

Serie
Selección de Textos

S|T

Nuevas soluciones ingenieriles en las áreas de metalurgia, logística e infraestructura

José Ernesto Calderón
Josefina Huespe
Esteban Anzoise
(Editores)



Facultad de Humanidades y Educación
Instituto de Filosofía

serie
Selección de Textos

S | T

SERIE SELECCIÓN DE TEXTOS

JUAN REDMOND & RODRIGO LÓPEZ-ORELLANA
(DIRECTORES)

JORGE BUDROVICH S. (EDITOR)

VOLUMEN 12

NUEVAS SOLUCIONES INGENIERILES EN LAS ÁREAS DE METALURGIA, LOGÍSTICA E INFRAESTRUCTURA

JOSÉ ERNESTO CALDERÓN, JOSEFINA HUESPE

& ESTEBAN ANZOISE

(EDITORES)

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE HUMANIDADES
INSTITUTO DE FILOSOFÍA

2025

FACULTAD DE HUMANIDADES, UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO

III

Rector: Osvaldo Corrales Jorquera
Vicerrector de Gestión Institucional: Christian Corvalán Rivera
Secretario General: Ricardo Bravo Méndez
Decano: Pablo Aravena Núñez.

Comité Editorial de la Serie

Directores: Juan Redmond & Rodrigo López-Orellana
Editor: Jorge Budrovich Sáez

Comité Científico de la Serie

Adriana Arpini, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina
Alejandro Cassini, Universidad de Buenos Aires, Argentina
Carlos Bello, UTN-Facultad Regional Mendoza, Argentina
Claudio Albertani, Universidad Autónoma de la Ciudad de México
Cristián Soto, Universidad de Chile, Chile
Diego Fernandes, Universidade Federal de Goiás, Brasil
Esteban Anzoise, UTN-Facultad Regional Mendoza, Argentina
Félix Aguirre, Universidad de Valparaíso, Chile
Guillermo Cuadrado, UTN-Facultad Regional Mendoza, Argentina
Jaime Villegas, Universidad de Valparaíso, Chile
María José Frápolli, University College London, United Kingdom
María Manzano Arjona, Universidad de Salamanca, España
Miguel Tornello, UTN-Facultad Regional Mendoza, Argentina
Rolando Rebolledo, Universidad de Valparaíso, Chile
Rubén Quiroz Avila, Universidad Nacional de San Marco, Perú
Sara Beatriz Guardia, Universidad San Martín de Porres, Perú
Shahid Rahman, Université de Lille 3, Francia
Víctor Aranda, Universidad Complutense de Madrid, España

Serie Selección de Textos – Volumen 12. Nuevas soluciones ingenieriles
en las áreas de metalurgia, logística e infraestructura.
Primera edición. Valparaíso. Chile, 2025.
ISSN: 2810-7330

Editores: José Ernesto Calderón, Josefina Huespe & Esteban Anzoise
Diagramación: Esteban Anzoise

Esta publicación se distribuye bajo una Licencia
Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin
Obra Derivada 4.0 Internacional



INSTITUTO DE FILOSOFÍA, UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO Serrano 546, 2362415 Valparaíso. Chile	ISSN: 2810-7330
---	-----------------

NUEVAS SOLUCIONES INGENIERILES EN LAS
ÁREAS DE METALURGIA, LOGÍSTICA E
INFRAESTRUCTURA

JOSÉ ERNESTO CALDERÓN, JOSEFINA HUESPE

& ESTEBAN ANZOISE

(EDITORES)

Serie Selección de Textos, Volumen 12

Primera edición. Valparaíso, 2025

© 2025 de la presente edición, Universidad de Valparaíso.

Comité Científico del Volumen

Guillermo Cuadrado, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina

Esteban Anzoise, UTN-Facultad Regional Mendoza, Argentina

Raúl Pérez, UTN-Facultad Regional Mendoza, Argentina

Shahid Rahman, PhD, Universidad de Lille 3, Francia

Alejandro Cassini, UBA, Buenos Aires

Eduardo Barrios, UBA, Buenos Aires

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
<i>INFERENCIA PROBABILÍSTICA, ALGORITMO ID3.</i>	<i>9</i>
<i>GABRIEL AGUIRRE</i>	
<i>ESTUDIO COMPARATIVO DE LA HUELLA DE CARBONO EN MAMPUESTOS</i>	<i>37</i>
<i>SEBASTIÁN PANELLA; NERY PIZARRO; MIGUEL TORNELLO; NELSON AGÜERA</i>	
<i>MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA ASIGNACIÓN Y COMBINACIÓN DE TAMAÑOS DE LOTE.</i>	<i>49</i>
<i>PABLO GABRIEL MORALES SÁNCHEZ; FRANCO ADRIÁN GARINO; MARGARITA MIGUELINA MIERAS, FABRICIO ORLANDO SÁNCHEZ VARRETTI</i>	
<i>EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA SOBRERRESISTENCIA EN BARRAS DE ACERO</i>	<i>59</i>
<i>TERESITA SALINAS; ROCÍO MERCADO; JESÚS CEPPI; GABRIEL AGOSTINI; CANDELA ESPINOZA; JOANA AVALOS; CAROLINA DOMIZIO; MARCELO GUZMÁN; GERARDO GONZÁLEZ DEL SOLAR</i>	
<i>ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MATERIALES DEL RIEL FERROVIARIO U36</i>	<i>75</i>
<i>PATRICIA CARRIZO; RUBÉN LEPEZ</i>	
<i>USO DE REALIDAD AUMENTADA EN EL MONITOREO INDUSTRIAL</i>	<i>87</i>
<i>EUGENIA ALFONSO, MARÍA CECILIA CASTELLANOS, CAROLINA PENNISI, MATILDE INÉS CÉSARI</i>	
<i>DISEÑO PRELIMINAR DE AISLADOR SÍSMICO FRICCIONAL DE IMPACTO CON UN NÚCLEO DE GOMA</i>	<i>101</i>
<i>KEYVYNN CENAS; MIGUEL TORNELLO; GUSTAVO GIOACCHINI</i>	

CARACTERÍSTICA METALOGRÁFICA DE UN RIEL DECAUVILLE
DONADO POR EL MUSEO Y CENTRO CULTURAL FERROVIARIO
"RAUL SCALABRINI ORTIZ" 117
GUADALUPE TREJO; PATRICIA CARRIZO; JULIÁN DE FALCO; KHALIL FIGUEROA

IMPACTO DE LOS ESQUEMAS DINÁMICOS SOBRE LOS
OBSERVABLES CINÉTICOS..... 133
TATIANA DURÁN; RODOLFO DEMATTE; RAÚL PÉREZ; ARLES GIL REBAZA Y
JOSEFINA HUESPE

DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD DE POTENCIA
UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET EMPÍRICA 149
JESÚS RUBÉN AZOR MONTOYA

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE VARIABLES PRELIMINARES EN EL
PROCESO DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO..... 165
ALICIA CARLA TAPIA; HUGO F. TAPIA

PRÓLOGO

Es un lugar común hablar de la crisis que vive hoy la educación en general y la universidad en particular, no sólo a nivel nacional o regional sino a escala global. Esta situación no es nueva. El surgimiento de la educación formal se da en el Siglo V AC justamente por la crisis de la cultura griega clásica. En esta etapa aparece el paso del mito al logos, el cual también reconfiguró la forma de organizar la vida en común. Sobre esta base, podríamos decir que crisis y educación son sinónimos, por lo cual siempre estamos obligados a repensar el porqué de nuestras instituciones o, en otros términos, las misiones de la universidad.

Las misiones de la universidad las abordó el destacado pensador argentino Risieri Frondizi, en un artículo publicado en el año 1956, titulado, justamente, 'La Universidad y sus misiones'. En ese escrito distinguió cuatro misiones: preservación del patrimonio cultural; investigación científica; formación de profesionales y misión social. La preservación de la cultura debe entenderse no como un mero depósito de saberes, sino como la preservación del saber vivo, como la forma en la cual la universidad debe hacer para que el patrimonio de la cultura no sea considerado algo ajeno a la sociedad. Vivificar la cultura significa hacerla patente en la forma en que las nuevas generaciones comprenden el mundo y se relacionan entre sí. En este sentido, la segunda misión, la investigación, va de la mano con la primera. La universidad que simplemente se dedica a repetir lo que otros dicen pierde el poder creador. La permanente necesidad de avanzar en el conocimiento científico está asociada a ir construyendo permanentemente nuevos saberes que nos permitan afrontar de manera creativa las otras dos funciones. La función de formación de profesionales hoy no puede entenderse como una simple transmisión de saberes: la universidad ha perdido el lugar de única reserva de información. De hecho, la información está hoy literalmente al alcance de la mano en nuestros teléfonos y computadoras. Sin embargo, más que nunca esa accesibilidad nos reclama verdadera formación. El ex-ceso de información muchas veces lleva a desinformación, problema que sólo puede

afrontarse a partir de que la universidad cumpla su misión de formar profesionales y se asocia a la última función que señalaba Frondizi: la misión social. Esta última apunta directamente a cómo la universidad se relaciona con la sociedad. Esta relación debe ser de mutua comprensión y cooperación. Si se rompe el vínculo que une sociedad y universidad, estamos dando más que nunca lugar a los dogmatismos de todos los colores y banderas. Es un deber de la universidad saber interpretar los tiempos que vivimos, no para simplemente avalarlos sino para devolver una mirada crítica y superadora. Las misiones no son para Frondizi una mera yuxtaposición de tareas sino un conglomerado que debe fusionarse para lograr un resultado sólido. El hecho de que uno de los elementos falte, hace que la Universidad se aleje de su verdadero destino.

Para abordar los desafíos que tiene la universidad no basta con discurso y declaraciones, sino que son necesarias acciones concretas. Por ello, desde el año 2010 y cada dos años se desarrolla el Congreso Internacional de Enseñanza de Ciencias Empíricas en Facultades de Ingeniería (ECEFI). En el año 2024 realizamos el octavo encuentro, dando claras muestras de continuidad, a pesar de los desafíos que más arriba mencionamos. El octavo encuentro se desarrolló los días 7 y 8 de noviembre del año mencionado en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza. En todas las ediciones anteriores el ECEFI ha sido organizado por el Grupo de Investigaciones en Matemática Aplicada a la Ingeniería y Gestión (IEMI). En esta oportunidad fue organizado en conjunto con la Centro Estudios de Filosofía de la Ciencia, Lógica y Epistemología del Instituto de Filosofía de la Universidad de Valparaíso (Chile). Además, se contó con la participación de docentes de facultades, centros e institutos de la Universidad de Valparaíso (Chile), la Universidad Nacional de Cuyo, la Universidad de Mendoza, otras Facultades Regionales de la UTN y docentes de diversas universidades tanto de Argentina como de Latinoamérica. El presente volumen reúne una parte de los artículos seleccionados de los trabajos presentados en el VIII ECEFI. Este Volumen se titula "Nuevas soluciones ingenieriles en las áreas de metalurgia, logística e infraestructura".

El primer escrito es de Gabriel Aguirre y se titula 'La problemática de inferencias racionales y el uso de la Inteligencia Artificial (IA)'. Específicamente se utilizan los llama-dos 'Árboles de decisión' los cuales pueden ser implementados como un componente fundamental en los sistemas que piensan racionalmente. Esta investigación se centra en el estudio de los aspectos teóricos que fundan la idea del algoritmo y la implementación computacional del mismo, para proceder a la validación frente a otros productos.

El segundo escrito corresponde a Sebastián Panella, Nery Pizarro, Miguel Tornello y Nelson Agüera. El título es 'Estudio comparativo de la huella de carbono en mampuestos'. Su principal objetivo es analizar y comparar el impacto ambiental generado por la producción de mampuestos tradicionales en contraste con los mampuestos sustentables.

El tercer artículo es de Pablo Gabriel Morales Sánchez; Franco Adrián Garino; Margarita Miguelina Mieras, Fabricio Orlando Sánchez Varretti y se titula 'Método de optimización para la asignación y combinación de tamaños de lote'. En este escrito se parte de la problemática de la optimización de las actividades logísticas, especialmente la gestión de inventarios y se presenta un modelo teórico que permite reducir la complejidad de los datos relacionados con el dimensionamiento de lotes. Esta flexibilidad en la toma de decisiones puede mejorar de manera significativa la capacidad operativa de la empresa y los costos operativos de la misma.

El cuarto artículo es de Teresita Salinas, Rocío Mercado, Jesús Ceppi, Gabriel Agostini, Candela Espinoza, Joana Avalos, Carolina Domizio, Marcelo Guzmán y Gerardo González del Solar y se titula 'Evaluación experimental de la sobrerresistencia en barras de acero'. El objetivo del artículo es presentar la evaluación experimental de la capacidad de sobrerresistencia flexional de barras de acero ADN 420-S de diferentes diámetros y marcas comerciales, de acuerdo con la normativa vigente en Argentina. La sobrerresistencia es clave en la ingeniería

estructural, ya que garantiza el correcto desempeño de las estructuras ante cargas sísmicas.

El quinto artículo pertenece a Patricia Carrizo y Rubén López y se titula 'Estudios de las propiedades materiales del Riel Ferroviario U36'. En este artículo se plasma la investigación que consistió en el estudio de una pieza de riel ferroviario tipo Vignole con denominación U36 (SNCF). Se realizaron los estudios de micrografía, macrografía, composición química y dureza con la intención de poder caracterizar las propiedades del material tales como el grado del acero y su comparación con materiales actuales. Los resultados del estudio demuestran en principio que se trata de un acero eutectoide recocido de estructura ferrita - perlita con un contenido de 0,88% de Carbono.

El sexto artículo es de Eugenia Alfonso, María Cecilia Castellanos, Carolina Pennisi y Matilde Inés Césari y se titula 'Uso de realidad aumentada en el monitoreo industrial'. En este artículo se revisan los beneficios y desafíos de la Realidad Aumentada (RA) en el monitoreo industrial, se presentan casos de éxito y se discuten las mejores prácticas para su implementación efectiva. A través de una revisión exhaustiva de la literatura y la comparación de enfoques actuales, se destacan las oportunidades y las barreras tecnológicas y organizativas que deben ser superadas.

El séptimo artículo es de Kevynn Cenas, Miguel Tornello y Gustavo Giocchini y se titula 'Diseño preliminar de aislador sísmico friccional de impacto con un núcleo de goma'. En el mismo se trabaja, en primer lugar, la información sobre la respuesta del equipo diseñado localmente frente a sismos sensibles ocurridos en la región registrados por el instrumental sísmico del CeReDeTeC. En segundo lugar, se analiza las características generales del dispositivo de aislamiento sísmico en relación con su mecanismo particular de disipación de energía.

El octavo escrito se titula 'Características metalográfica de un riel Decauville donado por el museo y centro cultural ferroviario "Scalabrini Ortiz"' y sus autores son Guadalupe Trejo, Patricia Carrizo, Julián De Falco y Khalil Figueroa. El perfil de riel fue concedido en forma de cooperación con el proyecto PID: 8543-

Ingeniería Inversa Aplicada al estudio de Calidades en Materiales de Rieles Ferroviarios Históricos, con el cual se realiza una investigación en el Área Arqueometalurgia que funciona dentro del Instituto de Materiales y Tecnología Aplicada (IMTECAP) perteneciente a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza. Se realizaron micrografías para observar la estructura interna del material y las macrografías para obtener calidad del material para ambos procesos se utilizó el reactivo Nital 2%. La composición química se obtuvo por una espectroscopia de plasma. También se realizaron mediciones de microdureza en distintas zonas del respectivo riel.

El noveno escrito, titulado 'Impacto de los esquemas dinámicos sobre observables cinéticos' pertenece a Tatiana Durán, Rodolfo Dematte, Raúl Pérez, Arles Gil Rebaza y Josefina Huespe. En este trabajo se explora el efecto de los observables cinéticos, (coeficiente de sticking y espectros de desorción térmica programada) sobre diferentes esquemas dinámicos en un modelo de gas red bidimensional. El coeficiente de sticking y los espectros de desorción térmica programada (DTP), se obtuvieron y comprobaron mediante dos técnicas: Simulación Monte Carlo y Método de Matriz de Transferencia (TMM).

El décimo escrito, se titula 'Determinación de índices de calidad de potencia utilizando transformada Wavelet Empírica' de Jesús Rubén Azor Montoya. Este artículo establece una mecánica de trabajo que permite, a partir de una señal simulada compleja como las que se presentan en la práctica, descomponerla eficientemente mediante la Transformada Wavelet Empírica y desde allí calcular los citados índices. Dado que se cuenta con la señal original, es posible comparar los índices verdaderos con los obtenidos de la descomposición y así valorar los errores cometidos en su cálculo.

El último escrito de este volumen se titula 'Revisión bibliográfica de variables preliminares en el proceso de diseño arquitectónico' y sus autores son Alicia Carla Tapia y Hugo F. Tapia. Este artículo propone el desarrollo de un marco integral para sintetizar las variables detectadas en el proceso proyectual arquitectónico. El

objetivo general del artículo es identificar y recabar las variables preliminares empleadas en el proceso de diseño arquitectónico, a través de una revisión y análisis de la literatura científica, en la base de datos Google académico, IGLC, Lean Construction Institute, Dialnet y ScieLO.

Juan Ernesto Calderón
Mendoza, junio de 2025

INFERENCIA PROBABILÍSTICA, ALGORITMO ID3.

Gabriel Aguirre

UTN-FRM/gabriel.aguirre@docentes.frm.utn.edu.ar

UAI/GabrielVictor.Aguirre@alumnos.uai.edu.ar

/GVAguirre72@yahoo.com.ar

Resumen: La complejidad del mundo aporta incertidumbre, limitando la posibilidad de realizar inferencias racionales. Es aquí donde la IA puede brindar soluciones computacionales a partir de métodos Inferenciales automatizados como los llamados Árboles de decisión, que pueden ser implementados como un componente fundamental en los sistemas que piensan racionalmente. Uno de ellos vincula las nociones de Probabilidad y Entropía en el marco de la Teoría de la Información; estamos hablando del clásico Iterative Dichotomiser 3 (ID3), desarrollado en 1979 por John Ross Quinlan para implementar el razonamiento basado en casos. Esta investigación se centra en el estudio de los aspectos teóricos que fundan la idea del algoritmo, sin escatimar en exaltar rasgos históricos relacionados con este proceso. Implementando computacionalmente el mismo, para proceder a la validación frente a otros productos. Explorar otras alternativas teóricas que retoman el enfoque clásico de física estadística, para implementar el algoritmo.

Palabras claves: ID3, Entropía, Inferencia, Incertidumbre, Árboles de Decisión.

INTRODUCCIÓN

ID3 (Iterative Dichotomiser Three) o como se lo suele traducir también aludiendo a un juego de palabras Inferential Decision Tree, es un algoritmo de clasificación y decisión basado en el principio físico de la Entropía, concebido y adaptado al ámbito de la Informática. Y como tal permite la construcción de un árbol de decisión que trata de limitar la probabilidad de error al tomar una decisión por sí o por no. Dicho algoritmo fue propuesto por el Ingeniero en Sistemas Australiano John Ross Quinlan en 1979.

Para la presentación de este trabajo de Investigación, junto con algunos de los resultados obtenidos de un Mapeo Sistemático de la Literatura hemos optado por dividirlo en cuatro tramos. Un apartado de **CONTEXTO** de la temática, a continuación, los aspectos referentes a **FUNDAMENTOS LÓGICOS**, continuamos con los **FUNDAMENTOS**

FÍSICO-MATEMÁTICO que rigen la heurística del algoritmo. Dejando para el tramo final los aspectos computacionales en **DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ALGORITMO ID3** e **IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL**.

CONTEXTO

¿Qué es la inteligencia?

Russell (1983) se pregunta cómo es que los seres humanos, cuyos contactos con el mundo son breves, personales y limitados, logran, sin embargo, conocer tanto como conocen. La inteligencia puede ser definida en la literatura de diversas maneras,

“**inteligencia**. (Del lat. *intelligentia*). f. 1. Capacidad de entender o comprender. 2. Capacidad de resolver problemas. 3. Conocimiento, comprensión, acto de entender. 4. Sentido en que puede tomar una proposición, un dicho o una expresión...” (Real Academia Española, 2024)

Pero todas ellas deben ser tomadas como definiciones provisionales, acuerdos convencionales, puesto que es muy difícil caracterizar la inteligencia. En palabras del biólogo Stephen Jay Gould

“...hemos llegado a ser, en virtud de un glorioso accidente evolutivo llamado **inteligencia**, los administradores de la continuidad de la vida en la Tierra. No pedimos que se nos asignara ese papel, pero no podemos rechazarlo. Quizá no seamos los más adecuados para desempeñarlo, pero aquí

estamos... (citado en Audesirk, Audersirk y Byers, 2008, p. 353)”

Incluso durante décadas, el hombre ha descrito la inteligencia desde su propia perspectiva, pero de hecho la inteligencia puede ser observada en los organismos en general, y por tanto no es un rasgo exclusivo del género homo. En este sentido la ciencia comienza a observar y estudiar este rasgo, no solamente en el hombre.

Una comprensión de la inteligencia no puede pretender ser sustentable, enfocándose solo en el hombre, debe tener una mirada integral y observar también el resto de los casos presentes en la naturaleza.

¿Qué es la inteligencia Artificial?

Lo dicho anteriormente nos pone ante un dilema, pero el hombre mismo es parte de este dilema. Lo que nos motiva es comprender ser curiosos, hacer preguntas. Desde el momento en que el hombre pensó en construir una máquina no orgánica para auxiliarlo en sus tareas, comenzó a develar el dilema.

Actualmente nos referimos a Sistemas Inteligente (IS), en este sentido el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) nos dice

Intelligent Systems (IS)

Artificial intelligence (AI) is the study of solutions for problems that are difficult or impractical to solve with traditional methods.

It is used pervasively in support of everyday applications such as email, word-processing and search, as well as in the

design and analysis of autonomous agents that perceive their environment and interact rationally with the environment. (ACM & IEEE, 2013, p. 121)

Usted está aquí.

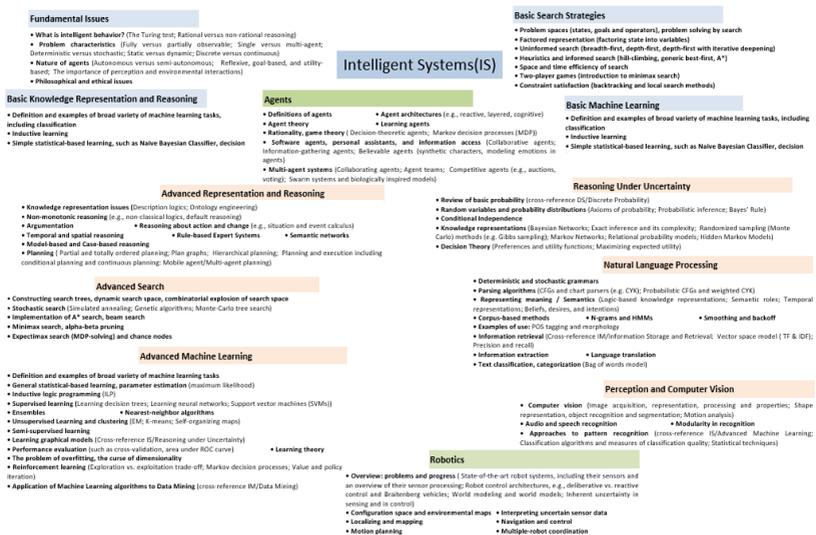
Como parte de este estudio se realizó un **mapeo sistemático de la literatura**. En él se plantea una primera pregunta de investigación

P1: ¿Qué taxonomía del Campo de la Inteligencia Artificial podría ser referenciada?

A través de la comparación de distintos documentos y según los criterios de búsqueda y análisis establecidos se obtiene el siguiente resultado presentado en la Figura 1

Figura 1

Taxonomía del campo de la Inteligencia Artificial.



Nota. El gráfico presentado está inspirado en los resultados obtenidos en The Joint Task Force on Computing Curricula, Association for Computing Machinery (ACM) y IEEE Computer Society para el Computer Science Curricula 2013. Realizando una adecuación didáctica en “Aguirre, Gabriel Víctor TP 3.3 Mapeo Sistemático de la Literatura VI.docx”, bajo las exigencias del plan de estudios para el Doctorado en Informática de la Universidad Abierta Interamericana, y enmarcada en el espacio “Metodología de la Investigación Científica” a cargo del Dr. Carlos Neil.

La taxonomía de la Inteligencia Artificial (IA) presentada en la **Figura 1** referencia de manera central la denominación actualizada del campo como **Intelligent Systems (IS)**. En celeste se destacan las nociones introductorias o básicas para el abordaje del campo: **Fundamental Issues** (Cuestiones fundamentales), **Basic Knowledge Representation and Reasoning** (Representación y razonamiento de conocimientos básicos), **Basic Search Strategies** (Estrategias de búsqueda básicas) y **Basic Machine Learning** (Aprendizaje automático básico). **Agents**, Teoría de Agentes es troncal en el campo de IA y se exalta en color verde oliva en posición central.

Los sub campos que abordan temáticas en profundidad se muestran en color naranja suave - la disposición no es casual, organizadas desde categorías más específicas a otras más amplias -, podemos observar las siguientes: **Advanced Representation and Reasoning** (Representación y razonamiento avanzados), **Reasoning Under Uncertainty** (Razonamiento en condiciones de incertidumbre), **Advanced Search** (Búsqueda avanzada), **Natural Language Processing** (Procesamiento del lenguaje natural), **Advanced Machine Learning** (Aprendizaje automático avanzado) y **Perception and Computer Vision** (Percepción y visión artificial). **Robotics**, la implementación física de algunos o todos los tópicos anteriores es referenciada en el sub campo de Robótica, destacada de manera central abajo en color verde oliva. (Aguirre, comunicación personal, 2024).

La Taxonomía presentada en la Figura 1 permite hacernos de una mirada del campo de IA, pero a la vez caracterizar el algoritmo ID3. Esto nos llevó a contestar la segunda pregunta de investigación.

P2: ¿En qué rama de IA se ubican los Árboles de Decisión?

A partir de los resultados obtenidos podemos decir que, los Árboles de Decisión y en particular el Algoritmo ID3 pertenecen al sub campo **Aprendizaje Automático Avanzado** (Advanced Machine Learning); y como tal requieren un **Aprendizaje Supervisado** (Supervised learning), en este sentido la base de conocimiento que sirve para entrenar el algoritmo posee los valores objetivo, lo que permite establecer a su vez una curva de aprendizaje que el científico debe observar y corregir de ser necesario.

FUNDAMENTOS LÓGICOS.

Entre sus distintos enfoques la Inteligencia Artificial tiene como objetivo la producción de sistemas que piensan racionalmente. El abordaje de este tipo de sistemas ha sido realizado implicando diferentes campos del conocimiento como la Lógica (Lógicas de primer orden, Lógicas Polivalentes, Sistemas axiomáticos, Deducción natural, Inducción, etc.), la Psicología (Constructivismos, Conductismo, etc.), la Biología (Neurología), Ingeniería del Conocimiento, Filosofía, Cibernética, Lingüística, etc. Si puntualizamos en la idea de realizar inferencias racionales, encontraremos que existen tres formas de razonamiento (Pierce, 1878):

- **Razonamiento deductivo:** Consistente en partir de la regla general, y que obtiene una conclusión a partir del caso particular -sustento de las ciencias formales-
- **Razonamiento inductivo:** que establece reglas generales, a partir de casos. –sustento de las ciencias fácticas-.
- **Razonamiento abductivos:** que permiten establecer hipótesis, a partir de casos particulares y reglas generales. –que es la forma auténtica de descubrimiento de nuevo conocimiento-

En todos ellos, los elementos que constituyen el razonamiento están dados por enunciados establecidos, podríamos decir perfectamente delimitados. Normalmente los agentes en el mundo real, no están provistos de elementos tan bien definidos; pero esto no es una limitación para realizar inferencias y que estas gocen de racionalidad.

La complejidad del mundo dificulta establecer consideraciones desprovistas de errores o aspectos faltantes; esta complejidad dificulta también establecer reglas generales para ser aplicadas, e incluso puede inhabilitar hipótesis propuestas.

Claro está, que la única excepción provenga de las ciencias formales, que pueden prescindir de una interpretación o correspondencia con el mundo real; incluso los dilemas y paradojas están restringidos en estos ámbitos. Podemos decir que la complejidad del mundo aporta incertidumbre, limitando la posibilidad de realizar inferencias racionales.

Es aquí donde la IA puede brindar soluciones computacionales a partir de métodos Inferenciales automatizados como los llamados Árboles de decisión, que pueden ser implementados como un componente fundamental en los sistemas que piensan racionalmente.

La tarea, también llamada **aprendizaje inductivo**, consiste en aprender una función a partir de ejemplos de sus entradas y salidas...El aprendizaje inductivo consiste en encontrar una hipótesis consistente que verifique los ejemplos. La navaja de Ockham¹ sugiere elegir la hipótesis consistente más sencilla. (Russell y Norvig, 2004, p. 766)

Existen diversos criterios o algoritmos para implementar Árboles de decisión, uno de ellos vincula las nociones de Probabilidad y Entropía en el marco de la Teoría de la Información; este es caso de Iterative Dichotomiser 3 (ID3).

FUNDAMENTOS FÍSICO-MATEMÁTICO.

En esta sección vamos a establecer las ideas centrales que gobiernan la heurística del algoritmo ID3. Rudolf Julius Emanuel Clausius fue un Físico Alemán del siglo XIX, reconocido por ser uno de los “fundadores” de la Termodinámica (Meitner, 2017). En 1865 estableció la noción de **Entropía(S)** y una definición matemática de la misma como se observa en la Ecuación 1.

$$S = \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

¹ A William de Ockham (1280-1349), el filósofo más influyente de su siglo y un gran contribuidor a la epistemología medieval, la lógica y la metafísica, se le atribuye la afirmación denominada «La navaja de Ockham». Se expresa en latín “Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem”, y en castellano «Las entidades no han de ser multiplicadas más allá de la necesidad». Desgraciadamente, este loable consejo no se encuentra en ninguna parte de sus escrituras con estas palabras precisamente (Russell y Norvig, 2004, p. 767).

Básicamente una razón entre la cantidad de calor (Q) y la temperatura absoluta (T). Famosa es su frase “La entropía del universo tiende a un máximo.” Para entender mejor esta noción podemos recurrir a una visión macroscópica estableciendo que “La Entropía es una medida cuantitativa del desorden...” (Sears, Zemansky, Young & Freedman, 2004).

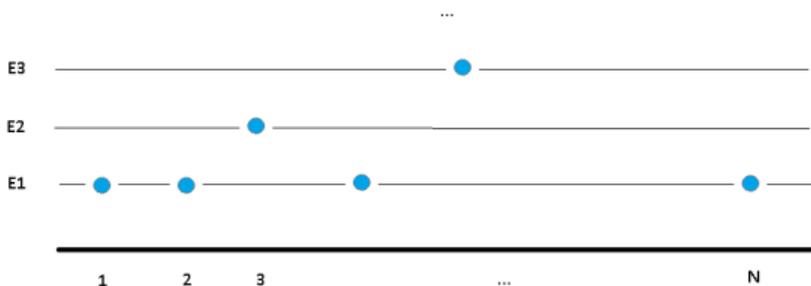
Podemos pensar en un gas más **desordenado** después de la expansión porque las moléculas se mueven en un volumen mayor y tienen más aleatoriedad de posición, para una referencia mayor ver **Apéndice I**. Más tarde y con base a las observaciones dadas por Maxwell, el Físico-Matemático Ludwig Edward Boltzmann demuestra en 1872 la siguiente identidad (Meitner, 2017) (Ecuación 2)

$$S = k \log w \tag{2}$$

Mediante argumentaciones combinatorias y ciertos supuestos sobre la interacción molecular de un gas, establece que la entropía(S) se encuentra en función de los posibles estados microscópicos para un estado macroscópico dado (w), siendo K la constante de Boltzmann. Las ideas de Boltzmann fundan lo que se conoce como Física Estadística (Alonso y Finn, 1986). De manera resumida podemos pensar en un conjunto de N partículas que se encuentran en un gas ideal, como muestra la Figura 2.

