	20
25	9	0	7	7	0	7	14	9
26	16	0	18	18	17	8	15	6
27	17	7	9	9	14	17	17	0
28	12	0	17	17	12	7	13	10
29	8	13	2	0	15	14	13	21
30	12	12	12	12	12	16	15	1
31	14	14	6	0	14	17	13	2
1	12	0	7	19	9	14	16	23
2	10	0	23	0	0	4	11	2
3	12	8	2	0	14	13	0	23
4	12	0	4	20	13	14	14	4
5	8	8	15	21	12	13	10	10
6	9	8	13	0	13	15	15	6
7	13	7	12	9	12	12	12	1

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

8	14	0	10	0	17	16	15	12
9	16	2	16	14	0	0	3	19
10	7	7	14	1	9	17	17	6
11	10	0	9	7	15	17	17	6
12	9	9	13	0	14	23	15	23
13	12	12	13	14	10	15	15	3
14	3	0	8	0	3	0	9	0

Un dato interesante que se pudo observar es que los caudalímetros 6 y 13 tienen un consumo significativo fuera del rango horario entre las 7 y las 19 horas. Esto se debe a que el caudalímetro 6 alimenta a la caldera y el caudalímetro 13 al proceso de neutralización de aceite.

4. Conclusiones

La digitalización del agua de pozo utilizando el modelo RAMI 4.0 en la planta industrial ha demostrado ser una estrategia efectiva para optimizar el uso de este recurso vital. La implementación de caudalímetros y un sistema SCADA permite un monitoreo en tiempo real del consumo de agua, lo que facilita la identificación de patrones de uso, la detección temprana de anomalías y la reducción del desperdicio. Estos avances no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también promueven la sostenibilidad ambiental al minimizar el impacto ecológico de las operaciones industriales. Además, la capacidad de analizar datos precisos en tiempo real permite una toma de decisiones más informada y estratégica, mejorando la capacidad de respuesta ante cambios en la demanda y en las condiciones operativas. Este enfoque no solo cumple con las regulaciones ambientales actuales, sino que también prepara a la industria para futuros desafíos relacionados con la gestión de recursos naturales. La digitalización del agua de pozo no solo representa una mejora en la gestión operativa y en la eficiencia de recursos, sino que también refuerza el compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental. Esta iniciativa destaca la importancia de integrar tecnologías avanzadas en los procesos industriales para garantizar un desarrollo sostenible y competitivo en el sector. Las experiencias obtenidas de esta implementación pueden servir como referencia para otras industrias que buscan mejorar su gestión de recursos y su impacto ambiental.

Lo más difícil es obtener los valores de consumo en tiempo real. A futuro, se trabajará en un tablero que permita mostrar simultáneamente los valores y procesarlos para sacar conclusiones inmediatas, en lugar de hacerlo como se hace actualmente, donde los datos se extraen del PLC en lotes y luego se procesan.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al Profesor Pedro Querini por su valiosa orientación y apoyo durante la realización de esta investigación. Su conocimiento y dedicación fueron fundamentales para la calidad y el desarrollo de este trabajo.

Referencias Bibliográficas

DIN SPEC 91345:2016-04. (2016). Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). https://doi.org/10.31030/2436156

Ismail, M. H., Khater, M., & Zaki, M. (n.d.). Digital business transformation and strategy: What do we know so far? Publicación en línea avanzada. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36492.62086

Schallmo, D., Williams, C. A., & Boardman, L. (2017). Digital transformation of business models — Best practice, enablers, and roadmap. International Journal of Innovation Management, 21(08), 1740014. https://doi.org/10.1142/S136391961740014X

Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. Procedia CIRP, 52(4), 161–166. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040

Ulas, D. (2019). Digital transformation process and SMEs. Procedia Computer Science, 158(1), 662–671. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.101

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Tecnologías de las organizaciones
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Definición de información para desarrollo de pasaporte digital de productos lácteos

Definition of information for the development of a digital passport for dairy products

Presentación 18/10/2024

Javier Andrés Benitez

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: jabenitez@frsf.utn.edu.ar

Resumen

En este artículo se describe la cadena de suministro en la industria láctea de un queso con características diferenciadoras para la exportación, poniendo en manifiesto distintos requerimientos legislativos y datos de interés solicitados a las partes intervinientes con el motivo de garantizar la calidad del producto. Primeramente, se describió los procesos llevados a cabo a lo largo de la elaboración del queso para establecer responsabilidades en la gestión de los datos de relevancia. Se definieron cuales serán los datos que se recopilaran en cada etapa, que luego se plasmaran en el pasaporte digital permitiendo la trazabilidad del producto. Para gestionar los datos en cuestión, se diseñaron una serie de documentos con los que se asegura el cumplimiento de los requerimientos legislativos y bacteriológicos, así como también características diferenciadoras que los destacarían para su exportación. Ofreciéndose distintas metodologías con las que se podrá relevar los datos de interés.

Palabras clave: Pasaporte digital; Gestión de datos; Cadena de suministros láctea; Exportación de productos.

Abstract

This article describes the supply chain in the dairy industry of a cheese with distinctive characteristics for export, highlighting various legislative requirements and relevant data requested from the involved parties to ensure the product's quality. Initially, the processes carried out throughout the cheese production were described to establish responsibilities in managing significant data. The specific data to be collected at each stage were defined, which will later be documented in a digital passport, enabling product traceability. To manage the relevant data, a series of documents were designed to ensure compliance with legislative and bacteriological requirements, as well as distinctive features that would enhance its export potential. Various methodologies are offered to gather the relevant data.

Keywords: Digital Passport; Data management; Dairy supply chain; Product export.

1. Introducción

En los últimos años, los sistemas de trazabilidad han sido reconocidos como una herramienta fundamental para garantizar la seguridad y calidad de los alimentos y la gestión de la cadena de suministro. Las tecnologías de la Industria 4.0 añaden valor a la cadena de suministro de alimentos agrícolas ya que permiten obtener datos e información para la toma de decisiones, integrar los actores de la cadena de suministro, monitorear y controlar los procesos productivos. En este escenario, una cadena de suministro láctea digitalizada permitirá la trazabilidad de productos lácteos y proporcionará una estrategia competitiva a las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES). Las diferentes legislaciones alimentarias establecen los principios y requisitos generales relacionados con la seguridad alimentaria y los datos necesarios que deben ser registrados acerca de los movimientos de la leche y productos lácteos a lo largo de la cadena de suministro.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El equipo de trabajo propuso el Pasaporte Digital como herramienta para realizar la trazabilidad de productos lácteos (Armando Colombo et al., 2023), el cual estará asociado a diferentes productos lácteos (leches en polvo, mantequilla, suero, queso, etc.). El Pasaporte Digital es la herramienta central que permite a todas las partes interesadas realizar la trazabilidad de productos y procesos. Proporciona datos e información digitalizados, para ser expuestos y/o consumidos como servicios, desarrollados y compartidos en tiempo real por todos los actores de la cadena de suministro láctea, respondiendo a los estrictos requisitos comerciales y legales para exportar o importar productos lácteos.
Como caso de estudio para llevar adelante la propuesta se contactó al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Rafaela (INTA Rafaela, 2021) quién evaluó el efecto diferencial que provocan diferentes niveles de alfalfa en la dieta de las vacas sobre las características físicas, químicas y sensoriales en la leche cruda y elaboración de quesos, en condiciones estandarizadas. Llegando a la conclusión que la vaca alimentada con un porcentaje de alfalfa del 40% o superior permite obtener leche cruda y quesos de mejor calidad. A partir de la interacción con INTA y diferentes PYMES de la región que estaban interesadas se definió el objetivo de obtener la trazabilidad de la elaboración de un queso diferenciable utilizando leche cruda que se obtenga de vacas alimentadas a alfalfa y que pueda ser exportado.
Para poder asegurar la trazabilidad del producto y corroborar el cumplimiento la legislación correspondiente es necesario establecer qué información es meritoria de ser registrada a lo largo de la cadena de suministro del queso. Dicha información debe de ser registrada con un criterio y formato común para poder relacionar los datos con los distintos actores.
En este trabajo se definen los datos que son necesarios recopilar y se diseñan documentos que muestran la información a capturar en distintos momentos de la cadena de suministro.

2. Metodología

2.1 Pasaporte Digital Del Queso (PDQ).

El pasaporte digital del producto es una herramienta electrónica que permite integrar un conjunto específico de datos e información que está segmentada entre los distintos actores de la cadena de valor de un producto. Ordenando y estructurando esta información es posible que pueda ser analizada y darle un seguimiento digital generando transparencia hacia los consumidores.

Para asegurar la trazabilidad de quesos existe una amplia normativa nacional e internacional sobre los controles realizados para garantizar el cumplimiento de la legislación correspondiente, interviniendo en esto instituciones como el Servicio nacional de sanidad y calidad agroalimentaria (SENASA, 2024) y normas como el código alimentario argentino (CAA, 2018). Cabe destacar que dependiendo del país al que las PYMES quieran exportar, los requisitos nutricionales y bacteriológicos pueden cambiar. Pudiéndose simplificar el análisis en dos grandes situaciones:

- Países con los cuales existen relaciones comerciales, teniéndose acordado las exigencias sanitarias para exportar productos lácteos a ese destino.
- Países con los cuales no existen relaciones comerciales, por lo que no existe en la actualidad un modelo de certificado zoosanitario acordado y aprobado.

El queso diferenciador en cuestión posee características semejantes al Tête de Moine (Cabeza de monje) de origen suizo. El cual es clasificado, según el código alimentario argentino, como uno de pasta semidura y alto tenor graso (525g/kg de materia seca y 315g/kg de queso). Elaborado a partir de leche sin procesar y con un período de maduración entre 75 y 120 días. Comercializado en hormas de 0,7-2 kg, 10-15cm de diámetro, cuya relación de altura/diámetro es 0,7-1 y color pardo o marrón rojizo. Característico por su fragancia aromática, que se intensifica durante la maduración y presentando un ligero aroma a corteza y hongos. Además de un sabor salado y ligeramente ácido, usualmente con un ligero tono a corteza y pastura.

2.2. Cadena De Suministro Del Queso.

El proceso de elaboración corresponde con las recetas tradicionales para los quesos de pasta semidura. Donde los actores activamente involucrados son tambos, transportistas, laboratorios e industrias. Debiendo los establecimientos lácteos (Tambo e industria), estar certificados por el SENASA y cumpliendo con los requerimientos establecidos en el Decreto del Poder Ejecutivo Nacional Nº 2687/77 (Gobierno Nacional, 1977). Siendo tarea de este garantizar el cumplimiento del CAA, que fija protocolos para realizar el transporte de forma adecuada y determina características físicas y químicas que debe poseer tanto la leche que da origen al producto como el propio queso al finalizar su elaboración. Para el caso de los

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

laboratorios, quien garantiza la validez de los resultados que estos emiten es el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial)

- Tambo: En cuanto a la producción lechera, los sabores y aromas característicos de este queso se deben en parte a la nutrición animal. La presencia de pasturas eleva la concentración de ácidos grasos y otros compuestos que derivan en color, sabores y aromas más intensos. Para el caso de estudio se definió un requerimiento mínimo del 40% de alfalfa en la nutrición del animal con el objetivo de obtener un queso diferenciado por sus cualidades organolépticas. Donde los animales seleccionados para la producción ingresan a un corral sembrado con alfalfa como pastura. Al retirar los animales para su ordeñe se determinará la cantidad de alfalfa consumida en el corral para evaluar la dieta del animal. La leche se almacena en un tanque refrigerado del cual, luego de la tanda de ordeñe, se obtiene una muestra para caracterizar la leche y evaluar el desempeño del proceso de acuerdo con los requerimientos del mencionado código.
- Transporte: El transporte es realizado en camiones cisterna enviados por la industria a las granjas lecheras para recoger la leche, almacenada a una temperatura de 4°C. Los camiones cisterna están equipados con un tanque térmico, una bomba de carga y un caudalímetro. Cada tanque cuenta con compartimentos aislados para separar la leche de diferentes tambos y evitar contaminaciones. Siendo necesario realizar mediciones in-situ de las características de la leche.
- Laboratorio: A partir de una muestra enviada por la industria se controla la calidad de la leche, determinada por su composición de sólidos totales, grasas y proteínas, su estado higiénico-sanitario del recuento de células somáticas y bacterias totales, la titulación de acidez, su punto crioscópico y la presencia de plaguicidas y antimicrobianos en las concentraciones establecidas.
- Industria: La leche se recibe en planta una o dos veces al día, a una temperatura por debajo de 18ºC y debe ser procesada rápidamente. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento y transporte, fundamentalmente si la temperatura es adecuada (debajo de 8ºC), puede aguardarse y procesar ambos ordeñes diarios juntos; de lo contrario, deben procesarse por separado ya que no es posible prorrogar la producción.
  Para la fabricación debe ajustarse el tenor graso de la leche eliminando parte del agua en forma de suero de leche. Los métodos tradicionales permiten únicamente el descremado natural, la centrifugación y la reincorporación de crema procedente exclusivamente del mismo proceso de fabricación.
  La leche de alto tenor graso se vacía en bachas, tradicionalmente de cobre, donde se lleva a cabo la inoculación con cuajo de origen animal. La leche inoculada se agita suavemente mientras se forma la cuajada. Cuando se alcanza la consistencia adecuada se procede a la rotura del coágulo y se comienza la eliminación de agua calentando la cuajada entre 44 y 53ºC. Cuando se ha alcanzado la consistencia apropiada se rellenan los moldes y se prensan para compactar la pasta y reducir aún más el contenido de agua de la cuajada.
  Luego de desmoldarlas, las hormas se sumergen en salmuera durante aproximadamente 12hs y se las lleva a la bodega donde se dejan madurar 90 días. Durante este tiempo se procederá a inspeccionarlas para controlar el crecimiento de hongos y bacterias. Finalmente se realiza el análisis y la caracterización organoléptica de los quesos para verificar el resultado.