Figura 2

Modelo molecular general de un gas ideal



Y establecer los siguientes supuestos

1. El número de partículas permanece constante durante todos los procesos que ocurren en el sistema.
2. Las partículas no interactúan, o solo lo hacen ligeramente.
3. El sistema está aislado, la energía total U debe ser constante; sin embargo, pueden cambiar la distribución de las partículas entre los estados disponibles de energía.

Dadas estas condiciones podemos reconocer que algunas partículas se encuentran en un estado energético, y otras en otro. Esto determina una partición del sistema de partículas que conforman el gas. Por consiguiente y mediante consideraciones fundamentalmente combinatorias, es posible establecer que tan probable es una partición dada mediante una distribución de Maxwell-Boltzmann dada en la Ecuación 3

$$P_K = \prod_{i=1}^K \frac{g_i^{n_i}}{n_i!} \quad (3)$$

Particularmente, cuando un sistema alcanza la partición más probable, se encuentra en un estado de **equilibrio estadístico**. Y es aquí donde el sistema posee máxima entropía. Un resultado notable determina que (Ecuaciones 4 y 5)

$$dA = \frac{dQ}{T} \quad (4)$$

con

$$A = K \ln(P) = K N + K \ln\left(\frac{Z}{N}\right) N + \frac{U}{T} \quad (5)$$

La identidad presentada en las Ecuaciones 4 y 5 puede ser ampliada en el Apéndice II. La importancia de esta identidad en nuestra exposición radica en proveernos de un instrumento matemático para medir la

entropía en un sistema y en particular establecer cuando estamos en un sistema con equilibrio estadístico o con máxima entropía.

En 1948 el genial matemático e ingeniero Claude Elwood Shannon redactó “**A Mathematical Theory of Communication**” en “The Bell System Technical Journal”. La importancia del texto es conocida por todos ya que en él se funda la llamada Era de la Información. Una de las preocupaciones centrales de Shannon, expresada en este documento, era establecer la confiabilidad de los mensajes durante los procesos de comunicación: “The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point” (Shannon, 1948, p. 379). Nos interesa por tanto puntualizar en el siguiente resultado que hemos decidido mostrar de manera literal en la Figura 3

Figura 3

Formulación original presenta en la página 19, del famoso escrito de Shannon del año 1948

Theorem 2: The only H satisfying the three above assumptions is of the form:

$$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

where K is a positive constant.

En el de manera brillante se conectan las ideas de entropía e información, al considerar los elementos de información supeditados a condiciones semejantes a las partículas en los gases. De hecho, demuestra que el operador H es análogo al conocido resultado dado por Boltzmann en su Mecánica Estadística para la entropía. Es de notar que p_i es la probabilidad de que una cierta unidad de información se encuentre en la celda i (léase, adquiera un valor específico). Y para nosotros es sumamente importante a la vez que conveniente limitarnos a la Ecuación 6, considerando K como la unidad

$$H(x) = -p(x) \log(p(x)) - q(x) \log(q(x)) \quad (6)$$

La Ecuación (6) para Shannon es una medida de información, elección e **incertidumbre**, este último concepto nos será especialmente útil, y puede ser ampliado en el Apéndice III.

Finalmente presentamos el último eslabón en nuestra red de conexiones. En el año 1979 el Ingeniero John Ross Quinlan presenta "INDUCTION OVER LARGE DATABASES" en la Universidad de Stanford. En este trabajo alude a un procedimiento basado en inducción a partir del cual es posible extraer reglas de aprendizaje representadas en un Árbol de decisión (Quinlan, 1979). No obstante, vamos a remitirnos al informe presentado en el año 1986 conocido como "Induction of Decision Trees", cuya portada puede verse en la Figura 4.

Figura 4

Portada del escrito "Induction of Decision Trees", presentado por Quinlan en el año 1986

Machine Learning 1: 81–106, 1986
© 1986 Kluwer Academic Publishers, Boston – Manufactured in The Netherlands

Induction of Decision Trees

J.R. QUINLAN (munnar!nswitgould.oz!quinlan@seismo.css.gov)
Centre for Advanced Computing Sciences, New South Wales Institute of Technology, Sydney 2007, Australia

(Received August 1, 1985)

Key words: classification, induction, decision trees, information theory, knowledge acquisition, expert systems

Abstract. The technology for building knowledge-based systems by inductive inference from examples has been demonstrated successfully in several practical applications. This paper summarizes an approach to synthesizing decision trees that has been used in a variety of systems, and it describes one such system, ID3, in detail. Results from recent studies show ways in which the methodology can be modified to deal with information that is noisy and/or incomplete. A reported shortcoming of the basic algorithm is discussed and two means of overcoming it are compared. The paper concludes with illustrations of current research directions.

La razón de ello es la clara intención de divulgar su algoritmo ID3, que permite la construcción de árboles de decisión por medio de la inducción: “The induction task is to develop a classification rule that can determine the class of any object from its values of the attributes” (Quinlan, 1986, p. 86).

Es posible considerar la Ecuación 6 para calcular la entropía (I) de un elemento de información llamado “atributo”, a partir de una clase que posee dos valores (digamos positivos y negativos); este atributo está constituido a su vez de elementos que la caracterizan, y que permiten vía la Ecuación 6 calcular una suerte de entropía esperada (E). Surge de esta consideración la posibilidad de definir una heurística para la construcción de reglas, conocida como Ganancia de Información(G) (Ecuación 7)

$$G(a) = I(a) - E(a) \quad (7)$$

A partir de la Ecuación 7 podremos calcular la ganancia de información de un atributo, al comparar la incertidumbre obtenida a partir de su elección, contra la incertidumbre esperada de sus elementos. Y construir, por tanto, con este procedimiento, un árbol de decisión comenzando por la raíz.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ALGORITMO ID3

Hemos podido en términos generales establecer las bases teóricas que hacen que el algoritmo ID3 funcione. Trataremos ahora de manera resumida de presentar el algoritmo, en primer lugar, aludiendo al formato de su base de conocimiento y más tarde al algoritmo en sí.

Base de conocimiento, conjunto de instancias.

Quinlan (1986) en la primera parte de su escrito requiere de un ejemplo tutorial preparado por un experto del dominio: “...set of tutorial examples prepared by a domain expert...” (Quinlan, 1986, p. 84) para entrenar el algoritmo. En particular propone a modo de ejemplo un dataset, que es favorito en la presentación del algoritmo ID3, como puede ser visto en la

Figura 5

Data Set de entrenamiento "weather", propuesto en el escrito "Induction of Decision Trees", presentado por Quinlan en el año 1986

Table 1. A small training set

No.	Atributos				Class
	Outlook	Temperature	Humidity	Windy	
1	sunny	hot	high	false	N
2	sunny	hot	high	true	N
3	overcast	hot	high	false	P
4	rain	mild	high	false	P
5	rain	cool	normal	false	P
6	rain	cool	normal	true	N
7	overcast	cool	normal	true	P
8	sunny	mild	high	false	N
9	sunny	cool	normal	false	P
10	rain	mild	normal	false	P
11	sunny	mild	normal	true	P
12	overcast	mild	high	true	P
13	overcast	hot	normal	false	P
14	rain	mild	high	true	N

Tal base de conocimiento está compuesta de "**Instancias**" (catorce en nuestro ejemplo); se reconocen también otras categorías conocidas como "**Atributos**" (a saber, Outlook, Temperature, Humidity, Windy), descriptos en términos de "**Elementos**" (en el caso Outlook, tendremos sunny, overcast y rain).

En las instancias de la aplicación existe una categoría llamada "**Class**", compuesta solamente de dos elementos, uno **positivo(P)** y otro **negativo(N)**. Esta categoría es central en la heurística del algoritmo, pues a partir del uso de "ventanas" es posible decidir entre distintos atributos evaluando la probabilidad de positivo y negativo. Esto permite determinar la ganancia de información del atributo.

Quinlan advierte sobre no considerar instancias idénticas que tengan elementos de clase opuestos: "...if the training set contains two objects that have identical values for each attribute and yet belong to different classes, it is clearly impossible to differentiate between these objects with reference only to the given attributes" (Quinlan, 1986, p. 86).

El último punto que señalaremos consiste en la **iteración** sobre un sub conjunto del conjunto de entrenamiento dado, que podrá ser ampliado conforme el árbol (podríamos decir la teoría) realice mejores predicciones.

Algoritmo ID3.

La implementación del algoritmo ID3, consiste en aplicar una técnica **recursiva** de programación: "ID3 examines all candidate attributes and chooses A to maximize gain(A), forms the tree as above, and then uses the same process recursively to form decision trees for the residual subsets $C_1, C_2 \dots C_v$." (Quinlan, 1986, p. 90)

De esta manera en nuestro ejemplo puede ser elegido un atributo, digamos "Outlook". Para el que podemos calcular su entropía (o incertidumbre) en los términos dados por la Ecuación 6 al tener en cuenta que p es la probabilidad de positivos, y q la de negativos (Ecuación 8).

$$I_{\text{Outlook}}(9,5) = \left(-\frac{9}{14}\right) \log_2 \left(\frac{9}{14}\right) - \left(\frac{5}{14}\right) \log_2 \left(\frac{5}{14}\right) = 0.9402 \quad (8)$$

Por otro lado, es posible calcular la **entropía esperada del atributo**, a partir de la entropía de cada uno de sus elementos. En nuestro caso resultan en (Ecuación 9)

$$I_{\text{sunny}}(2,3) = \left(-\frac{2}{5}\right) \log_2 \left(\frac{2}{5}\right) - \left(\frac{3}{5}\right) \log_2 \left(\frac{3}{5}\right) = 0.9709 \quad (9)$$

Aquí sunny, como muestra la Ecuación 9, posee máxima entropía y por consiguiente la mayor incertidumbre. Overcast, presenta entropía nula como muestra la Ecuación 10 y por consiguiente nula incertidumbre; ciertamente en este caso podemos estar seguros que podemos concluir en el elemento de clase "positivo" (Ecuación 11).

$$I_{\text{overcast}}(4,0) = \left(-\frac{4}{4}\right) \log_2 \left(\frac{4}{4}\right) - \left(\frac{0}{4}\right) \log_2 \left(\frac{0}{4}\right) = (-1) 0 - [0][-\infty] = 0 \quad (10)$$

$$I_{rain}(3, 2) = \left(-\frac{3}{5}\right) \log_2 \left(\frac{3}{5}\right) - \left(\frac{2}{5}\right) \log_2 \left(\frac{2}{5}\right) = 0.9709 \quad (11)$$

Finalmente, rain, presenta máxima entropía, y por consiguiente máxima incertidumbre. Estos valores permiten calcular la **entropía esperada** del atributo Outlook (Ecuación 12):

$$E(\text{Outlook}) = \frac{5 \cdot 0.9709 + 4 \cdot 0 + 5 \cdot 0.9709}{14} = 0.6935 \quad (12)$$

Para explicarlo en términos simples, la entropía de la condición Outlook, implica una incertidumbre de 0.6935 a partir de considerar sus elementos. Finalmente, estos valores permiten calcular la **Ganancia de información** del atributo Outlook (Ecuación 13):

$$G(\text{Outlook}) = I_{\text{outlook}}(9,5) - E(\text{Outlook}) = 0.9402 - 0.6935 = \mathbf{0.2467} \quad (13)$$

Básicamente la Ganancia de información permite considerar cuanta incertidumbre estamos dispuestos a aceptar al optar por el atributo Outlook como un nodo de nuestro árbol, con base a las opciones (o elementos) a los que estaremos supeditados. Ciertamente la máxima ganancia de información respecto de los otros atributos se da para Outlook.

Este procedimiento puede ser reproducido de manera recursiva, teniendo en cuenta como condición de terminación establecer los elementos de clase como se sugirió en la ecuación (10). El árbol resultante permite construir una “teoría” suficientemente buena, con un costo computacional bajo, al realizar una inducción sobre las instancias del elemento.

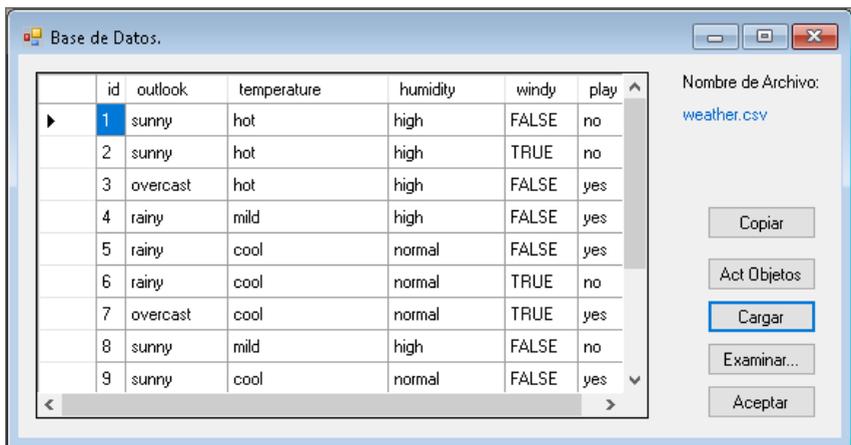
The worth of ID3's attribute-selecting heuristic can be assessed by the simplicity of the resulting decision trees, or, more to the point, by how well those trees express real relationships between class and attributes as demonstrated by the accuracy with which they classify objects other than those in the training set (their predictive accuracy) (Quinlan, 1986, p. 91)

IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Finalmente se muestra una implementación del algoritmo en un lenguaje C#, empleando memoria dinámica para la construcción del árbol (Deitel & Deitel, 2008).

Figura 6

Acceso al Data Set de entrenamiento "weather.csv", con las catorce instancias propuestas por Quinlan



The screenshot shows a window titled "Base de Datos." with a table of weather data. The table has columns for id, outlook, temperature, humidity, windy, and play. The data is as follows:

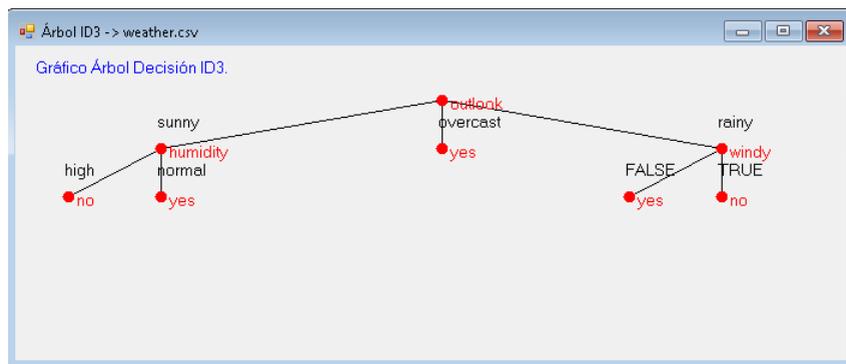
id	outlook	temperature	humidity	windy	play
1	sunny	hot	high	FALSE	no
2	sunny	hot	high	TRUE	no
3	overcast	hot	high	FALSE	yes
4	rainy	mild	high	FALSE	yes
5	rainy	cool	normal	FALSE	yes
6	rainy	cool	normal	TRUE	no
7	overcast	cool	normal	TRUE	yes
8	sunny	mild	high	FALSE	no
9	sunny	cool	normal	FALSE	yes

Below the table, there are several control buttons: "Copiar", "Act Objetos", "Cargar" (highlighted with a blue border), "Examinar...", and "Aceptar". To the right of the table, there is a label "Nombre de Archivo:" followed by the text "weather.csv".

Nota. El gráfico corresponde a una aplicación propia implementada en C#, con la habilidad de leer archivos de tipo .csv. Y poner disponible las instancias, para la construcción en memoria dinámica del árbol ID3.

Figura 7

Árbol de decisión ID3, obtenido a partir de la base de conocimiento "weather.csv"

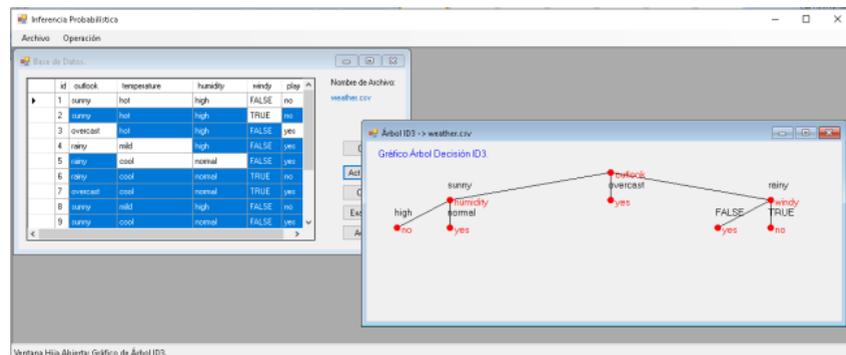


Nota. El gráfico corresponde a una aplicación propia implementada en C#, en el pueden verse los atributos Humidity, Outlook, Windy y sus respectivos elementos. El resultado es idéntico al obtenido por Quinlan con su famoso data set.

Como estrategia de construcción del árbol de decisión, se implementó la ejecución del algoritmo ID3 a la vez que se calculaban los puntos necesarios para su representación gráfica. Y siempre apelando a la técnica recursiva. (Aguirre, comunicación personal, 2024)

Figura 8

Interfaz completa donde se observa el árbol de inducción logrado a partir del algoritmo ID3, junto con la base de conocimiento "weather.csv"-luego de reconocer los elementos de cada atributo- empleando child windows.



CONCLUSIONES

Existe una notable interconexión entre los distintos campos del conocimiento (Lógica, Matemática, Filosofía, Física, Historia, Biología, etc.) al postular un modelo de la realidad. Este trabajo de manera resumida ha permitido experimentar este proceso, un privilegio y resultado de meses de ensayo y error, replanteo, investigación documental, horas de programación, etc. El estudio de modelos de la realidad, que en particular tengan implementaciones en modelos computacionales es un objetivo logrado...seguirán otros en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la organización de ECEFI 2024 por generar un espacio para la presentación de trabajos de investigación. Al Doctor Carlos Neil, por incentivar y acompañarme en el nacimiento de un investigador novel. A mi familia por tolerar ausencias mentales...y a veces físicas.

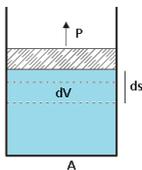
APÉNDICE I

Notas del libro de Sears, Zemansky, Young y Freedman (pág. 754)

Entropía: “es una medida cuantitativa del desorden.”

Consideremos una expresión isotérmica infinitesimal de un gas ideal (y dada la primera ley de la termodinámica “...el calor(Q) neto que fluye hacia la máquina en un proceso cíclico es igual al trabajo(W) realizado por la máquina” $U_1 - U_2 = 0 = Q - W \rightarrow Q = W$)

$$\begin{aligned}dU = 0 &\rightarrow dQ = dW = d(f \times s) = d(p \times A \times ds) = \\ &= p \times A \times ds = p \cdot dV = \frac{n R T}{V} dV\end{aligned}$$



T, es constante debido al proceso isotérmico.

U_G , es constante debido a que la energía interna del gas depende de su temperatura, con lo cual $dU = 0$.

Debido al tratamiento infinitesimal, la presión p puede ser considerada constante.

Recordemos la ecuación fundamental del gas ideal $pV = nRT$, donde p : presión, n : número de moles, R : constante molar de los gases, T : temperatura.

De manera que

$$\frac{dQ}{nRT} = \frac{dV}{V}$$

“El gas está en un estado más **desordenado** después de la expansión porque las moléculas se mueven en un volumen mayor y tienen más aleatoriedad de posición.”

“...los procesos se efectúan naturalmente en la dirección de desorden creciente,

- (1) La adición de calor a un cuerpo aumenta su desorden (aumenta su vibración molecular)
- (2) La expansión libre de un gas (aumenta la distancia entre moléculas)”

Matemáticamente, **definimos la entropía(S)** en un proceso reversible infinitesimal a temperatura T como

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (dS = nR \frac{dV}{V})$$

Para una cantidad discreta de calor Q (intercambio de energía entre el sistema y el entorno)

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} \quad [S]: \text{J/K}$$

Apéndice II

Enfoque molecular basado en un ejercicio propuesto en el Libro de Física de Alonso y Finn (Ejercicio 11.3, pág. 490).

En un sistema en equilibrio estadístico y que obedece a la estadística de Maxwell-Boltzmann.

$$\begin{aligned}
 A &= K \ln(P) = K \left(N - \sum_i n_i \ln \left(\frac{n_i}{g_i} \right) \right) = K N - K \sum_i n_i \ln \left(\frac{n_i}{g_i} \right) \\
 &= K N - K \sum_i n_i \ln \left(\frac{g_i \frac{N}{Z} e^{-\beta E_i}}{g_i} \right) = \\
 &K N - K \sum_i n_i \ln \left(\frac{N}{Z} e^{-\frac{E_i}{K T}} \right) = K N - K \sum_i n_i \left(\ln \left(\frac{N}{Z} \right) - \frac{E_i}{K T} \right) = \\
 &= K N - K \ln \left(\frac{N}{Z} \right) \sum_i n_i + K \frac{1}{K T} \sum_i E_i = K N - K \ln \left(\frac{N}{Z} \right) N + \frac{1}{T} U \\
 &= K N + K \ln \left(\frac{Z}{N} \right) N + \frac{U}{T}
 \end{aligned}$$

De manera que

$$A = K \ln(P) = K N + K \ln \left(\frac{Z}{N} \right) N + \frac{U}{T} \quad (\text{Ec. 11.28})$$

Para una transformación reversible infinitesimal en la cual el número total de partículas no varía.

$$\begin{aligned}
 \frac{dA}{dT} &= \frac{d \left(K N + K N \ln \left(\frac{Z}{N} \right) + \frac{U}{T} \right)}{dT} \\
 \frac{dA}{dT} &= 0 + K N \frac{1}{N} \frac{dZ}{Z} \frac{1}{dT} + \frac{dU}{dT} \frac{1}{T} - \frac{U}{T^2} \\
 dA &= K N \frac{dZ}{Z} + \frac{dU}{T} - \frac{U}{T^2} dT \quad (\text{Ec. 11.38})
 \end{aligned}$$

Sea la función de partición, dada en términos de la temperatura absoluta.

$$Z = \sum_{i=1}^K g_i e^{-\frac{E_i}{KT}}$$

Diferenciando

$$dZ = d \left(\sum_i g_i e^{-\frac{E_i}{KT}} \right)$$

$$\begin{aligned} dZ &= \sum_i g_i d \left(-\frac{E_i}{KT} \right) e^{-\frac{E_i}{KT}} = \sum_i g_i \left(-\frac{dE_i}{KT} + \frac{E_i}{KT^2} dT \right) e^{-\frac{E_i}{KT}} = \\ &= \sum_i g_i \left(-\frac{dE_i}{KT} \right) e^{-\frac{E_i}{KT}} + \sum_i g_i \left(\frac{E_i}{KT^2} \right) e^{-\frac{E_i}{KT}} dT \end{aligned}$$

Tras lo cual

$$dZ = \sum_i g_i \left(-\frac{dE_i}{KT} \right) e^{-\frac{E_i}{KT}} + \sum_i g_i \left(\frac{E_i}{KT^2} \right) e^{-\frac{E_i}{KT}} dT$$

De esta última ecuación al multiplicar por un factor conveniente, resulta que

$$KN \frac{dZ}{Z} = \sum_i g_i \frac{KN}{Z} \left(-\frac{dE_i}{KT} \right) e^{-\frac{E_i}{KT}} + \sum_i g_i \frac{KN}{Z} \left(\frac{E_i}{KT^2} \right) e^{-\frac{E_i}{KT}} dT$$

$$KN \frac{dZ}{Z} = \left(-\frac{1}{T} \right) \sum_i g_i \frac{N}{Z} e^{-\frac{E_i}{KT}} dE_i + \frac{1}{T^2} \sum_i g_i \frac{N}{Z} E_i e^{-\frac{E_i}{KT}} dT$$

$$KN \frac{dZ}{Z} = \left(-\frac{1}{T} \right) \sum_i n_i dE_i + \frac{1}{T^2} \sum_i n_i E_i dT$$

Por lo tanto

$$KN \frac{dZ}{Z} = \frac{1}{T} dW + \frac{1}{T^2} U dT$$

Retomando de la ecuación (Ec. 11.38)

$$dA = K N \frac{dZ}{Z} + \frac{dU}{T} - \frac{U}{T^2} dT = \left(\frac{1}{T} dW + \frac{1}{T^2} U dT \right) + \frac{dU}{T} - \frac{U}{T^2} dT =$$

$$= \frac{dW}{T} + \frac{dU}{T} = \frac{dW + dU}{T} = \frac{dQ}{T}$$

Por lo cual $dA = \frac{dQ}{T}$, que es la **definición de entropía con $A = K \ln(P)$**

Apéndice III

• Interpretación de la entropía H.

La siguiente imagen se extrae directamente de la p. 20 del texto original publicado por Shannon en el año 1948. En ella se muestra la gráfica de la entropía en función de una probabilidad p de cierto sistema con $q = (1 - p)$

The entropy in the case of two possibilities with probabilities p and $q = 1 - p$, namely

$$H = -(p \log p + q \log q)$$

is plotted in Fig. 7 as a function of p .

The quantity H has a number of interesting properties which further substantiate it as a reasonable measure of choice or information.

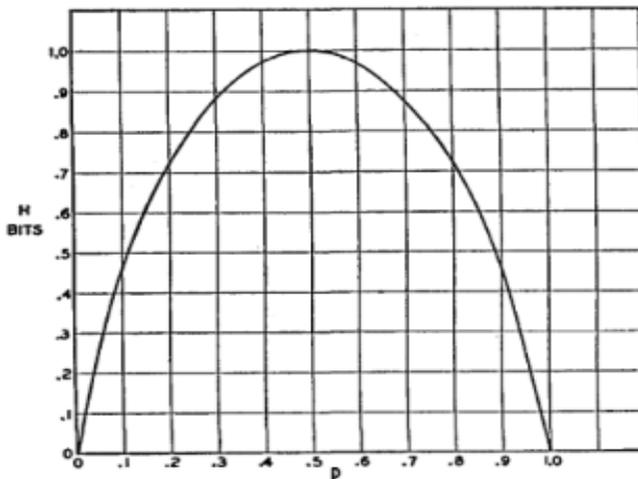
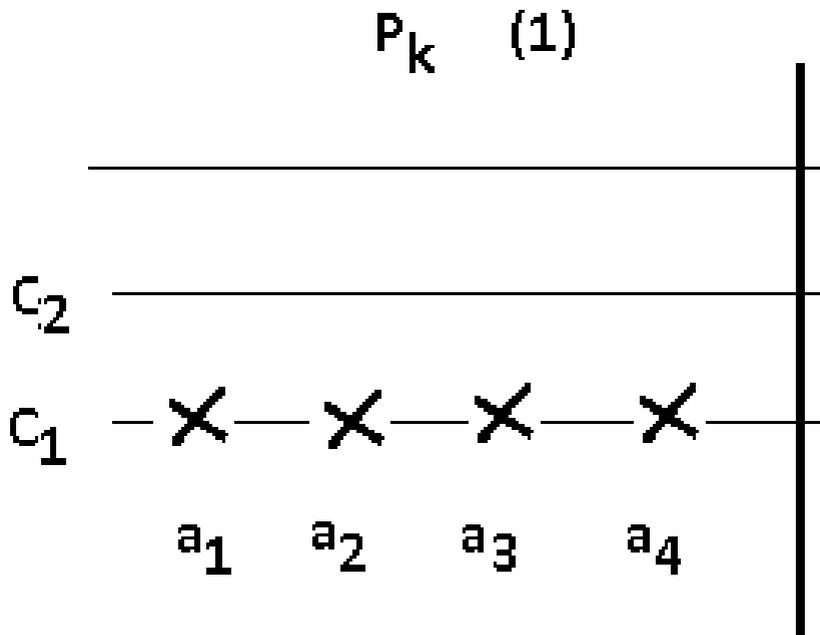


Fig. 7—Entropy in the case of two possibilities with probabilities p and $(1 - p)$.

Para explicar el funcionamiento de la entropía H y con vista a nuestros propios fines recurriremos a ejemplos particulares.

√ Pensemos en cuatro elementos de información a_1, a_2, a_3, a_4 . Supondremos que ellos pueden tomar dos estados c_1 y c_2 (digamos “bajo” 0 y “alto” 1) como muestra el siguiente gráfico



Desde un punto de vista físico podríamos decir que el sistema presenta una determinada partición (“todos ceros”). En tal caso la probabilidad de “todos ceros” sería

$$p = P[a_1 = 0 \wedge a_2 = 0 \wedge a_3 = 0 \wedge a_4 = 0] = 1 \quad \text{y} \quad q = (1 - p)$$

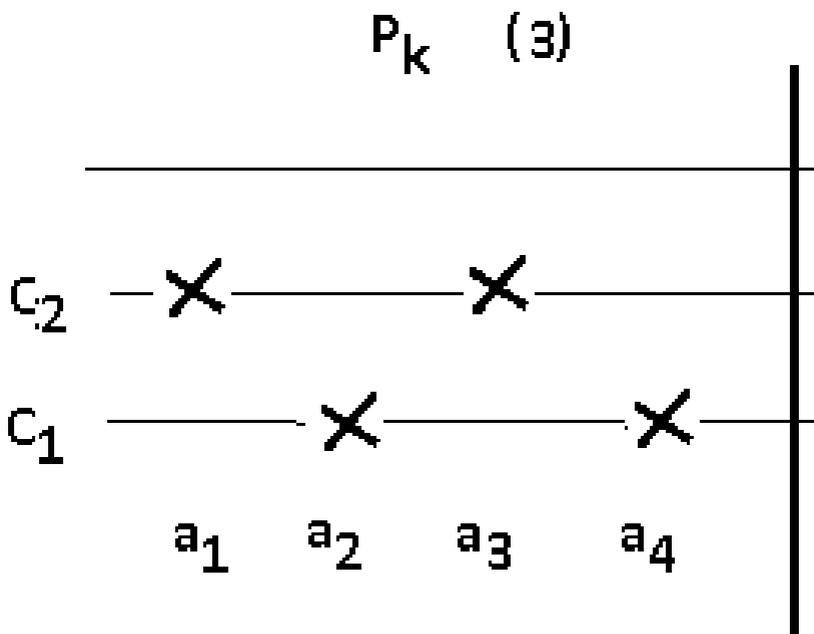
Con lo cual la evaluación de la expresión de entropía (con la adecuación matemática necesaria) sería

H("todos ceros")

$$= -p(\text{"todos ceros"}) \log(p(\text{"todos ceros"})) \\ - q(\text{"todos ceros"}) \log(q(\text{"todos ceros"})) = 0$$

Es decir, la entropía será nula, hay plena certeza de que los elementos de información son todos ceros –no hay incertidumbre en los términos de Shannon-.

√ Consideremos ahora que estos cuatro elementos de información a_1 , a_2 , a_3 , a_4 adquieren una determinada configuración o partición. Llamemos a la misma “dos ceros”



Podríamos definir en tal caso la probabilidad de “dos ceros” (la probabilidad de esta partición) como

$$p = P[a_1 = 1 \wedge a_2 = 0 \wedge a_3 = 1 \wedge a_4 = 0] = \frac{1}{2} \quad \text{y} \quad q = (1 - p) = \frac{1}{2}$$

Con lo cual la evaluación de la expresión sería

$$H(\text{"dos ceros"}) = -p(\text{"dos ceros"}) \log(p(\text{"dos ceros"})) \\ - q(\text{"dos ceros"}) \log(q(\text{"dos ceros"})) = \frac{1}{2}$$

Es decir, la entropía sería 0.5, nunca podríamos estar seguros de si un elemento de información alcanza el estado cero -en tal configuración, el sistema se encuentra en equilibrio estadístico, puesto que la entropía es máxima-.

Apéndice IV

• Una aplicación alternativa del algoritmo ID3.

Informe de aplicaciones en Inteligencia: Toma de decisiones a nivel operacional.

Tabla de datos: instancias de la base de conocimiento

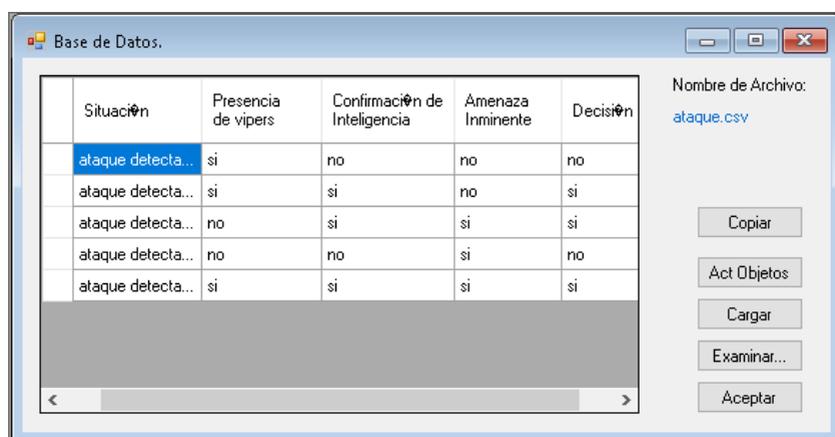
Id.	Situación	Presencia de vipers	Confirmación de Inteligencia	Amenaza Inminente	Decisión
1	ataque detectado	si	no	no	no
2	ataque detectado	si	si	no	si
3	ataque detectado	no	si	si	atacar
4	ataque detectado	no	no	si	no
5	ataque detectado	si	si	si	atacar

Ingeniería de Conocimiento: Se solicita a Bin que cree una base de conocimiento para aplicar algoritmo ID3.

Ejecución de Matía Gael Aguirre-Polenta.



Implementación: con C#, vista de resultados obtenidos



Inferencia Probabilística

Archivo Operación

Base de Datos

ID	Situación	Presencia de vipers	Confirmación
1	ataque detecta...	si	no
2	ataque detecta...	si	si
3	ataque detecta...	no	si
4	ataque detecta...	no	no
5	ataque detecta...	si	si

Nombre de Archivo: ataque.csv

Árbol ID3 -> ataque.csv

Gráfico Árbol Decisión ID3

Ventana Hija Abierta: Gráfico de Árbol ID3.

Base de Datos.

Situación	Presencia de vipers	Confirmación de Inteligencia	Amenaza Inminente	Decisión
ataque detecta...	si	no	no	no
ataque detecta...	si	si	no	si
ataque detecta...	no	si	si	si
ataque detecta...	no	no	si	no
ataque detecta...	si	si	si	si

Nombre de Archivo: ataque.csv

Copiar

Act Objetos

Cargar

Examinar...

Aceptar

Árbol ID3 -> ataque.csv

Gráfico Árbol Decisión ID3.

REFERENCIAS

- Alonso, M., & Finn, Edward J. (1986). *Física. Fundamentos Cuánticos y Estadísticos* (C. A. Heras y J. A. Barreto Araujo, Trans.). (Vol. 3). Addison-Wesley Iberoamericana S. A. (Original work published 1968).
- Audesirk, T., Audesirk, G., & Byers, B. E. (2008). *Biología: La vida en la tierra* (A. V. Flores Flores, Trans.). (8va ed.). Pearson Educación de México.
- Deitel, H. M., & Deitel, P. J. (2007). *Cómo programar en C#* (2da ed.). Pearson Education de México S.A.
- ACM & IEEE (2013). *Computer Science Curricula 2013: Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Science*. ACM. <https://doi.org/10.1145/2534860>
- Meitner, L. (2017). *Teorema H*. <https://www.fisica.uns.edu.ar>
- Quinlan, J. R. (1979). *Induction over Large Databases*. Stanford University.
- Quinlan, J. R. (1986). Induction of Decision Trees. *Machine Learning*, 1, 81–106. <https://doi.org/10.1007/BF00116251>.
- Real Academia Española. (s.f.). Inteligencia. En Diccionario de la lengua española. Recuperado el 15 de enero, 2024, de <https://dle.rae.es/inteligencia>.
- Russell, B. (1983). *El conocimiento humano* (N. Miguez, Trans.). Ediciones Orbis S.A. (Original work published 1948).
- Russell, S. J. & Norvig, P. (2004). *Inteligencia artificial. Un enfoque moderno* (J. M. I. Corchado Rodríguez, F. M. Rubio, J. M. Cadenas Figueredo, L. D. Hernández Molinero, E. P. Arís, R. Fuentetaja Pinzán, M. Robledo de los Santos & R. Rizo Aldeguer, Trans.). (2nd ed.). Pearson Educación de Madrid.
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., & Freedman, R. A. (2004). *Física Universitaria* (A. E. Brito, Trans.). (Vol. 1). (10th ed.). Pearson.
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell Labs Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.
- Peirce, C. S. (1994). *Collected papers of Charles Sanders Peirce* (Charles Hartshorne, Paul Weiss & Arthur W. Burks, Ed.). IntelLex Corporation. (Original work published 1931-1935 (Vol. I - VI); 1958 (Vol. VII and VIII)). <https://search.worldcat.org/title/collected-papers-of-charles-sanders-peirce/oclc/503075225>

* * *

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA HUELLA DE CARBONO EN MAMPUESTOS

Sebastián Panella¹; Nery Pizarro¹; Miguel Tornello¹; Nelson Agüera¹

¹CEREDETEC (Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica). Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza / naguera@frm.utn.edu.ar

Resumen: En los últimos siglos la temperatura terrestre ha experimentado cambios drásticos, atribuidos en gran medida a las actividades humanas que generan emisiones de gases de efecto invernadero. Es esencial comprender el origen de estas emisiones, mayormente asociadas a la actividad industrial, para impulsar la mejora tecnológica y reducir la contaminación. El objetivo de esta investigación es analizar y comparar el impacto ambiental generado por la producción de mampuestos tradicionales en contraste con los mampuestos sustentables. Dado que la industria de la construcción es una de las principales contribuyentes a la contaminación global, identificar los procesos que más la afectan permite implementar mejoras significativas. Para medir la magnitud de la contaminación se utiliza la Huella de Carbono, cuyo valor cuantifica todos los gases de efecto invernadero generados por las actividades humanas en el medio ambiente, específicamente en nuestro caso, las relacionadas con la fabricación de mampuestos. El resultado se expresa en toneladas de dióxido de carbono equivalente. Este estudio se realiza en función de los estándares establecidos por la norma ISO 14064, la cual contempla los diferentes alcances de los procesos y las maquinarias utilizadas en la producción de mampuestos sustentables. Finalmente se realiza una comparación de la Huella de Carbono en la fabricación de mampuestos tradicionales.

Palabras claves: Huella de Carbono, Mampuestos, Sustentable, Construcción

INTRODUCCIÓN

Ante la creciente urbanización en el mundo, se produce un incremento en la demanda de construcción de edificios residenciales y no residenciales, viviendas y otras infraestructuras ya existentes. Esto provoca un incremento en la producción de mampuestos y, por consiguiente, un aumento en la contaminación.

La fabricación de mampuestos consiste básicamente en la utilización de grandes cantidades de agua para la preparación de la arcilla. La extracción de arcilla también es un factor importante, produciendo un

efecto negativo en el entorno natural. Como consecuencia de dicha actividad se produce una degradación del suelo, alteración del ecosistema local y agotamiento de recursos naturales disponibles.

Otro efecto a considerar es el proceso de fabricación, que produce contaminación del aire debido a partículas en suspensión, compuestos tóxicos, entre otros, pudiendo comprometer la salud de las personas aledañas a las zonas de producción, provocando problemas respiratorios y otras enfermedades asociadas.

Todo lo mencionado anteriormente nos pone en la necesidad de innovar en la construcción, siendo una solución la producción de mampuestos sustentables, que utilizan como materia prima en su fabricación materiales reciclados. Actualmente, en el Departamento de Junín, Provincia de Mendoza, existe una planta de producción de mampuestos sustentables, mediante el uso del reciclado del PET (Polietileno Tereftalato) no reutilizables.

El PET es un material que se utiliza para envases de bebidas, alimentos, y una variedad de otros productos de consumo, en consecuencia, la reutilización del PET en un segundo uso establece un impacto positivo en el medio ambiente. El PET es un material que tarda hasta 1000 años en degradarse. Esto lo convierte en un material altamente contaminante estando a la intemperie (Cubilla et al, 2020)

Utilizando el PET como componente en la producción de mampuestos ecológicos, se puede lograr disminuir la demanda de mampuestos tradicionales. La investigación propuso un análisis de la huella de carbono que produce los mampuestos tradicionales y un estudio comparativo con la huella de carbono que produce los mampuestos sustentables.

PROCESO Y METODOLOGÍA

El análisis de la huella de carbono se realizó para mampuestos tradicionales de arcilla cocida y para mampuestos sustentables con PET. Se estableció para el estudio una cantidad de producción de 36.000 mampuestos anuales.

Proceso y materia prima para la elaboración del mampuesto tradicional

La materia prima en la producción de mampuestos tradicionales se compone de arcilla, agua y aditivos. La arcilla se extrae de yacimientos

naturales y se compone de minerales como sílice, alúmina, pequeñas cantidades de óxidos de hierro y calcio. Los aditivos utilizados son arenas o cenizas para mejorar la resistencia y reducir el costo.

En el proceso de fabricación se utiliza suelo extraído de excavaciones, generalmente arcillas rojas, o suelo vegetal negro, que se encuentra frecuentemente en la superficie. Posteriormente, es necesario dejarla reposar para lograr una homogeneización adecuada. A continuación, se agrega la cantidad de agua necesaria para facilitar el moldeado. El proceso de moldeado se realiza manualmente, introduciendo la arcilla en un molde doble que permite formar dos mampuestos. El tiempo de secado varía entre 3 y 4 días, dependiendo de las condiciones climáticas. Finalmente, se procede al horneado del material.

Proceso y materia prima para la elaboración del mampuesto sustentable

La materia prima en la producción de mampuestos sustentables se compone de PET (Polietileno Tereftalato), cemento portland compuesto con adición de puzolanas, arena o agregado fino, agua y aditivo ligante. En el proceso de fabricación se utiliza un protocolo compuesto de una serie de pasos para asegurar los estándares de calidad del producto (Mendez et al, 2022). Incluyendo la trituración de partículas de PET, siendo el tercer plástico más utilizado en el mundo por la Industria embotelladora de bebidas, debido a su durabilidad, resistencia química, bajo peso y adecuada capacidad de disipación de energía ante la aplicación de fuerzas externas (Botero Jaramillo et al, 2014).

Las partículas de PET se mezclan con cemento Portland y áridos, que proporcionan estructura y volumen a la mezcla, como se observa en la Figura 1. Se combinan en una hormigonera junto con agua y aditivos químicos. El uso de estos es crucial, ya que permite optimizar el comportamiento de la mezcla como su adhesión entre partículas como se observa en la Figura 2.

Figura 1
Preparación y pesado de los materiales para la mezcla



Figura 2
Mezcla de las partículas de PET con el Cemento Portland y los áridos



Una vez que la mezcla alcanza una consistencia uniforme, se vierte en moldes metálicos diseñados para confeccionar mampuestos, con dimensiones y formas estandarizadas como se observa en la Figura 3.

Figura 3
Colocación y distribución de la mezcla en los moldes



Durante esta etapa, es vital que la mezcla se distribuya de manera uniforme dentro de los moldes, para evitar la formación de burbujas de aire o vacíos como se observa en la Figura 4.

Figura 4

Colocación en capas de la mezcla en el molde



Posteriormente, se aplica una presión de 400 kg/cm^2 sobre la mezcla, comprimiendo para eliminar vacíos y compactar los materiales, lo que aumenta significativamente la densidad y resistencia del producto final. Esto se puede realizar en una máquina universal, donde la mezcla se va colocando en capas, que se acomodan y apisonan mediante espátula. Finalizado el llenado del molde, se coloca la tapa y se realizan unos golpes con martillo de goma para terminar de acomodar el material, para luego proceder a la compresión de la mezcla con la máquina universal, como se observa en la Figura 5.

Figura 5

Colocación de la tapa y compresión con la máquina universal



Después de este proceso, los mampuestos se dejan reposar durante un período inicial de 24 horas, tiempo necesario para permitir que alcancen la rigidez suficiente antes de ser sometidos a la etapa de curado. Este proceso es fundamental para asegurar la calidad y durabilidad del producto. El curado se realiza mediante la inmersión completa de los mampuestos en agua, donde permanecen durante 7 días continuos como se observa en la Figura 6. La exposición al agua en esta fase es muy importante, ya que permite que el cemento continúe su proceso de hidratación, lo que aumenta significativamente la resistencia del material.

Una vez que ha transcurrido esta etapa de curado, los mampuestos son cuidadosamente retirados del agua y trasladados a una zona de almacenamiento especial. En este lugar, se apilan en estructuras cubiertas para protegerlos de las condiciones climáticas adversas, como el exceso de sol o la lluvia, factores que podrían comprometer su proceso de endurecimiento.

Figura 6

Curado de los mampuestos mediante inmersión en agua



Los mampuestos permanecen en esta etapa de reposo hasta que se completan los 28 días desde su fabricación, como se observa en la Figura 7. Este período es considerado óptimo para que el material alcance su máxima resistencia (Instituto Nacional De Prevención Sísmica (INPRES), 2018).

Figura 7

Reposo/Almacenamiento de los mampuestos durante 28 días



Finalizado este tiempo, los mampuestos son llevados al laboratorio para someterlos a una serie de ensayos como se observa en la Figura 8. Estas pruebas permiten verificar su resistencia, durabilidad y capacidad

de cumplir con los estándares de calidad requeridos por las normativas vigentes en el sector de la construcción. Los resultados obtenidos en estas pruebas son esenciales para garantizar que los mampuestos no solo cumplan con los requisitos técnicos, sino que también sean productos sostenibles desde el punto de vista medioambiental, contribuyendo así a la reducción del impacto ecológico de las edificaciones.

Figura 8

Mampuestos que serán sometidos a ensayos



ANÁLISIS DE HUELLA DE CARBONO

Se realizaron dos alcances para la evaluación de la huella de carbono, que incluyen las emisiones directas e indirectas de los gases de efecto invernadero.

- **ALCANCE 1 (A1):** Incluye todas las emisiones directas de los gases de efecto invernadero (GEI) que provienen de fuentes de la elaboración de los mampuestos. Están relacionadas a la combustión de fósiles en instalaciones de la organización, tanto de vehículos, equipos de producción, calderas, entre otros.
- **ALCANCE 2 (A2):** Son las emisiones indirectas de los gases de efecto invernadero (GEI), como la generación de electricidad, calor o vapor que son adquiridos por la organización, pero

producidos por terceros. Suelen estar vinculadas al consumo de energía pero que se generen fuera de las instalaciones de producción.

En el primer alcance (A1) para el cálculo de la Huella de Carbono, se tuvo en cuenta el tipo de combustible utilizado para cada maquinaria. En este caso se utilizó solo una máquina que utiliza Diésel y Aceite, denominada máquina compactadora.

Luego identificamos que gas emite el uso de cada combustible, y lo multiplicamos por el factor de emisión y luego el potencial de calentamiento global, los cuales están definidos por tabla y dependen el año en el que se esté estudiando. Finalmente, se transforman los gases emitidos a toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) (Organización Internacional de Normalización (ISO),2018)

En el segundo alcance (A2), se evalúa el uso de la máquina hormigonera, trituradora de PET y la iluminación, las cuales emiten CO₂, posteriormente estos resultados se suman y se obtiene valores de toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e).

Tabla 1

Matriz huella de carbono - Mampuesto tradicional

Fuente	Cant. (Uni)	Total Fuente	TOTAL tCO ₂ e./año
Máquina laminadora	1.994L Diésel	5,24	72,74
	24,75L Aceite	0,06	
Máquina moldeadora	1.994L Diésel	5,23	
	24,75L Aceite	0,06	
Horno	Biomasa (leña)	50,77	
Baterías	1 Uni.	10,35	
Iluminación	mWH	1,03	

Nota. Matriz huella de carbono tomado de Villota-Carranza, 2023.

Tabla 2*Matriz huella de carbono – Mampuesto sustentable*

Fuente	Cant. (Uni)	Total Fuente	TOTAL tCO ₂ e./año
Máquina compactadora	1.500L Diésel	3,93	4,34
	24,75L Aceite	0,06	
Máquina hormigonera	0,41 mWh Eléctrica	0,35	
Iluminación	0,08 mWh Eléctrica		
Trituradora PET	0,41 mWh Eléctrica		

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La huella de carbono obtenida para mampuestos de arcilla cocida asciende a 72,7 tCO₂e/año. Sin embargo, los resultados de la huella de carbono obtenido para mampuestos sustentables con PET ascienden a 4,3 tCO₂e/año. Comparativamente, la huella de carbono de mampuestos tradicionales de arcilla cocida es 16 veces superior a los mampuestos sustentables con PET. Estos valores reflejan una fuerte reducción de los gases de efecto invernadero en la producción de mampuestos sustentables con PET. Además de la reducción de la huella de carbono, los mampuestos sustentables con PET también ofrecen beneficios para mitigar la degradación del suelo asociada a la producción de mampuestos tradicionales de arcilla cocida.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a Centro de Investigación CeReDeTeC de la Universidad Tecnológica Nacional, al Laboratorio de Ensayos de Materiales del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, a los alumnos Hugo Briccola, Ariel Palacios, David Mora, Bianca Fontemachi, Ariel Quintero, Aldana Olmos pertenecientes a la carrera de Ingeniería Civil de la UTN-FRM.

REFERENCIAS

- Botero Jaramillo, E., Muñoz, L., Ossa, A., & Romo, M. P. (2014). *Comportamiento mecánico del Polietileno Tereftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (70), 201-219. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.15520>
- Cubilla, K., González, Y., Montezuma, G., Samudio, M., & Gómez, E. (2020). *Fibra de coco y cáscara de plátano como alternativa para la elaboración de material biodegradable*. Revista De Iniciación Científica, 5(2), 15-20. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.2.2496>
- Instituto Nacional De Prevención Sísmica (2018). *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Construcciones de Mampostería (INPRES-CIRSOC 103-III)*. http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/INPRES-CIRSOC-103_Parte_III-Reglamento.pdf
- Mendez, F., Núñez, M., Galleli, A., Tornello, M., Martin, P., & Maldonado, N. (2022, 31/10 al 04/11). *Identificación de mampuestos sustentables, ecológicos & portantes para la construcción de muros resistentes a la acción sísmica*. [Conference presentation]. X Congreso Internacional y 34ava Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires, Argentina. <https://www.aath.org.ar/wp-content/uploads/Programa-gral-y-sesiones2.pdf.pdf>
- Organización Internacional de Normalización (2018). *Gases de efecto invernadero — Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero Título de la norma (Norma núm. ISO 14064-1:2018(es))*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14064:-1:ed-2:v1:es>
- Villota-Carranza, D. A. (2023). *Cálculo de huella de carbono para la fabricación de ladrillos artesanales en la parroquia Sinincay, Cuenca - Ecuador*. [Tesis de Maestría, Universidad Internacional de La Rioja]. <https://reunir.unir.net/handle/123456789/14744>

* * *

MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA ASIGNACIÓN Y COMBINACIÓN DE TAMAÑOS DE LOTE.

Pablo Gabriel Morales Sanchez¹; Franco Adrián Garino¹; Margarita Miguelina Mieras¹, Fabricio Orlando Sánchez Varretti¹

¹Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Rafael. Grupo SiCo. Gral. Urquiza 314, 5600, San Rafael, Mendoza, Argentina. / pabloamorales9@gmail.com.

Resumen: En el actual contexto empresarial, la eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad son objetivos fundamentales para las empresas. La optimización de las actividades logísticas, especialmente la gestión de inventarios se ha convertido en una estrategia esencial para reducir costos mediante la administración eficiente de materias primas y su distribución. Un aspecto crucial es el análisis de los tamaños de lote en los pedidos, dado que impacta directamente en la capacidad de satisfacer las necesidades de producción. La investigación de esta dinámica resulta relevante para abordar los desafíos actuales y alcanzar una mayor eficacia operativa. La gestión adecuada de inventarios presenta un desafío constante para ingenieros y analistas, ya que el equilibrio entre excesos y faltantes tiene un efecto significativo en las operaciones y en la satisfacción del cliente. En este trabajo, se presenta un modelo teórico que permite reducir la complejidad de los datos relacionados con el dimensionamiento de lotes. Además, el modelo ofrece la posibilidad de explorar combinaciones alternativas de tamaños de lote que, aunque no sean las óptimas en términos de costos, cumplen con diversas restricciones operativas, tales como situaciones imprevistas o demoras de proveedores. Esta flexibilidad en la toma de decisiones puede mejorar de manera significativa la capacidad operativa de la empresa.

Palabras claves: Inventarios – Optimización – Logística – Lotes – Eficiencia.

INTRODUCCIÓN

La optimización es el proceso de desarrollar una actividad de la manera más eficiente posible, es decir, utilizando la menor cantidad de recursos y en el menor tiempo. Al optimizar los procesos, se pueden identificar fácilmente los desperdicios. Esto permite detectar cuellos de botella que comprometen la productividad, fallos y el uso ineficiente de los recursos, lo que facilita la resolución de estos problemas y de posibles fallas emergentes.

La gestión y optimización de procesos son pilares fundamentales para la transformación de las empresas, especialmente en los últimos años, donde se ha priorizado una dinámica ágil en la gestión de la cadena de suministro global. A partir de esta premisa, el proyecto adquiere relevancia, ya que tiene el potencial de generar beneficios tangibles al mejorar la eficiencia, reducir costos y contribuir a la sostenibilidad de las operaciones empresariales mediante el análisis de un tema complejo: el abastecimiento de materiales. Este problema es común en cualquier empresa del sector industrial, comercial o de servicios, que de alguna forma gestionan la adquisición de materias primas, componentes, repuestos o insumos (Ballou, 2004; Heizer y Render, 2004; Holmström y Romme, 2012).

Considerando desarrollos anteriores propios donde se analizan todas las estrategias de abastecimiento posibles (Tobares et al., 2017; Tobares et al., 2021) y la información recopilada sobre la temática, optamos por formular un enfoque innovador y práctico para abordar la complejidad de la gestión de aprovisionamiento de materiales a través de modelos probabilísticos, identificando patrones de comportamiento entre grupos y tamaños de pedido.

Nuestra meta es identificar de manera eficiente el tamaño ideal de los pedidos, lo que conlleva una reducción en el uso de recursos tecnológicos y el esfuerzo humano, contribuyendo así al éxito de las organizaciones regionales en la toma de decisiones.

DESARROLLO

La programación del código en Python fue un componente clave de este proyecto. Se implementó un script diseñado para la manipulación y análisis de datos tabulares, que incluyó funciones específicas para la filtración y reducción de posibles combinaciones de variables, optimizando así el manejo de grandes volúmenes de datos.

Asimismo, se procedió a la construcción y optimización de tablas de pedidos con el fin de minimizar costos. Estas tablas fueron diseñadas para identificar y seleccionar las opciones que ofrecen un balance óptimo entre costo de pedido y almacenamiento. El modelo desarrollado permite evaluar múltiples escenarios, lo que facilita la determinación de la combinación más costo-efectiva.

MATERIALES Y MÉTODOS

El problema de definir el tamaño óptimo del lote de pedido es recurrente y notablemente complejo en la planificación de la producción. Esta complejidad surge de la necesidad de considerar múltiples factores, como los tiempos de entrega, la capacidad de almacenamiento, las distancias, y los descuentos aplicables, entre otros.

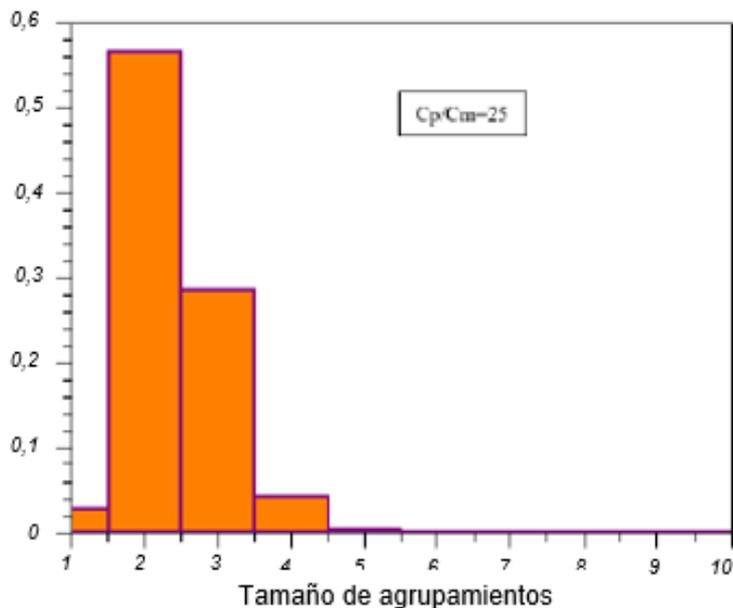
Dentro de las múltiples maneras de realizar pedidos en un sistema de tamaño dado (con la restricción de que la suma total de los tamaños de los pedidos sea igual al tamaño del sistema), existe una combinación específica que minimiza el costo total.

Por ejemplo, en un sistema con un horizonte de planificación de 5 periodos ($N=5$), existen $2^{(N-1)} = 2^{(5-1)} = 16$ posibles formas de realizar los pedidos (Hopp y Spearman, 2011). Habitualmente, se analizan estas 16 combinaciones para determinar cuál es la que genera el menor costo.

Sin embargo, este procedimiento se vuelve engorroso cuando $N = 12$, y extremadamente complejo para $N=30$, donde las combinaciones posibles superan los 500 millones. Investigaciones previas (Tobares et al., 2021) han demostrado que, bajo una relación de costos de 25 entre el costo de pedido y el costo de mantenimiento, las combinaciones que resultan en un costo total mínimo tienden a agrupar los pedidos en clústeres de 2 a 3 periodos. Es decir, las combinaciones óptimas se alcanzan cuando los pedidos se concentran principalmente en intervalos de 2 o 3 periodos (Figura 1).

Figura 1

Histograma de frecuencias de tamaños de agrupamiento para una relación de costos igual a 25



Al considerar las combinaciones con dichos grupos en un tamaño de sistema $N = 5$, el tiempo de procesamiento de la tabla se reduce a $\frac{1}{8}$, dado que solo hay dos combinaciones que tienen 2 (n_2) y 3 periodos agrupados (n_3) de los dieciséis totales (Tabla 1).

Tabla 1

Combinaciones de pedido para un sistema de tamaño =5 donde se resaltan las dos opciones analizadas

	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	0
3	1	1	2	0	1
4	1	1	3	0	0
5	1	2	0	1	1
6	1	2	0	2	0
7	1	3	0	0	1
8	1	4	0	0	0
9	2	0	1	1	1
10	2	0	1	2	0
11	2	0	2	0	1
12	2	0	3	0	0
13	3	0	0	1	1
14	3	0	0	2	0
15	4	0	0	0	1
16	5	0	0	0	0

En la Ecuación 1 se muestra las dos combinaciones posibles de realizar y en las que se alcanza el costo óptimo a través de aplicar una combinatoria de 2 elementos ubicados en dos formas distintas. Esta ecuación es aplicable en situaciones donde el valor de N no es demasiado elevado, lo que permite determinar con relativa facilidad el número exacto de formas en las que se puede lograr la agrupación esperada. Sin embargo, para sistemas más grandes y complejos, fue necesario desarrollar una nueva metodología que permita relacionar los clústeres como una condición fundamental, continuando así con la identificación de los diversos grupos de pedidos. Así mismo también lo podemos hacer por medio de Python:

$$\frac{n!}{n2!n3!} = \frac{2!}{1!1!} = 2 \quad (1)$$

Figura 2

Nueva metodología que permita relacionar los clústeres como una condición fundamental

```
#Para cluster 1 y 2
import math

def calcular_resultado (N, c1, c2, a, b):
    Resultado = 0

    #Iterar sobre i y j según las condiciones dadas
    for i in range(N // c1 + 1):
        for j in range (N // c2 + 1):
            #Verificar la condición c1*i + c2*j = N
            if c1*i + c2*j = N:
                #Calcular el término de la fórmula
                termino = math.factorial(N - a*i - b*j) / (math.factorial(i)*math.factorial(j))
                print(termino, " ", i, " ", j)

    return resultado

#Valores de ejemplo
N = 5
c1 = 2
c2 = 3
a = 1
b = 2

#Calcular el resultado utilizando los valores de ejemplo
resultado = calcular_resultado(N, c1, c2, a, b)
print("El resultado es:", resultado)

El resultado es: 2.0
```

A partir de investigaciones anteriores, en las cuales se examinó la relación entre los tamaños de los agrupamientos, los costos, la heterogeneidad en los requerimientos de materiales y el tamaño del sistema, se derivó la siguiente función (Ecuación 2):

$$\sum_{i=0}^{N/c1} \sum_{j=0}^{N/c2} \frac{(N - ai - bj)!}{i! j!} \quad (2)$$

En esta función, los índices i y j determinan la cantidad de veces que se aplicarán las condiciones de los clústeres, mientras que $cl1$ y $cl2$ representan los valores específicos de los clústeres a ser analizados. Los parámetros a y b indican la cantidad de ceros que se asignan a estos valores, considerando el tiempo que los pedidos permanecen en inventario.

Es crucial establecer ciertas condiciones para realizar este cálculo de manera precisa. Los índices de las sumatorias deben comenzar en $i = 0$ y $j = 0$, y terminar en la relación entre el tamaño del sistema y el valor de cada clúster $\binom{N}{cl}$. Además, es necesario que se cumpla la condición de que la suma ponderada de los clústeres sea igual al tamaño del sistema: $(cl1 * i + cl2 * j) = N$.

Quedando así (Ecuaciones 3 y 4):

$$A = \binom{(i,j)}{(cl1\ i)} + cl2j = N; i, j = Z \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \frac{(N - ai - bj)!}{i! j!} (i, j) \quad (4)$$

Trabajando con un tamaño de sistema $N = 10$ (no es posible continuar con el ejemplo anterior debido a que $1i + 2j + 3k \neq 5$) y los clústeres que contengan 1, 2 y 3 nuestra función quedará como (Ecuación 5):

$$\sum_{i=0}^{10/1} \sum_{j=0}^{10/2} \sum_{k=0}^{10/3} \frac{(10 - 0i - 1j - 2k)!}{i! j! k!} = 274 \quad (5)$$

De esta manera, logramos reducir el tiempo de procesamiento aproximadamente al **53%** de lo que era inicialmente, ya que solo se deben analizar 274 de las 512 filas. Este último ejemplo se puede resolver empleando el comando de Python (Figura 3):

Figura 3

Reducción del tiempo de procesamiento

```
import math

L1_SISTEMA = 10

a=0
b=1
c=2
suma=0

for i in range (0, L1_SISTEMA+1, 1):
    for j in range (0, L1_SISTEMA+1, 1):
        for k in range (0,L1_SISTEMA+1, 1):
            if ((i*1 + j*2 + k*3)==L1_SISTEMA):
                prob=math.factorial(L1_SISTEMA-i*a-j*b-k*c) / (math.factorial(i)*math.factorial(j)*math.factorial(k))
                print("i: "+str(i)+" j: "+str(j)+" k: "+str(k)+" Total combinaciones: "+str(int(prob)))
                suma=suma+prob

print()
print("Número de combinaciones útiles: "+ str(suma))
```

Comando que devuelve el número de combinaciones útiles para $N=10$. Cabe destacar que este código deberá ser modificado en los casos donde se incorporen más restricciones en los clústeres, al ser necesario incorporar una sumatoria.