2.3. Recopilación De Información Para El Pasaporte Digital Del Queso.

Resulta imprescindible para confeccionar el pasaporte digital un sistema que sea transparente, seguro, con trazabilidad y seguimiento continuo del circuito productivo, desde la alimentación y sanidad de los animales del establecimiento donde se adquiere la leche hasta las características del queso cuando este arriba a su destino de importación.

A fin de lograr la implementación de este sistema es que se debe de exigir una calidad de la información y requiere que se unifiquen criterios de los datos a recopilar. En función de esto el trackeo de información se hará a partir de referenciar un lote de producción de leche en el tambo y su destino final como composición en la elaboración de un lote de queso (múltiples lotes de leche componen un lote de queso). De acuerdo con las consideraciones anteriores, resulta oportuno establecer cuál es la información que cada uno de los actores debe documentar, así como también definir el formato en el que se registrara con vistas a la digitalización de los datos. En la figura 1 se puede observar que se definieron 3 documentos en los que se relevara la información que debería ser incorporada al pasaporte digital.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

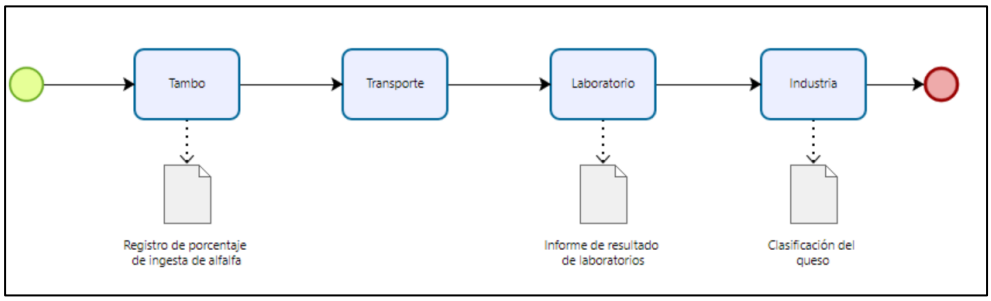


Figura 1: Cadena suministro de la industria láctea y documentación proporcionada en la misma

Datos registrados en el tambo.

Según la investigación realizada por el INTA la recomendación de la ingesta de alfalfa, adoptada en este proyecto, debe de ser de al menos 40% de la dieta del animal (siendo 20 Kg la ingesta diaria de cada vaca 8 Kg serán de alfalfa). Por lo que es necesario registrar la alimentación diaria de las vacas, la marca temporal del registro, así como identificar tanto el establecimiento con su código identificatorio del SENASA como los animales que conforman el lote de seguimiento.

Registro de ingesta de alfalfa	Registro de ingesta de alfalfa		
Establecimiento:	Establecimiento:	....	Texto ....
Codigo identificatorio SENASA:	Codigo identificatorio SENASA:	....	Alfanumerico ....
Fecha y hora:	Fecha y hora:	....	Numerico ....
N° Lote:	N° Lote:	....	Alfanumerico ....
Cantidad de vacas:	Cantidad de vacas:	....	Número ....
Alfalfa consumida (%):	Alfalfa consumida (%):	....	Número ....
Alfalfa consumida (Kg):	Alfalfa consumida (Kg):	....	Número ....

Figura 2. Documentación referida a la alimentación (Izquierda) y formato de registro de datos (Derecha).

Resultados de laboratorio.

En el CAA están establecidas las características organolépticas que debe tener la leche para poder ser utilizada en productos de consumo humano. Esto demanda que se realicen las pruebas correspondientes y se labre un informe con los resultados obtenidos de las muestras de cada uno de los lotes (Correspondiendo un informe por lote). Es necesario registrar el laboratorio y su código de identificación del INTI, proporcionar el código de acceso al informe de las características organolépticas, explicitar si el producto cumple los requerimientos establecidos y registrar el número de lote al que corresponde el documento.

Resultados de laboratorio		Resultados de laboratorio			
Laboratorio:		Laboratorio:	....	Texto	....
Codigo identificatorio INTI:		Codigo identificatorio INTI:	....	Numerico	....
Codigo de informe:		Codigo de informe:	....	Alfanumerico	....
Fecha y hora:		Fecha y hora:	....	Numerico	....
N° Lote:		N° Lote:	....	Alfanumerico	....
Caracteristicas en rango:	SI NO	Caracteristicas en rango:	SI	NO	
Comentarios:		Comentarios:	....	Texto	....

Figura 3. Informe de laboratorio (Izquierda) y formato de registro de datos (Derecha).

Datos para calificación del queso

Según sus valores de humedad y contenido graso este es clasificado y controlado según lo establezca el CAA. También se registran las cualidades distintivas del queso como el tiempo de maduración que tuvo el queso y nombre comercial. Además del lote de queso, se registran los lotes de leche que fueron empleados para su producción.

Calificación del queso	Calificación del queso		
Industria:	Industria:	....	Texto ....
Codigo identificatorio SENASA:	Codigo identificatorio SENASA:	....	Alfanumerico ....
Fecha y hora:	Fecha y hora:	....	Número ....
N° Lote:	N° Lote:	....	Alfanumerico ....
Nombre del queso:	Nombre del queso:	....	Texto ....
Humedad (%):	Humedad (%):	....	Número ....
Contenido graso (%):	Contenido graso (%):	....	Número ....
Tamaño de horma (Kg):	Tamaño de horma (Kg):	....	Número ....
Tiempo de maduración (Dias):	Tiempo de maduración (Dias):	....	Número ....

Figura 4. documentación descriptiva del queso (Izquierda) y formato de registro de datos (Derecha).

2.4. Fuente De Datos De Interés.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Para obtener la información descripta en la sección 2.3 resulta necesario analizar las diferentes fuentes de datos que poseen los actores de la cadena de suministro, es decir qué dispositivos, máquinas, tanques, base de datos, documentos etc. permitirán capturar los datos necesarios para el desarrollo del pasaporte digital. A continuación, se describen brevemente cómo se podrían obtener en cada eslabón.

Alimentación (Registro de alfalfa)

La dificultad de registrar esta información por los tamberos radica en que el sistema de alimentación más difundido en la industria agropecuaria argentina es el sistema pastoril con suplementación, donde las vacas se alimentan generalmente con forraje a base de alfalfa y hortalizas, complementado con ensilaje de maíz o sorgo, además de cereales como la soja. En este sentido, las metodológicas de medición del consumo suelen ser referidas a mediciones de cantidad de materia seca disponible antes y después del pastoreo, para ello, encontramos en la actualidad métodos destructivos y no destructivos para obtener dichos datos y así poder traspolarlos a la cantidad de materia ingerida por los animales. Los métodos más destacados son:

- Imágenes satelitales: Esta técnica tiene la ventaja el acceso a imágenes satelitales de libre patente y la facilidad de disponer de forma digital la información requerida para estimar la ingesta de alfalfa de una parcela.
- Uso de drones: Además de contar con información similar a la otorgada por las imágenes satelitales, tiene la ventaja de administrar de manera autónoma la zona del terreno que se desee analizar y la posibilidad de adaptar la frecuencia de actualización de la información (Bruno Recchia, 2024).

Con esta información se puede construir el registro de ingesta de alfalfa (figura 2)

Registro de laboratorio

Para el control de las características organolépticas se dispone de distintos ensayos realizados en los laboratorios donde se cercioran del cumplimiento de los valores de control en los rangos establecidos en la norma. Para mayor claridad se expondrá en la tabla1 los rangos de las características junto con la metodología utilizada para estimar los valores en la muestra recibida del lote a evaluar. Cabe mencionar que existen diferentes técnicas, utilizadas para ensayar in-situ, que expresan valores preliminares para tomar distintas decisiones en la cadena de producción que también serán incluidas en la tabla mencionada.

Con esta información se puede construir el informe de laboratorio (figura 3)

Tabla 1: Valores permitidos de las características de la leche y metodologías de ensayo.

Caracteristica en analisis	Metodo en laboratorio	Método in-situ	Valores aceptados
RCS (Recuento de celulas somanticas)	Citometría de flujo	Fossomatic	400000
RBT (Recuento de baterias totales)	Citometría de flujo	Bacto scan	200000
SG (Solidos grasos)	Método Gerber, método Kjeldahl o analizadores lacteos con infrarrojo	Milko Scan	Minimo 3 g/100 g
Lactosa	Método Gerber, método Kjeldahl o analizadores lacteos con infrarrojo	Milko Scan	4,5 a 5 (g/100 g)
SNG (Solidos no grasos)	Método Gerber, método Kjeldahl o analizadores lacteos con infrarrojo	Milko Scan	Minimo 8,2 g/100 g
ST (Solidos totales)	Método Gerber, método Kjeldahl o analizadores lacteos con infrarrojo	Milko Scan	Minimo 2,9 g/100 g
Densidad	Se utiliza un lactodensímetro		1,028 a 1,034
Acidez	Titulación de acidez	Milko Scan	0,14 a 0,18 g/L
Inhibidores	Prueba de la Delvotes	Milko Scan	Articulo 556 del CAA
Descenso crioscopico	Uso de un crioscopio		Maximo 0,512 °C
Prueba de alcohol	Prueba de alcohol al 72%:		Negativa

Clasificación del queso.

Para certificar la calidad del queso se le realiza una prueba para primeramente ubicarlo dentro de las clasificaciones del CAA y por consiguiente el control de las características organolépticas propia de la clasificación correspondiente del queso. En este trabajo el producto buscado es un queso alto en grasa (Entre 45% y 59,9%) y humedad media (Entre 36% y 45,9%). El procedimiento es retirar una muestra del producto, controlar la textura, sabor y humedad del queso, y finalmente se incuban colonias de las bacterias a ensayar que exige el CAA que estén en rango.

Con esta información se puede construir el informe de calificación del queso (figura 4)

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

3. Resultados y discusión

3.1. Caso De Estudio

La figura 5 presentan un ejemplo del registro de datos en los documentos definidos en la sección 2.3. En la figura puede observarse que la leche proviene de un tambo denominado “Granjera”, posee 80 vacas y se asigna como número de lote G-531-2748 que pertenece a la cantidad de leche producida por esas 80 vacas. El registro muestra también que se cumple el requerimiento de que las vacas deben consumir un 40 % de alfalfa o más. Luego muestra que para el lote G-531-2748 se cumple con las características de la leche exigida por la legislación. Finalmente, la empresa que produce el queso se denomina Lácteos SA y con el lote de G-531-2748 produce el queso denominado “Cabeza de monje” con ciertas características obtenidas luego de su proceso de producción.

Registro de ingesta de alfalfa	
Establecimiento:	Granjera
Codigo identificatorio SENASA:	2748
Fecha y hora:	31/8/2024 12:51
Nº Lote:	G-531-2748
Cantidad de vacas:	80
Alfalfa consumida (%):	47
Alfalfa consumida (Kg):	752

Resultados de laboratorio		
Laboratorio:		Alecol
Codigo identificatorio INTI:		3017
Codigo de informe:		1512
Fecha y hora:		31/8/2024 12:51
Nº Lote:		G-531-2748
Caracteristicas en rango:	SI	NO
Comentarios:		

Calificación del queso	
Industria:	Lacteos s.a.
Codigo identificatorio SENASA:	7083
Fecha y hora:	18/11/2024 12:51
Nº Lotes:	G-531-2748
Nombre del queso:	Cabeza de monje
Nº Lote del queso:	L-106-7083
Humedad (%):	35,2
Contenido graso (%):	53
Tamaño de horma (Kg):	1,2
Tiempo de maduración (Dias):	92

Figura 5: Información referente a la alimentación del lote de vacas G-531-2748 en el tambo "Granjera" (Izquierda), registro de los ensayos correspondientes al lote de leche en el laboratorio “Alecol” (Centro) y características del lote de queso L-106-7083 en la industria “Lacteos s.a.” (Derecha)

4. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se estudió la cadena de suministro láctea y la legislación existente para la trazabilidad y exportación de productos lácteos. Como resultado, se describió la información relevante que debería contener el pasaporte digital de un queso con características diferenciables y de exportación. Se definieron los datos que serán registrados, teniendo como horizonte facilitar la digitalización de estos para que sea compartida entre los actores intervinientes del proceso. Si bien la propuesta se muestra para un tipo de queso, la misma puede ser aplicada a diferentes productos lácteos.

Si bien se definieron los datos e información que contendrá el pasaporte digital del queso, queda pendiente la definición de la metodología y tecnología para la captura y registro de los datos. Es decir, queda resolver ¿con qué tecnología se obtendrán los datos?, ¿quién los cargará y de qué manera?

La obtención de datos depende de la tecnología existente en cada eslabón de la cadena productiva, pero se podría evaluar la incorporación de tecnología específica en caso de ser necesario y así, avanzar en el análisis de un prototipo de implementación del Pasaporte Digital.

Referencias bibliográficas

Armando Colombo et al. (2023). An Industry 4.0-compliant Digital Product Passport Approach for Realising Dairy Product Traceability. IECON 2023 is the 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IES).

Bruno Recchia. (2024). Métodos de obtención de datos en campo pasaporte digital de producto lácteo. (2024) Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe

Código Alimentaria Argentino. (2018). Web: https://acortar.link/W7d2gv

Decreto 2687/77. (1977). Web: https://acortar.link/fso5GY

Decreto 815/99. (1999). Web: https://acortar.link/Q7N7Ra

Erica Fernadez y Jose Luis Torres. (2024). Digitalization of the existing primary production dairy chain in the central-western region of the Province of Santa Fe, using Industry 4.0 technology.