CONCLUSIONES

En síntesis, el estudio ha generado soluciones significativas, destacando la reducción del tiempo de procesamiento al examinar las tablas de posibles pedidos. Estas soluciones no solo prometen mejorar la eficiencia en la gestión de pedidos e inventarios, sino también optimizar la asignación de recursos, contribuyendo a un proceso más eficiente y rentable en el ámbito de la gestión y logística. El enfoque teórico presentado abre nuevas perspectivas para la toma de decisiones en la determinación del tamaño de los lotes de pedido, ofreciendo un camino hacia la mejora continua en el manejo de la cadena de suministro.

Este enfoque se basa en la doble condición empírico-matemática del modelo, permitiendo la aplicación de cálculos para diversos tamaños de sistemas y agrupamientos variables, lo que amplía su aplicabilidad y versatilidad. Así, un problema complejo se puede abordar a partir de un caso simple de combinatoria. Además, es relevante destacar que las afirmaciones sobre modelos implican tres niveles de verdad: sintáctico, semántico y pragmático, los

cuales facilitan la representación de la realidad y el aprendizaje a partir de los modelos.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todas las personas que hicieron posible esta producción, su apoyo y contribuciones fueron esenciales para llevar a cabo este proyecto con éxito. Destacamos el especial acompañamiento de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Rafael, quien nos ha brindado el apoyo financiero para continuar explorando el basto mundo de la optimización de procesos bajo los proyectos PID UTN 8104 TC y 8105 TC. F.O.S.V es investigador del CONICET Argentina.

REFERENCIAS

- Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. (C. Mendoza Barraza & M. J. Herrero Díaz, Trans.). (5ta ed.). Pearson Education.
- Heizer, J. H., y Render, B. (2004). *Principles of operations management*. (5ta ed.). Prentice Hall College Div.
- Holmström, J., & Romme, A. G. L. (2012). Guest editorial: Five steps towards exploring the future of operations management. *Operations Management Research*, 5(1), 37–42. DOI: 10.1007/s12063-011-0060-8
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory Physics*. (Third Ed.). Waveland Press Inc.
- Tobares, T. D., Mieras, M. M., Palma, R. R., & Sánchez-Varretti, F. O. (2021). Theoretical relationship between the cluster size of orders in the materials requirement planning. *International Journal of Logistics Systems and Management.*, 46(1), 27–46. DOI: 10.1504/IJLSM.2021.10040859
- Tobares, T. D., Nambuena, C. F., & Sánchez Varretti, F. O. (2017, septiembre 4-8). *Análisis de agrupamientos de pedidos mediante enumeración exhaustiva en la MRP* [Conference presentation]. VI simposio argentino de informática industrial (SII)-JAIIO 46 y 43 CLEI, Córdoba, Argentina. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/66163/discover?field=author&filtertype=author&filter_relational_operator>equals&filter=Tobares%2C+Tania+Daiana

* * *

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA SOBRRRESISTENCIA EN BARRAS DE ACERO

Teresita Salinas¹; Rocío Mercado¹; Jesús Ceppi¹; Gabriel Agostini¹; Candela Espinoza¹; Joana Avalos¹; Carolina Domizio^{2,3}; Marcelo Guzmán^{2,3}; Gerardo González del Solar^{2,3}

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, FRM - UTN; ² Departamento de Ingeniería Civil, FRM – UTN; ³ CeReDeTeC, FRM - UTN jensalinas0@gmail.com

Resumen: El presente estudio se enfoca en evaluar experimentalmente la capacidad de sobrerresistencia flexional de barras de acero ADN 420-S de diferentes diámetros y marcas comerciales, de acuerdo a la normativa vigente en Argentina. La sobrerresistencia es clave en la ingeniería estructural, ya que garantiza el correcto desempeño de las estructuras ante cargas sísmicas. Este parámetro surge de la diferencia entre la tensión de fluencia nominal y la real, así como del endurecimiento por deformación del acero. El estudio toma muestras de barras de acero de diámetros 8, 12 y 16 mm, correspondientes a tres marcas comerciales disponibles en Mendoza. Las muestras fueron sometidas a ensayos de tracción uniaxial, donde se midió su comportamiento mecánico, permitiendo establecer las curvas tensión-deformación para cada probeta. A partir de estas curvas, se determinaron los valores de sobrerresistencia, los cuales fueron comparados con los límites establecidos por la normativa INPRES-CIRSOC 103 Parte II de 2021, aplicable a zonas sísmicas. Los resultados obtenidos permiten señalar que la mayoría de las muestras evaluadas cumplen con las exigencias reglamentarias, en particular con la relación entre la tensión de fluencia real y la nominal, la cual no debe exceder de 1,30. Además, las barras cumplieron con la nueva disposición reglamentaria para zonas sísmicas 3 y 4, que establece que la relación entre la tensión última real y la tensión de fluencia real debe estar entre 1,15 y 1,39. Sin embargo, el tamaño de la muestra ensayada no permite obtener conclusiones definitivas, por lo que se recomienda ampliar el estudio, incluyendo más diámetros y evaluando aceros ADN 420 no soldables.

Palabras claves: sobrerresistencia, acero, tracción, soldable.

INTRODUCCIÓN

Los aceros se obtienen a partir de una aleación entre hierro y carbono cuya participación relativa permite su clasificación en aceros con aplicación y aceros de fundición. Los aceros con aplicación son aquellos diseñados para desempeñar funciones específicas en diversos sectores industriales, gracias a sus propiedades mecánicas, resistencia y adaptabilidad a distintos procesos de manufactura. Los aceros de fundición son aleaciones de hierro y carbono que se producen mediante un proceso de colado en moldes siendo utilizados en componentes estructurales y de maquinaria. En particular, son de interés aquellos aceros aplicados en la industria de la construcción.

Las barras de acero nervuradas se tratan de aleaciones que poseen entre 0,30% a 0,50% de contenido de carbono y reciben el nombre de aceros de dureza media. Dentro de estos, se hallan los aceros de dureza natural (ADN) denominados ADN 420 y ADN 420-S, en donde el número indicado hace referencia a la tensión de fluencia que es capaz de desarrollar el material, indicada en MPa. A su vez, la letra S permite identificar si el acero es soldable. Esta característica resulta de interés ya que, ante una misma deformación en la zona de endurecimiento, el ADN 420-S alcanza menores tensiones de rotura.

La sobrerresistencia en el acero es un concepto esencial en la ingeniería civil y construcción, ya que permite garantizar un correcto desempeño sísmico de las estructuras. La misma proviene de la variabilidad entre la tensión de fluencia nominal, f_y^{nom} , y la tensión de fluencia real, f_y^{real} , y del endurecimiento por deformación del acero (Paulay y Priestley, 1992). En tal sentido, el reglamento sismorresistente vigente a nivel nacional, INPRES-CIRSOC 103 parte II (2021), establece dos condiciones. En primer lugar, un escalón de fluencia seguido por un endurecimiento gradual, y, en segundo lugar, una baja variabilidad entre la tensión real y la tensión de fluencia nominal. Estas propiedades permiten garantizar que la resistencia al corte de los componentes y la resistencia a flexión de las secciones donde no se desea el desarrollo de rótulas plásticas, son mayores a la necesaria para el desarrollo de la sobrerresistencia flexional de dichas rótulas plásticas (Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), 2021).

El acero debe presentar un adecuado balance entre la longitud del escalón de fluencia, $\epsilon_y - \epsilon_s$, y la tasa de endurecimiento real, obtenida como la relación entre la resistencia última real, f_u^{real} , y la tensión de

fluencia real f_y^{real} (Figura 1). Un escalón de fluencia amplio y una baja tasa de endurecimiento, permiten reducir la sobrerresistencia flexional en las rótulas plásticas, pero acortan la longitud de desarrollo de dichas rótulas. Si, por el contrario, el escalón de fluencia es muy prolongado, la falta de rigidez del acero induce a una mayor posibilidad de pandeo de las barras longitudinales sometidas a compresión.

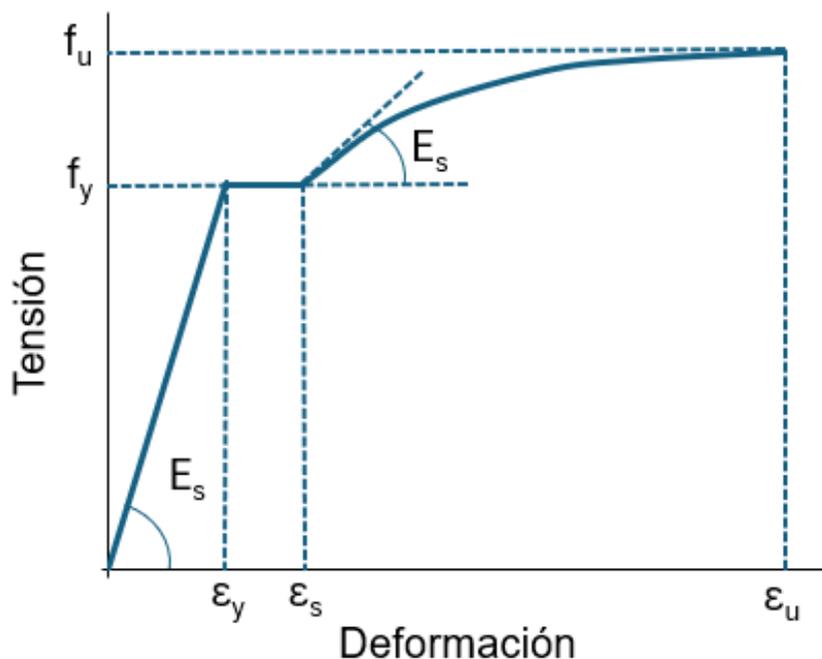
Para garantizar un desempeño adecuado, el artículo 1.2.2 del Reglamento INPRES-CIRSOC 103 parte II del año 2005, establece dos condiciones a cumplir por la armadura longitudinal. Por un lado, indica que la relación entre la tensión de fluencia real y la tensión de fluencia nominal, $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nom}}$, no podrá ser mayor que 1,30. Adicionalmente, especifica que la relación entre la tensión de rotura real y la tensión de fluencia real, $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$ no deberá ser menor que 1,25 (INPRES), 2005). Sin embargo, este valor fue modificado en la edición del año 2021 del mencionado reglamento. La nueva edición establece que, para un acero con endurecimiento post-fluencia normal a emplearse en zonas sísmicas 3 y 4, la relación $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$ debe estar comprendido entre 1,15 y 1,39 (INPRES), 2021).

Vega et al. (2018) realizaron un extenso estudio sobre muestras de acero ADN 420-S de 8, 10, 12, 16, 20 y 25 mm de diámetro, y de diferentes marcas comerciales disponibles en la Provincia de Mendoza. El estudio dio a conocer que las muestras evaluadas dieron resultados diversos. Al considerar los límites establecidos en la edición del año 2005 del mencionado reglamento (vigente al momento del estudio), se observa que 4 de los 7 diámetros en estudio cumplieron con la condición para la relación $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nominal}}$, en tanto que solamente 1 diámetro cumplió con la condición establecida para $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$.

Debido al cambio reglamentario mencionado, el objetivo del presente estudio es evaluar experimentalmente la capacidad de desarrollar sobrerresistencia flexional en barras de acero ADN 420-S de diferentes diámetros y comercialmente disponibles en la provincia de Mendoza, de acuerdo a la reglamentación vigente.

Figura 1

Representación esquemática de la curva tensión-deformación del acero.



METODOLOGÍA

Preparación de los especímenes

A fin de evaluar la sobrerresistencia se seleccionaron muestras de barras de acero de diferentes diámetros correspondientes a tres marcas comerciales, identificadas genéricamente como marca 1, 2 y 3. Las muestras seleccionadas corresponden a los diámetros 8, 12 y 16 mm, las cuales fueron ensayadas a tracción uniaxial según Norma IRAM IAS U 500-102 (1987), empleando para ello una Máquina Universal de Ensayos. La Tabla 1 presenta la designación de las muestras de acuerdo con su marca y diámetro.

Tabla 1*Identificación de muestras*

	ADN 420-S		
Diámetro [mm]	8	12	16
Marca 1	M1-8-S	M1-12-S	M1-16-S
Marca 2	M2-8-S	M2-12-S	M2-16-S
Marca 3	M3-8-S	M3-12-S	M3-16-S

Se dispusieron de tres probetas por cada muestra seleccionada en estudio, obtenidas de una misma barra. Cada probeta fue medida y pesada para determinar el área equivalente de la barra. Para ello, se consideró un peso específico del acero de 7,85 gr/cm³. Las Tablas 2, 3 y 4 presentan los parámetros determinados para las muestras de 8, 12 y 16 mm, respectivamente.

Tabla 2*Cálculo de área equivalente para muestras de 8 mm de diámetro nominal.*

Diám. nom. mm	Muestra	Id. Prob.	Longitud mm	Peso g	Área equivalente mm ²
8	M1-8-S	1	298	115	49.2
		2	301	116	49.0
		3	297	114	49.0
8	M2-8-S	1	305	115	48.0
		2	296	113	48.6
		3	300	115	48.8
8	M3-8-S	-	-	-	-
		-	-	-	-
		-	-	-	-

Tabla 3*Cálculo de área equivalente para muestras de 12 mm de diámetro nominal.*

Diám. nom. mm	Muestra	Id. Prob.	Longitud mm	Peso g	Área equivalente mm ²
12	M1-12-S	1	303	278	116.9
		2	300	277	117.6
		3	290	268	117.7
12	M2-12-S	1	305	268	111.9
		2	300	264	112.1
		3	299	263	112.1
12	M3-12-S	1	298	264	112.9
		2	299	268	114.2
		3	295	261	112.7

Tabla 4

Cálculo de área equivalente para muestras de 16 mm de diámetro nominal.

Diám. nom.	Muestra	Id. Prob.	Longitud	Peso	Área equivalente
mm			mm	g	mm ²
16	M1-16-S	1	400	624	198.7
		2	398	613	196.2
		3	399	610	194.8
16	M2-16-S	1	312	482	196.8
		2	293	464	201.7
		3	300	479	203.4
16	M3-16-S	1	299	466	198.5
		2	296	460	198.0
		3	299	468	199.4

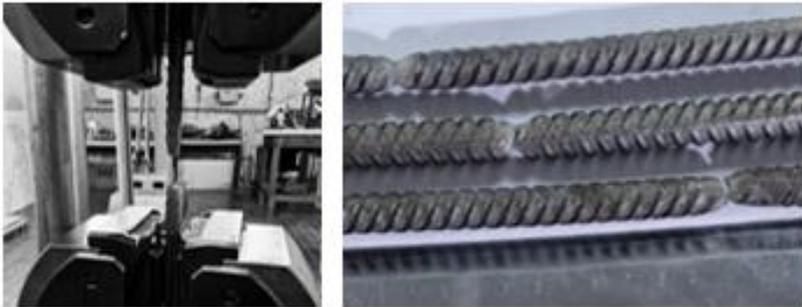
Descripción del ensayo

Se procedió al ensayo de dos probetas por muestra, dejando la tercera probeta como contramuestra. Una vez preparadas las probetas, se procedió a su montaje en la Máquina Universal de Ensayos asegurando su verticalidad. La velocidad y escala de carga fueron ajustadas de acuerdo con el diámetro de la barra a ensayar, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma IRAM IAS U 500-102 (1987). A medida que aumenta la fuerza de tracción, el equipo registra el alargamiento obteniendo la curva fuerza-desplazamiento. La fuerza de tracción es incrementada hasta alcanzar la carga de rotura de la probeta. La Figura 2 presenta la disposición de la probeta en la máquina universal, al momento de alcanzar la carga de rotura, y la rotura en tres probetas ensayadas.

A partir de considerar el área equivalente de la sección transversal y la longitud inicial de la probeta, es posible establecer la curva tensión-deformación, y en particular, determinar la tensión de fluencia real, f_y^{real} , y la resistencia última real, f_u^{real} .

Figura 2

Rotura de probeta.



RESULTADOS

Los ensayos realizados permitieron obtener las curvas tensión-deformación para cada probeta. Las Figuras 3, 4 y 5 presentan las curvas obtenidas durante los ensayos a tracción de las probetas correspondientes a las muestras de 8, 12 y 16 mm de diámetro nominal, respectivamente. Las curvas presentadas dieron lugar a la identificación de los puntos de interés correspondientes a la tensión de fluencia real y la tensión de rotura última. Con estos parámetros, se procedió a la determinación de los factores de sobrerresistencia. Las Tablas 5, 6 y 7 resumen los valores obtenidos para las muestras de 8, 12 y 16 mm de diámetro nominal, respectivamente.

Figura 3

Curva tensión-deformación de las muestras de 8 mm de diámetro nominal.

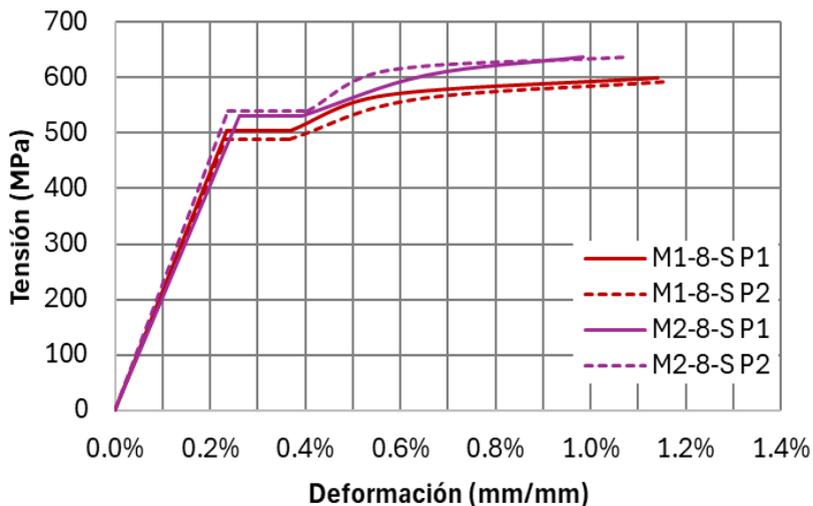


Figura 4

Curva tensión-deformación de las muestras de 12 mm de diámetro nominal.

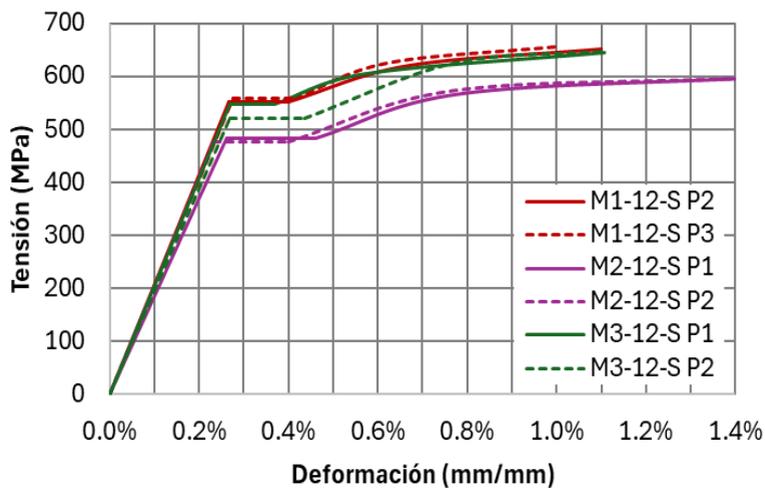


Figura 5

Curva tensión-deformación de las muestras de 16 mm de diámetro nominal.

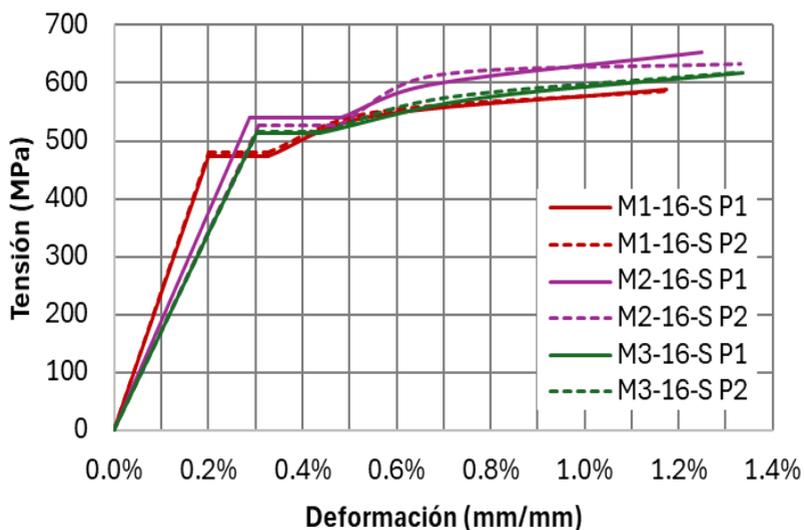


Tabla 5

Valores característicos y factores de sobrerresistencia para muestras de 8 mm de diámetro nominal.

Muestra	Id. Pr.	ϵ_y	ϵ_s	ϵ_u	E MPa	f_y^{nom}	f_y^{real}	f_u^{real}	f_y^{real}/f_y^{nom}		f_u^{real}/f_u^{nom}	
		%	%	%		MPa	MPa	MPa	Pr.	Md.	Pr.	Md.
M1-8-S	1	0.235	0.369	1.141	214902	420	505	600	1.20	1.18	1.19	1.20
	2	0.233	0.365	1.163	210162	420	489	593	1.16	1.18	1.21	1.20
M2-8-S	1	0.262	0.393	0.984	202453	420	531	637	1.26	1.28	1.20	1.19
	2	0.236	0.405	1.081	228602	420	541	637	1.29	1.28	1.18	1.19

Tabla 6

Valores característicos y factores de sobrerresistencia para muestras de 12 mm de diámetro nominal.

Muestra	Id. Pr.	ϵ_y	ϵ_s	ϵ_u	E	f_y^{nom}	f_y^{real}	f_u^{real}				
		%	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa	Pr.	Md.	Pr.	Md.
M1-12-S	2	0.267	0.400	1.100	207047	420	552	652	1.31	1.32	1.18	1.18
	3	0.276	0.414	1.000	202992	420	560	657	1.33		1.17	
M2-12-S	1	0.262	0.459	1.475	184439	420	484	599	1.15	1.14	1.24	1.25
	2	0.233	0.400	1.400	204023	420	476	598	1.13		1.26	
M3-12-S	1	0.268	0.369	1.107	203994	420	548	645	1.30	1.27	1.18	1.21
	2	0.268	0.435	1.104	195236	420	522	647	1.24		1.24	

Tabla 7

Valores característicos y factores de sobrerresistencia para muestras de 16 mm de diámetro nominal.

Muestra	Id. Pr.	ϵ_y	ϵ_s	ϵ_u	E	f_y^{nom}	f_y^{real}	f_u^{real}				
		%	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa	Pr.	Md.	Pr.	Md.
M1-16-S	1	0.200	0.325	1.175	236949	420	474	588	1.13	1.14	1.24	1.23
	2	0.201	0.327	1.181	238795	420	480	587	1.14		1.22	
M2-16-S	1	0.288	0.481	1.250	187494	420	541	654	1.29	1.27	1.21	1.20
	2	0.307	0.478	1.331	171768	420	528	632	1.26		1.20	
M3-16-S	1	0.301	0.435	1.338	170721	420	514	618	1.22	1.23	1.20	1.20
	2	0.304	0.439	1.318	169494	420	515	617	1.23		1.20	

DISCUSIÓN

Las muestras ensayadas permitieron establecer los valores de sobrerresistencia para las barras de 8, 12 y 16 mm de diámetro nominal, y para las tres marcas comerciales disponibles en la Provincia de Mendoza.

El reglamento vigente, establece que el acero de construcción debe cumplir que la relación entre la tensión de fluencia real y la tensión de fluencia nominal, $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nom}}$, no sea mayor que 1,30. Los resultados presentados precedentemente, dan cuenta que en general este aspecto se cumple satisfactoriamente. La Figura 6 presenta gráficamente los

resultados obtenidos para cada muestra, en relación al límite reglamentario.

Adicionalmente, la nueva edición del reglamento prescribe que la relación entre la tensión última real y la tensión de fluencia real, $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$, debe estar comprendida entre 1,15 y 1,39 para aceros a emplearse en zonas sísmicas 3 y 4. Las muestras ensayadas permiten verificar el cumplimiento de lo indicado. La Figura 7 presenta de manera gráfica, la distribución del factor de sobrerresistencia $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$, obtenido para cada muestra en estudio, dentro de los límites reglamentarios. Por otro lado, en relación a la edición 2005 del Reglamento INPRES CIRSOC 103 Parte II, puede establecerse que la modificación incorporada ha representado un avance en este sentido.

Figura 6

Distribución del factor de sobrerresistencia de $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nom}}$ de cada muestra dentro de los límites prescritos.

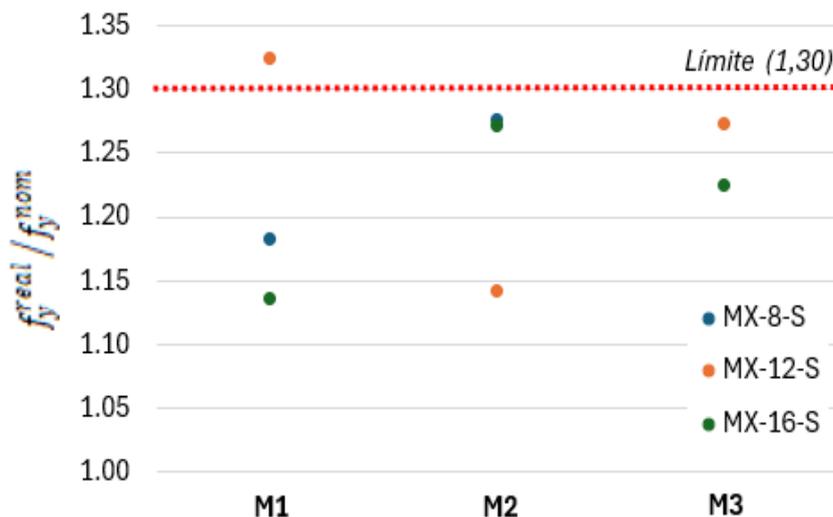
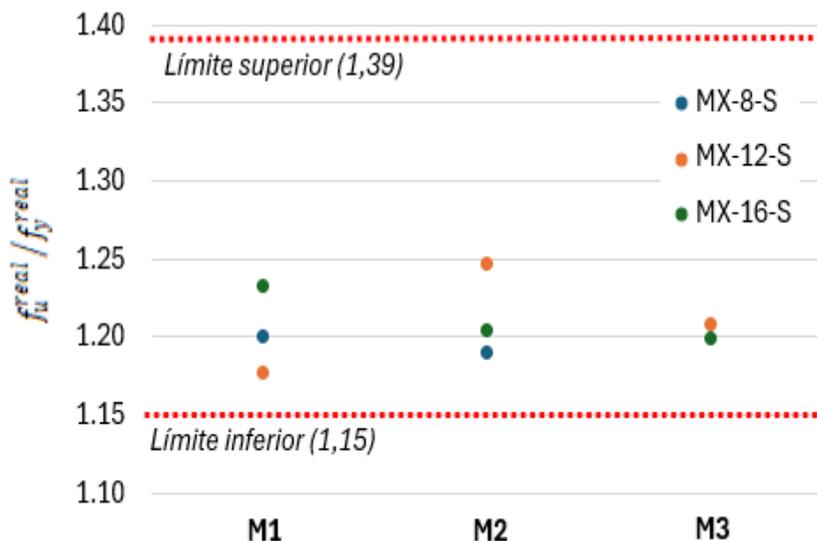


Figura 7

Distribución del factor de sobrerresistencia de $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$ de cada muestra dentro de los límites prescriptos.



CONCLUSIONES

El presente estudio experimental sobre barras de acero de diferentes diámetros y marcas comerciales disponibles en la provincia de Mendoza ha permitido obtener conclusiones significativas en cuanto a la capacidad de desarrollar sobrerresistencia flexional, de acuerdo a la reglamentación vigente.

Los resultados obtenidos en los ensayos indican que la mayoría de las muestras evaluadas cumplen con las exigencias establecidas por el Reglamento INPRES-CIRSOC 103 Parte II (2021). En particular, se verificó que la relación entre la tensión de fluencia real y la tensión de fluencia nominal, $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nom}}$, en general, no supera el límite de 1,30, garantizando así un comportamiento adecuado del acero en aplicaciones estructurales.

Se demostró que las barras de acero ensayadas cumplen con el requisito reglamentario más reciente, que establece que la relación entre la tensión última real y la tensión de fluencia real, $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$, debe estar comprendida entre 1,15 y 1,39 para zonas sísmicas 3 y 4. Este hallazgo sugiere que el cambio reglamentario de la edición 2021 ha representado un avance en el control de la sobrerresistencia de los aceros utilizados en construcción. Los factores de sobrerresistencia determinados para las muestras de 8, 12 y 16 mm de diámetro nominal proporcionan información valiosa para el diseño y la construcción en regiones de alta actividad sísmica. Las muestras ensayadas demostraron un comportamiento mecánico que contribuye a mejorar el desempeño estructural, cumpliendo con los estándares de seguridad exigidos.

En resumen, este estudio confirmaría que las barras de acero de las tres marcas comerciales evaluadas ofrecen una respuesta adecuada para el desarrollo de estructuras resistentes en condiciones sísmicas, cumpliendo con los requisitos de la reglamentación vigente. Estos resultados son fundamentales para asegurar la confiabilidad y seguridad de las construcciones en zonas sísmicas, destacando la importancia de la sobrerresistencia flexional como un parámetro clave en el diseño estructural. El tamaño de las muestras ensayadas no es suficiente para obtener conclusiones definitivas, por lo que resulta necesario ampliar la investigación. En este sentido, sería valioso no solo aumentar el número de muestras en los casos presentados, sino también incorporar la evaluación de la sobrerresistencia en aceros ADN 420 no soldables y extender el estudio a los diámetros restantes en el caso de los aceros ADN 420-S.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Mendoza, por el apoyo técnico brindado para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1987). Productos de Acero. Método de ensayo de tracción. Condiciones generales (Norma IRAM-IAS U 500 102 Parte I). <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/11950>
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (2005). *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte II. Construcciones de Hormigón Armado* [INPRES-CIRSOC 103-II]. http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/INPRES-CIRSOC-103_Parte_II-Reglamento.pdf
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (2021). *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte II. Construcciones de Hormigón Armado* [INPRES-CIRSOC 103-II]. <http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/reglamentos/Reglamento%20INPRES-CIRSOC-103%20Parte%20II%20-%20Abril%202021%20Construcciones%20Sismorresistentes%20de%20Hormigón%20Armado.pdf>
- Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley & Sons, Inc. DOI:10.1002/9780470172841
- Vega, E., Llopiz, C., Crisafulli, F., & Mercier, J. (2018, septiembre 26–29). *Aceros ADN-420 S (soldables) vs aceros ADN-420. Situación normativa en Argentina* [Conference presentation]. 25° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Chaco, Argentina. <https://jornadasaie.org.ar/jornadas-aie-anteriores/2018-25JAIE-Resistencia/trabajos.html>

* * *

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MATERIALES DEL RIEL FERROVIARIO U36

Patricia Carrizo¹; Rubén Lepez²

¹Responsable Área Arqueometalurgia, IMTECAP, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, Argentina

²Museo Ferroviario "Estación Benegas", Godoy Cruz, Mendoza, Argentina

e-mail: patricia.carrizo@frm.utn.edu.ar

Resumen: Esta investigación consistió en el estudio de una pieza de riel ferroviario tipo Vignole con denominación U36 (SNCF). Se realizaron los estudios de micrografía, macrografía, composición química y dureza con la intención de poder caracterizar las propiedades del material tales como el grado del acero y su comparación con materiales actuales. El riel fue recibido, previamente cortado en forma de perfil longitudinal, para su estudio. No se realizaron inclusiones en baquelita y se procedió a trabajar la pieza de manera completa, la preparación de la misma en primer lugar de manera adecuada por medio de un proceso de lijado con lijas al agua y de pulido utilizando una suspensión de alúmina para pulir a espejo con cuidado de preservar la muestra de la mejor manera. Se realizó el ataque químico con reactivo (Nital 2%) para hacer la micrografía. Posteriormente, se realizó la macrografía del riel U36 para obtener la calidad del material constituyente del riel. La caracterización del material incluye la medición de la dureza con durómetro de impacto y la composición química de la muestra mediante espectroscopia de emisión óptica por chispa de argón. Los resultados del estudio demuestran en principio que se trata de un acero eutectoide recocido de estructura ferrita - perlita con un contenido de 0,88% de Carbono.