Ministerio de Economía, Agricultura, Ganadería y Pesca. SENASA. (1998) Web: https://acortar.link/OkR1Rg

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Product Specification Tête de Moine, Fromage de Bellelay Registered as a Protected Designation of Origin. (2021). Web: https://acortar.link/89t8PE
INTI. (2011). Requisitos para habilitación de laboratorios. Web: https://acortar.link/6LKGef

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Tecnologías de las organizaciones
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Aplicación de una Metodología para Identificar Áreas Prioritarias en la Transformación Digital de PyMEs: Análisis Inicial

Application of a Methodology to Identify Priority Areas in the Digital Transformation of PyMEs: Initial Analysis

Presentación 18/10/2024

Bianca Arteta
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.
E-mail de contacto: biancaarteta01@gmail.com

Jesé Trulli
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.
E-mail de contacto: jesetrulli@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta un análisis preliminar del resultado de la aplicación de una metodología que tiene como objetivo identificar el área de la cadena de valor productiva en donde debería comenzar la transformación digital una PyME. Dicha metodología cuenta con un cuestionario que fue realizado a tres empresas de diferentes rubros y posteriormente, fue procesado para dar una respuesta a cada una de las empresas mediante un informe que resume brevemente su situación actual y menciona recomendaciones por dónde comenzar con la transformación digital. En este trabajo, se presenta el informe final que recibe la empresa entrevistada y se analizan los resultados obtenidos con el objetivo de detectar fortalezas, debilidades u oportunidades de mejora antes de realizar una validación que implique un número mayor de empresas.

Palabras clave: Transformación Digital; Industria 4.0; Metodología para PyME

Abstract

This work presents a preliminary analysis of the results from applying a methodology aimed at identifying the area of the value chain where a small or medium-sized enterprise (SME) should begin its digital transformation. This methodology includes a questionnaire that was administered to three companies from different industries. The responses were then processed to provide each company with a report that briefly summarizes their current situation and offers recommendations on where to start their digital transformation. In this paper, the final report received by the interviewed company is presented, and the results obtained are analyzed to identify strengths, weaknesses, or opportunities for improvement before conducting a validation involving a larger number of companies.

Keywords: Digital Transformation; Industry 4.0; Methodology for PyME

1. Introducción

El mundo actual avanza a una velocidad elevada y las empresas deben responder a esa demanda, donde todo se solicita en la inmediatez. Las propuestas tecnológicas para lograr estos objetivos son amplias y se encuentran en un proceso de mejora continua. En este contexto, diferentes sectores industriales argentinos enfrentan el desafío de adaptarse a los rápidos avances tecnológicos y aprovechar las oportunidades que estos ofrecen.

La literatura existente sobre tecnologías de la Industria 4.0 reconoce el impacto positivo de estas en las organizaciones y en el potencial de brindar visibilidad a la información ayudando en la toma de decisiones y reducción de costos (Biswas et al., 2024). En (Ammar et al., 2022) se menciona que la adopción de tecnologías I4.0 conduce a mejoras significativas en la productividad de las organizaciones, en la flexibilidad para adaptarse a eventos no planificados, en la reducción de los tiempos de entrega de las órdenes, en las condiciones del lugar de trabajo y en la eficiencia de la producción. Sin embargo, I4.0 y la revolución digital representan más que un simple desafío de software y/o hardware, constituyen para las organizaciones una revolución cultural, intelectual, de recursos y de competencias (Sima et al., 2020).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Aunque la mayoría de las empresas se encuentra incorporando tecnología para agilizar la toma de decisiones y no quedar fuera de mercado, se les dificulta definir por dónde comenzar con la transformación digital debido a que requiere un adecuado análisis organizacional que permita identificar y priorizar problemáticas u oportunidades de mejora tanto a nivel estratégico como operacional. Muchas PyMES automatizan sus procesos, invirtiendo dinero en maquinarias, robots e instalaciones industriales porque pueden obtener datos (sin analizarlos) o simplificar tareas sin evaluar realmente el impacto/utilidad en la organización, generando costos altos de inversión innecesarios.
En la actualidad, existen diversas herramientas y/o test que permiten conocer la madurez digital de una organización evaluando el conjunto de herramientas tecnológicas y habilidades digitales que tienen para adaptarse y utilizar las nuevas tecnologías digitales en su quehacer diario. Los resultados de la aplicación de estas herramientas, muestran que existen dificultades y obstáculos para interpretar los resultados debido a que brindan conclusiones generales sin una clara identificación de por dónde se debe comenzar o continuar con la transformación digital.
Es por ello, que se desarrolló una metodología que permite identificar potenciales objetivos de transformación digital en la cadena de valor de una organización. Dicha metodología consiste de 5 pasos: 1- Descripción de la empresa, 2- Priorización de áreas, 3- Realización del cuestionario, 4- Mecanismo de procesamiento del cuestionario y 5- Identificación del área y el objetivo de la transformación digital (Natán Montenegro y Luis Nadalutti, 2023). En (Bianca Arteta y Leandro Riva, 2023), se presenta el mecanismo de procesamiento del cuestionario, el cual describe como se obtienen los resultados de ponderación individual de las áreas.
En este trabajo se realiza un análisis preliminar de la aplicación de la metodología en tres empresas con el objetivo de analizar sus fortalezas, debilidades u oportunidades de mejora antes de realizar una validación que implique un número mayor de empresas.

2. Metodología

2.1. Antecedentes y aporte a la metodología existente

La metodología propuesta y descripta en (Natán Montenegro y Luis Nadalutti, 2023), consta de cinco pasos. El paso 1, descripción de la empresa consiste en un conjunto de preguntas para capturar datos fundamentales de la organización (rubro, tamaño, productos, etc.) y de la persona entrevistada, misma la cual es selecta en función de su conocimiento general sobre la empresa y capacidad de adquisición de la información necesaria para la entrevista. El paso 2, priorización de áreas captura desde un punto de vista objetivo y subjetivo la criticidad de un área en la cadena valor de la organización. Las áreas definidas para evaluar como potenciales a realizar transformación digital son: logística de entrada y salida, operaciones, marketing y ventas, investigación y desarrollo, infraestructura tecnológica y mantenimiento.
El paso 3, realización del cuestionario consiste en un conjunto de preguntas que el entrevistador debe responder para cada una de las áreas de la cadena de valor. El cuestionario posee preguntas de múltiple opción y algunas de ellas pueden requerir completar información por parte del entrevistado (por ejemplo: información de los tipos de mantenimientos aplicados a los equipos críticos).
El paso 4, consiste en un mecanismo de procesamiento del cuestionario donde se define la puntuación para cada respuesta y la evaluación para obtener el paso 5, que es la identificación del área y el objetivo de la transformación digital con mayor probabilidad de continuar analizando para definir un plan de transformación digital. Este mecanismo de procesamiento fue descripto y presentado exhaustivamente en (Bianca Arteta y Leandro Riva, 2023). En la Figura 1 se muestra un pequeño ejemplo de la distribución de puntajes para las respuestas en una pregunta ejemplo del área de logística. En el ejemplo, se le asigna un puntaje total (**6**) a la pregunta total, mientras que a cada respuesta se le asigna un valor entre 0 y 1. El valor de la respuesta se multiplica por el valor total de la pregunta. Luego, para cada área se realiza la relación entre la suma del total del valor respondido y del valor total de la pregunta. El resultado obtenido, también entre 0 y 1, indica la prioridad para realizar una potencial transformación digital. Estos valores quedan plasmados gráficamente en el histograma de la sección 2, de la Figura 2.

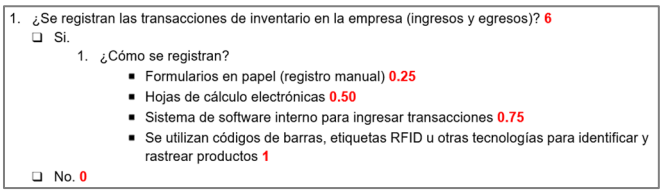


Figura 1. Ejemplo de Asignación de Puntaje

Cuando la empresa finaliza el cuestionario se realiza el procesamiento de datos manualmente, utilizando el mecanismo previamente descripto, y se obtiene un informe con el resultado el cuál se muestra en la figura 2. En la sección 1, se muestra el

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

nombre de la empresa, el rubro al que corresponde y datos generales de interés. Esta información sale del Paso 1 de la metodología. La segunda sección, es la más importante del informe porque, mediante un histograma, muestra la valoración de las preguntas realizadas en el formulario y el procesamiento de las respuestas. El histograma es el diagrama que indica, a la empresa, en cuál de los 6 sectores evaluados se puede llegar a detectar mejores oportunidades para la transformación digital. En la sección 3, se describe en palabras el contenido de la sección anterior y se enuncian las problemáticas significativas que se hayan encontrado al procesar las respuestas y que puedan aportar al entendimiento del histograma. Estas dos últimas secciones (2 y 3) surgen del Paso 4 y 5 de la metodología. Finalmente, en la sección 5, se muestran comentarios que puedan agregar valor al documento.

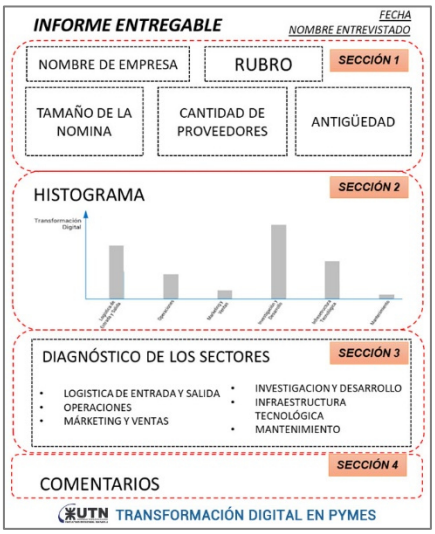


Figura 2. Informe Resultante

2.1. Casos de estudio

Se realizó la aplicación de la metodología, el mecanismo de procesamiento y la generación del informe entregable a 3 empresas de la región que pertenecen al sector metalúrgico, aceitero y químico con el objetivo de evaluar el desempeño en empresas de distintos rubros.

En la empresa metalúrgica se entrevistó a un analista de procesos, en la aceitera se entrevistó a la gerenta de producción y en la industria química al encargado de calidad.

Luego de realizar la entrevista y completar el cuestionario, se aplica el mecanismo de procesamiento el cual en la actualidad se desarrolla manualmente debido a que resulta importante en esta etapa la intervención del sentido crítico del encuestador en el procesamiento de los datos. Esto puede generar mejores resultados tanto para la empresa que recibe el informe entregable como para la detección de mejoras que se pueda realizar sobre el mismo formulario de preguntas y el sistema de valoración de respuestas.

3. Resultados y discusión

Primera entrevista: Empresa metalúrgica

La primera entrevista fue realizada en una empresa metalúrgica, la cual produce diversas autopartes por pedido en masa. La encuesta fue asincrónica y completada por el Analista de Procesos, por ende, se desconoce la duración, mientras que el formulario fue respondido en un plazo de once minutos. A continuación, se describe brevemente las respuestas obtenidas para cada área.

Logística de entrada y salida, el stock se encuentra documentado, tanto de materia prima como de producto terminado, el mismo se realiza de manera manual y se carga diariamente a un sistema, el cual se verifica manualmente entre un plazo de dos a cuatro semanas para controlar las existencias con las digitales.

Operaciones es un área que tiene una variedad de equipos (tornos, fresadoras, laminadoras, rectificadoras, prensas, entre otros) y un registro de procedimientos claros pero la cantidad de procesos con los que se trabaja no permite reconocer correctamente los cuellos de botella que se entiende que existen y por ende no se identifica precisamente donde se debería mejorar la maquinaria o hacer hincapié para mejorar el área.

Marketing y ventas posee un plan estratégico. Se realizan encuestas para conocer la información de los clientes, no se conoce directamente el aporte de estas encuestas y se demora demasiado en procesarlas, las mismas se realizan manualmente y se contrastan en una planilla de cálculo.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Investigación y desarrollo, no se identifican problemas relevantes que afecten el funcionamiento adecuado del área, salvo por motivos ajenos al área, por ejemplo, debido al poco trabajo existente o nulo en algunas épocas, se asigna a los mismos a realizar trabajos correspondientes a otros sectores.
La empresa mantiene servidores internos y externos, en los que se almacena toda la información que se posee, los datos de los equipos se toman tanto digital como manualmente, en menor medida, y se los almacena y procesa digitalmente.
Mantenimiento se comunican avisos automáticos a las áreas correspondientes ante mantenimientos preventivos, se realizan mantenimientos predictivos en equipos de alto valor y se posee un plan ante mantenimientos correctivos.
La figura 3 representa el informe que recibe la empresa, el cual resulta del procesamiento numérico de las respuestas y sentido crítico del encuestador. En el informe entregable para la metalúrgica, se puede ver que el histograma indica con mayor énfasis que las oportunidades de transformación digital se encuentran en el sector de operaciones, seguido por el sector de logística, marketing y ventas y finalmente infraestructura tecnológica, para concluir con mantenimiento e investigación y desarrollo.

Segunda entrevista: Empresa química
La segunda entrevista fue realizada en una empresa química, la misma realiza principalmente productos químicos de limpieza y desinfectantes para venta al público. Se entrevistó de manera presencial al encargado del área de calidad, demorando doce minutos en el formulario y veinticinco en la encuesta.
Logística de entrada y salida, el entrevistado resaltó problemas existentes con el abastecimiento, esencialmente en el control actual, la forma que utilizan para conocer su stock se basa en una revisión ocular y comunicación personal, no se posee un sistema de registro ni nada relacionado con ello, esto debido a la metodología con la que vienen trabajando desde un inicio, este problema es de conocimiento de la empresa y no se lo soluciona por lo que el entrevistado resalta como “no es necesario actualmente” y que “hay problemas peores”.
Operaciones poseen su propia estructura, donde todo está detallado en procedimientos, cada fabricación tiene su propia hoja de ruta, esto debido a la precisión que se requiere en las mezclas. Si bien la mayor parte del trabajo es realizado por máquinas, en lo que a tiempo respecta, no se sabe con exactitud cuando un producto se encuentra concluido y para esto se realizan pruebas en el laboratorio cada cierto tiempo.
Marketing y ventas se formó hace aproximadamente un año en la empresa, la misma se encuentra en sus inicios y actualmente se encuentra formulando sus planes y estructuras para implementarse a futuro, no siendo el área capaz de dar respuesta a muchos de los puntos planteados por este motivo.
Investigación y desarrollo no corresponde a un área en la empresa, según el entrevistado “debido a la complejidad, el desarrollo de nuevos productos queda en mano de laboratorios y grupos de investigación completamente externos a la empresa, solamente se encargan de reproducirlos”.
La actual estructura tecnológica comprende gran parte de equipos modernos, los datos de la empresa se encuentran almacenados en los servidores de la misma y respaldados adecuadamente, aun así, parte de los datos recopilados por los equipos se registran de forma manual y se archivan.
Los procedimientos de mantenimiento actuales se realizan por el área en cuestión y son administrados y controlados por el encargado actual, estos se registran parcialmente y de forma manual, no existe coordinación entre áreas para el planeamiento del mantenimiento y no es analizada salvo que ocurra algún problema grave.
En la figura 4 se puede observar el informe generado y las preguntas del formulario, se remarca el área de Investigación y Desarrollo, la cual no se encuentra en el histograma debido a lo anterior mencionado y así evitando posibles inconvenientes de interpretación. En consideración de lo ya antes descrito, la progresión de la transformación digital queda definido por el histograma en el informe resultante, siendo mantenimiento la prioridad y a posteriori el resto.