Palabras claves: Riel, Macrografía, Micrografía, Calidad, Museo

INTRODUCCIÓN

El espécimen que se estudia en este trabajo es un perfil de riel de trocha ancha tipo Vignole con denominación U36, de acuerdo a la Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses, donado por el Museo Ferroviario Estación Benegas ubicado en Godoy Cruz, provincia de Mendoza. La Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses (SNCF) es una sociedad estatal francesa que actúa como empresa matriz de un grupo de empresas ferroviarias en ese país.

Figura 1

Imagen de la muestra del riel de denominación U36 recibido para su estudio.



La SNCF fue constituida por el gobierno francés en 1938. Su capital se repartió entre el Estado francés, que se quedó con un 51 %, y las compañías ferroviarias privadas que se fusionaban, que tuvieron un 49 %. En aquella época se trataba de satisfacer un plan de servicios públicos básicos a través de subvenciones estatales. A partir de 1940 y tras el armisticio firmado por el gobierno de Philippe Pétain con los nazis, los alemanes requisan la SNCF. Estos la utilizarán fundamentalmente para trasladar tropas por Francia, así como la deportación de judíos entregados por el general Pétain a las autoridades alemanas, para su posterior envío a campos de concentración y exterminio alemanes. A pesar de este control nazi de

la empresa, los ferroviarios franceses fueron un importante núcleo en la resistencia francesa a la ocupación, y fundaron la llamada *Resistance Fer*, que sería la oposición más frontal y dura a la que se enfrentaron las tropas alemanas, y a la que no pudieron vencer, debido a sus espectaculares y planificados sabotajes de la red ferroviaria.

La guerra acabó en 1945, y la SNCF se encontró con una red totalmente devastada, un material anticuado y con necesidades urgentes de renovación y mantenimiento. Por ese motivo la SNCF siguió bajo la tutela del estado, con lo que poco a poco consiguió recuperar lo que había perdido, en parte gracias a la ley de transportes terrestres, que otorgaba prioridad al transporte de viajeros a la SNCF. Actualmente, la SNCF (Figura 2) pone en circulación una media de 14000 trenes diarios, y transporta 1000 millones de pasajeros al año. Por su volumen de actividad, es la segunda empresa ferroviaria de la Unión Europea tras la Deutsche Bahn.

Figura 2

Mapa de las líneas operadas por los Ferrocarriles SNCF.



OBJETIVO: Analizar las características metálicas del riel de trocha ancha tipo U36 (SCNF) y comparar con materiales modernos ferroviarios.

PARTE EXPERIMENTAL

El ejemplar que se recibió para el estudio se muestra en la Figura 1. Se le realizó el proceso de lijado siguiendo una secuencia de lijas de 80 - 240 - 400 - 600 - 1500 - 2500 (granos/cm²). Luego, se pulió a espejo, mediante suspensión de óxido de aluminio (alúmina) y algodón. Para el estudio metalográfico, se realizaron en primer lugar se las micrografías, y para el ataque se utilizó el reactivo Nital 2%, y se tomaron las imágenes correspondientes a las zonas del riel Cabeza, Alma y Patín, las cuales se muestran en la Figuras 3, 4 y 5 respectivamente. Estas observaciones se lograron con microscopio metalográfico de platina invertida.

Figura 3

Micrografía de la Cabeza del riel U36. Aumento: 100X

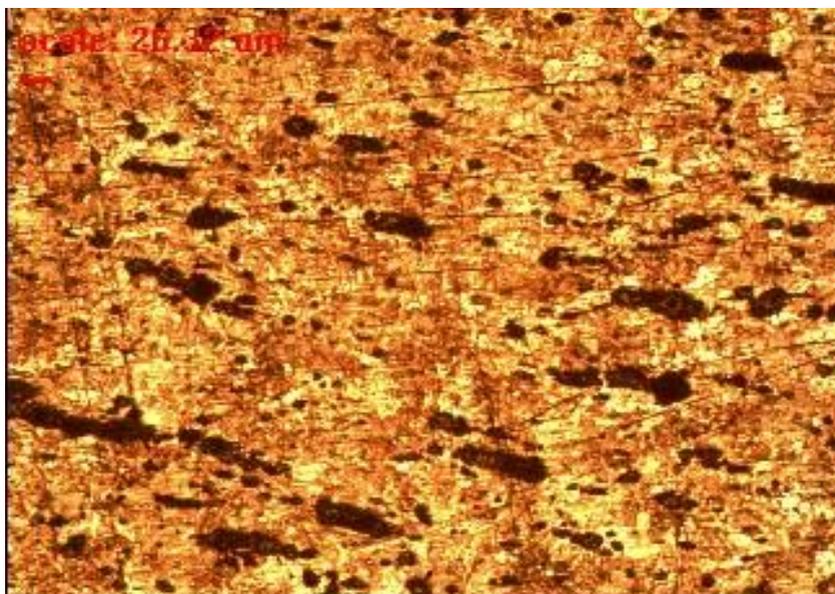


Figura 4

Micrografía del Alma del riel U36. Aumento: 100X

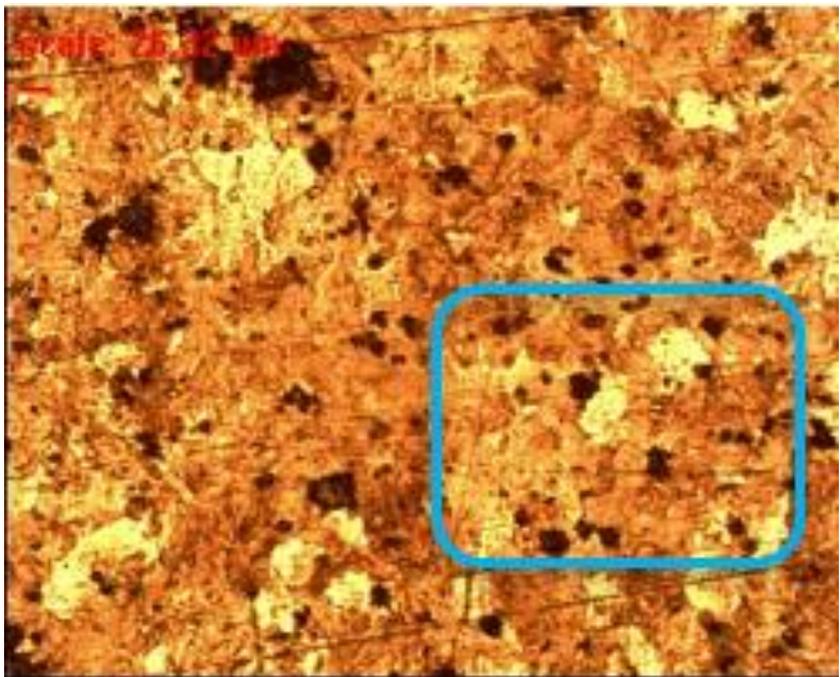
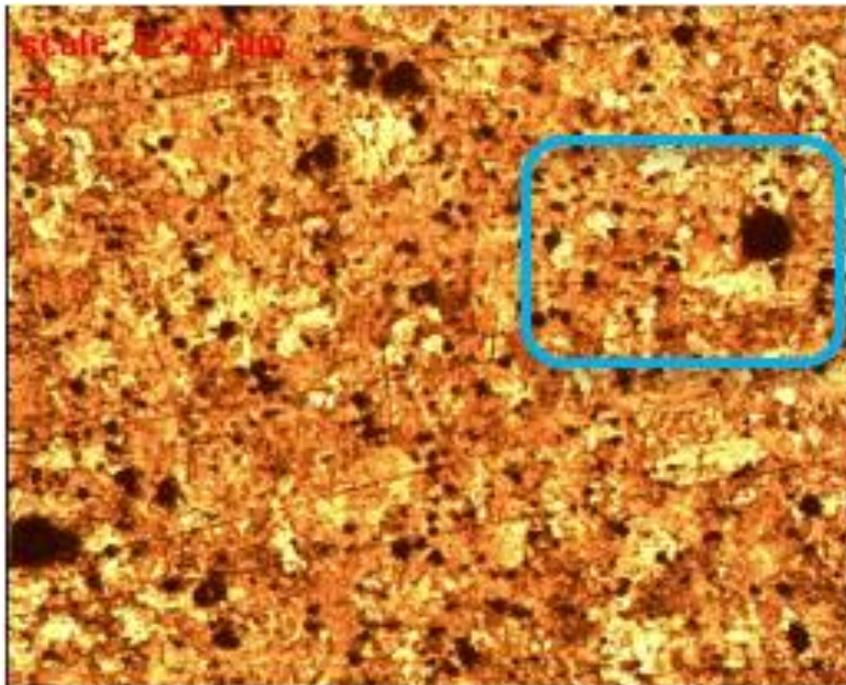


Figura 5

Micrografía de Patín del riel U36. Aumento: 100X.



A continuación, se procedió a la realización de un nuevo proceso de lijado utilizando la siguiente secuencia de lijas de: 80 - 240 - 400 - 600 - 1500 - 2500 (granos/cm²) y nuevamente pulido a espejo con alúmina, para poder eliminar el ataque con reactivo Nital 2% previamente realizado. Todo este procedimiento responde al objetivo de llevar a cabo los estudios macrográficos, la cuales aportan datos sobre la calidad del material y se muestran en las Figuras 6, 7 y 8.

Figura 6

Macrografías de Cabeza del riel tipo Vignole, denominación U36 (SNCF).

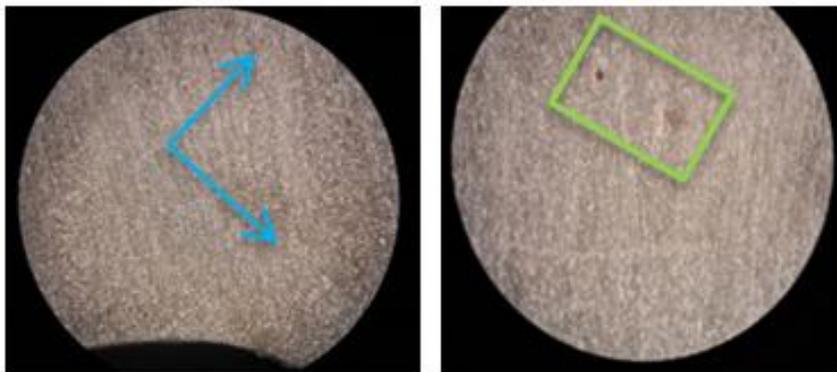


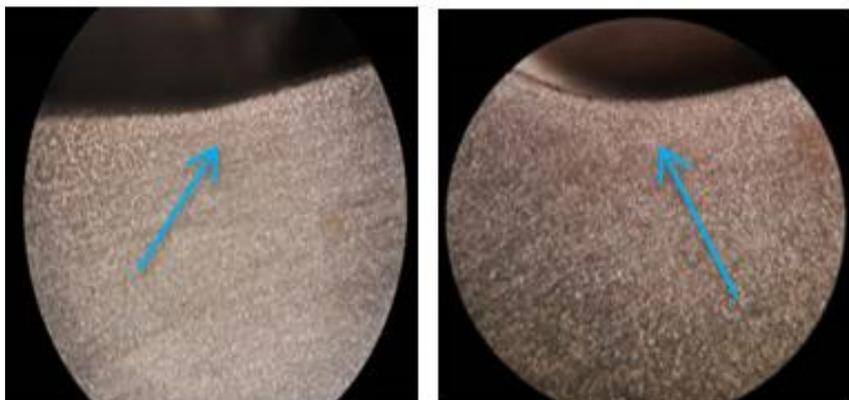
Figura 7

Macrografías de Alma del riel U36. Aumento: 6.7μm



Figura 8

Macrografías del Patín de riel U36. Aumento: 6.7 μ m.



Complementariamente se evaluó la composición química utilizando un espectrómetro de emisión óptica por chispa de argón, datos que se visualizan en la Tabla 1. Además, se procedió a la evaluación del rango de dureza en las zonas: Cabeza, Alma y Patín del riel ferroviario U36 las cuales se encuentran especificadas en escala de dureza Brinell (HB) (Tabla 2), y fueron tomadas mediante durómetro de impacto.

Tabla 1

Composición química del riel tipo Vignole, denominación U36 (SNCF).

<i>Elementos</i>	<i>%</i>	<i>Elementos</i>	<i>%</i>
C	0.88	Mo	0.005
Si	0.23	Ni	0.010
Mn	1.11	Al	0.005
P	0,039	Co	0.007
S	0,041	Cu	0.012
Cr	0.030	Nb	0.006

Tabla 2

Perfil de Dureza del riel tipo Vignole, denominación U36 (SNCF).

	Cabeza	Alma	Patín
Medición de Dureza (HB)	238	199	240
	259	307	349
	248	215	236
Promedio (HB)	248,3	240,3	275

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el caso de las micrografías del riel de trocha ancha del tipo U36 (SNCF) mostradas en las Figuras 3, 4 y 5, efectuadas en distintos sectores nombrados como Cabeza, Alma y Patín, se observa que la microestructura corresponde a una matriz ferrita (zona clara) con perlita globulizada (zonas oscuras) lograda mediante un tratamiento térmico de recocido de globalización, este tratamiento se aplica a los metales para ablandarlos y disminuir su dureza, además crea una estructura más homogénea y granulada en el material, lo que lo hace más maleable, mejorando las propiedades mecánicas y eliminando tensiones internas.

El acero de este espécimen es un acero eutectoide (ASM International, 1985); dado su contenido de carbono (0.88 %C) de acuerdo a lo revelado por el análisis de composición química (Tabla 1).

En las micrografías citadas se observa puntualmente en la zona de Cabeza del riel como la perlita paso de ser esferoidal a aplanarse en la dirección de los esfuerzos, esto forma parte grano de la deformación en frío a que estuvo sometido el riel producto de las cargas cíclicas actuantes.

En las macrografías correspondientes mostradas en las Figuras 6, 7 y 8, en la Cabeza del riel se puede observar claramente un perfecto delineado de las fibras del material constituyente (ASM International, 2002). Sin embargo, en esta zona se observaron algunos huecos mínimos o porosidad.

En la parte superior del Alma se detectó segregación, lo que nos indica la diferencia en los tiempos de solidificación de los elementos aleantes que se concentran en el centro de los sectores (Lindenvald, 1972).

En el Patín del riel U36 se observan con claridad las fibras del material indicando, por lo tanto, que la materia prima para la fabricación de este tipo de riel U36 ha sido de buena calidad y el proceso de conformado ha sido controlado por lo que ha seguido en servicio activo durante décadas.

La dureza Brinell fue evaluada en las tres distintas zonas del espécimen (Cabeza, Alma y Patín), las cuales se pueden visualizar en la Tabla 2. Se tomaron tres mediciones por cada sector y se calculó el valor promedio, adicionalmente se realizó la equivalencia en escala Dureza Rockwell, así: Cabeza 248,3 HB (102 HRB), Alma 240,3 HB (100 HRB) y Patín 275 HB (104 HRB). Por último, se pudo apreciar que dicho ejemplar (Tabla 3) presenta valores de dureza semejantes a los rieles actuales. Con respecto a la relación de este riel U36 con algún material moderno se encuentra que dada su composición química es similar al acero SAE Grado 1080 (Tabla 4). La composición química del riel U36 está en concordancia con la composición química de los rieles actuales en general (Tabla 5).

Tabla 3

Valores de Dureza rieles actuales, expresados en Dureza Rockwell (HRB)

<i>Tipos de rieles actuales</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Dureza Brinell (HB)</i>	<i>Máximo</i>	<i>Dureza Brinell (HB)</i>
<i>Rieles Normales</i>	107 HRB	302 HB
<i>Rieles de Alta Resistencia</i>	109 HRB	341 HB	112 HRB	388 HB

Tabla 4*Composición química del acero SAE Grado 1080*

%C	%Mn	%S	%P
0,75 - 0,88	0,60 - 0,90	<0,05	<0,04

Tabla 5*Composición química de los rieles ferroviarios actuales*

%C	%Mn	%Si	%S	%P
0,40 - 0,82	0,60 - 1,70	0,05 - 0,50	<0,05	<0,04

CONCLUSIONES

Considerando los estudios de micrografías, valores de composición química y del perfil de dureza obtenidos en el riel de trocha ancha tipo Vignole, de denominación U36 (SNCF) y comparándolo con los valores de composición química y dureza se correlacionan con los valores indicados para los rieles actuales. De acuerdo a los efectos de la deformación en frío en la zona llamada Cabeza del ejemplar se observa que la perlita globulizada de la estructura metalográfica ha tomado la forma aplanada y en la dirección de las sollicitaciones.

Este mecanismo de deformación en frío es lo que con el paso del tiempo le ha permitido al riel ferroviario U36 desarrollar mayor resistencia y dureza, y de esta manera que adquiriera mayor resistencia a los mecanismos de desgaste y fatiga propios de sus prestaciones.

Desde el punto de vista de la calidad del material, según lo evaluado a partir de los estudios macrográficos, el material presenta buena calidad y ha sido conformado mediante procesos de fabricación controlados y además el material cumple con las especificaciones estándar.

Comparando la relación con aceros actuales, se concluye que el material de este perfil longitudinal de riel ferroviario U36 es semejante o similar a los aceros SAE Grado 1080 que, debido a su alta resistencia al desgaste, este tipo de aceros se utilizan en productos largos y perfiles estructurales, para muelles y ejes, así como en otros productos que sufren la influencia de las cargas dinámicas (fatiga) y la abrasión (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1984).

Históricamente, es importante señalar que este estudio permitió conocer su procedencia (Francia) y que fue fabricado por la Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses (SNCF), la cual fue fundada por el gobierno francés en 1938. Adicionalmente, concluir que resulta importante conocer que no todas las líneas férreas de nuestro país fueron adquiridas a Gran Bretaña, sino que las opciones son un poco más amplias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al IMTECAP (Instituto de Materiales y Tecnología Aplicada) perteneciente a la UTN Facultad Regional Mendoza en virtud de la colaboración en equipamiento e insumos para el desarrollo este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- ASM International (1985). *ASM Handbook. Metallography and Microstructures* (ninth ed., Vol. 9). American Society for Metals.
- ASM International (2002). *ASM Handbook. Failure analysis and Prevention* (10th ed., Vol. 11). American Society for Metals.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1984). Bulones para vías (Norma número IRAM-FA L 70-06). https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/fa_7006.pdf
- Lindenvald, Nora (1972). *La Estructura de los Metales*. Editorial Prensa Universitaria Argentina.

* * *

USO DE REALIDAD AUMENTADA EN EL MONITOREO INDUSTRIAL

Eugenia Alfonso¹, María Cecilia Castellanos¹, Carolina Pennisi¹,
Matilde Inés Césari¹

¹GIDECo Grupo Regional UTN de Investigación y Desarrollo de Ecosistemas de Conocimiento - ReAVi Laboratorio de investigación Realidad Aumentada y Virtual) – Universidad Tecnológica Nacional FRM / eugenia.alfonso@docentes.frm.utn.edu.ar

Resumen: La implementación de soluciones de realidad aumentada (RA) en el monitoreo industrial tiene el potencial de transformar la supervisión y gestión de procesos al permitir la visualización de *dashboards* integrados en tiempo real. Este enfoque innovador busca mejorar significativamente la toma de decisiones operativas al proporcionar información contextualizada y accesible directamente en el entorno de trabajo. Al superponer datos relevantes sobre la vista del operador, la RA mejora la interacción con el proceso y la capacidad de respuesta ante eventos inesperados. Además, la integración de gemelos digitales y sistemas móviles de RA ofrece una plataforma robusta para la formación de operadores novatos y la gestión de mantenimiento. En este estudio, se revisan los beneficios y desafíos de la RA en el monitoreo industrial, se presentan casos de éxito y se discuten las mejores prácticas para su implementación efectiva. A través de una revisión exhaustiva de la literatura y la comparación de enfoques actuales, se destacan las oportunidades y las barreras tecnológicas y organizativas que deben ser superadas. Los resultados demuestran que, aunque la RA ofrece ventajas claras en términos de eficiencia, precisión y seguridad, su adopción requiere una planificación estratégica y una capacitación adecuada de los usuarios. Finalmente, se proporciona un análisis del retorno de inversión (ROI) y las métricas clave para evaluar el impacto de la RA en la industria, subrayando su potencial para optimizar procesos y reducir costos operativos.

Palabras claves: realidad aumentada, proceso industrial, tablero de monitoreo

INTRODUCCIÓN

La realidad aumentada (RA) ha emergido como una tecnología prometedora en el monitoreo industrial, facilitando la toma de decisiones y la supervisión de procesos en tiempo real. Estudios recientes, como el de Caiza & Sanz (2022), demuestran el uso de gemelos digitales (digital twins) para monitorear procesos industriales a través de RA, integrando hardware de bajo costo y servicios en la nube para mejorar la confiabilidad del proceso.

He *et al.* (2021) exploran un sistema móvil de RA que utiliza datos del gemelo digital para ayudar a operadores novatos a interactuar con dispositivos industriales complejos, mejorando significativamente la interacción humano-dispositivo. Otros estudios, como el de Maio *et al.* (2023), introducen prototipos de RA para el monitoreo de datos en tiempo real, destacando el diseño centrado en el usuario para mejorar el apoyo en el contexto industrial. La importancia de estos avances radica en su capacidad para aumentar la eficiencia operativa, reducir costos y mejorar la seguridad en las plantas industriales.

El objetivo de este artículo es analizar y sintetizar la literatura existente sobre el uso de la realidad aumentada en el monitoreo industrial, evaluando sus beneficios, desafíos y mejores prácticas. Además, se busca proporcionar una guía para la implementación efectiva de soluciones de RA en entornos industriales, destacando casos de éxito y áreas futuras de investigación

METODOLOGÍA

Este estudio se basa en una revisión bibliográfica exhaustiva de artículos científicos, informes técnicos y estudios de caso sobre la implementación de RA en el monitoreo industrial. Se identificaron fuentes relevantes a través de bases de datos académicas como IEEE Xplore, ScienceDirect y Google Scholar. Se analizaron artículos que describen aplicaciones prácticas de RA, sus beneficios y desafíos, y las tecnologías utilizadas. Se recopilieron datos sobre la eficiencia operativa, la reducción de costos y la mejora en la seguridad y formación de los trabajadores.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Ventajas

La realidad aumentada (RA) en el mantenimiento industrial ofrece múltiples beneficios que optimizan la eficiencia y reducen costos. Uno

de los principales beneficios es la capacidad de superponer elementos virtuales sobre el entorno real, permitiendo a los técnicos recibir instrucciones en tiempo real sin necesidad de interrumpir sus tareas. Esto se traduce en intervenciones más eficientes y rápidas (Malta, Farinha & Mendes, 2023). Además, la RA puede mejorar el entrenamiento y la visualización de equipos, permitiendo a los usuarios explorar la estructura interna y el tamaño de los equipos, lo cual es esencial para la reparación rápida y precisa en un entorno de Industria 4.0 (Alatawi et al., 2023). Otra ventaja es la capacidad de realizar inspecciones de calidad en tiempo real, integrando la evaluación de calidad en el flujo de trabajo de RA y permitiendo a los operarios corregir su trabajo antes de continuar con otras tareas (Cortijo Leyva & Benavides Ramos, 2023). Finalmente, la RA facilita la creación de contenido participativo, optimizando la producción de contenido y mejorando la percepción de los usuarios sobre sus habilidades tecnológicas (De Silva, Rupasinghe & Apeagyei, 2019).

Costos y beneficios de implementación

Medir el retorno de inversión (ROI) al implementar la realidad aumentada (RA) en el mantenimiento industrial implica evaluar diversos factores que afectan tanto los costos como los beneficios derivados de su uso. Diversos estudios han mostrado cómo la colaboración remota basada en RA reduce significativamente los costos de desplazamiento y mejora la disponibilidad operativa de los sistemas (Nepal, Pavlovich & Guilherme, 2023). Otros estudios señalan que el uso de RA para proporcionar instrucciones detalladas y visuales mejora la capacidad de los técnicos para identificar y reparar problemas rápidamente, aumentando así la productividad y reduciendo errores (Müller et al., 2023).

Métricas Clave

Para evaluar la efectividad de la implementación de RA en el mantenimiento industrial, se utilizan métricas clave como:

- **Costos de Implementación:** incluyen el hardware (costo de dispositivos como HoloLens, smartphones y tablets), software (licencias de software de RA como Vuforia y ARViewer), y entrenamiento (costos asociados con la capacitación del personal).
- **Ahorros en Costos:** reducción en viajes, menos tiempo de inactividad y mayor eficiencia.

- **Indicadores de Rendimiento:** tiempo de reparación, disponibilidad del equipo y tasa de resolución de problemas (Alatawi et al., 2023; Bahari et al., 2023).

Herramientas de hardware y software

Las herramientas de software y hardware utilizadas comúnmente en soluciones de RA para la industria incluyen una combinación de dispositivos avanzados y plataformas de desarrollo especializadas que facilitan la integración de la RA en entornos industriales.

Integración de RA en la Industria: Herramientas de Software y Hardware

En la actualidad, la integración de la realidad aumentada (RA) en la industria se apoya en una combinación de dispositivos avanzados y plataformas de desarrollo especializadas que facilitan la implementación de estas tecnologías en entornos industriales. Los dispositivos como **Google Glass** y **Microsoft HoloLens 2** son ejemplos clave de hardware utilizado, permitiendo la superposición de información digital en entornos reales, lo que mejora la interacción y la visualización de datos en tiempo real (Torres et al., 2024). Además, plataformas de software específicas se desarrollan para gestionar estas interacciones, incluyendo herramientas de reconocimiento gestual que permiten una mayor naturalidad en la manipulación de equipos industriales, optimizando la seguridad y eficiencia operativa (Shoemaker et al., 2023). La combinación de RA con inteligencia artificial (IA) también está emergiendo como una tendencia significativa, promoviendo el uso de técnicas avanzadas para mejorar la capacitación de la fuerza laboral y la precisión en la manufactura (Devagiri et al., 2022). Sin embargo, a pesar de las potenciales aplicaciones y la reducción de costos, la adopción de estas tecnologías enfrenta barreras, como la falta de automatización en la comunicación entre modelos digitales y la necesidad de más investigación para mejorar la integración de plataformas (Szajna & Kostrzewski, 2022).

En la integración de la realidad aumentada (RA) en entornos industriales, se utilizan diversas herramientas de software que son fundamentales para el desarrollo y la implementación efectiva de estas tecnologías. Algunas de las herramientas más comunes incluyen:

- **Unreal Engine y Unity:** Estas plataformas de desarrollo son ampliamente utilizadas para crear experiencias de RA.

Proporcionan un entorno robusto para la construcción de aplicaciones que pueden integrarse con hardware de RA como HoloLens y Google Glass, facilitando la creación de interfaces inmersivas y la superposición de datos en el mundo real.

- ARKit y ARCore: Desarrolladas por Apple y Google respectivamente, estas herramientas permiten a los desarrolladores crear aplicaciones de RA para dispositivos móviles, lo que expande el uso de la RA más allá de los dispositivos dedicados a otros que ya se encuentran en manos de los usuarios, como smartphones y tablets.
- Vuforia: Es una de las plataformas más utilizadas para la creación de aplicaciones de RA debido a su capacidad para reconocer objetos y superficies, permitiendo una interacción dinámica con el entorno físico.
- Blippar y Wikitude: Estas plataformas ofrecen soluciones integradas para la creación de experiencias de RA, incluyendo herramientas de reconocimiento de imagen y modelado 3D que son esenciales en aplicaciones industriales para visualización y entrenamiento.

Algunas herramientas de software actuales que se están utilizando para aplicaciones de realidad aumentada (RA) en el ámbito industrial:

- Software para el Reconocimiento de Equipos Industriales: Esta herramienta de RA se enfoca en el reconocimiento de puntos característicos de objetos y la modelación 3D a través de software CAD, integrándose en una multiplataforma para la simulación y control de procesos industriales (Romero et al., 2020).
- Sistema de RA para la Programación de Robots: Esta aplicación de RA, creada con software comercial y código JavaScript adicional, está diseñada para la programación de robots industriales, mejorando los métodos tradicionales al evitar la necesidad de detener las líneas de producción o requerir modelos CAD 3D (Zhang et al., 2020).
- AR-planar: Una aplicación móvil de RA auto-suficiente usada para la aceptación de edificios industriales, que facilita la comparación de la documentación planificada con la fábrica construida mediante la superposición de modelos 3D en imágenes de video (Schoenfelder & Schmalstieg, 2008).

- Integración de Motores de Juegos para RA en Interacción Humano-Robot: Este marco de software utiliza motores de juegos para desarrollar experiencias de realidad extendida (XR), incluidas RA y realidad virtual (VR), para aplicaciones de interacción humano-robot en entornos industriales (Coronado et al., 2023).
- 3DGAM: Este sistema combina el uso de gestos en 3D y modelos CAD para mejorar la colaboración remota en tareas de ensamblaje, proporcionando instrucciones claras basadas en modelos CAD que se proyectan en un entorno de realidad aumentada (Wang et al., 2021).
- Augmented Reality for CAD-CAM Training: Una aplicación móvil de RA que se utiliza para mejorar los procesos de aprendizaje y material didáctico en cursos de dibujo mecánico, permitiendo a los estudiantes visualizar y manipular modelos CAD 3D en un entorno de RA (Marinakakis et al., 2021).

Mejores prácticas para la implementación de RA en el entorno de trabajo industrial

La implementación exitosa de la Realidad Aumentada (RA) en entornos industriales requiere la adopción de un enfoque sistemático que considere tanto los aspectos tecnológicos como humanos de la integración. En primer lugar, es fundamental realizar un análisis detallado de las necesidades específicas del entorno de trabajo y los desafíos que la RA puede resolver. Esto incluye la identificación de áreas clave donde la RA puede mejorar la eficiencia, como la capacitación de empleados, el mantenimiento predictivo y el control de calidad. Además, la selección del hardware y software adecuados debe basarse en criterios de ergonomía, facilidad de uso y compatibilidad con los sistemas existentes (Bimber & Raskar, 2005). La formación y la capacitación del personal también juegan un papel crucial; los trabajadores deben estar cómodos y familiarizados con el uso de dispositivos de RA para maximizar su potencial (Zhou et al., 2008). Por otra parte, la integración de la RA debe alinearse con los flujos de trabajo existentes, evitando interrupciones y asegurando que la tecnología se integre de manera natural en las operaciones diarias (Nee et al., 2012). Finalmente, es esencial llevar a cabo pruebas piloto para evaluar el impacto de la RA y realizar ajustes antes de una implementación a gran escala. Estas pruebas permiten identificar y mitigar posibles problemas técnicos o de aceptación por parte de los empleados, garantizando una transición más suave y eficiente (El-Nahass, 2021). La RA, cuando se

implementa siguiendo estas mejores prácticas, puede transformar significativamente los procesos industriales, mejorando la productividad y reduciendo errores operativos.

Mejores prácticas para la integración de RA con Sistemas de Gestión de Mantenimiento

La integración de la Realidad Aumentada (RA) con los sistemas de gestión de mantenimiento requiere una planificación estratégica que considere tanto las necesidades específicas del mantenimiento como las capacidades tecnológicas actuales. Es crucial identificar las áreas donde la RA puede ofrecer el mayor valor y desarrollar métodos que permitan la integración fluida de los datos de producción y los sistemas de gestión de mantenimiento (CMMS) con las tecnologías de RA (Di Pace et al., 2020; Kollatsch et al., 2017). Para facilitar esta integración, se recomienda el uso de interfaces de programación de aplicaciones (API) y kits de desarrollo de software (SDK) que aseguren una comunicación efectiva entre el software de RA y los sistemas de gestión de mantenimiento (Bahari et al., 2023). Además, el desarrollo de interfaces de usuario intuitivas es fundamental para presentar la información de manera clara y accesible, facilitando el trabajo de los técnicos de mantenimiento (Saidi et al., 2022). La selección de hardware y software adecuados es igualmente importante, ya que deben adaptarse a las necesidades específicas de la industria (Aivaliotis et al., 2022). Una vez implementada la tecnología, es esencial realizar pruebas piloto y establecer un ciclo de evaluación continua para asegurar que la integración funcione correctamente y cumpla con los objetivos establecidos (Cortijo Leyva & Benavides Ramos, 2023). La formación adecuada de los usuarios es clave para garantizar la adopción exitosa de la RA, asegurando que los trabajadores se sientan cómodos y competentes en su uso (Avalle et al., 2019). Finalmente, el desarrollo de contenido interactivo y relevante, junto con ajustes continuos, asegura que la RA se mantenga eficiente y adaptada a las necesidades cambiantes del entorno de trabajo (Avalle et al., 2019).

Implementación de un gemelo digital en un entorno industrial

Los gemelos digitales, representaciones virtuales precisas de sistemas físicos, permiten la simulación, análisis y optimización de procesos industriales, lo que conlleva múltiples beneficios como la mejora de la

eficiencia operativa y la reducción de tiempos de inactividad. El proceso de implementación de un gemelo digital comienza con la creación y modelado detallado del sistema físico, lo cual requiere la incorporación de datos provenientes de sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real (Schroeder et al., 2021). Una vez que se ha desarrollado el modelo, es crucial integrar datos en tiempo real de diversas fuentes para simular el comportamiento del sistema, permitiendo así la optimización continua mediante la evaluación de diferentes escenarios y la predicción de resultados (Konstantinidis et al., 2020; Vogel-Heuser *et al.*, 2021). La simulación y el análisis predictivo juegan un papel central en este proceso; a través de algoritmos avanzados de análisis, los gemelos digitales pueden anticipar fallas y optimizar el mantenimiento preventivo, lo cual no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce los tiempos de inactividad, contribuyendo a un funcionamiento más robusto y confiable del sistema (Ceruti et al., 2019).

Desafíos de integrar la realidad aumentada en procesos industriales

La implementación de la realidad aumentada (RA) en el mantenimiento industrial enfrenta varios desafíos importantes que deben abordarse para asegurar su éxito y eficacia. Entre los principales desafíos se incluyen la precisión en el seguimiento y la registración de objetos en el entorno industrial, que es crucial para la correcta superposición de elementos virtuales sobre los reales (Eswaran et al., 2023). Además, la aceptación del usuario y la ergonomía son factores críticos; los trabajadores deben sentirse cómodos y seguros utilizando las tecnologías de RA, lo cual requiere interfaces intuitivas y dispositivos ergonómicos (Runji et al., 2022). La integración de RA con sistemas de aprendizaje profundo presenta desafíos técnicos adicionales, como la necesidad de algoritmos robustos y eficientes que puedan operar en tiempo real y en entornos dinámicos (Durchon et al., 2022). Otro desafío significativo es la infraestructura tecnológica, incluyendo la necesidad de hardware y software avanzados que puedan soportar aplicaciones de RA complejas y la capacidad de procesar y analizar grandes volúmenes de datos generados durante las operaciones de mantenimiento (Frandsen et al., 2023).

Casos de éxito

La implementación de la realidad aumentada (RA) en el mantenimiento industrial ha producido varios casos de éxito notables. Un ejemplo destacado es el desarrollo de un modelo de adopción de mantenimiento

remoto basado en RA, que identificó factores clave que promueven y obstaculizan la adopción de esta tecnología en la industria. Este modelo se desarrolló mediante un análisis cualitativo de factores de éxito a través de entrevistas con 16 empresas, revelando ventajas operativas cualitativas y cuantitativas, así como la importancia de la experiencia del usuario y la gestión de la adopción (Müller et al., 2023). Otro caso es la aplicación de RA en el mantenimiento de una célula robótica multiproceso (MPRC). Utilizando RA, se crearon guías de mantenimiento que aumentaron la eficiencia y el éxito de los usuarios primerizos al realizar tareas de mantenimiento, demostrando así un impacto positivo en la productividad de la empresa. Además, el uso de la RA junto con la tecnología de detección de objetos como la red YOLOv5 ha mejorado significativamente la capacitación y la asistencia en tiempo real durante el mantenimiento de motores de automóviles. Este enfoque permitió la detección precisa de piezas de automóviles y ofreció una asistencia visual inmediata para los técnicos, mejorando la eficiencia y precisión del mantenimiento (Malta et al., 2021). Finalmente, la implementación de un sistema de inspección de calidad en tiempo real basado en RA para dispositivos móviles mostró cómo esta tecnología puede mejorar la inspección y corrección de errores durante los procedimientos de mantenimiento, lo que resulta en una mayor eficiencia y calidad del trabajo realizado (Frandsen et al., 2023).

CONCLUSIONES

La implementación de la realidad aumentada en el mantenimiento industrial proporciona beneficios significativos en términos de eficiencia operativa, seguridad y capacitación, facilitando la interacción contextual y reduciendo errores operativos. Sin embargo, también enfrenta desafíos significativos relacionados con la fragmentación tecnológica, requisitos específicos y la aceptación del usuario que deben ser abordados para asegurar una implementación exitosa. Asimismo, la implementación de gemelos digitales en entornos industriales permite una optimización avanzada de procesos mediante simulaciones precisas y análisis predictivos, mejorando la eficiencia y reduciendo costos operativos. Futuros estudios deben enfocarse en desarrollar interfaces más intuitivas y robustas, y en la capacitación continua de los usuarios para maximizar los beneficios de la RA en el mantenimiento industrial.

REFERENCIAS

- Aivaliotis, S., Lotsaris, K., Gkourmelos, K., Fourtakas, N., Koukas, S., Kousi, N., & Makris, S. (2022). An augmented reality software suite enabling seamless human robot interaction. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(1), 3-29. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2022.2104459>
- Alatawi, H. Q., Albalawi, N., Shahata, G., Aljohani, K., Alhakamy, A., & Tuceryan, M. (2023). Augmented Reality-Assisted Deep Reinforcement Learning-Based Model towards Industrial Training and Maintenance for NanoDrop Spectrophotometer. *Sensors*, 23, Article Number 6024. <https://doi.org/10.3390/s23136024>
- Avalle, G., De Pace, F., Fornaro, C., Manuri, F., & Sanna, A. (2019). An Augmented Reality System to Support Fault Visualization in Industrial Robotic Tasks. *IEEE Access*, 7, 132343-132359. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940887>
- Bahari, M. A., Salleh, S.R. M., & Kiram, M. K. A. (2023). Augmented Reality Assisted Maintenance and Monitoring at Onpremise Data Center. In David C. Wyld & Dhinaharan Nagamalai (Eds.), *9th International Conference on Information Technology Convergence and Services (ITCSS 2023)*, 49-58. <https://doi.org/10.5121/csit.2023.130204>
- Bimber, O., & Raskar, R. (2005). *Spatial Augmented Reality. Merging Real and Virtual Worlds*. A K Peters/CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10624>
- Caiza, G., & Sanz, R. (2022). Digital Twin for Monitoring an Industrial Process Using Augmented Reality. In Alvaro Rocha, Borja Bordel, Francisco Garcia Penalvo, Ramiro Goncalves (Eds.), *Proceedings of 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI 2022* (pp. 1-5). IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.23919/cisti54924.2022.9820356>
- Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., & Bil, C. (2019). Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 516-526. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>
- Coronado, E., Itadera, S., & Ramirez-Alpizar, I. G. (2023). Integrating virtual, mixed, and augmented reality to human–robot interaction applications using game engines: A brief review of accessible software tools and frameworks. *Applied Sciences*, 13(3), Article Number 1292. <https://doi.org/10.3390/app13031292>
- Cortijo Leyva, R. E., & Benavides Ramos, P. R. (2023). *Asistencia remota de mantenimiento por realidad aumentada para máquinas CNC de corte por láser para la empresa Prodigytrading SA* [Master's thesis, Universidad Tecnológica Israel]. <http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/3874>
- De Silva, R. J., Rupasinghe, T. D., & Apeageyi, P. (2019). A collaborative apparel new product development process model using virtual reality and augmented reality technologies as enablers. *International Journal of*

- Fashion Design, Technology and Education*, 12(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1080/17543266.2018.1462858>
- Devagiri, J. S., Paheding, S., Niyaz, Q., Yang, X., & Smith, S. (2022). Augmented reality and artificial intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges. *Expert Systems with Applications*, 207, Article Number 118002. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118002>
- Di Pace, A., Fenza, G., Gallo, M., Loia, V., Meglio, A., & Orciuoli, F. (2020). Implementing the Cognition Level for Industry 4.0 by Integrating Augmented Reality and Manufacturing Execution Systems. In Barolli, L., Amato, F., Moscato, F., Enokido, T., & Takizawa, M. (Eds.), *Advanced Information Networking and Applications. AINA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing: Vol. 1151* (pp.957-967). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44041-1_83
- Durchon, H., Preda, M., Zaharia, T., & Grall, Y. (2022). Challenges in applying deep learning to augmented reality for manufacturing. In Christophe Mouton & Marius Preda (Eds.), *Proceedings of the 27th International Conference on 3D Web Technology* (pp. 1-4). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3564533.3564572>
- El-Nahass, M. M. A. (2021). The Impact of Augmented Reality on Fashion and Textile Design Education. *International Design Journal*, 11(6), 39-52.
- Eswaran, M., Gulivindala, A. K., Inkulu, A. K., & Bahubalendruni, M. V. A. R. (2023). Augmented reality-based guidance in product assembly and maintenance/repair perspective: A state of the art review on challenges and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 213(Part A). Article Number 118983. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118983>
- Frandsen, J., Tenny, J., Frandsen, W., & Hovanski, Y. (2023). An augmented reality maintenance assistant with real-time quality inspection on handheld mobile devices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125, 4253-4270. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10978-1>
- He, F., Ong, S.-K., & Nee, A. Y. C. (2021). An Integrated Mobile Augmented Reality Digital Twin Monitoring System. *Computers*, 10(8), Article Number 99. <https://doi.org/10.3390/COMPUTERS10080099>
- Kollatsch, C., Schumann, M., Klimant, P., & Lorenz, M. (2017). Industrial Augmented Reality: Transferring a Numerical Control Connected Augmented Reality System from Marketing to Maintenance. [Poster presentado en] *2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct)*, Nantes, France. 39-41. doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2017.27
- Konstantinidis, F. K., Kansizoglou, I., Santavas, N., Mouroutsos, S. G., & Gasteratos, A. (2020). MARMA: A Mobile Augmented Reality Maintenance Assistant for Fast-Track Repair Procedures in the Context of Industry 4.0. *Machines*, 8(4), Article Number 88. <https://doi.org/10.3390/machines8040088>
- Maior, R., Marques, B., Santos, A. M., Ramalho, P., Almeida, D., Dias, P., & Santos, B. S. (2023). Real-Time Data Monitoring of an Industry 4.0

- Assembly Line using Pervasive Augmented Reality: First Impressions. *2023 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* (pp.414-417). Curran Associates. <https://doi.org/10.1109/VRW58643.2023.00090>
- Malta, A., Farinha, T., & Mendes, M. (2023). Augmented reality in maintenance—History and perspectives. *Journal of Imaging*, *9*(7), Article Number 142. <https://www.mdpi.com/2313-433X/9/7/142>
- Malta, A., Mendes, M., & Farinha, T. (2021). Augmented Reality Maintenance Assistant Using YOLOv5. *Applied Sciences*, *11*(11). Article Number 4758. <https://doi.org/10.3390/APP11114758>
- Marinakakis, A., Mania, K., & Antoniadis, A. (2021). Augmented Reality for CAD-CAM Training Featuring 3D Interactive Geometric Transformations. *Computer-Aided Design and Applications*, *18*(3), 561-570. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.561-570>
- Müller, M., Stegelmeyer, D., & Mishra, R. (2023). Development of an augmented reality remote maintenance adoption model through qualitative analysis of success factors. *Operations Management Research*, *16*(3), 1490-1519. <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00356-1>
- Nee, A. Y. C., Ong, S. K., Chryssolouris, G., & Mourtzis, D. (2012). Augmented Reality Applications in Design and Manufacturing. *CIRP Annals*, *61*(2), 657-679. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.010>
- Nepal, R., Pavlovich, R. J., & Guilherme, C.E. (2023) VirtualWorx™: Transforming Maintenance Concepts through Augmented Reality Collaboration Capabilities. *2023 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Orlando, FL, USA* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/rams51473.2023.10088179>
- Romero, J. A., Quero, W. D, Sánchez, J. S., & Andaluz, V. H. (2020). Training Assistant for Industrial Processes through Augmented Reality. *Proceedings of the 11th International Conference on Education Technology and Computers, Amsterdam Netherlands*. 308 – 315. <https://doi.org/10.1145/3369255.3369295>
- Runji, J. M., Lee, Y., & Chu, C. (2022). User Requirements Analysis on Augmented Reality-Based Maintenance in Manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, *22*(5). Article Number 050901. <https://doi.org/10.1115/1.4053410>
- Saidi, H., Carreteros, L., Rey, S., Truscillo, L., & Miloudi, Y. (2022). BL.MIXEDR: Augmenting Traditional Maintenance Procedures to Better Exploit the Capabilities of Head-Worn AR. *PETRA '22: Proceedings of the 15th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environment*, (pp. 176-184). <https://doi.org/10.1145/3529190.3529210>
- Schoenfelder, R., & Schmalstieg, D. (2008). Augmented Reality for Industrial Building Acceptance. *2008 IEEE Virtual Reality Conference* (pp. 83-90). Curran Associates. <https://doi.org/10.1109/VR.2008.4480755>
- Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Rodrigues, R. N., Henriques, R. V. B., Rettberg, A., & Pereira, C. E. (2021). A methodology for digital twin modeling and

- deployment for industry 4.0. *Proceedings of the IEEE*, 109(4), 556-567. doi: 10.1109/JPROC.2020.3032444
- Shoemaker, T. A., Saylor, A., Brown, W. K., Marchisello, M., & Snider, F. (2023). Augmented, Virtual, and Mixed Reality in Practice. In Ellen Rathje, Brina M. Montoya & Mark H. Wayne (Eds.), *Geo-Congress 2023: Geotechnical Data Analysis and Computation* (pp. 584-594). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784484692>
- Szajna, A., & Kostrzewski, M. (2022). AR-AI tools as a response to high employee turnover and shortages in manufacturing during regular, pandemic, and war times. *Sustainability*, 14(11), Article Number 6729. <https://doi.org/10.3390/su14116729>
- Torres, W., Santos, L., Melo, G., Oliveira, A., Nascimento, P., Carvalho, G., Neves, T., Martins, A., & Araújo, Í. (2024). A Framework for Real-Time Gestural Recognition and Augmented Reality for Industrial Applications. *Sensors (Basel)*, 24(8), Article Number 2407. <https://doi.org/10.3390/s24082407>
- Vogel-Heuser, B., Ocker, F., Weiß, I., Mieth, R., & Mann, F. (2021). Potential for combining semantics and data analysis in the context of digital twins. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2207). Article Number 20200368. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0368>
- Wang, P., Bai, X., Billingham, M., Zhang, S., Wei, S., Xu, G., He, W., Zhang, X., & Zhang, J. (2021). 3DGAM: using 3D gesture and CAD models for training on mixed reality remote collaboration. *Multimedia Tools and Applications*, 80(20), 31059 - 31084. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09731-7>
- Zhang, F., Lai, C. Y., Simic, M., & Ding, S. (2020). Augmented reality in robot programming. *Procedia Computer Science*, 176, 1221-1230. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.09.119>
- Zhou, F., Duh, H. B., & Billingham, M. (2008). Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction, and Display: A Review of Ten Years of ISMAR. *2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Cambridge, USA*. 193-202. doi: 10.1109/ISMAR.2008.4637362

* * *

DISEÑO PRELIMINAR DE AISLADOR SÍSMICO FRICCIONAL DE IMPACTO CON UN NÚCLEO DE GOMA

Kevynn Cenas¹; Miguel Tornello²; Gustavo Gioacchini²

¹Aspirante al Doctorado en Ingeniería. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC). Facultad Regional Mendoza. UTN / kevynn.cenas@docentes.frm.utn.edu.ar

²Docentes Investigadores. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC). Facultad Regional Mendoza. UTN / miguel.tornello@docentes.frm.utn.edu.ar; ggioacchini@frm.utn.edu.ar

Resumen: En la República Argentina más de las dos terceras partes de su territorio se encuentran en riesgo sísmico y con diminuta protección sísmica. Estudios realizados sobre sismicidades locales y regionales han demostrado el elevado peligro sísmico de importantes provincias del oeste argentino, un ejemplo son Mendoza y San Juan. La región conocida como el Gran Mendoza con un poco más de dos millones de habitantes, presenta una importante historia sísmica. En los últimos 200 años han ocurrido no menos de 15 terremotos que ocasionaron distintos niveles de daños en las construcciones y en algunos casos se ha tenido que lamentar la pérdida de vidas humanas. El antecedente histórico más conocido lo constituye el terremoto de 1861, que provocó la destrucción total de la ciudad y ocasionó la muerte del 60 % de las personas que habitaban la ciudad. El avance tecnológico de los últimos años ha permitido contar con nuevos desarrollos e innovaciones tecnológicas que tiendan a reducir y controlar el efecto de los terremotos destructivos sobre las construcciones emplazadas en regiones de alto riesgo sísmico. El trabajo consiste en el diseño preliminar de un dispositivo friccional de aislamiento sísmico para equipos esenciales y contenidos. Se desarrolla el marco teórico y la capacidad de soportar eventos sísmicos. El trabajo se completa con, i) información sobre la respuesta del equipo diseñado localmente frente a sismos sensibles ocurridos en la región registrados por el instrumental sísmico del CeReDeTeC, ii) características generales del dispositivo de aislamiento sísmico en relación a su mecanismo particular de disipación de energía.

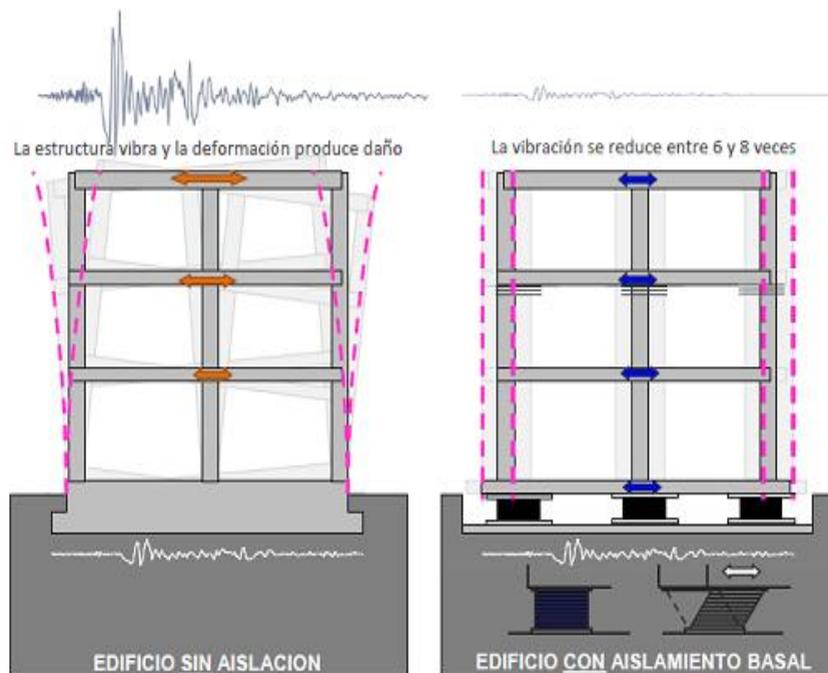
Palabras claves: protección sísmica - aislamiento sísmico – dispositivo friccional.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería sísmica ha focalizado su esfuerzo a lo largo de los años en el diseño de sistemas estructurales resistentes a terremotos. Sin embargo, no se ha prestado la misma atención en garantizar un comportamiento sísmico adecuado de los componentes no estructurales, equipos, y contenidos. Las técnicas convencionales de protección sísmica en edificaciones apuntan a garantizar la seguridad de sus ocupantes, evitando la pérdida de vidas humanas, ya que según la Organización de la Naciones Unidas (ONU), los terremotos son responsables del 60% de las muertes provocadas por desastres naturales (Organización de la Naciones Unidas, 2010). Para ello, buscan impedir el colapso de una estructura durante un evento sísmico, permitiendo la disipación de energía mediante la aceptación de un nivel de daño controlado. Este grado de desempeño ocasiona grandes pérdidas económicas, asociadas a la operatividad posterior del edificio y al daño de sus componentes estructurales y no estructurales. Existen 3 técnicas de protección sísmica muy conocidas a nivel global: aislamiento sísmico, disipadores sísmicos y masa sintonizada. En el presente trabajo de investigación, hablaremos sobre la estrategia del aislamiento sísmico, que consiste en desacoplar la estructura del suelo de fundación con el objeto de que el movimiento del terreno durante un sismo no sea transmitido a la superestructura y que ella permanezca esencialmente detenida en un marco de referencia inercial (Figura 1). Se aclara que, un desacople perfecto entre suelo y estructura es impracticable actualmente, pero cualquier sistema de aislamiento busca concentrar en él la deformación impuesta por el suelo, filtrando el movimiento que se transmite hacia la superestructura.

Figura 1

Respuesta entre un edificio tradicional y un edificio aislado en su base (Gioacchini, 2017)



El aislamiento sísmico global de un edificio, si bien resulta ser una técnica de protección sísmica muy eficiente, representa un costo de inversión adicional que impacta en las decisiones desde el punto de vista económico situación que desalienta su uso y, en algunos casos especiales, no garantiza una protección eficiente de los equipos especiales que alberga la construcción. La implementación de dispositivos de aislamiento sísmico permite reducir la demanda sísmica sobre las estructuras y asegurar su capacidad de resistencia frente a terremotos destructivos. Por lo tanto, dichas estructuras muestran un comportamiento elástico ante la ocurrencia de importantes terremotos, situación que garantiza la estabilidad de la estructura aislada, la supervivencia de sus ocupantes y contenidos.

Los beneficios del aislamiento sísmico han quedado demostrados a nivel mundial en diversas oportunidades. En tal sentido se puede citar el caso del edificio aislado de la residencia de estudiantes de la Facultad Regional Mendoza de la UTN (Tornello et al., 2010). En Sudamérica, Chile es el país que más utiliza dispositivos de aislamiento sísmico. Las aplicaciones más relevantes son: un edificio de cuatro niveles para viviendas económicas, conformado por dos departamentos de 50 m² cada uno, aislado con dispositivos elastoméricos a base de láminas de caucho reforzado con acero; un puente de 383 metros de longitud (Marga-Marga), con un único tablero continuo apoyado en 36 aisladores elastoméricos reforzados con láminas de acero; un tramo elevado de 5 a 8 metros de la línea 5 del metro de Santiago, un edificio destinado al Hospital Militar, que consta de una superficie de 50 000 m², posee cuatro niveles por encima del sistema de aislamiento y se utilizaron 164 aisladores elastoméricos reforzados con placas de aceros con diámetros de 70 y 90 cm, siendo esta la estructura aislada de mayores dimensiones en América Latina. Entre las obras de infraestructura puede citarse el puente Amolanas de 268 metros de longitud. En los estribos y pilas existen dos apoyos de neopreno en una caja fija de acero con lámina de teflón, a excepción de la pila más alta donde sólo hay apoyo de neopreno. En ambos estribos hay dos amortiguadores viscoelásticos de Taylor Devices Inc. de 300 toneladas (Gioacchini, 2017).

DESARROLLO

Diseño de aisladores del tipo friccionales

El principio de los aisladores friccionales se basa en la ley de fricción de Coulomb dada por la Ecuación 1:

$$F_f = \mu N_n \quad (1)$$

Dónde:

N_n = Fuerza normal en la interface de aislación

$\mu = \tan(\phi)$, coeficiente de fricción

ϕ = Ángulo de roce medido entre la normal a la superficie y la dirección de la reacción sobre el cono de fricción

La disipación de energía se realiza a través del amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco, la cual es proporcional al coeficiente cinético de fricción, a la carga normal y a la amplitud del movimiento. El coeficiente de fricción es función de la naturaleza de la superficie de deslizamiento, velocidad relativa y de la presión de contacto, la cual puede variar con el tiempo. Investigaciones realizadas sobre dicho coeficiente de fricción concluyeron que la variación del coeficiente puede modelarse de acuerdo a la Ecuación 2:

$$\mu(t) = \mu_{\text{máx}} - (\mu_{\text{máx}} - \mu_{\text{mín}}) \exp(-b_f |\dot{x}_b|) \quad (2)$$

Dónde:

$\mu_{\text{máx}}$ = coeficiente de fricción a velocidades altas

$\mu_{\text{mín}}$ = coeficiente de fricción a velocidades cercanas a cero

b_f = parámetro que controla la variación del coeficiente de fricción en función de la velocidad

\dot{x}_b = Velocidad de deslizamiento

El periodo asociado a la rigidez lateral u horizontal del aislador friccional ($K=W/r$), recta que pasa por el origen viene dado por la Ecuación 3:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K}{m}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{W}{r m}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{m g}{r m}}} = 2\pi \sqrt{\frac{r}{g}} \quad (3)$$

Dónde:

T = período del aislador friccional

K = rigidez lateral y horizontal del aislador friccional

m = masa del aislador friccional

W = peso del dispositivo sísmico en la dirección de estudio

r = radio de curvatura del plato deslizador

g = aceleración de la gravedad

La expresión anterior indica que el periodo no depende de la masa, por lo tanto, el péndulo friccional permite darle a la estructura aislada un periodo que está en función de las características geométricas del dispositivo, que es este caso, el período del aislador friccional está en función de su radio de curvatura del plato deslizador.

Diseño de aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior

En el presente trabajo, se centra en el diseño de un aislador sísmico friccional con un núcleo de goma en su interior, en donde la goma le otorga al dispositivo mayor capacidad de disipación sísmica, frente a los terremotos destructivos. Además, el aislador friccional va a ser colocado en la parte inferior de los equipos esenciales de quirófanos, como, por ejemplo, una cama de cirugía (Figura 2).

El prediseño del dispositivo, comienza asumiendo el período del aislador friccional ($T=2s$) y la carga máxima axial que va a soportar ($N_{m\acute{a}x}=2Tn$), y partiendo de la Ecuación 3, por medio de despejes y ordenamiento, llegamos a la Ecuación 4 para obtener el radio de curvatura:

$$r = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 g \quad (4)$$

Obtenemos un radio de curvatura de $r=101,45$ cm, y en base a la Ecuación 5 de la Norma Chilena 2745-03 que contempla el diseño de estos dispositivos, nos permite determinar los máximos desplazamiento frente a un evento telúrico, lo cual es importante, porque los Reglamentos de Protección Sísmica, recomiendan que el diámetro del dispositivo friccional, tiene que ser como mínimo el doble del desplazamiento máximo ($d=2D_m$):

$$D_{m[mm]} = \frac{C_d M_m}{B_d} = \frac{300 z M_m}{B_d} \quad (5)$$

Dónde:

Cd = Coeficiente de tipo de suelo

Bd = Coeficiente de amortiguamiento efectivo, se obtiene de la Tabla C-2 NCh2745-03

Z = Coeficiente de zona, se obtiene de la Tabla 5 NCh2745-03

Mm = Parámetro de mayoración, se obtiene de la Tabla 3 NCh2745-03

Figura 2

Cama de Cirugía que se colocará arriba del aislador sísmico (Hospital Central, Mendoza, 2024)



Ahora, se definen los materiales que van a componer el aislador friccional. El plato superior e inferior son de acero, el deslizador superior e inferior son de teflón con $\mu=0,08$ y $\sigma_t=4,6$ kN/cm², y el núcleo interior es de goma de caucho con $\sigma_c=5$ Mpa; respetando y verificando los reglamentos: NCh2745-03, ASCE/SEI 7-10 y FEMA, obtenemos el diseño preliminar del aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior, como se muestra en la Figura 3 y 4:

Figura 3

Diseño preliminar de Aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior (Cenas, 2023)

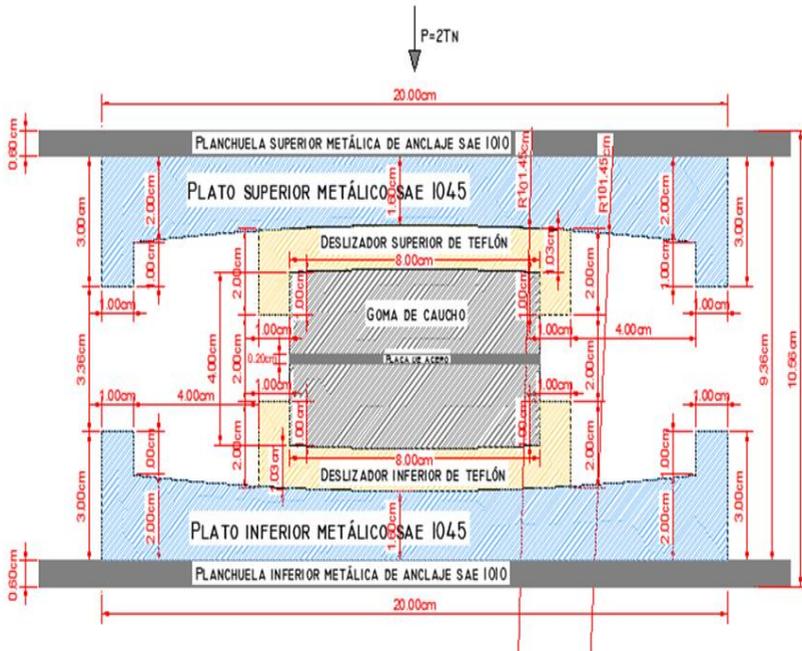
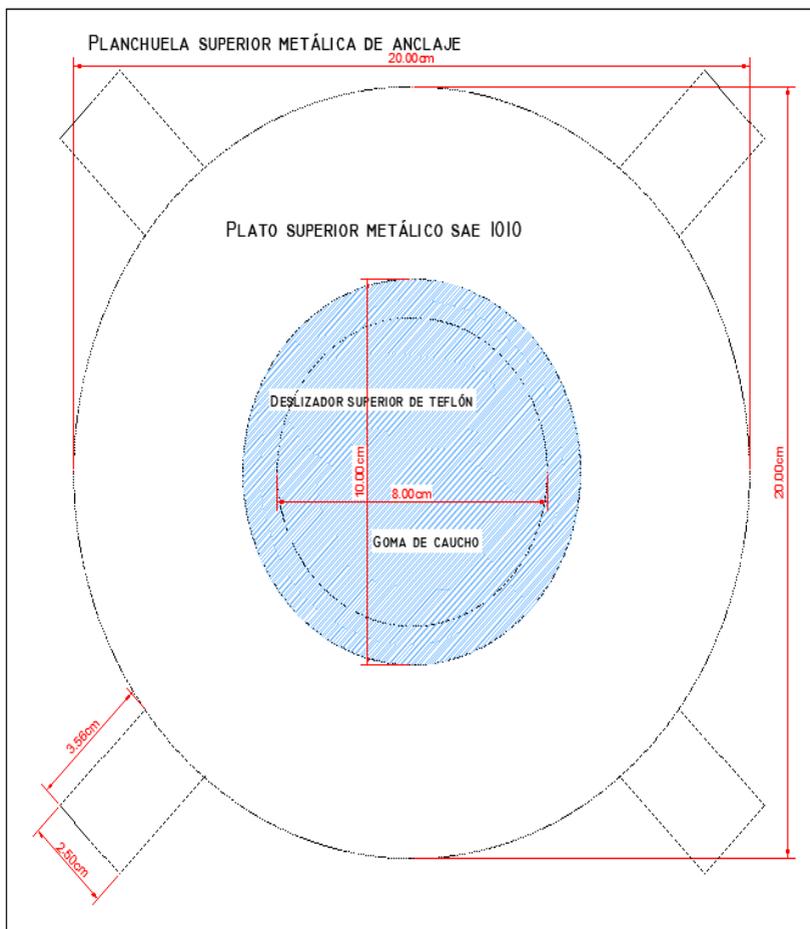


Figura 4

Vista superior del Aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior (Cenas, 2023)



RESULTADOS

Avanzando con el prediseño del dispositivo, y verificando los reglamentos sismorresistentes y de protección sísmica ut supra, llegamos a las tablas resumen con los parámetros geométricos y mecánicos, de la parte elastomérica (goma) y de la parte friccional (platos de acero y deslizador), donde se puede visualizar que las demandas sísmicas disminuyen (Tornello et al., 2022) con el aislamiento sísmico de base (Tornello et al., 2023).