Tercera entrevista: Empresa aceitera
La tercer y última entrevista fue realizada en una empresa aceitera, la misma produce aceite de soja y derivados. La persona entrevistada fue la gerenta de producción y dio respuesta al formulario y encuesta en el momento, mismos los cuales demandaron nueve y quince minutos respectivamente.
Logística de entrada y salida para el control de ingreso y egreso de materia prima y producto terminado se utiliza una balanza en el pesaje de los vehículos de transporte, los procedimientos de registro se realizan manualmente para a posteriori ser cargados en el sistema.
Operaciones se encuentra debidamente planificada y es funcional, la estructura está bien definida y se registran procedimientos. Se recalca el compromiso ambiental adoptado por la empresa y la ineficiencia actual en el consumo de agua en producción.
Marketing y ventas se encuentra debidamente estructurado y no se recalca inconveniente o percance por parte del entrevistado.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Investigación y desarrollo, el desarrollo de nuevos productos y mejoras se realiza siguiendo procedimientos y controles estrictos, con alto compromiso por los integrantes del área. Aun así, la comunicación interna de estas labores se realiza manualmente y los avances se registran solo a nivel personal y no de servidor, siendo un inconveniente para analizar o realizar un seguimiento por encargados o la gerencia.

La infraestructura tecnológica de la empresa es altamente competitiva y se mantiene actualizada, incitando la mejora continua, se posee tanto servidores propios como nueve para el almacenamiento y se realizan copias de seguridad diariamente de archivos importantes y semanalmente o mensualmente del resto de la información.

El mantenimiento posee un sistema de registro que se puede seguir desde cualquier área de la empresa, esencialmente producción, en la que se observa bisemanalmente el calendario con los equipos, sus diversas tareas a realizar y tiempo estimado, además la comunicación por solicitud de mantenimiento es por medio digital interno de la empresa.

En función de lo considerado anteriormente y la información obtenida del formulario se le devolvió a la empresa el informe que se puede observar en la figura 5. Se tuvo en alta consideración el compromiso de la empresa con el medio ambiente para la devolución. El área prioritaria, en orden cronológico, a incurrir en una transformación digital es *Operaciones*, siendo con gran diferencia la de mayor resultado según el histograma.

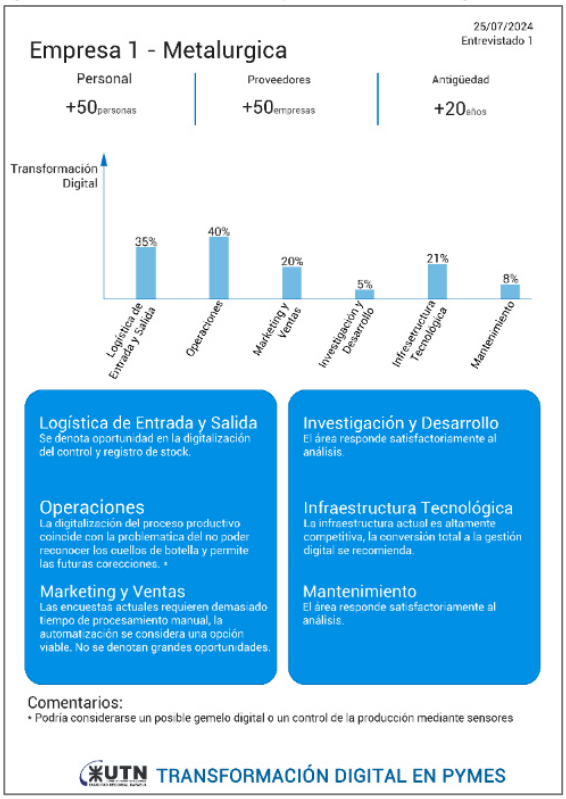


Figura 3. Informe Resultante de una Empresa Metalúrgica

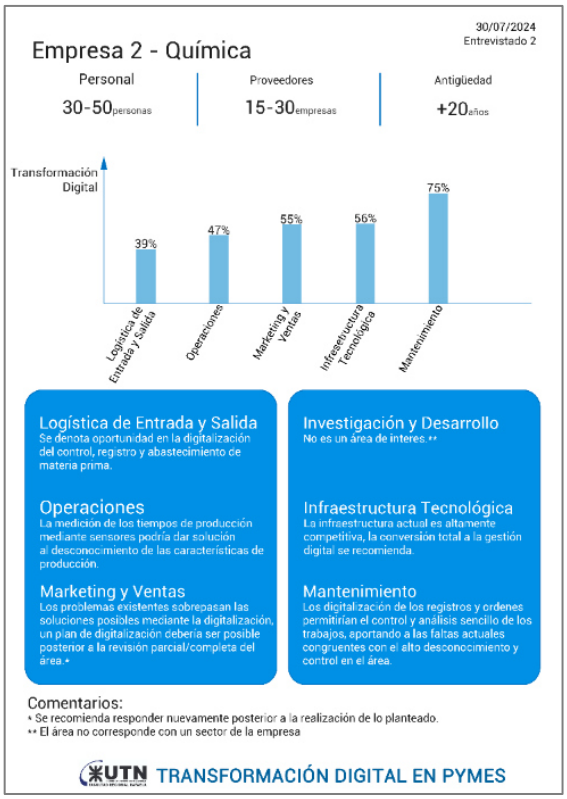


Figura 4. Informe Resultante de una Empresa Química

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

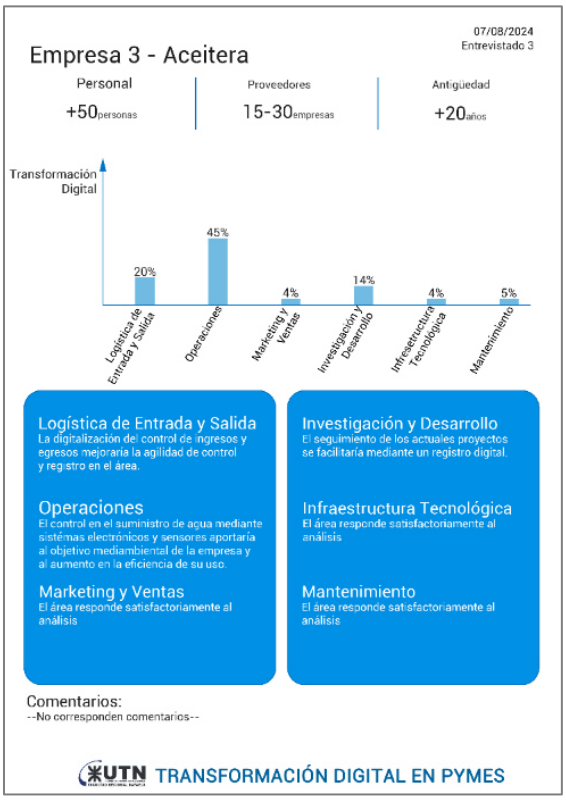


Figura 5. Informe Resultante de una Empresa Aceitera

3.1. Discusión de los resultados

La diversidad en el tipo de industrias entrevistadas permitió la independencia del análisis en cada una, no siendo sesgadas las respuestas por previas consideraciones. Así mismo los resultados obtenidos difieren entre sí en gran medida, desde el orden de prioridad de las áreas hasta áreas sin existencia, la relación entre los informes y, por ende, la extrapolación a un análisis general, no es asertiva en definición de la muestra actual.

Definido la nula relación entre las distintas empresas, se reconocen los beneficios de las recomendaciones planteadas, partiendo de la primera empresa, los inconvenientes en la identificación de sus cuellos de botellas combinado con la ineficiencia del control y registro de stock no permiten la planificación adecuada de producción, la mejora en la agilidad de registro y control otorgada por la digitalización condecirían en planear y distribuir recursos con mayor precisión. En la segunda empresa se identificaron inconvenientes en todas las áreas, la variedad de recomendaciones planteadas no sigue una línea de solución conjunta, sino que prevén cubrir los problemas por separado, las soluciones propuestas apuntan a mejorar la comunicación entre áreas y la disposición, registro y recolección de la información, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones. En la tercera empresa el compromiso ambiental definió una problemática clave en el resultado, a saber, la ineficiencia de la utilización del agua; la gestión de recursos y el planeamiento habilitado por la transformación digital en conjunción con sensores para control del uso de las distintas fuentes de agua otorga la solución acertada a este inconveniente, impactando directamente en la mejora área de producción.

Finalmente, se identificó como fortaleza de la metodología, el tiempo reducido para completar la misma debido a que para cada área se definieron preguntas claves con el objetivo de identificar por dónde la empresa debe comenzar a realizar la transformación digital. Como debilidad se puede mencionar que el procesamiento del cuestionario es manual y requiere de análisis de información que es completada por cada empresa. Para ampliar la cantidad de empresas a validar se debería analizar la utilización de algún mecanismo de procesamiento automático.

4. Conclusiones

La metodología actual permite la recolección de información de forma eficiente mediante preguntas estratégicas, el procesamiento a través de métodos de ponderación y otorga como resultado, de forma gráfica y resumida, un informe en el que se detalla el orden identificado de transformación digital por área y las recomendaciones respectivas. Este informe otorga a la empresa conocimiento sobre su situación, permitiendo el planeamiento en consideración de esto y, por ende, la optimización en la distribución de recursos. Como trabajo futuro, se deberá continuar extendiendo el informe, quizás agregando

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

gráficos resultantes en algunas de las secciones. También se validará la metodología propuesta, comenzando con una muestra de empresas de Rafaela que se deberá definir en función de sectores industriales interesados.

Agradecimientos

Nos gustaría agradecer a las personas que participaron de este trabajo, desde los que nos permitieron probar la metodología en su empresa hasta los profesores que nos brindaron su apoyo para la elaboración de la misma. Sus aportes y orientación fueron cruciales para el desarrollo y refinamiento de este proyecto.

Referencias

Ammar, M., Haleem, A., Javaid, M., Bahl, S. y Verma, A. S. (2022). Implementing Industry 4.0 technologies in self-healing materials and digitally managing the quality of manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, *52*(8), 2285–2294. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.248

Bianca Arteta y Leandro Riva (2023). Mecanismo de procesamiento de encuestas para identificar objetivos de digitalización en pymes. *Jovenes Investigadores Tecnologicos*.

Biswas, I., Singh, G., Tiwari, S., Choi, T.-M. y Pethe, S. (2024). Managing Industry 4.0 supply chains with innovative and traditional products: Contract cessation points and value of information. *European Journal of Operational Research*, *316*(2), 539–555. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.01.047

Natán Montenegro y Luis Nadalutti (2023). Metodología científica y práctica para identificar objetivos de transformación digital en PYMEs. *Jovenes Investigadores Tecnologicos*.

Sima, V., Gheorghe, I. G., Subić, J. y Nancu, D. (2020). Influences of the Industry 4.0 Revolution on the Human Capital Development and Consumer Behavior: A Systematic Review. *Sustainability*, *12*(10), 4035. https://doi.org/10.3390/su12104035

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Embolsado y extracción de granos. Determinación del costo operativo utilizando costeo por absorción.	
Área prioritaria:	Tecnologías de las organizaciones
Categoría:	Estudiante
Facultad Regional:	Reconquista

Embolsado y extracción de granos. Determinación del costo operativo utilizando costeo por absorción

Bagging and extraction of grains. Determination of operating cost using absorption costing

Presentación 18/10/2024

Fabio Garcia

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: fabiogarciaa16@gmail.com

Mara Armoa

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista, Reconquista, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: mararmoa1992@gmail.com

Resumen

El silo bolsa es una innovación tecnológica clave para el acopio de granos, utilizada ampliamente en los últimos años. Este proyecto de investigación tiene como objetivo determinar el costo de embolsado y extracción de granos para un productor agropecuario con el equipo necesario, considerando diferentes escalas de producción que incluyen girasol, soja, trigo, maíz y sorgo. Se utilizó el sistema de costeo por absorción para calcular los costos. El costo por tonelada para el planteo técnico analizado es de U$S 7.66 para 15 bolsas anuales, reduciéndose a U$S 5.70 para una escala de 100 bolsas anuales. Conocer estos costos es fundamental para que el productor decida entre embolsar en el campo o entregar a un acopiador. Este análisis busca facilitar la toma de decisiones estratégicas, mejorando la gestión objetiva y profesional de la empresa agropecuaria.

Palabras claves: Costo de silo bolsa; almacenamiento silo bolsa; costeo por absorción; tiempo operativo; escala de producción.

Abstract

The bag silo is a key technological innovation for grain collection, widely used in recent years. This study aims to determine the cost of bagging and grain extraction for an agricultural producer with the necessary equipment, considering different production scales that include sunflower, soybeans, wheat, corn and sorghum. The absorption costing system was used to calculate costs, considering both fixed and variable costs. The cost per ton for the technical approach analyzed is US$7.66, reducing to US$5.70 for a scale of 100 bags per year. Knowing these costs is essential for the producer to decide between bagging in the field or delivering to a collector. This analysis seeks to facilitate strategic decision making, improving the objective and professional management of the agricultural company.

Keywords: silo bag cost; storage silo bag; absorption costing; operating time; production scale.