Tabla 1

Cálculo de parámetros geométricos y mecánicos del aislador – Parte elastomérica (Cenas, 2023)

DISEÑO DE AISLADOR SÍSMICO - PARTE ELASTOMÉRICA		
Descripción	Valor	Unidad
Período asumido (T_i)	2,00	s
Altura total (H)	4,00	cm
Diámetro (d)	8,00	cm
Tipo	H5	adim.
Espesor goma (tr)	1,9	cm
Espesor placa de acero (ts)	0,2	cm
Esfuerzo de compresión (σ_{adm})	5,00	Mpa
Módulo de elasticidad longitudinal (E)	5,90	Mpa
Módulo de elasticidad transversal (G)	0,64	Mpa
Área	50,27	cm ²
Esfuerzo normal (N)	19,62	kN
Esfuerzo de compresión (σ_c)	3,90	Mpa
Rigidez mínima lateral ($K_{min.Lat}$)	19,74	kN/m
Rigidez horizontal (K_h)	84,66	kN/m
Verificación de Esfuerzos: $\sigma_c < \sigma_{adm}$	Si Verifica	adim.

Tabla 2

Cálculo de parámetros geométricos y mecánicos del aislador – Parte friccional (Cenas, 2023)

DISEÑO DE AISLADOR SÍSMICO FRICCIONAL		
Descripción	Valor	Unidad
Período asumido (T_i)	2,02	s
Radio de curvatura (r)	1,01	m
Tension admisible del Teflon del deslizador (σ_{adm})	2,44	kN/cm ²
Coefficiente de fricción (μ) del Teflón	0,08	adim.
Esfuerzo normal para posición extrema (N)	19,62	kN
Diámetro requerido del deslizador (d_1) para la posición	3,20	cm
Diámetro adoptado del deslizador (d_1) para la posición	10,00	cm
Tension normal del Teflon del deslizador (σ_f)	0,25	kN/cm ²
Área del deslizador d_1 (A_{d1})	78,54	cm ²
Verificación de Esfuerzos: $\sigma_t < \sigma_{adm}$	Si Verifica	adim.
Fuerza máxima ($F_{m\acute{a}x}$) Régimen IV	3,52	kN
Desplazamiento máximo ($\mu_{m\acute{a}x}$)	9,85	cm
Rigidez efectiva del aislador (K_{ef})	17,87	N/mm
Amortiguamiento efectivo (ξ)	22,52%	%
Período del dispositivo (T_{dis})	2,10	s

En próximas investigaciones y en un mayor grado de avance de la Tesis Doctoral, se pretende determinar el amortiguamiento efectivo y la energía máxima de disipación. También, poder fabricarlo con tecnología local, y otorgarle usos aplicativos en equipos esenciales, como los equipos quirúrgicos. A continuación, se muestran las leyes constitutivas teóricas de la goma y de la parte metálica friccional en las Figuras 5 y 6.

Figura 5

Ley constitutiva de aislador elastomérico de goma APA 1-1 ensayado en el CeReDeTeC (marzo de 2024)

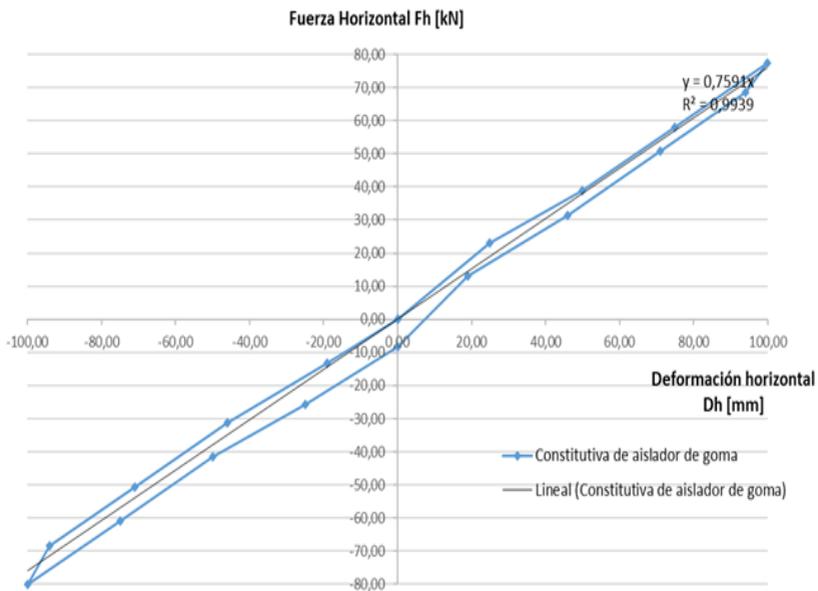
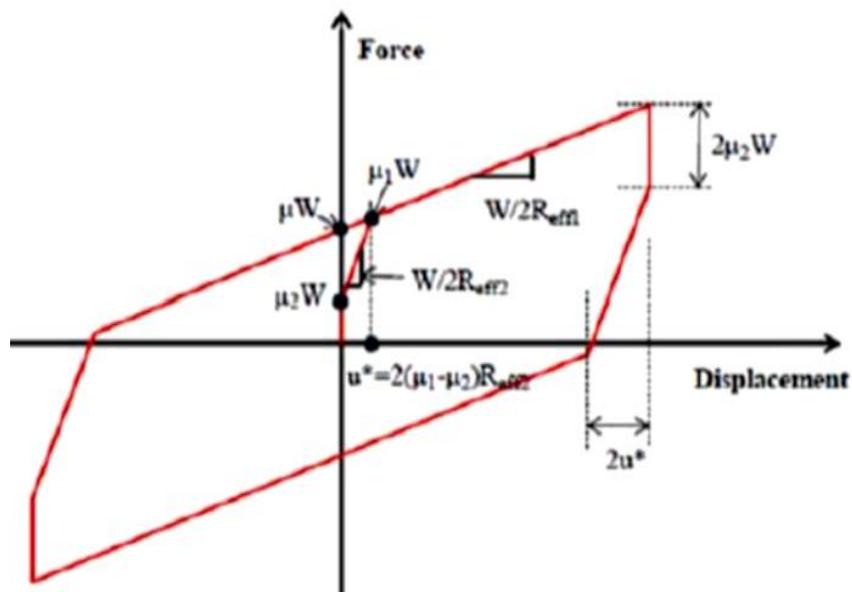


Figura 6

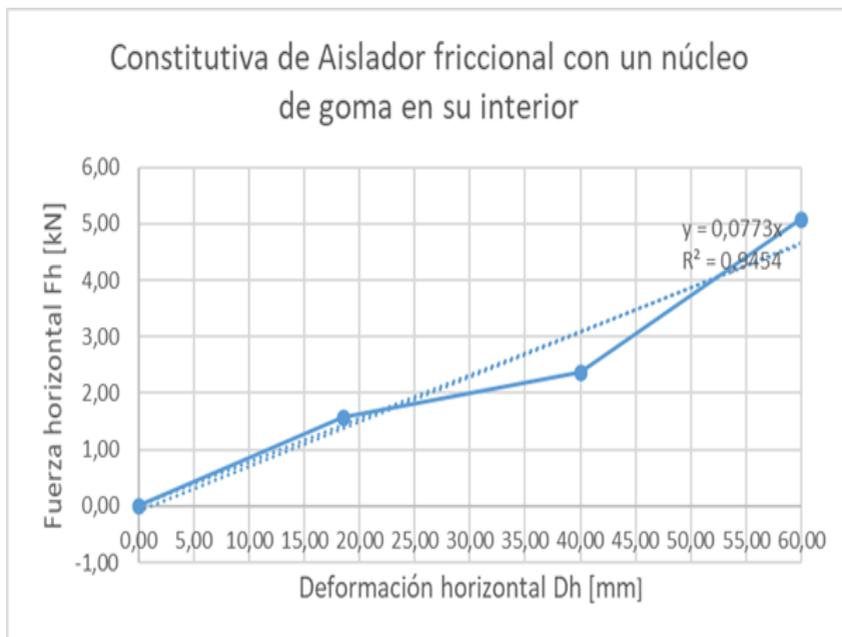
Ley constitutiva de aislador friccional de triple péndulo



En base a la teoría de las figuras 5 y 6, componemos la Ley constitutiva para nuestro dispositivo de aislación sísmica. La figura 7 está descrita por 3 puntos característicos: zona elástica de goma, zona gobernada por el friccional de impacto; y finalmente, por la deformación de la goma en el borde del plato metálico. Y se puede predecir que el impacto interno del dispositivo sísmico, generará mayor disipación de energía sísmica para la superestructura que se conservará en campo elástico (Aquad, Almazán, & Quizanga, 2024).

Figura 7

Constitutiva de Aislador friccional con un núcleo de goma en su interior (Cenas, 2023)



CONCLUSIONES

Se observa que la Ley constitutiva de aislador friccional de impacto con un núcleo de goma en su interior (figura 7), sigue una forma trilineal, lo cual podría tener una importante disipación de energía sísmica. El período del dispositivo sísmico friccional de 2 s, depende del radio de curvatura y no del peso, a lo que le corresponde un radio de curvatura de 101,45 cm.

La aplicación y el uso inmediato para los dispositivos sísmicos son equipos esenciales de salud, monumentos históricos, motocompresores de yacimientos petroleros, centrales hidroeléctricas, servidores de internet, etc. Es factible la fabricación de aisladores sísmicos con

tecnología local. Respetando y verificando los pertinentes reglamentos sismorresistentes y de protección sísmica, como NCh2745-03, ASCE/SEI 7-10 y FEMA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a las autoridades de la Universidad y de la Subsecretaría de Postgrado Rectorado – Becas Doctorales para docentes UTN. También, se agradece a todos los docentes investigadores del CeReDeTeC, por los aportes y sugerencias realizadas al texto y al contenido del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Auad, G., Almazán, J., & Quizanga D. (2024, octubre 24-26). *Validación estática y dinámica del comportamiento lateral del aislador Lateral Impact Resilient Double Concave Friction Pendulum (LIR-DCFP)* [Conference presentation]. XIII Congreso Chileno de sismología e ingeniería sísmica ACHISINA, Viña del Mar, Región de Valparaíso, Chile. https://www.eabstract.cl/paper/proceedings?event_id=46&page=5
- Cenas, K., Tornello, M., Gioacchini G. (2023). *Técnicas de protección sísmica basada en el aislamiento sísmico de base*. In María Luisina Biondi, Ariela Magali Bueno, María Jimena Lloret & Cecilia J. Soengas (Eds.), Libro de actas XII ENIDI: Décimo Segundo Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería. eduTecNe.
- Gioacchini, G. (2017). *Desarrollo de un dispositivo de aislamiento sísmico con bajo nivel de carga axial* [Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica Nacional].
- Organización de las Naciones Unidas (28 de enero de 2010). Más de 3800 desastres naturales en la última década. *Noticias ONU. Mirada global. Historias humanas*. <https://news.un.org/es/story/2010/01/1183891>
- Tornello, M., & Frau, C. (2010). Experiencias sobre aislamiento sísmico en Mendoza, Argentina. Diseño, modelación y construcción. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 15(1), 1-47. <https://ia801202.us.archive.org/9/items/Art01Argentina/Art%2001%20Argentina.pdf>
- Tornello, M., Gioacchini, G., Cenas K., Tillar, A. (2022). *Comparación cualitativa e instrumental de las respuestas del edificio aislado y el de base fija de la Residencia Universitaria de la UTN-FRM*. In Juan Ernesto Calderón, Josefina Huespe & Esteban Anzoise (Eds.), Investigación y Educación en Ciencias de la Ingeniería (Vol. 3, 2da ed.). Universidad Tecnológica Nacional.

* * *

CARACTERÍSTICA METALGRÁFICA DE UN RIEL DECAUVILLE DONADO POR EL MUSEO Y CENTRO CULTURAL FERROVIARIO “RAUL SCALABRINI ORTIZ”

Guadalupe Trejo¹; Patricia Carrizo²; Julián De Falco³; Khalil Figueroa⁴

¹ Integrante Proyecto Ingeniería Inversa aplicada al estudio calidades de rieles, IMTECAP, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, Argentina

² Responsable Área Arqueometalurgia, IMTECAP, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, Argentina

e-mail: guadalupe.trejo@alumnos.frm.utn.edu.ar

Resumen: El espécimen que se estudia en este trabajo es un perfil de riel de trocha angosta del tipo Decauville donado por el Museo y Centro de Cultural Ferroviario “Raúl Scalabrini Ortiz” que está ubicado en la ciudad Haedo, provincia de Buenos Aires. El perfil de riel fue concedido en forma de cooperación con el proyecto PID: 8543-Ingeniería Inversa Aplicada al estudio de Calidades en Materiales de Rieles Ferroviarios Históricos, con el cual se realiza una investigación en el Área Arqueometalurgia que funciona dentro del Instituto de Materiales y Tecnología Aplicada (IMTECAP) perteneciente a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza. Este tipo de rieles fue utilizado en Argentina a partir del año 1884 como vías secundarias que se montaban y desmontaban para realizar el transporte de cargas. Específicamente, este perfil de riel Decauville en la estación de Haedo del Ferrocarril del Oeste de Bs. As. (FCO) se lo utilizó como vía auxiliar para transportes hacia y desde el taller del mencionado ferrocarril. Previo a su estudio se realizó la preparación del material mediante lijado con lijas al agua y el pulido a espejo. Se realizaron micrografías para observar la estructura interna del material y las macrografías para obtener calidad del material para ambos procesos se utilizó el reactivo Nital 2%. La composición química se obtuvo por una espectroscopia de plasma. También se realizaron mediciones de microdureza en distintas zonas del respectivo riel. Se agrega conocimiento histórico del material de las vías de ferrocarril que existió en el país aportado por el Museo y Centro Cultural Ferroviario, los cuales fueron investigados y profundizados.

Palabras claves: Decauville, Micrografía, Macrografía, Calidad, Vía Auxiliar.

INTRODUCCIÓN

El espécimen que se estudia en este trabajo es un perfil de riel de trocha angosta del tipo Decauville donado por el Museo y Centro de Cultural Ferroviario “Raúl Scalabrini Ortiz” que está ubicado en la ciudad Haedo, provincia de Buenos Aires. Este tipo de rieles fue utilizado en Argentina a partir del año 1884 como vías secundarias que se montaban y

desmontaban para realizar el transporte de cargas. Específicamente, este perfil de riel Decauville en la estación de Haedo del ferrocarril del Oeste de Bs. As. (FCO) se lo utilizó como vía auxiliar para transportes hacia y desde el taller del mencionado ferrocarril. Decauville fue una fábrica francesa de locomotoras, vagones y rieles creada por el ingeniero Paul Decauville (1846-1922), pionero del ferrocarril industrial. La empresa, fundada en 1875 en la comuna francesa de Corbeil-Essonnes (muy próxima a París), tuvo su origen en la aplicación de vías desmontables metálicas a las tareas agrícolas. En la actualidad, se dedica a la fabricación de carrocerías y equipos especiales para vehículos pesados.

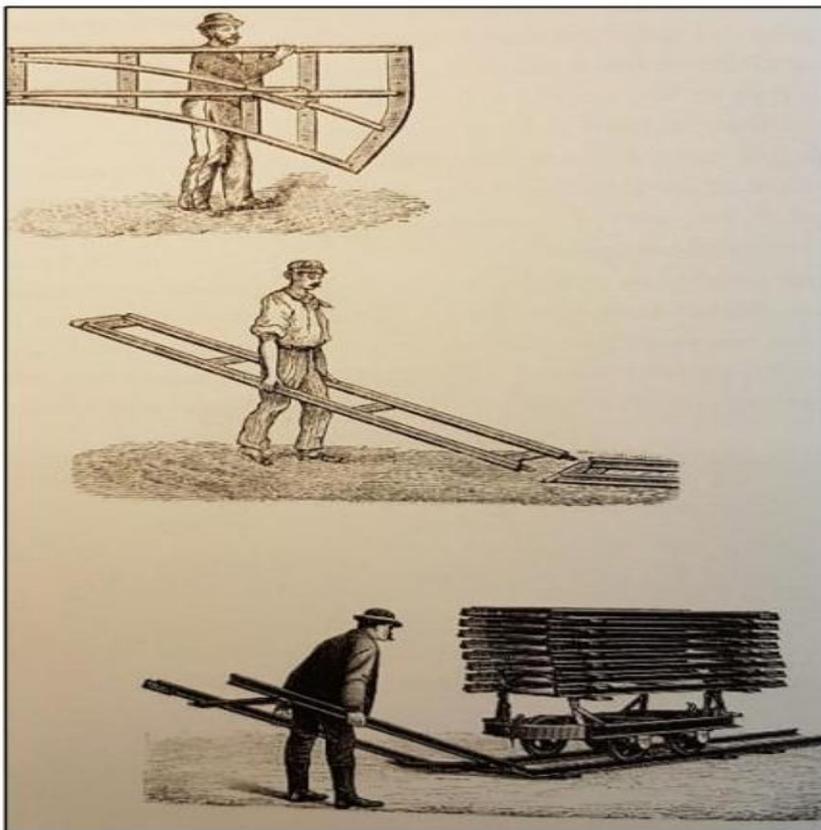
Su principal innovación fue el uso de secciones prefabricadas de vía estrecha listas para utilizarse, compuestas por carriles fijados sobre traviesas de acero. Su primer ferrocarril tenía un ancho de vía de 400 mm (1' 3,70"). Posteriormente, Decauville refinó su invento y amplió la anchura a 500 mm (1' 7,70") y a 600 mm (1' 113/5") (Figuras 1 y 2).

“Su formación de ingeniero lo condujo a la innovación de los carriles de vía angosta (de 40 y/o 50 cm de ancho), para que fueran portátiles: el riel y el durmiente eran una sola pieza, como una escalera.⁴ Con ellos construyó un camino de acero, que fácilmente se desmontaba por ser ligero y de ensamblaje simple (Imagen 1). Para la creación del material rodante se apoyó en el principio de la división de cargas: distribuyó el peso en numerosos vehículos planos y sobre ellos colocó canastos metálicos trapezoides. Según la narrativa de Decauville, su innovación creó el ferrocarril portátil, un transporte que le permitió realizar con mayor eficiencia su actividad agrícola; al

mecanizar la recolección de la cosecha, consiguió obtener 9.000 toneladas de remolacha, un acopio histórico en el registro de sus cosechas (Decauville, 1884). El ferrocarril estaba formado por varias plataformas que al ser cargadas con la remolacha corrían sobre la vía en senderos cortos de 100 m., aproximadamente (Fresné, 2007; Marchi, 2012). Así, los trabajadores del campo recolectaban el producto apoyados en canastos y una vez llenados, los colocaban en los carros; los empujaban rumbo al punto de acopio” (Rangel Vargas, 2022, p. 56).

Figura 1

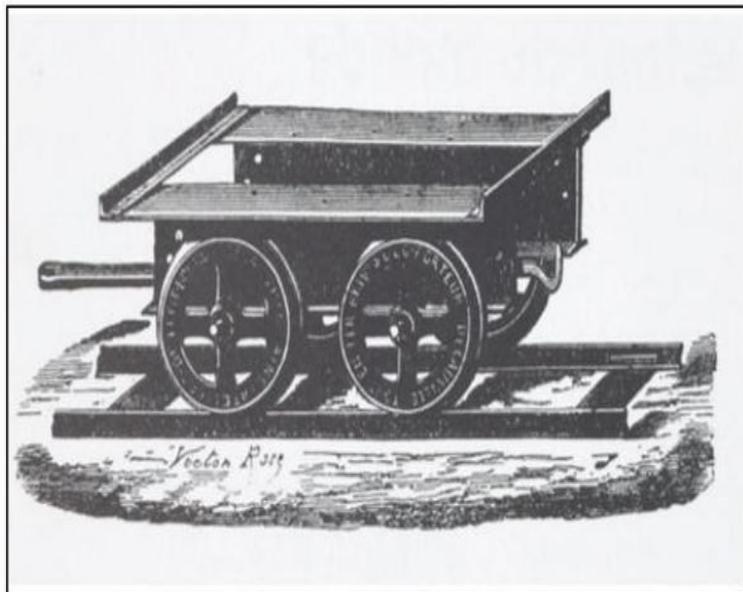
Dibujo que muestra el tamaño, peso y flexibilidad de la vía portátil



Nota. Reproducido de Rangel Vargas, J. M. (2022). Los ferrocarriles portátiles Decauville y la modernización de la hacienda mexicana: El caso de la producción y transporte de henequén y pulque, c. 1880-1907. *Historia Agraria De América Latina*, 3(01), 51–81. <https://doi.org/10.53077/haal.v3i01.110>. (p. 57).

Figura 2

Vehículo metálico diseñado por Paul Decauville para la recolección de remolacha con capacidad de 250 kilos.ca.1880



Nota. Reproducido de Rangel Vargas, J. M. (2022). Los ferrocarriles portátiles Decauville y la modernización de la hacienda mexicana: El caso de la producción y transporte de henequén y pulque, c. 1880-1907. *Historia Agraria De América Latina*, 3(01), 51–81. <https://doi.org/10.53077/haal.v3i01.110>. (p. 57).

El Museo Nacional Ferroviario "Raúl Scalabrini Ortiz" de la Argentina se encuentra en la Ciudad de Buenos Aires, en Avenida del Libertador 405, en Retiro. Fundado en 1971, el Museo Nacional Ferroviario "Raúl Scalabrini Ortiz" brinda a sus visitantes recorridos guiados en español, inglés y portugués.

Entre máquinas que expenden y pican boletos, candados, fechadores, mobiliarios de oficina, fuelles, relojes, telégrafos, teléfonos, zorras, velocípedos y otros cientos de objetos protagonistas del quehacer cotidiano de los Ferrocarriles Argentinos en los últimos ciento sesenta

años, se destacan en su colección piezas únicas a nivel internacional como una autovía de principios del S. XX, una locomotora a vapor de trocha ancha -denominada "PATRIA"- del año 1896 y una de trocha de 60 cm. marca Hunslet del año 1919 que funcionó en el Ferrocarril Económico Correntino.

OBJETIVO: Analizar las características metálicas del riel de trocha angosta tipo "Decauville" y comparar con materiales modernos ferroviarios.

PARTE EXPERIMENTAL

El ejemplar que se recibió para el estudio se muestra en la Figura 3. Se le realizó el proceso de lijado siguiendo una secuencia de lijas de 60 - 80 - 120- 360 - 500 - 1200 - 2500 (granos/cm²). A continuación, se pulió hasta un pulido espejo. Para las micrografías, se tomó con ataque en distintos sectores mostrados en las Figuras 4, 5 y 6. El ataque fue de segundos, aproximadamente 10 segundos, con el reactivo Nital 2%. Se procedió a observar una micrografía metálica en tres distintos sectores de cambio de dimensión de dicho riel, nombrados como cabeza, alma y patín. Los cuales son mostrado en las Figuras 4, 5 y 6 mediante un microscopio metalográfico.

Figura 3

Perfil de riel de trocha angosta, tipo Decauville.



Figura 4

Micrografía de la Cabeza. Aumento: 100X

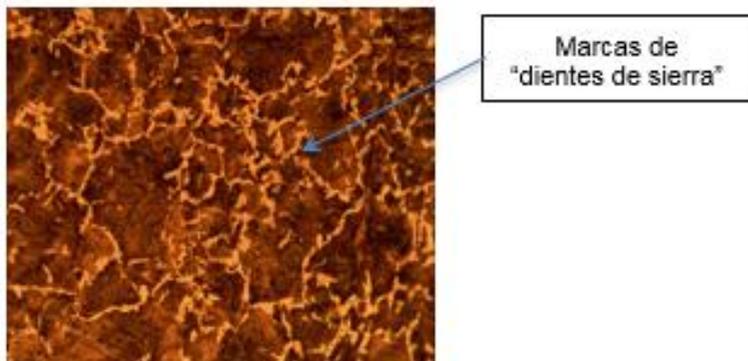


Figura 5

Micrografía del Alma. Aumento: 100X

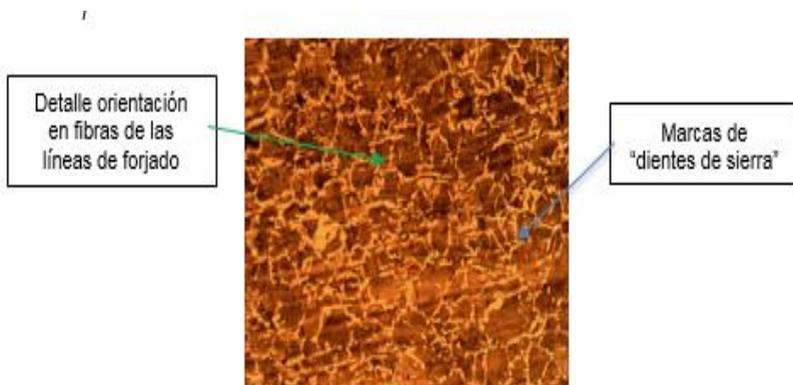
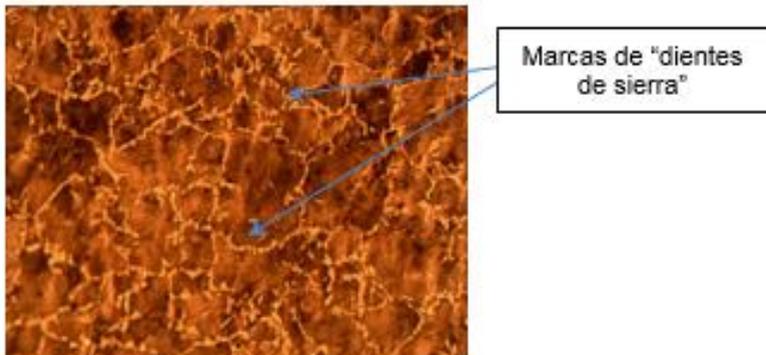


Figura 6

Micrografía de Patín. Aumento: 100X.



Se procedió nuevamente a realizar el proceso de lijado siguiendo una secuencia de lijas de 60 - 80 - 120- 360 - 500 - 1200 - 2500 (granos/cm²) y posteriormente se procedió a un pulido con Alúmina, para poder eliminar el ataque realizado con anterioridad con el reactivo Nital 2%. Con el objetivo de ejecutar una macrografía a dicho ejemplar, la cuales se muestran en las Figuras 7, 8, 9 y 10.

Figura 7

Macrografías del riel de trocha angosta del tipo Decauville.



Figura 8

Macrografias de Patín. Aumento: 6.7 μ m

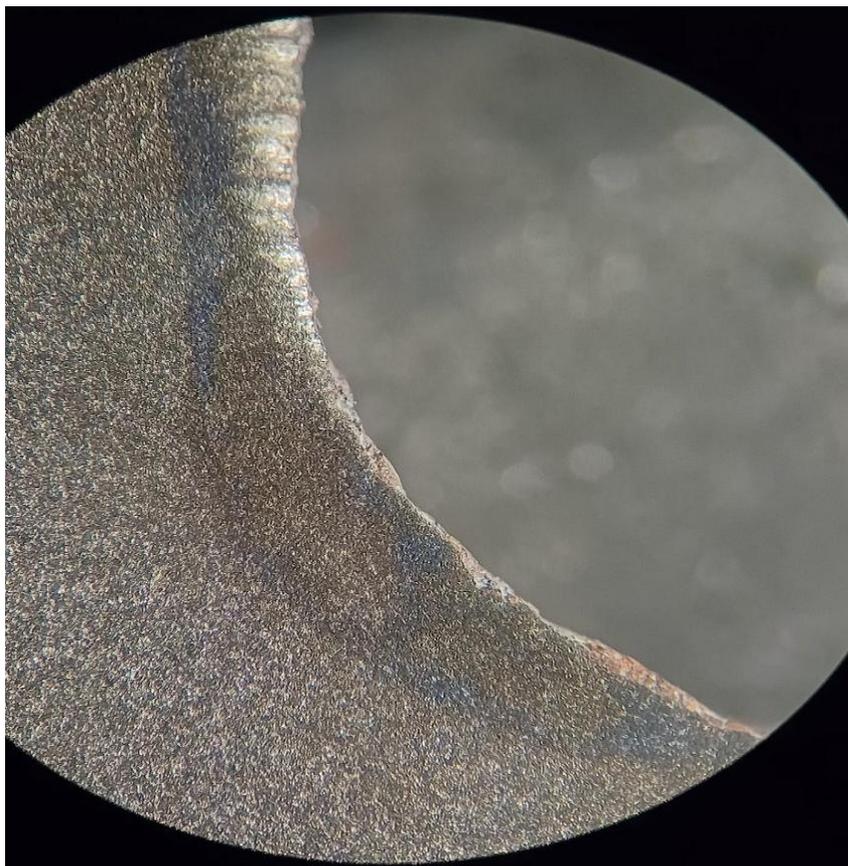
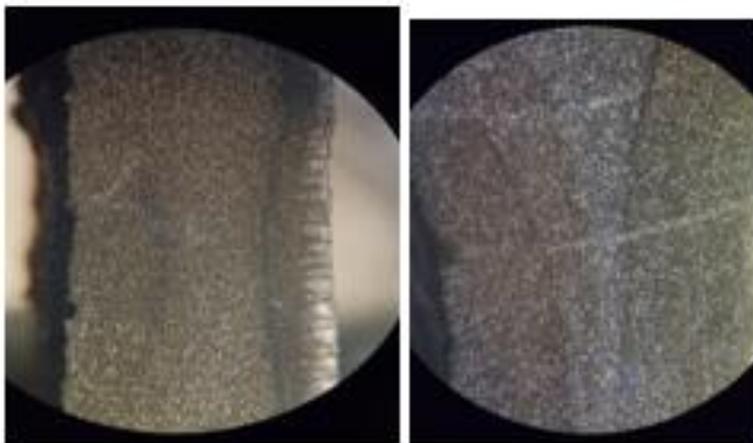


Figura 9

Macrografías de Alma. Aumento: $6.7\mu\text{m}$.



Se realizó el estudio de la composición química mediante un espectrómetro portable con espectroscopia de plasma, las cuales se pueden apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1

Composición química del riel de trocha angosta, tipo Decauville.

Elementos	%m/m	Elementos	%m/m
C	0.52	Mo	<0.003
Si	0.055	Ni	0.12
Mn	0.92	Al	<0.003
Pmax	-	Co	0.026
Smax	-	Cu	0.098
Cr	0.050	Nb	0.020

Figura 10

Macrografías de la cabeza. Aumento: 6.7 μ m.



Se procedió a la realización de un estudio de mediciones de dureza en las tres distintas zonas del ejemplar las cuales se pueden visualizar en las Figuras 4, 5 y 6 mediante un microdurómetro en la escala HV, mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2

Perfil de microdureza del riel de trocha angosta del tipo Decauville.

	Cabeza	Alma	Patín
Perfil de Microdureza (HV)	263	214	198
	236	212	180
	241	201	208
	259	197	239
	204	187	239
Promedio (HV)	240	202	112
Equivalencia (HRB)	98	92	96

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el caso de la micrografía del riel de trocha angosta del tipo Decauville, mostrados en las Figuras 4, 5 y 6 en distintos sectores nombrados con Cabeza, Alma y Patín, se observa una matriz ferrita (zona clara) combinada con perlita (zona oscura) de un acero hipoeutectoide con un contenido medio de carbono (0.52 %C) de acuerdo a lo revelado por el análisis de composición química, es decir que el material de este riel histórico “Decauville” se trataría de un acero estructural que es utilizado en la fabricación de productos largos y de perfiles estructurales (ASM International, 1985). En las micrografías citadas se observa el grano del material con indicios de deformación en frío debidos a los esfuerzos o cargas actuantes sobre el riel, estas deformaciones del grano se denominan “dientes de sierra”

En las macrografías correspondientes mostradas en las Figuras 7, 8, 9 y 10 se puede observar claramente un perfecto delineado de las fibras

del material constituyente, formadas por bandas de ferrita y perlita, en la zona del borde del perfil, no se observaron huecos, rechupes, burbujas o algún indicio que indicara mala calidad del material del riel y del proceso de fabricación.

Se realizó un perfil de dureza en tres distintas zonas del ejemplar, las cuales se pueden visualizar en las Figuras 4, 5 y 6, indicada en la Tabla 2. Consideramos tres valores promedios de dureza en las tres zonas característica que son la cabeza con un valor de 240 HV(98 HRB), el alma con un valor de 202 HV(92 HRB) y el patín con un valor de 212 HV(96 HRB).

Es oportuno relacionar su semejanza con respecto a algún material moderno, entonces podemos observar según la Tabla 1, que el riel de trocha angosta del tipo Decauville estudiado mantiene semejanzas con respecto a la composición química de la fabricación de rieles en la actualidad, mostrado en la Tabla 3. También se puede apreciar por la Tabla 2 que dicho ejemplar tiene valores de dureza semejante a los valores de dureza actuales de los rieles (ver Tabla 4) los cuales contienen valores muy aproximados en las tres zonas característica de dicho ejemplar.

Tabla 3

Materiales de los rieles según su origen

Composición Química wt%	Fabricación en Europa	Fabricación en EE.UU
wt%C	0.4-0.57	>0.57
wt%Mn	0.8-1.2	<0.8
wt%Si	0.1-0.25	0.1-0.25
wt%P	Máximo permitido <0.06	Máximo permitido <0.06

Tabla 4

Dureza actual de los rieles, valores expresados en dureza Rockwell (HRB)

<i>Tipos de rieles actuales</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Rieles normales	107HRB	-
Rieles de altas resistencias	109 HRB	112 HRB

CONCLUSIONES

Considerando los estudios de micrografías, valores de composición química y del perfil de dureza obtenidos en el riel de trocha angosta del tipo Decauville y comparándolo con los valores de un riel actual, podemos decir que el ejemplar cumple con las especificaciones estándar. Se concluye sobre los efectos de la deformación en frío en el ejemplar es que permite una mayor resistencia y dureza del acero, provocando que resistiera más al desgaste y la fatiga. Al tener una mayor resistencia a la fatiga del acero, permitiendo una mayor susceptibilidad a la formación de grietas y fracturas. Desde el punto de vista de la calidad del material, según lo evaluado a partir de los estudios realizados, se concluye que el material presenta buena calidad y ha sido conformado mediante procesos de fabricación controlados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Museo y Centro de Cultural Ferroviario “Raúl Scalabrini Ortiz” por su contribución en esta investigación.

REFERENCIAS

- ASM International (1985). *ASM Handbook. Metallography and Microstructures* (ninth ed., Vol. 9). American Society for Metals.
- Rangel Vargas, J. M. (2022). Los ferrocarriles portátiles Decauville y la modernización de la hacienda mexicana: El caso de la producción y transporte de henequén y pulque, c. 1880-1907. *Historia Agraria De América Latina*, 3(01), 51–81. <https://doi.org/10.53077/haal.v3i01.110>.

* * *

IMPACTO DE LOS ESQUEMAS DINÁMICOS SOBRE LOS OBSERVABLES CINÉTICOS

Tatiana Durán^{1,*}; Rodolfo Dematte^{1,2}; Raúl Pérez¹; Arles Gil Rebaza³ y
Josefina Huespe¹

1 Unidad Investigativa: Epistemología, Lógica y Ciencias Básicas.
Grupo IEMI Grupo orientado a la realización de Investigaciones en Matemática Aplicada
a la Ingeniería y Gestión.

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza Coronel Rodríguez 273,
M5500 Mendoza, Argentina

2Instituto de Energías Naturales y Renovables. Centro de Investigación e Innovación
Tecnológica. UNLaR. Gdor. Luis Vernet & Apóstol Felipe, M5300, La Rioja, Argentina

3 Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de
La Plata UNLP, 1900 La Plata, Argentina

* andretatiduran@gmail.com

Resumen: Se explora el efecto de los observables cinéticos, (coeficiente de sticking y espectros de desorción térmica programada) sobre diferentes esquemas dinámicos en un modelo de gas red bidimensional. El coeficiente de sticking y los espectros de desorción térmica programada (DTP), se obtuvieron y comprobaron mediante dos técnicas: Simulación Monte Carlo y Método de Matriz de Transferencia (TMM). Este estudio se realizó para tres esquemas de cinética dura en la que la probabilidad de transición no puede ser factorizada en una parte que depende sólo de la energía de interacción y otra que sólo dependa de la energía del campo y para cinco esquemas de cinética blanda, en las que dicha factorización es posible. Los resultados mostraron un excelente acuerdo entre las dos técnicas para el coeficiente de sticking. Los ajustes de TPD fueron aceptables considerando las limitaciones de TMM.

Palabras claves: Observables Cinéticos, Cinéticas duras, Cinéticas Blandas, Espectros de Desorción Térmica Programada.

INTRODUCCIÓN

La investigación básica en ciencia de superficies e interfaces es altamente interdisciplinaria, abarcando los campos de la física, la química, la biología física, las ciencias geográficas, atmosféricas y ambientales, la ciencia de materiales, la ingeniería química, entre otros. Específicamente, el comportamiento cinético de las interfaces gas-sólido es generalmente el fenómeno de interés en la ciencia de superficies.

Esta es la importancia de la investigación en la cinética de los procesos superficiales en general. El conocimiento del comportamiento observable, como el coeficiente de sticking y los espectros de desorción programada térmicamente (TPD), es un tema particular en esta área. Es bien conocido que los parámetros de Arrhenius de la constante de velocidad de desorción y el coeficiente de pegado (sticking) dependen del cubrimiento, incluso en el caso de superficies monocristalinas.

La dependencia del cubrimiento con la energía de activación para la desorción y el coeficiente de adherencia suele atribuirse a interacciones laterales entre partículas adsorbidas o también se explica por interacciones a través de estados precursores. Interesa también la dependencia del cubrimiento con el factor pre-exponencial para la desorción (Zhdanov, 1986).

MATERIALES Y MÉTODOS

Coeficiente de sticking

Uno de los métodos utilizados para analizar la teoría de la cinética de adsorción/desorción es el modelo de gas de red cinético (Kinetic Lattice Gas Model, KLGM) aplicado a la capa adsorbida. Este método se basa en la aproximación de la ecuación maestra. En el KLGM, la adsorción, desorción y difusión se introducen como procesos markovianos a través de probabilidades de transición, las cuales deben satisfacer el principio de equilibrio detallado (Payne et al., 2005). La probabilidad de transición para un gas de red bidimensional con interacciones a primeros vecinos en donde sólo los procesos de adsorción y desorción son tenidos en cuenta pueden ser escrita como (Ecuación 1):

$$\begin{aligned}
W_{\text{ads-des}}(\mathbf{n}'; \mathbf{n}) = & \sum_{\{i,j\}} \left\{ w_a (1 - n_{i,j}) \left[A_0 \right. \right. \\
& + A_1 (n_{i-1,j} + n_{i+1,j} + n_{i,j-1} + n_{i,j+1}) \\
& + A_2 \left((n_{i-1,j} n_{i+1,j}) + (n_{i,j-1} n_{i,j+1}) \right. \\
& + (n_{i-1,j} n_{i,j+1}) + (n_{i-1,j} n_{i,j-1}) \\
& + (n_{i+1,j} n_{i,j+1}) + (n_{i+1,j} n_{i,j-1}) \left. \right) \\
& + A_3 \left((n_{i-1,j} n_{i+1,j} n_{i,j-1}) \right. \\
& + (n_{i-1,j} n_{i+1,j} n_{i,j+1}) \\
& + (n_{i,j-1} n_{i,j+1} n_{i-1,j}) \\
& + (n_{i,j-1} n_{i,j+1} n_{i+1,j}) \left. \right) \\
& + A_4 (n_{i-1,j} n_{i+1,j} n_{i,j-1} n_{i,j+1}) \left. \right] \\
& + w_d n_{i,j} \left[D_0 \right. \\
& + D_1 (n_{i-1,j} + n_{i+1,j} + n_{i,j-1} + n_{i,j+1}) \\
& + D_2 \left((n_{i-1,j} n_{i+1,j}) + (n_{i,j-1} n_{i,j+1}) \right. \\
& + (n_{i-1,j} n_{i,j+1}) + (n_{i-1,j} n_{i,j-1}) \\
& + (n_{i+1,j} n_{i,j+1}) + (n_{i+1,j} n_{i,j-1}) \left. \right) \\
& + D_3 \left((n_{i-1,j} n_{i+1,j} n_{i,j-1}) \right. \\
& + (n_{i-1,j} n_{i+1,j} n_{i,j+1}) \\
& + (n_{i,j-1} n_{i,j+1} n_{i-1,j}) \\
& + (n_{i,j-1} n_{i,j+1} n_{i+1,j}) \left. \right) \\
& + D_4 (n_{i-1,j} n_{i+1,j} n_{i,j-1} n_{i,j+1}) \left. \right] \delta (n'_{i,j}, 1 \\
& - n_{i,j}) \prod_{\{l,m\} \neq \{i,j\}} \delta (n_{l,m}, n'_{l,j}).
\end{aligned} \tag{1}$$

w_a y w_d contienen información sobre el intercambio de energía entre el sólido y los procesos de adsorción y desorción. Adicionalmente al Principio de Balance Detallado (PDB), en KLGm el cubrimiento puede ser definido como (Ecuaciones 2 y 3):

$$\theta(t) = \langle \bullet \rangle = \frac{1}{N} \sum_i \sum_{\mathbf{n}} n_i P(\mathbf{n}; t), \tag{2}$$

$$\langle \circ \rangle = \frac{1}{N} \sum_i \sum_n (1 - n_i) P(\mathbf{n}; t), \quad (3)$$

Del mismo modo, la probabilidad de encontrar un sitio vacío está dada por la ecuación (3) por ello, la ecuación del movimiento para el cubrimiento puede ser escrita (Kreuzer, 1990; Kreuzer & Payne, 1988; Payne et al., 2005; Steele, Zgrablich & Rudzinski, 1996) (Ecuación 4):

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} = & w_a [A_0 \langle \circ \rangle + 2A_1 \langle \bullet \circ \rangle + A_2 \langle \bullet \circ \bullet \rangle] \\ & - w_d [D_0 \langle \bullet \rangle + 2D_1 \langle \bullet \bullet \rangle \\ & + D_2 \langle \bullet \bullet \bullet \rangle] \end{aligned} \quad (4)$$

$\langle \bullet \circ \rangle$ indica el promedio de ocupación para el momento de segundo orden. Alternativamente al tratamiento con la ecuación maestra, la ecuación de velocidad para el cubrimiento puede escribirse a través de la formulación fenomenológica, como la diferencia entre los términos de adsorción y desorción (Ecuación 5):

$$\frac{d\theta}{dt} = R_a - R_d. \quad (5)$$

El término de adsorción se puede especificar como el producto del flujo de partículas que alcanza la superficie desde la fase gaseosa con presión P y temperatura T , golpeando el área a_s de una celda de adsorción, y adsorbiendo con una probabilidad igual a $S(\theta, T)$, es decir (Ecuación 6),

$$R_a = S(\theta, T) \frac{a_s P \lambda}{h}. \quad (6)$$

$S(\theta, T)$ es llamado el coeficiente de sticking, el que puede ser escrito para una red cuadrada con interacciones a vecinos cercanos (Ecuación 7)

$$\frac{S(\theta, T)}{S(0, T)} = (1 - \theta) + 4 \frac{A_1}{A_0} \langle \bullet \circ \rangle + 6 \frac{A_2}{A_0} \langle \bullet \bullet \circ \rangle + 4 \frac{A_3}{A_0} \langle \bullet \bullet \circ \bullet \rangle + \frac{A_4}{A_0} \langle \frac{\bullet \bullet \circ \bullet}{\bullet} \rangle \quad (7)$$

Espectros de Desorción Térmica Programada (TPD)

La desorción térmica es una de las técnicas experimentales más importantes para estudiar las propiedades de la capa adsorbida en superficies sólidas mediante la determinación de parámetros cinéticos y termodinámicos del proceso de desorción. Los análisis de este tipo proporcionan información muy útil para entender los mecanismos involucrados en los procesos que ocurren en el sistema, cuando los espectros son analizados utilizando modelos apropiados (Payne et al., 1996; Van Santen & Niemantsverdriet, 1995; Zhdanov & Kasemo, 1997; Zhdanov, 2013).

Para un TPD móvil, es importante que el sistema esté siempre en equilibrio. Una manera de determinar el equilibrio en un TPD es cuando la cantidad de partículas que se adsorben es igual a las que se desorben. Esto significa que, si el sistema está en equilibrio, las partículas desorbidas durante el TPD deben ser iguales a las que deberían adsorberse para que el sistema esté en equilibrio. Por lo tanto, la cantidad desorbida se puede evaluar al evaluar la velocidad de adsorción, pero también teniendo en cuenta que las partículas que abandonan la superficie deben salir del pozo de potencial V_0 . Entonces, el TPD móvil se puede obtener a partir de (Ecuación 8):

Principio del formulario

Final del formulario

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= -R_a \exp(-\beta V_0) \\ &= \frac{2\pi a_s Z_{\text{int}}}{h^3} (k_B T)^2 S(\theta, T) \exp(\beta\mu) \exp(-\beta V_0) \end{aligned} \quad (8)$$

Donde μ es el potencial químico de la fase adsorbida.

Descripción de los esquemas dinámicos

La elección del esquema dinámico en la descripción de los procesos de superficie es muy importante. Tales esquemas pueden clasificarse en dinámicos no conservativos o suaves (soft dinámica), donde las probabilidades de transición pueden factorizarse en términos dependientes de las energías de interacción lateral y otros campos dependientes de la energía, y dinámicos conservativos o duros (dinámica dura), donde tal factorización no es posible. Para calcular el coeficiente de sticking y los espectros de desorción térmica programada (TPD), es imperativo conocer los coeficientes de adsorción (A_i) y desorción (D_i). Los resultados de los observables para algunos esquemas dinámicos se cotejan mediante dos técnicas diferentes.

Simulación de Monte Carlo (MC)

Los fundamentos y aplicaciones del método de simulación de Monte Carlo (MC) han sido ampliamente estudiados por Binder (Kilkpatrick, 1949; Ree & Chesnut, 1966), evitando redundancias descriptivas sobre un método ampliamente conocido, se enfatizan las siguientes consideraciones, aunque bien conocidas, necesarias para el análisis propuesto en este artículo.

En estos sistemas se utilizaron condiciones periódicas de contorno. La cuadrícula diseñada cumple el papel de sustrato, donde las partículas se adsorben (monómeros) desde una fase gaseosa a temperatura T . En el conjunto canónico grande, trabajando con la temperatura T , el potencial químico μ y el volumen del sistema se utilizan como parámetros fijos, y como variable, el número N de moléculas en el adsorbato. La adsorción se estudió siguiendo la variación de cantidades como el cubrimiento superficial diferente, la energía interna, etc., que se

calculan para interacciones laterales atractivas y repulsivas entre vecinos más cercanos. Se utilizó el enfoque de modelo de gas en red, caracterizando el estado de cada sitio solo por los números de ocupación. El sistema termodinámico consiste en una cuadrícula regular y homogénea de tamaño $M = L \times L$, donde M sitios de adsorción están ubicados en posiciones fijas en la cuadrícula. Si n_1, n_2, \dots, n_m son los números de ocupación de los sitios 1, 2, ..., m , respectivamente. Cada uno puede ser 0 o 1 según si el sitio correspondiente está ocupado por un vacío o un monómero. El equilibrio se alcanza utilizando un algoritmo como el "intercambio de espín" (dinámica de Kawasaki).

Método de Matriz de Transferencia (TMM)

Este método fue elegido como una técnica analítica complementaria debido a que la ecuación maestra en un sistema de ecuaciones donde las incógnitas son las diversas correlaciones independientes del sistema debe ser resuelta. Estas correlaciones, de hasta cinco sitios independientes, forman un sistema que, independientemente de su tamaño, tiene la desventaja de no contar con un esquema de clausura con buena aproximación en sistemas bidimensionales con interacciones de primeros vecinos, como se muestra en una dimensión. A continuación, se presenta una breve descripción de este método, conocido por su rapidez y eficiencia en la obtención de resultados.

El método de la matriz de transferencia surgió como una herramienta alternativa y poderosa para el estudio de fenómenos de superficie desde principios de la década de 1940 (Rikvold & Gunton, 1984). Las cantidades se calculan exactamente en una cuadrícula semi-infinita. La técnica ha demostrado ser muy efectiva en la determinación de diagramas de fase y propiedades en el punto crítico en modelos de redes de gas, así como en sistemas magnéticos.

Para llevar a cabo este tratamiento bidimensional propuesto, consideramos un arreglo rectangular con interacciones entre vecinos más cercanos en una tira con N_s sitios en una dirección y M sitios en la segunda dirección, cuyas condiciones de contorno en esta dimensión fueron elegidas de manera que la red sea toroidal con $2^{N_s \cdot M}$ microestados. n_i es el número de ocupación para i columna para un caso bidimensional $n_i = (n_{i,1}, n_{i,2}, \dots, n_{i,M})$ para una matriz de M sitios (Ecuaciones 9, 10 y 11)

$$T(n_i, n_{i+1}) = \exp \left[\frac{1}{2} (\varepsilon(n_i) + \varepsilon(n_{i+1})) - v(n_i, n_{i+1}) \right], \quad (9)$$

$$\varepsilon(n_i) = \varepsilon \sum_{j=1}^M n_{i,j} - v \sum_{j=1}^M n_{i,j} n_{i,j+1}, \quad (10)$$

$$v(n_i, n_{i+1}) = v \sum_{j=1}^M n_{i,j} n_{i+1,j}. \quad (11)$$

$\varepsilon(n_i)$ es la energía de sitio de la columna y $v(n_i, n_{i+1})$ es la interacción entre dos columnas adyacentes. La función de partición es entonces planteada en términos de 2^M autovalores de la matriz como (Ecuación 12)

$$\Xi(T, N_s, M, \mu) = \sum_{j=1}^{2^M} \lambda_j^{N_s}. \quad (12)$$

Esta suma es dominada por el mayor autovalor λ_1 , para valores grandes de N_s , que depende de M y está limitada por la memoria del ordenador. En el cálculo del coeficiente de adherencia, se calculan las correlaciones necesarias, dependiendo del cubrimiento (o del potencial químico). Dado que este método se utiliza para cálculos en equilibrio, solo se pueden obtener para TPD móviles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Consideraciones sobre la implementación de los métodos

En el cálculo del coeficiente de sticking, se utilizaron redes de 100×100 , y cada coeficiente se obtuvo después de realizar 10^6 promedios. Los resultados obtenidos por MC se cotejaron con la Matriz de Transferencia. Para TPD, se emplearon redes de 40×40 , con 10,000 muestras independientes y una termalización inicial de 10^5 MCS (Monte Carlo Steps). Para TPD móviles, se realizaron 100 MCS de termalización para alcanzar el equilibrio térmico del sistema para cada aumento de temperatura o cambio en el cubrimiento del sistema.

Coeficiente de sticking

Como se mencionó, la precisión del método TMM está determinada por el número de filas y las condiciones de contorno utilizadas. Se han empleado diversas combinaciones de estas condiciones para obtener observables con este método. Es importante señalar que añadir más filas incrementa exponencialmente el tiempo de cálculo y la complejidad en la obtención de resultados. En cuanto a este método, se utilizaron para calcular observables diferentes valores de M (número de filas) y condiciones de contorno periódicas, normales para pares de M y toroidales para M impares.

Los resultados de las contribuciones de las correlaciones se muestran en la Figura 1, donde todas las correlaciones ocurren desde ningún vecino en la cuadrícula (1 a) y b), la presencia de un vecino (1 c) y d), dos vecinos (1 e) y f), tres vecinos (1 g) y h) y cuatro (1 h) y i)), considerando valores atractivos ($V=-1$ kcal/mol) e interacciones laterales repulsivas ($V=3$ kcal/mol).

Los resultados mostraron el comportamiento esperado, independientemente de la interacción lateral, el tamaño de la matriz predomina en la concordancia de ambos métodos, lo cual se alcanza justo para valores de $M=5$. Este estudio previo de las correlaciones permitió determinar el tamaño de las matrices para calcular observables mediante TMM. Respecto al coeficiente de sticking normalizado obtenido por MC. En la Figura 2 a) y b), respectivamente, se puede observar que, tanto para una dinámica suave (cinética de interacción) como para una dinámica dura (cinética de Ising), que las diferencias entre los dos métodos elegidos son prácticamente nulas cuando $M=5$. Como se mencionó anteriormente, la correlación entre los resultados de ambos métodos fue precisa para todos los esquemas dinámicos.

Figura 1

Correlaciones obtenidas por MC y TMM para interacciones laterales atractivas y repulsivas.

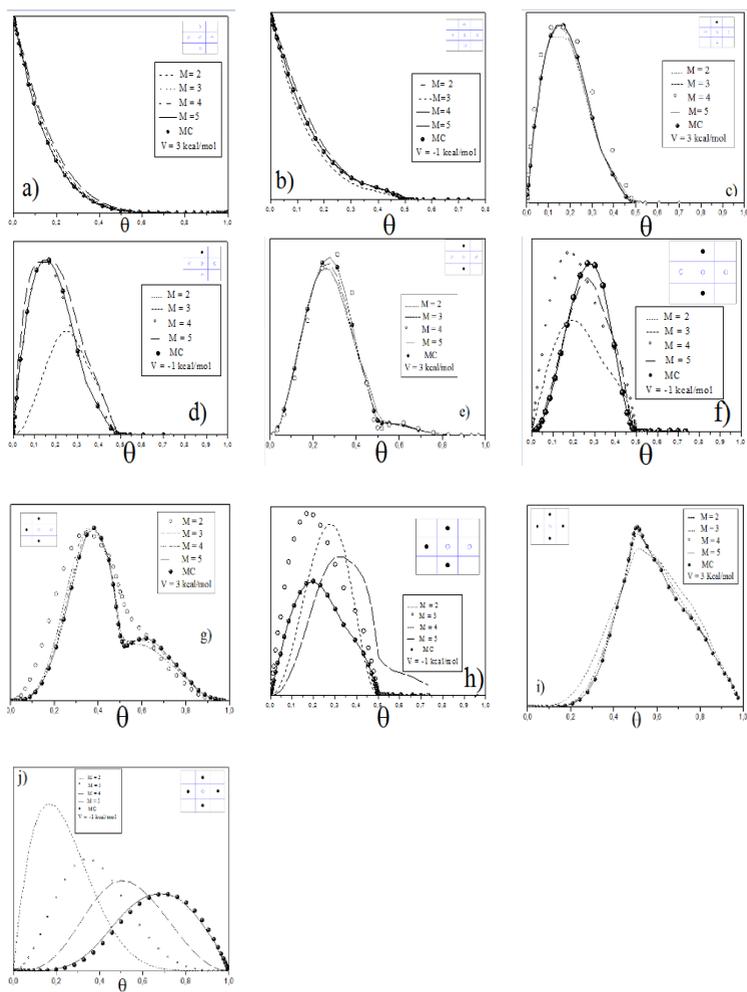
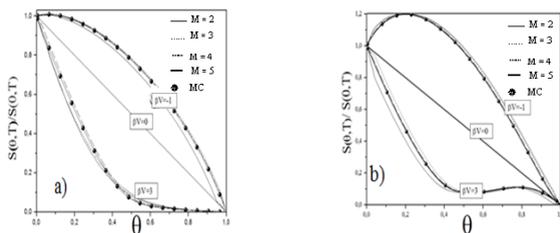


Figura 2

Coeficiente de sticking normalizado para Cinética de Interacción Soft (a) y cinética dura de Ising (b)

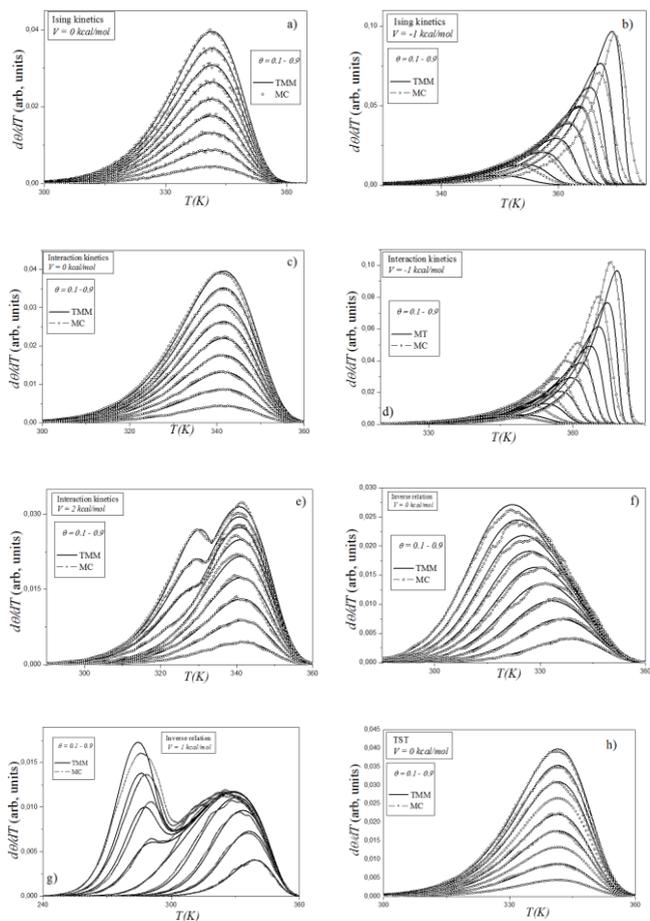


TPD con MC y TMM

Como se mencionó, el método TMM se utiliza para cálculos en equilibrio, por lo tanto, solo se puede obtener para TPD móviles. Esta es la razón por la cual solo se compararon los espectros de adsorción-desorción del adsorbato móvil con ambos métodos para esquemas dinámicos duros y suaves, con interacciones nulas, atractivas y repulsivas, y coberturas de $\theta=0.1$ a 0.9 .

Figura 3

TPD a) y b) Cinética de Ising, c), d) y e) Cinética de interacción, e) y f) Relación inversa y h) TST. En todos los casos para cubrimientos de $\theta=0.1$ a 0.9 .



CONCLUSIONES

Este artículo presenta un estudio en dos dimensiones sobre la influencia de los diferentes esquemas dinámicos propuestos en los observables cinéticos. Debido a la imposibilidad de obtener la solución exacta para las funciones de cubrimiento y correlación, se presentaron simulaciones de observables mediante dos métodos diferentes, Monte Carlo y matriz de transferencia. El ajuste entre ambos métodos fue preciso para el coeficiente de adhesión en todos los esquemas dinámicos estudiados. Los espectros obtenidos por desorción programada térmica en las simulaciones Monte Carlo y matriz de transferencia concuerdan aceptablemente dentro de los efectos de tamaño finito.

Existe una alta influencia de la dinámica en el proceso, con un comportamiento diferente dependiendo de si se trata de cinética dura o suave. Cuando las interacciones laterales aumentan, la aproximación al límite termodinámico se deteriora, especialmente en el caso atractivo. Sin embargo, los rangos de temperatura en los que se desorbe el sistema, los máximos y mínimos de las curvas, son independientes del método utilizado.

Los tiempos de cálculo de matrices para la matriz de transferencia son mucho más rápidos, unos pocos minutos, proporcionando información sustancialmente más rápida que los intervalos típicos de cálculo de Monte Carlo, que suelen ser de horas. Aunque con la misma geometría rectangular, se observa que la simulación se realizó en cuadrículas de sitios cuadrados de lado 100, mientras que, para la TMM, las cuadrículas son bandas infinitas de hasta 10 filas.

A esto se puede atribuir algunas de las diferencias más destacadas, para corroborar la TPDS se realizaron en cuadrículas alargadas ($L > 400$) con el mismo número de filas que la TMM, encontrándose una total concordancia entre las curvas.

Esta limitación del método TMM se puede reducir explotando la invarianza del modelo hamiltoniano (imponiendo condiciones periódicas de frontera translacional), reduciendo las matrices mediante herramientas de teoría de grupos.

Actualmente incluimos la teoría de la densidad funcional (DFT) como método complementario con Monte Carlo para el estudio de observables cinéticos debido a sus fortalezas combinadas. La DFT proporciona una

descripción precisa de las propiedades electrónicas y estructurales a nivel atómico, lo que es crucial para entender las interacciones fundamentales en los sistemas estudiados. Por otro lado, los métodos de Monte Carlo son altamente efectivos para simular procesos estocásticos y dinámicos a escalas de tiempo más largas. Al integrar DFT con Monte Carlo, podemos obtener una visión más completa y detallada de los fenómenos cinéticos, permitiendo una mejor predicción y análisis de los comportamientos observables en los sistemas complejos.

REFERENCIAS

- Kilpatrick, J. E. and Pitzer, K. S. (1949). Energy Levels and Thermodynamic Functions for Molecules with Internal Rotation. III. Compound Rotation. *The Journal of Chemical Physics*, 17, 1064–1075. <https://doi.org/10.1063/1.1747114>.
- Kreuzer, H. J. (1990). Theory of surface processes. *Surface science*, 231(1-2), 213-226. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(90\)90714-