1.Introducción

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

El silo bolsa en Argentina es una herramienta consolidada de traslado en el tiempo de la producción granaría, ampliamente utilizada por productores agropecuarios, acopios, industrias y otros actores de los complejos agroalimentarios[1]. Como herramienta tecnológica es para el acopio de granos una innovación que se vio rápidamente difundida en los últimos años. Esta tecnología se introdujo en Argentina en el año 1994, y a partir del año 1995, se comenzaron a realizar los primeros ensayos por parte del INTA[2]. Se estima, que, durante los últimos cinco años, entre el 40% y el 50% de la producción de granos se almacenan en silos bolsa[3], lo cual destaca la importancia de esta tecnología para nuestro país, como importante productor de granos.

El productor agropecuario, al almacenar el grano en el campo, por un lado, puede especular y gestionar el momento óptimo de venta, aprovechando los mejores precios del mercado, y por otro, puede mejorar su capacidad de negociación tanto por el costo del flete que debe pagar o por la posibilidad de ofrecer su grano a varios compradores.

Algunos productores poseen en su establecimiento, parte o la totalidad del equipamiento necesario para embolsar y extraer el grano del silo bolsa: tractores, tolvas autodescargables, embolsadora y extractora. Para ellos es estratégico conocer el costo real del embolsado y extracción de granos, ya que le permite tener la información para comparar dicho costo con el de enviar el grano directamente al acopio o de contratar el servicio para realizar dichas tareas.

Partiendo de la premisa de que el productor sabe y conoce los parámetros óptimos de calidad que debe reunir el grano para poder almacenarse, y que se pueden resumir en: Granos Sanos, Secos y Limpios, el objetivo general del presente trabajo se resume en:

"Determinar el Costo de Embolsado y Extracción de Granos para el caso de un productor agropecuario que dispone del equipamiento necesario, considerando distintas escalas de embolsado para un planteo productivo que incluye producción de Girasol, Soja, Trigo, Maíz y Sorgo Granífero".

En función a ello, la unidad de costeo será la tonelada de cada grano embolsado y extraído según el planteo técnico que se defina.

2.Planteo Técnico del Caso - Metodología

Se analiza el caso de un productor agropecuario que produce Girasol, Soja, Trigo, Maíz y Sorgo Granífero y que dispone del equipamiento necesario para realizar el embolsado y extracción de granos.

Para determinar los costos del planteo, se optó por aplicar el sistema de costeo por absorción, en dónde todos los costos, tanto fijos como variables, son absorbidos por las tareas que forman parte de la actividad.

Todos los costos están expresados en U$S, contemplando un tipo de cambio equivalente a la cotización del dólar tipo vendedor del banco de la nación argentina, que a la fecha del presente trabajo cotiza en $969.50 / U$S.

Las etapas que serán consideradas como partes del proceso de generación de costos comienzan con la epata 1, que corresponde a la carga del grano directo de la cosechadora a la tolva autodescargable. La etapa 2 es el traslado del grano hasta el lugar de embolsado, se consideró un recorrido de 1.000 metros para el traslado, intervienen los mismos de la etapa 1. Etapa 3 corresponde al embolsado del grano, sumándole a las maquinarias intervinientes un tractor conectado a la embolsadora. Por ultimo la etapa 4 que corresponde a la extracción del grano y carga a camión para destino final.

El equipamiento disponible por parte del productor, con su potencia, capacidad y valor a nuevo de referencia es el siguiente:

Tabla 2. 1 Inversiones contempladas.

Tipo de Inversión	Potencia / Capacidad	U$S
Tractor 1	Potencia de 120 HP	$ 90.000,00
Tractor 2	Potencia de 120 HP	$ 90.000,00
Embolsadora	Flujo continuo 250 tn/h	$ 17.534,00
Extractora	Capacidad de 250 tn/h	$ 33.693,00
Autodescargable	Autodescargable de 20tn	$ 38.000,00

Otros datos técnicos que se consideraron para determinar el costo operativo del tractor se presentan seguidamente:

[1] FERRO MORENO, S. y PATURLANNE, J. Costos y desempeño Económico del Traslado en el tiempo de productos agrícolas. El Silo Bolsa en Argentina (2004-2014). RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias. ISSN 0325-8718, Vol. 41, N° 3, diciembre 2015, INTA Buenos Aires.

[2] Benedetti Gerónimo – Análisis Marginal. Determinación del Costo del Almacenamiento de Soja Poroto en Silo Bolsa. Carrera de Postgrado. Especialización en Costos y Gestión Empresarial. IAPUCO – Instituto Argentino de Profesores Universitarios de Costos. Cohorte 14 – 2016-2017.

[3] Hernán Urcola y Ricardo Bartosik. "Calculador de Costos de Embolsado de Granos". INTA Balcarce. 2021.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 2.2 Datos técnicos del tractor.

Valor residual (% del VN)	40%
Vida Útil (años)	15
Vida Útil (horas)	12000
Vida Útil Equivalente de uso (horas/año)	800
Consumo específico (lts/cv/hs.- Transporte)	0,18
Consumo específico (lts/cv/hs.- Embolsadora)	0,16
Consumo específico (lts/cv/hs.- Extractora)	0,16
Consumo Lubricantes (% s/gastos combustibles)	10%
Seguro (U$S/año)	U$S 600
Coeficiente de gasto de reparación y mantenimiento de Tractor	0,000071

Mano de Obra: Se consideró el valor por jornal comprendido en el régimen de trabajo agrario para la categoría "Conductores tractoristas, maquinistas de máquinas cosechadoras y agrícolas", con vigencia a partir del 1° de julio de 2024, y cuyo valor asciende a $ 30.353,6[4], lo que equivale a $3.794,2 por hora. Convertido a valor dólar, asciende a U$S 3,91/hora.

Combustible: Se considera un precio de $1.127,0 /litro, que convertido a dólar equivale a un valor de U$S 1,16/litro.

Tasa de Interés: Se contempla, en concepto de tasa de interés como costo de oportunidad del dinero, para toda la estructura de costos que generan los activos fijos involucrados, una tasa nominal anual equivalente al 7% en dólares.

En cuanto a los datos técnicos que permitirán determinar los costos de la tolva autodescargable, la embolsadora y la extractora de granos, los mismos se presentan seguidamente:

Tabla 2.3. Datos técnicos autodescargable, embolsadora y extractora.

Variable	Autodescargable	Embolsadora	Extractora
valor residual (% VN)	40%	40%	40%
Vida útil (años)	15	15	15
CGCRYM	0,00004	0,000045	0,00005

Si bien existen en el mercado diferentes marcas de silo bolsa, con distinta longitud y diámetro, para el caso analizado se considera uno marca IPESA, de 60 metros de largo y un diámetro de 9 pies, con una capacidad de 343,52 m^3 y un costo en pesos de $800.000 u U$S 825,17.

En función de la capacidad de la bolsa y considerando los siguientes pesos específicos de cada grano, expresados en tn/m3, se determina la cantidad de toneladas de cada grano que es posible almacenar en cada bolsa.

Tabla 2.4 Pesos de granos.

Grano	Tn/m3	Capacidad de la Bolsa (tn/bolsa)
Girasol	0,45	**154,59**
Soja	0,68	**233,60**
Trigo	0,78	**267,95**
Maíz	0,69	**230,16**
Sorgo Granífero	0,66	**226,73**

La tolva autodescargable posee una capacidad de 20 toneladas base trigo, lo que, en función del peso específico del trigo, equivale a un volumen de 25,64 m3.

En el cuadro siguiente se presenta la capacidad teórica de carga del autodescargable (tn), el coeficiente de carga efectiva, la capacidad efectiva de carga (tn), la cantidad de autodescargable necesarios para completar una bolsa y la capacidad de descarga del autodescargable.

[4] Agrocontratistas. www.agrocontratistas.com.ar – Salarios Rurales.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 2.5 Datos técnicos del autodescargable.

		Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero
Capacidad Teórica Autodescargable (tn)		11,54	17,44	20,00	17,69	16,92
Coeficiente de Carga Efectiva	0,85					
Capacidad de Carga Efectiva Autodescargable (tn)		**9,81**	**14,82**	**17,00**	**15,04**	**14,38**
Cantidad de Autodescargables por Bolsa		15,76	15,76	15,76	15,76	15,76
Capacidad de Descarga del Autodescargable (tn/hs)	150					

Para iniciar el proceso, se procede a determinar la capacidad de trabajo de la cosechadora y en función del rendimiento del cultivo, poder determinar el volumen de cosecha de granos expresado en kg/hs. Lo mencionado se refleja seguidamente:

Tabla 2.6 Capacidad de trabajo de la cosechadora.

Cosechadora		Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero
Ancho de trabajo (pie)	30					
Valor del pie (m)	0,3					
Ancho de trabajo (m)	9					
Velocidad de avance promedio (km/hs)		7	7	7	7	7
Coeficiente de Conversión (m/km)	0,1					
Capacidad de Trabajo Teórica (has/hs)		6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Coeficiente de tiempo efectivo	0,85					
Capacidad de Trabajo Efectiva (has/hs)		**5,355**	**5,355**	**5,355**	**5,355**	**5,355**
Rendimiento Promedio del Cultivo (kg/ha)		1.800	2.100	1.900	3.200	3.000
Cosecha de Granos (kg/hora)		**9.639**	**11.246**	**10.175**	**17.136**	**16.065**

Conociendo la capacidad de carga del autodescargable y la capacidad de cosecha en función del rendimiento del cultivo, se procede a determinar la cantidad total de horas necesarias para llenar un autodescargable, y por ende para completar la bolsa. Esta cantidad de horas será afectada para determinar el costo de la mano de obra.

Tabla 2.7 Tiempo del autodescargable.

	Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero
Tiempo de llenado Autodescargable (hs/autodesc.)	1,018	1,318	1,671	0,878	0,895
Tiempo Total de Autodescargable - para afectar mano de obra (hs)	**16,037**	**20,772**	**26,335**	**13,832**	**14,113**

Pero dado que, en la práctica, el tractor y el autodescargable no están todo el tiempo en marcha, en función de que la cosechadora procede a descargar cada determinado intervalo de tiempo, se procede a calcular la cantidad de horas que efectivamente marcha el tractor o se encuentra en movimiento para poder calcular los costos asociados a ello.

Tabla 2.8 Cantidad de horas en movimiento del tractor.

		Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero
Capacidad de la Tolva de la Cosechadora (m3)	10					
Capacidad de la tolva de la cosechadora (tn)		4,5	6,8	7,8	6,9	6,6
Cantidad de tolvas de la cosechadora por autodescargable		2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Velocidad de descarga de la cosechadora (tn/hs)	120					
Tiempo de descarga de tolva de la cosechadora (hs/tolva)		0,0375	0,0567	0,0650	0,0575	0,0550
Cantidad de Horas de Descarga por Autodescargable (hs/autodesc.)		0,082	0,124	0,142	0,125	0,120
Cantidad de Horas por Bolsa (hs/bolsa)		**1,29**	**1,95**	**2,23**	**1,98**	**1,89**
Adicional por movimiento y traslado en chacra	30%					
Total de horas para afectar costo de tractor en movimiento (hs/bolsa)		**1,67**	**2,53**	**2,90**	**2,57**	**2,46**

Una vez llenado el autodescargable, comienza la segunda etapa, que consiste en el traslado o acarreo del grano al lugar definido para realizar el embolsado. Para el caso analizado, se considera una distancia promedio desde el punto de cosecha hasta el lugar de embolsado de 1.000 metros con fines representativo y utilizando como fuentes de información productores de la zona. En función de esta distancia, se determina la cantidad total de horas necesarias para este concepto.

Tabla 2.9. Tiempo total de acarreo.

		Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero
Distancia al lugar de embolsado (m)	1.000					
Cantidad de viajes (tractor + autodescargable - ida y vuelta)		31,52	31,52	31,52	31,52	31,52
Distancia Total de Recorrido (m)		31.523	31.523	31.523	31.523	31.523
Velocidad promedio de acarreo (km/hs)		9	9	9	9	9
Tiempo total de Acarreo (hs)		3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Imprevistos en Acarreo (%)	10%					
Tiempo Total de Acarreo con Imprevistos (hs/bolsa)		**3,85**	**3,85**	**3,85**	**3,85**	**3,85**

Para que pueda operar la embolsadora, es necesario que el autodescargable descargue los granos en la tolva de la embolsadora. Dicho tiempo de descarga, en función de su capacidad, se representa a continuación:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Tabla 2.10 Tiempo de descarga del autodescargable.

		Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero
Tiempo de descarga del autodescargable (hs/autodesc)		0,0654	0,0988	0,1133	0,1003	0,0959
Imprevistos descarga autodescargable (%)	10%					
Tiempo Total de Descarga Autodescargable con imprevistos (hs/bolsa)		**1,134**	**1,713**	**1,965**	**1,738**	**1,663**

Los tiempos operativos de embolsado son los siguientes:

Tabla 2.11 Tiempo total de embolsado.

		Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero
Capacidad Teórica de Embolsado (tn/hs)	250					
Coeficiente de tiempo efectivo de emblsado	0.75					
Capacidad Efectiva de Embolsado (tn/hs)	187.5					
Tiempo de Embolsado / Autodescargable (hs/autodesc.)		0.052	0.079	0.091	0.080	0.077
Tiempo de Embolsado Total por Bolsa (hs)		0.824	1.246	1.429	1.264	1.209
Imprevistos en Embolsado (%)	15%					
Tiempo Total de Embolsado con Imprevistos (hs/bolsa)		**0.948**	**1.433**	**1.643**	**1.454**	**1.391**

La última etapa del proceso corresponde a la extracción del grano de la bolsa, en el momento en que el productor lo considere oportuno. Considerando la capacidad de extracción de la maquinaria, los tiempos operativos de dicha tarea son:

Tabla 2.12 Tiempo total de extracción.

		Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero
Capacidad Teórica de Extracción (tn/hs)	250					
Coeficiente de tiempo efectivo de extracción	0.75					
Capacidad Efectiva de Extracción (tn/hs)	187.5					
Tiempo de Extracción por Bolsa (hs/bolsa)		0.824	1.246	1.429	1.264	1.209
Imprevistos en Extracción (%)	20%					
Tiempo Total de Extracción con imprevistos (hs/bolsa)		**0.989**	**1.495**	**1.715**	**1.517**	**1.451**

Con los tiempos operativos de trabajo definidos, se presenta seguidamente el detalle de horas necesarias por bolsa para cada tarea o actividad considerada. Se adiciona, además, en concepto de limpieza y tareas varias, una (1) hora por bolsa.

Tabla 2. 13 Resumen tiempo operativo.

		Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero
Llenado de Autodescargable (para afectar tractor en movimiento)		1,67	2,53	2,90	2,57	2,46
Llenado de autodescargable (para afectar M.O)		16,037	20,772	26,335	13,832	14,113
Acarreo hasta lugar de embolsado		3,85	3,85	3,85	3,85	3,85
Descarga en Embolsadora		1,134	1,713	1,965	1,738	1,663
Embolsado		0,948	1,433	1,643	1,454	1,391
Extracción		0,989	1,495	1,715	1,517	1,451
Subtotal Tiempo Operativo (hs/bolsa)		**22,013**	**27,833**	**33,868**	**20,940**	**21,080**
Limpieza y Tareas varias (hs/bolsa)	1					
Tiempo Operativo Total (hs/bolsa)		**23,013**	**28,833**	**34,868**	**21,940**	**22,080**

No es posible determinar con precisión los costos si no se define una escala de embolsado[5]. Para el caso que se analiza, se considera el siguiente planteo técnico de embolsado:

Tabla 2.14 Escala de embolsado proyectada.

	Girasol	Soja	Trigo	Maíz	Sorgo Granífero	Total
Cantidad de Bolsas por año	2	5	3	3	2	15
Total de toneladas embolsadas por año	309	1,168	804	711	453	3,446
% de representación de cada cultivo	13.3%	33.3%	20.0%	20.0%	13.3%	100%

Considerando que el Tractor 1 se utiliza para la tracción del autodescargable y el acarreo y descarga en la embolsadora, y el Tractor 2 se usa para la embolsadora y la extractora, a los fines de precisar los costos, se procedió a determinar el porcentaje (%) de afectación de cada tractor relacionando el tiempo operativo de uso de las tareas mencionadas en función de la vida útil equivalente[6] de cada tractor, que se determinó en 800 horas por año.

Para la escala de embolsado considerada, la afectación anual de cada tractor queda 15% para el tractor 1 y 5,4% para el tractor 2.

Para el caso del autodescargable, la embolsadora y la extractora de granos, el porcentaje de afectación es del 100%.

[5] Cantidad de bolsas de cada grano que el productor genera en el año.

[6] Vida útil en horas dividido Vida útil en años – (12.000 hs / 15 años) = 800 hs/año.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

3.Resultados

Considerando todas las variables y tiempos operativos expresados en el planteo técnico y para la escala de embolsado referenciada, se presenta la estructura de costos, expresada en U$S/año y U$S/tn.

Tabla 3.1 Costo variable.

	U$S/año	U$S/tn
Costo de la Bolsa para silo (U$S/u)	U$S 12377.5	U$S 3.59
Tractor 1 con Autodescargable - Tractor en movimiento (U$S/hs)	U$S 1269.5	U$S 0.37
Tractor 1 con Autodescargable - Mano de Obra(U$S/hs)	U$S 1439.1	U$S 0.42
Tractor 2 con Embolsadora (U$S/hs)	U$S 753.2	U$S 0.22
Tractor 2 con Extractora (U$S/hs)	U$S 805.7	U$S 0.23
Limpieza y otras tareas varias (U$S/hs)	U$S 58.7	U$S 0.02
Total Costo Variable	**U$S 16703.8**	**U$S 4.85**

Tabla 3.2 Costo fijo.

Costo Fijo - Tractor 1	U$S/año	U$S/tn
Amortización	U$S 541.7	U$S 0.16
Interés	U$S 663.6	U$S 0.19
Seguro	U$S 90.3	U$S 0.03
Costo Fijo - Tractor 2		
Amortización	U$S 194.3	U$S 0.06
Interés	U$S 238.1	U$S 0.07
Seguro	U$S 32.4	U$S 0.01
Costo Fijo - Autodescargable		
Amortización	U$S 1520.0	U$S 0.44
Interés	U$S 1862.0	U$S 0.54
Costo Fijo - Embolsadora		
Amortización	U$S 701.4	U$S 0.20
Interés	U$S 859.2	U$S 0.25
Costo Fijo - Extractora		
Amortización	U$S 1347.7	U$S 0.39
Interés	U$S 1651.0	U$S 0.48
Total Costo Fijo (U$S/Año)	**U$S 9701.6**	**U$S 2.82**

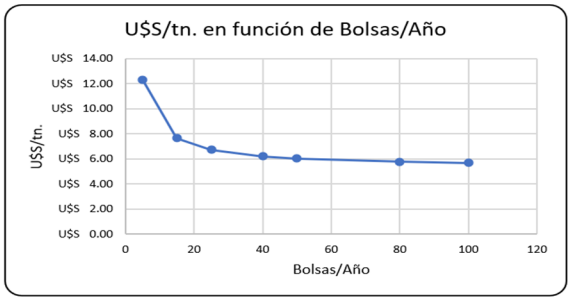
Tabla 3.3 Costo de embolsado y extrccion.

Costo de Embolsado y Extracción	U$S/tn 7.66

Como toda actividad económica, el mejor desempeño y resultado se obtiene incrementando o maximizando la escala de producción (para nuestro caso, la escala de embolsado). Se presenta seguidamente un análisis de costos para distintas escalas de embolsado (cantidad de bolsas por año), manteniendo aproximadamente el porcentaje de representación de cada uno de los cultivos considerados en el planteo inicial. Cabe mencionar que las distintas escalas pueden utilizarse con fines a la prestación de servicio.

Tabla 3.4 Costos para diferentes escalas de embolsado

Bolsas/año	U$S/tn.
5	U$S 12.30
15	U$S 7.66
25	U$S 6.74
40	U$S 6.22
50	U$S 6.05
80	U$S 5.79
100	U$S 5.70



4.Conclusiones

El silo bolsa es imprescindible para la estrategia logística, sobre todo al momento de la cosecha de los granos, que es dónde normalmente se presentan dificultades operativas.

Pero considerar el uso de esta herramienta, implica indefectiblemente conocer el costo de implementación en función de su propia escala productiva. Sólo conociendo el costo estará en condiciones de comparar y decidir si le conviene embolsar o no.

Para el planteo técnico analizado y la escala de embolsado definida, el costo por tonelada de embolsado y extracción asciende a U$S 7.66 por tonelada. Dicho costo, disminuye a U$S 5,70 por tonelada para una escala de 100 bolsas anuales.

Si hay factores subjetivos que el productor pondera en su decisión de embolsado (falta de camiones, largos tiempos de espera, entre otros), el conocimiento de los costos es lo que lo posicionará de mejor manera para tomar las decisiones adecuadas.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Con el trabajo pretendemos hacer una contribución para facilitar el proceso de toma de decisiones del productor agropecuario.

Referencias Bibliográficas

AGROCONTRATISTAS. www.agrocontratistas.com.ar – Salarios Rurales.

BENEDETTI, Gerónimo – Análisis Marginal. Determinación del Costo del Almacenamiento de Soja Poroto en Silo Bolsa. Carrera de Postgrado. Especialización en Costos y Gestión Empresarial. IAPUCO – Instituto Argentino de Profesores Universitarios de Costos. Cohorte 14 – 2016-2017.

FERRO MORENO, S. y PATURLANNE, J. Costos y desempeño Económico del Traslado en el tiempo de productos agrícolas. El Silo Bolsa en Argentina (2004-2014). RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias. ISSN 0325-8718, Vol. 41, N° 3, diciembre 2015, INTA Buenos Aires.

URCOLA, Hernán y BARTOSIK, Ricardo. Calculador de Costos de Embolsado de Granos. INTA Balcarce. 2021.

PINTO, M., CARMONA, C., & SUAREZ, G. Costo-beneficio del uso de silo bolsas en la conservación de granos básicos: el caso del departamento del Quindío-Colombia. Revista Investigación y Desarrollo Agroindustrial. 2019

ARRARAS, Juan. Inversión del silo bolsa para granos secos en los mercados agrícolas de Argentina. (1995-2018). Revista de Investigación Agropecuaria. Escuela de Hábitat y Sostenibilidad de la Universidad Nacional de San Martín - Centro de Estudios Sociales de la Economía de la Escuela Interdisciplinaria de Altos Estudios Sociales de la Universidad Nacional de San Martín. 2024.

Transportes y vías de comunicación



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Transportes y vías de comunicación
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Santa Fe

Ruta Nacional 11: Un corredor estratégico de GNC para el transporte carretero argentino

National Route 11: A strategic CNG corridor for Argentine road transport

Presentación 18/10/2024

Facundo Oostdyk

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo Científico de Estudios de Transporte Accidentología y Movilidad (CETRAM), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: facundotres@gmail.com

Ingrid Gerstner

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo Científico de Estudios de Transporte Accidentología y Movilidad (CETRAM), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: ingrugerstner@gmail.com

Santiago Vallejos

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Grupo Científico de Estudios de Transporte Accidentología y Movilidad (CETRAM), Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: santyvallejos_sua@hotmail.com

Resumen

En Argentina, existe una infraestructura desarrollada para la distribución de GNC, así como proyectos en marcha que buscan fortalecer su uso en el transporte de carga. Este informe se centra en la situación actual de la infraestructura para el transporte de carga con GNC, analizando el corredor Formosa - Rosario a lo largo de 890 km de ruta pavimentada, la Ruta Nacional 11. Mediante este combustible, se tiene una alternativa viable más económica, lo cual se traduce en una reducción de costos y una disminución del impacto ambiental; optimizando el transporte y avanzando hacia una transición energética más efectiva. La expansión de las estaciones de servicio ha sido notable, mostrando un aumento casi lineal en su número a lo largo de los años y se cree que, combinando políticas públicas e iniciativa privada, se puede desarrollar una sólida infraestructura. Queda un largo camino por recorrer, pero, las perspectivas son prometedoras.

Palabras clave: GNC, infraestructura, transporte, costo, impacto.

Abstract

In Argentina, there is a developed infrastructure for the distribution of CNG, as well as ongoing projects that seek to strengthen its use in cargo transportation. This report focuses on the current situation of the infrastructure for CNG cargo transportation, analyzing the Formosa - Rosario corridor along 890 km of paved route, National Route 11. Using this fuel, there is a more viable alternative. economic, which translates into a reduction in costs and a decrease in environmental impact, optimizing transportation and moving towards a more effective energy transition. The expansion of service stations has been notable, showing an almost linear increase in their number over the years and it is believed that, by combining public policies and private initiative, a solid infrastructure can be developed. There is a long way to go, but the prospects are promising.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Keywords: CNG, infrastructure, transport, cost, impact.

1. Introducción

Argentina es un país que desde hace muchos años se destaca por la amplia posibilidad de desarrollarse como agroexportador. Por eso, las exportaciones agroindustriales se transportan a los puertos con diferentes medios, para luego distribuirse por todo el mundo. El principal medio de transporte es el carretero, abarcando un 91%, y el resto, 4,8% por hidrovía, 4,2% en ferrocarril, y menos del 0,1 % por modo aéreo (Bolsa de Comercio de Rosario, 2018).

El enfoque de estudio del presente informe es sobre el transporte carretero, estos vehículos mayormente son impulsados por combustible fósil (gasoil), el cual, actualmente se convirtió en un combustible ineficiente, por su costo y elevado nivel de contaminación al medioambiente. Así, surgiendo nuevas alternativas como motores 100% eléctricos, impulsados por biodiésel, Gas Natural Comprimido (GNC) o Gas Natural Licuado (GNL), entre otros.

El GNC es una alternativa amigable a la hora de disminuir los costos relacionados al transporte, sumado a los beneficios que trae respecto al medioambiente y la disminución de la generación de emisiones. En Argentina, se encuentra presente infraestructura para la distribución de este tipo de combustible como así también, se encuentran presente proyectos en desarrollo. Se propone a lo largo de este informe, plasmar en palabras, la situación actual del país respecto a la infraestructura para la utilización de transportes de carga con gas.

2. Metodología

La metodología utilizada para este informe ha sido la recopilación de información mediante la consulta a distintas bibliografías y fuentes, en conjunto con demás aportes al actual PID: “Propuestas para la disminución de los costos logísticos en el transporte de carga en el corredor de la Ruta Nacional Nº 11, tramo Rosario – Formosa” (TVTCFE0010031TC).

2.1 Zona de estudio

La Ruta Nacional Nº 11 es una carretera argentina, que une las provincias de Santa Fe, Chaco y Formosa. Se denomina *de jure* Carretera Juan de Garay, por Decreto n.º 25.954/44. Desde que nace en la Circunvalación de Rosario hasta que termina, en el Puente internacional San Ignacio de Loyola, en la frontera con Paraguay, recorre 988 km, totalmente pavimentados. El enfoque de estudio y análisis de transporte será destinado al corredor que comienza en Formosa y culmina en Rosario, este corredor se extiende por 890 kilómetros de ruta pavimentada. Esto puede observarse en la Figura 1.



Figura 1. Ruta Nacional Nº11
Fuente: Open Street Map

2.2 *Descripción actual de la infraestructura actual*

La infraestructura de gas natural en Argentina se basa en una red de oleoductos que transporta gas desde áreas de producción hasta centros de consumo. El proyecto más importante reciente es el Gasoducto presidente Néstor Kirchner

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

(GPNK), inaugurado en 2023. Este oleoducto es vital para el desarrollo de gas de la formación Vaca Muerta en la Patagonia, que tiene grandes reservas de gas y petróleo no convencionales.

El GPNK, de 573 kilómetros, va desde Neuquén hasta Buenos Aires y permite a Argentina sustituir el gas importado por el producido localmente, reduciendo costos. Otros proyectos importantes incluyen el Gasoducto Norte, que antes importaba gas de Bolivia, pero ahora se complementa con gas natural licuado debido a la disminución de la producción boliviana. La red TGS cubre el sur y la TGN el norte, mientras que el GPNK conecta ambas, facilitando el transporte desde Vaca Muerta hacia el norte. En resumen, la infraestructura busca hacer a Argentina más autosuficiente en energía y reducir costos de importación. (Terzaghi V., 2023).

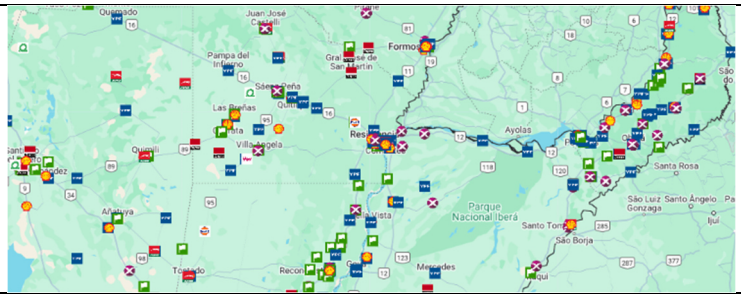
Retomando sobre el GPNK, su primera etapa fue inaugurada el 9 de julio del 2023 (construcción del Tramo I) que atraviesa 4 provincias: comienza en la localidad de Tratayén, en Neuquén, pasando por las provincias de Río Negro y La Pampa y finaliza en la localidad de Salliqueló en la provincia de Buenos Aires. El Tramo II, de unos 450 km, unirá la localidad bonaerense de Salliqueló con San Jerónimo, en Santa Fe, lo que permitirá abastecer a hogares e industrias del Litoral y también en un futuro exportar gas a Brasil, vía Uruguayana a Porto Alegre. Este dato es importante, dado que se podría hablar del abastecimiento en la provincia de Santa Fe con proveedores de GNC, por lo que la provincia presenta buenas características en relación con la distribución del Gas Natural como se ve en la Figura 2.



Figura 2. Sistema de Transporte y Distribución de Gas Natural de la Provincia de Santa Fe.
Fuente: ENERGAS

2.3 *Prestadores de servicios actuales*

Actualmente, Argentina cuenta con gran cantidad de proveedores del servicio estudiado. A continuación, en la Figura 3 se puede visualizar una herramienta digital que permite obtener el conocimiento de que forma y en que zonas está abastecida energéticamente el país. Este software ha sido utilizado para elaborar la que se visualiza a la derecha de la Figura 3, la cual comprende las determinadas banderas que abastecen de GNC al corredor evaluado. La posibilidad de contar con diversidad de banderas dentro del mismo corredor genera una mayor oferta del producto y amplia el mercado, haciéndolo más competitivo.



Estaciones de servicio por bandera	
Estaciones de Servicio de GNC	Cantidad
Puma	6
YPF	20
Shell	12

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

	Gulf	2
	Blanca	14
	Axion	7
	Dapsa	5

Figura 3. Mapeo de proveedores

Fuente: Secretaría de Energía Presidencia de la Nación - Información Geográfica.

2.4 *Proyectos futuros*

Actualmente, la red nacional de distribución de aprovisionamiento de gas con destino vehicular llega a más de 500 localidades y ciudades, alcanzando un total de 2.041 estaciones de carga de GNC habilitadas y activas en 2021. En la Figura 4 se puede visualizar la expansión de estaciones de carga de GNC a lo largo de los años, de lo cual se resalta un aumento casi lineal conforme transcurre el tiempo.

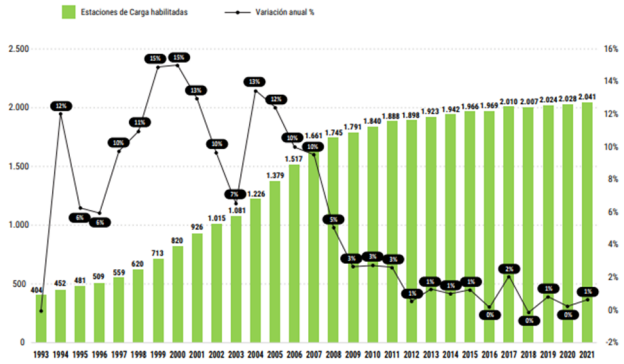


Figura 4. Expansión de estaciones de carga de GNC (1993 – 2021)
Fuente: ENERGAS

2.5 *Camiones y diésel*

Al analizar el comportamiento de un camión Diesel se observa que tiene mayor autonomía que un camión a GNC. Es importante destacar que la autonomía del motor GNC depende de la aplicación y de la configuración de ejes los camiones y de la cantidad de tubos de gas que puedan llevar (metros cúbicos), posibilitando que cuenten con una autonomía de entre 350 y 500 km. Si bien con esas capacidades se tenían camiones polivalentes para ciertas aplicaciones, de acuerdo con la infraestructura que hay en Argentina, en algunos puntos resultaba difícil conectarlos por la distancia entre estaciones de servicio. A lo largo del tramo de la ruta Nacional N° 11 hay una cantidad aproximada de 66 estaciones de servicio que brindan GNC, por ende, se visualiza una buena oferta de servicio de expendio de GNC.

2.6 Implicancias en el medioambiente

La transición y uso de gas, se considera que no solo trae ventajas en cuanto a las reducciones de los costos, sino que tiene como ventaja involucrada, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. El GNC es una de las fuentes de energía más limpias y respetuosas con el medio ambiente, su consumo resulta menos nocivo para la capa de ozono, ya que, en su combustión, se reducen las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx) en un 80% y de hidrocarburos reactivos, que forman el ozono a nivel del suelo, el ingrediente principal del smog, hasta en un 95% (RPP, 2017).

Desde la perspectiva ambiental, considerando que el transporte es el responsable del 25% de las emisiones del planeta, es relevante la baja de las emisiones de CO_2 alcanzada a partir de usar gas como combustible, en comparación con el gasoil, en el orden del 15-20%, pero mucho mayor si se usa biometano como materia prima del combustible, que se estima en el 90-95%. También desde la óptica del cuidado del medio ambiente, hay que destacar el funcionamiento silencioso de su motor, en comparación con el diésel, adaptándose a los requerimientos acústicos para entregas nocturnas (Barreña M. et al., 2023).

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Entre las posibles ventajas a mencionar sobre el uso de GNC como combustible para los vehículos de carga que circulan por el sector de estudio, se podría mencionar que, su distribución a través de redes de gasoductos y cañerías garantiza un transporte rápido y seguro, minimizando el riesgo de accidentes, derrames y contaminación ambiental. También así, como se mencionaba brevemente antes, las emisiones de contaminantes atmosféricos como monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y gases del cárter se reducen significativamente en comparación con los vehículos que emplean gasolina y diésel, promoviendo así un entorno más limpio y saludable.

2.7 Situación argentina de consumo

Año tras año Argentina importa una cuarta parte de los requerimientos domésticos de gasoil, combustible aplicado en un 75% al servicio de transporte; particularmente, en 2022 el sector agropecuario vio peligrar el procesamiento y distribución de su producción por los faltantes del combustible.

Este requerimiento representa el 14% del Consumo Final del Transporte. Si al transporte de larga distancia para la distribución de la cosecha, se le añade la demanda del sector para la producción (que incluye el transporte de corta distancia, del punto de producción al acopio, estimado en un promedio de 2 km), en 2021 representó 4.485 miles de TEP, es decir, un 35% de la demanda efectiva (todo el Consumo Final más insumos de los Centros de Transformación).

El incremento en los precios del combustible afecta directamente los costos operativos de la industria logística, elevando a los gastos en transporte y distribución. Esta situación conlleva un reajuste de tarifas y puede afectar la competitividad de las empresas.

El precio del combustible en el país ha experimentado un aumento significativo en los últimos meses. De acuerdo con lo confirmado por el titular de la Cámara de Empresas de Combustibles, solo en enero del 2024 se registró un incremento del 27%. Ante este panorama, muchas empresas han comenzado a explorar alternativas más eficientes y sustentables, como el uso de gas natural comprimido GNC. Le define de noviembre del año pasado, el precio de los combustibles líquidos subió más del 160%, mientras que el GNC lo hizo más del 90% (Redacción LAVOZ, 2024).

Además, la volatilidad de los precios agrega una capa de incertidumbre en la planificación y gestión logística, lo cual indudablemente, se traduce en un aumento de los costos de transporte. Desde una perspectiva cíclica, se da así una presión inflacionaria. El aumento de los costos del transporte se traslada al precio final de los productos, lo que genera un efecto inflacionario en la economía. Además, la incertidumbre produce disrupciones en la cadena de suministro dado que la volatilidad en los precios del combustible puede generar disrupción en la cadena de suministro, afectando la planificación en el flujo de mercancías.

2.8 Caracterización de la zona de estudio respecto al transporte de carga

Las exportaciones agroindustriales son embarcadas mayoritariamente en los puertos del Gran Rosario y el UpRiver. Sin embargo, para llegar hasta allí se requiere de una logística interna, que permita trasladar la mercadería desde los campos hacia las industrias y los puertos. Eso puede realizarse por los distintos medios de transporte que existen en el país: camión, ferrocarril y barcazas.

Entre los proyectos que se consideran estratégicos para mejorar la situación logística en el UpRiver, la Ruta Nacional N° 11 se considerada la columna vertebral del flujo vial en el eje norte-sur sobre el este de la provincia. Sirve en gran medida al transporte desde las provincias del NEA y parte del NOA; siendo una conectividad fundamental para con el Paraguay (Bolsa de Comercio de Rosario, 2023).

Para el transporte de cargas, que circula por el sector de estudio, es esencial el poder abastecerse de combustible para lograr cumplir los recorridos en los tiempos estipulados. Tanto el tiempo como el costo del combustible, se traducirán en el precio final del producto que pagara el cliente.

3. Resultados que se esperan alcanzar

El impacto del combustible en los costos de transporte es significativo al determinar el costo total de un producto. Por lo tanto, la transición de los combustibles tradicionales a alternativas más sostenibles es un objetivo deseable. Entre las opciones disponibles, el GNC se destaca como un candidato prometedor, dada la abundancia de recursos en Argentina y la

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

reducción de emisiones que su uso conlleva. Como estrategias para mitigar el impacto del combustible en los costos, se proponen a continuación una serie de recomendaciones:

- Optimización de rutas y entregas.
- Negociación de precios buscando acuerdos con proveedores de GNC para fomentar su uso.
- Inversiones en vehículos eficientes adquiriendo vehículos con mayor eficiencia de combustible para reducir el consumo. Inversión en infraestructura, expansión y modernización de infraestructura de estaciones de servicio como de las redes de transporte de gas en la zona de estudio.

Mediante este estudio se han aportado datos, información y un análisis detallado del corredor de la Ruta Nacional Nº11 en su tramo Rosario-Formosa. Este análisis permitirá realizar una propuesta estratégica de mejora en la infraestructura, para así mejorar los costos logísticos del transporte de cargas mediante el uso de GNC en los vehículos dedicados a transporte de cargas en general. Este estudio sienta las bases para generar una metodología técnica, la cual se puede replicar en otros corredores del país

.

4. Conclusiones

Se considera que a lo largo del informe se ha logrado plasmar en palabras la situación actual del país respecto a la infraestructura para la utilización de transportes de carga con gas. Se ha podido notar que la incertidumbre produce disrupciones en la cadena de suministro dado la volatilidad en los precios del combustible, afectando la planificación en el flujo de mercancías.

La Ruta Nacional 11 es de gran importancia estratégica para el transporte de cargas hacia los puertos, ya que funciona como la columna vertebral del flujo vial que conecta estos destinos. Integrar este corredor con infraestructura de gas para abastecer al transporte de carga contribuiría a la transición energética. Aunque es un proceso a largo plazo, esta optimización promete mejorar significativamente el transporte en el futuro.

Referencias bibliográficas

Barreña M., Catalano R., Paoloni G., Sierra J. (2023). Uso de Biogás Licuado en el transporte de larga distancia de la producción de la PyME agropecuaria argentina. Potencial de producción y un análisis de rentabilidad. Perspectivas: Revista Científica de la Universidad de Belgrano, V 6, Nº1. Recuperado de https://revistas.ub.edu.ar/index.php/Perspectivas/article/view/227/219

Bolsa de Comercio de Rosario (22/12/2023). Transporte de carga 2023 / 24 dejaría atrás la sequía. Recuperado de https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/el-17#:~:text=La%20pr%C3%B3xima%20campa%C3%B1a%20espera%201,log%C3%ADstica%20en%20el%20Gran%20Rosario.

ENERGAS. Sistema de Transporte y Distribución de Gas Natural de la Provincia de Santa Fe. Recuperado de https://www.enargas.gob.ar/secciones/informacion-geografica/Mapas/Atlas/santa_fe.pdf

ENERGAS (2022). Expansión de estaciones de carga de GNC. Recuperado de https://www.enargas.gob.ar/secciones/publicaciones/informes-graficos/pdf/GNV_IG_2.pdf

Información Geográfica-ENERGIA. Secretaría de Energía Presidencia de la Nación. Recuperado de https://sig.energia.gob.ar/visor/visorsig.php?t=3

Mapeo de proveedores. Secretaría de Energía Presidencia de la Nación. Recuperado de https://sig.energia.gob.ar/visor/visorsig.php?t=3

Open Street Map. Relation: Ruta Nacional 11 (172949). https://www.openstreetmap.org/relation/172949#map=6/-28.92/-61.12&layers=T

Ortiz, I. (16/1/2024). Enarsa decide sobre la continuidad de la Etapa II del Gasoducto Néstor Kirchner. Mejor Energía. Recuperado de https://www.mejorenergia.com.ar/noticias/2024/01/16/2383-enarsa-decide-sobre-la-continuidad-de-la-etapa-ii-del-gasoducto-nestor-kirchner

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Redacción LAVOZ (15/3/2024). Logística: crece el uso de combustibles alternativos en el transporte de cargas. La Voz. Recuperado de https://www.lavoz.com.ar/negocios/empresas/logistica-crece-el-uso-de-combustibles-alternativos-en-el-transporte-de-cargas/

RPP (2017). GNV: Impacto en la contaminación atmosférica frente a otros combustibles. Recuperado de https://rpp.pe/vital/vivir-bien/gnv-impacto-en-la-contaminacion-atmosferica-frente-a-otros-combustibles-noticia-1086316

Terzaghi V. (2023). Una por una, cuáles son las grandes obras de infraestructura para potenciar Vaca Muerta. Redacción-Periodismo Humano. Recuperado de https://www.redaccion.com.ar/una-por-una-cuales-son-las-grandes-obras-de-infraestructura-para-potenciar-vaca-muerta/

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Identificación del Trabajo	
Área prioritaria:	Transportes y vías de comunicación
Categoría:	Alumno
Facultad Regional:	Rafaela

Utilización de IA para medición de flujo de tránsito en áreas urbanas

Use of AI to measure traffic flow in urban areas

Presentación 02/09/2024

Adrían Rodrigues Copque

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: adricopque@hotmail.com

Alex Andrada

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina.

E-mail de contacto: alexgustavoandrada@gmail.com

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo de estudio del flujo de tránsito de diferentes tipos de vehículos automotrices con el propósito de poder cuantificar y mejorar la eficiencia de tiempo con el fin de obstruir lo menos posible el flujo. Mejorando el tiempo de respuesta de la semaforización a fin de mantener el flujo de tránsito en un estado óptimo sin interrupciones. Las cuales sin duda dan pérdidas de tiempo y cuellos de botella en el tránsito.
En este proyecto, se trata el desarrollo de un sistema de detección y conteo para recabar información útil a la hora de programar un sistema de señalización con mayor precisión en cuanto a la onda verde se trate y la misma se pueda modificar según los requerimientos detectados en el tránsito.
Los parámetros por destacar son: mejorar la calidad de vida, eficientizar flujo tránsito, evitar accidentes.

Palabras clave: inteligencia artificial; Python; flujo de trafico

Abstract

The objective of this research work is to study the traffic flow of different types of automotive vehicles with the purpose of being able to quantify and improve time efficiency in order to obstruct the flow as little as possible. Improving the response time of traffic lights in order to maintain traffic flow in an optimal state without interruptions. Which undoubtedly cause loss of time and bottlenecks in traffic.
This project involves the development of a detection and counting system to collect useful information when programming a signaling system with greater precision regarding the green wave in question and it can be modified according to the requirements detected in the transit.
The parameters to highlight are: improve the quality of life, make traffic flow more efficient, and avoid accidents.

Keywords: Artificial intelligence; Piton; traffic flow

1. Introducción

Producto del gran aumento del ejido urbano, los avances a niveles industriales y tecnológicos permitieron el incremento en el flujo del tránsito, llevando a un serio problema en lo que respecta a la gestión del tráfico.

Para abordar un tema bastante complejo se necesita primeramente contar con información confiable de cómo se comporta dicho tráfico. Es importante saber que calles se utilizan en mayor medida, generando cuellos de botellas en ellas y que franja horaria es la más ocupada por los ciudadanos, buscando brindar una onda verde para que el flujo sea constante.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Por todo lo mencionado anteriormente, el objetivo del proyecto es desarrollar un prototipo compuesto por un sistema de procesamiento capaz de correr con inteligencia artificial en tiempo real, cámaras de seguridad dentro del ejido urbano y una constante implementación de machine learning (aprendizaje constante).

2. Metodología

2.1. Solicitud del material de análisis

En la primera fase del proyecto, se realizó una visita al centro de monitoreo de la ciudad de Rafaela con el objetivo de solicitar y recolectar secuencias de video correspondientes a diversas intersecciones urbanas, abarcando tanto períodos diurnos como nocturnos.

2.2. Descripción de software a utilizar

Utilizaremos una serie de softwares específicos para llevar a cabo esta tarea. En primer lugar, usaremos OpenCV tratándose de una librería de computación visual para el procesamiento de imágenes en Python. Esta biblioteca proporciona herramientas para realizar operaciones de procesamiento de imágenes, como el filtrado, la detección de bordes, el reconocimiento de características, el seguimiento de objetos, etc. A continuación, usaremos el lenguaje Python para llevar a cabo la programación. Además, Cascade Trainer GUI se empleará para entrenar, probar y mejorar el clasificador en cascada de diversos modelos. Utiliza una interfaz gráfica para configurar los parámetros. Cada uno de estos programas jugará un papel crucial en el proceso, y su combinación permitirá un flujo de trabajo eficiente y eficaz.

2.3. Diseño de Experimento

Para llevarse a cabo su funcionamiento se procedió con la instalación del programa OpenCv con sus respectivas extensiones y bibliotecas. Seguido de esto se ejecuta el programa y carga de la programación; se cargó el video proporcionado por la GUR y acto seguido el análisis.

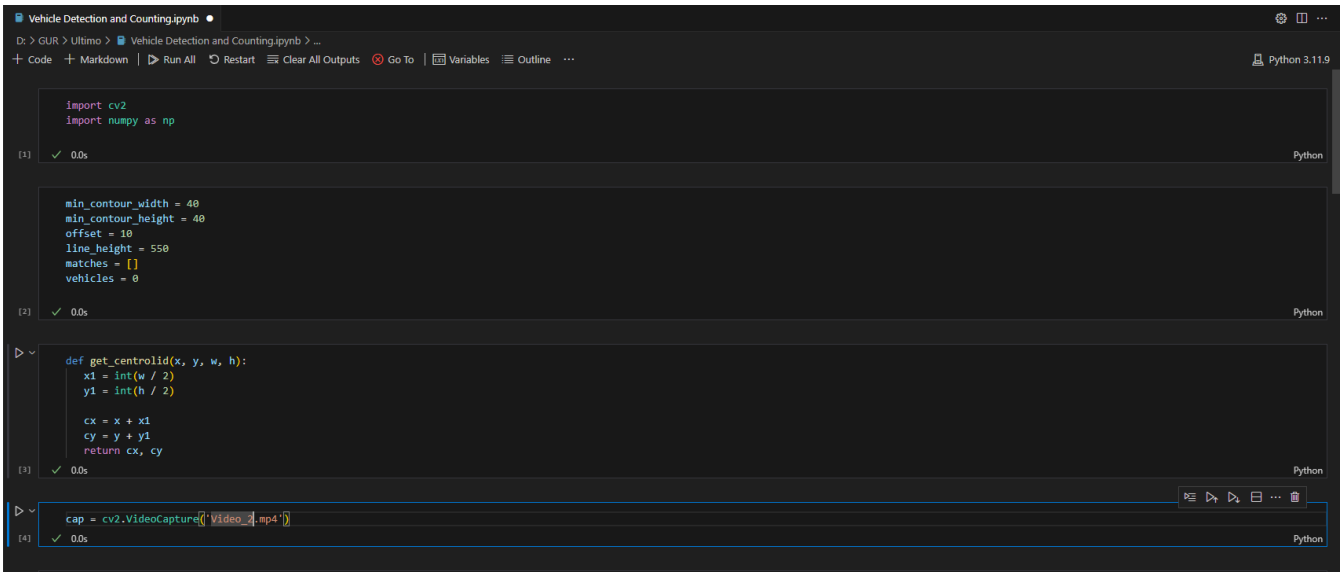


Figura 1. Programación en OpenCV.

A continuación, se visualiza el programa ejecutado con los demás archivos cargados. Como resultado observamos:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Video 1:

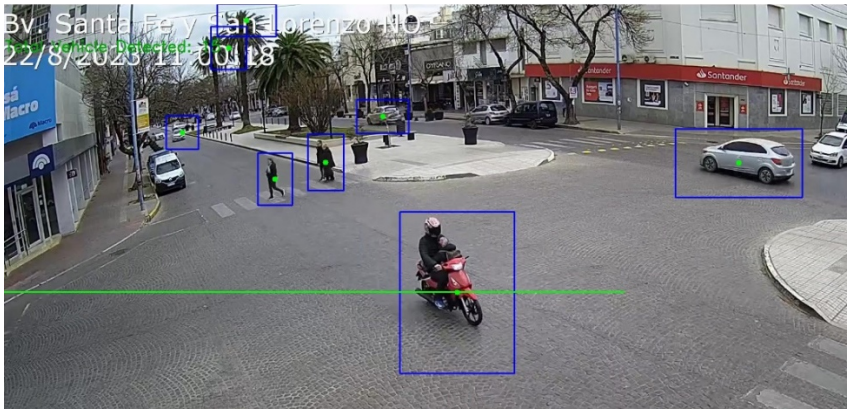


Figura 2. Ejecución de la programación en video diurno.

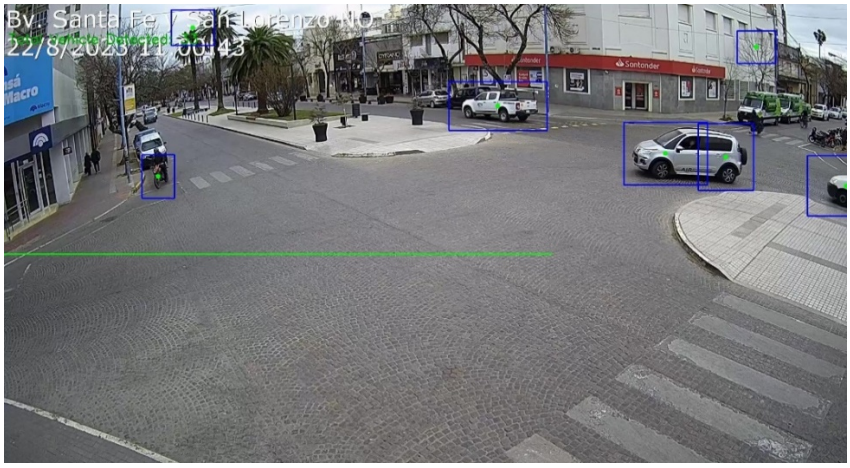


Figura 3. Ejecución de la programación en video diurno.

Las fallas encontradas son las siguientes:

- Detección de personas
- Detección de arboles
- Detección de vehículos en sentido opuesto al análisis del carril en cuestión

Video 2:



Figura 4. Ejecución de la programación en video nocturno.

Las fallas encontradas son las siguientes:

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

- Detección de ciclista sobre vereda peatonal
- Múltiple detección de un solo vehículo
- Falso positivo de detección de vehículo

3. Resultados

3.1. Resultados experimentales en primera fase

Los resultados obtenidos en esta primera fase nos proporcionaron las siguientes problemáticas:

- Detección de ciclista sobre vereda peatonal.
- Múltiple detección de un solo vehículo.
- Falso positivo de detección de vehículo.
- Detección de personas.
- Detección de árboles.
- Detección de vehículos en sentido opuesto al análisis del carril en cuestión.

3.2. Resultados experimentales en segunda fase

Como segunda fase a los videos obtenidos se les sectorizo a través de una ventana de análisis de menor superficie ubicando únicamente la parte de la acera por donde circulan los vehículos.

Con esta información y con una nueva ejecución de análisis mejoramos la fiabilidad del sistema quedando todavía, en algunos casos, falsos positivos a resolver, por ejemplo, los vehículos estacionados.

Estando actualmente en el procesamiento tratando de lograr solo identificar los vehículos que se encuentren en movimiento para lo cual se debe generar un nuevo desarrollo con el agregado de una nueva opción al algoritmo ya definido. También a este sistema se le realizara un entrenamiento con mayor cantidad de videos en búsqueda de mejorar la fiabilidad hasta ahora obtenida.

Otra alternativa como propuesta final es la incorporación de cámaras con un enfoque y posición definidas solo para la detección de los vehículos. Entendemos que esta alternativa es sin duda la de mejor resultado pero que no deja de tener un costo oneroso desde el punto de vista que se deben colocar cámaras solo con este objetivo.

La idea es insistir en utilizar las cámaras ya existentes y colocadas en las diferentes intersecciones.

4. Conclusiones

Hasta el momento de acuerdo con el desarrollo planteado se obtuvieron resultados alentadores en cuanto a la detección de flujo de tránsito quedando resolver los falsos positivos que arroja el sistema implementado.

Para mejorar el sistema se plantea la necesidad de un entrenamiento en la programación indicando o limitando su lectura de manera que ajuste la exactitud de esta según el objetivo que se tiene, tanto en forma como en distancia, ya que por sí solo y hasta el momento su lectura no es la deseada.

Analizando el uso que se tuvo de las cámaras actuales se considera utilizables en una primera instancia más aun en la etapa de entrenamiento del programa, si puede ser necesario la reubicación tanto física en la intersección de calles que se desea utilizar, como el espectro que esta pueda tener, evitando lecturas no deseadas por lejanía o por forma, esto es requerimiento para luego utilizar la información que el programa entregue y generar cambios en el flujo del tránsito, por lo que una mala lectura en un futuro puede generar cambios negativos en el resultado final.

Actualmente continuamos con el entrenamiento para aumentar la fiabilidad superior al 99% como resultado ideal para nuestro proyecto.

AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)
DOI:https://doi.org/10.33414/ajea.1941.2025

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de las distintas instituciones GUR (guardia urbana de Rafaela) y al Centro de monitoreo de Rafaela.

Referencias Bibliográficas

Revista innovación (2022). Solución de control de tráfico con inteligencia artificial que descongestiona grandes ciudades. Disponible en <https://revistainnovacion.com/nota/11620/solucion_de_control_de_trafico_con_inteligencia_artificial_que_descongestiona_grandes_ciudades/>

Noticias de la Ciencia y la Tecnología Divulgando la Ciencia por internet desde 1997 (2024). Control del tráfico urbano mediante inteligencia artificial. Disponible en < https://noticiasdelaciencia.com/art/49589/control-del-trafico-urbano-mediante-inteligencia-artificial>

Github (foro abierto). Librería de Haarcascade para el software OpenCV. Disponible en <https://github.com/opencv/opencv/tree/master/data/haarcascades>

Alex Bradbury and Ben Everad (2014). “Learning Python with Raspberry Pi”. *Phyton Basics*, Chapter 3, 27-56



Jornadas de Jóvenes
Investigadores Tecnológicos

FACULTAD REGIONAL ROSARIO
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL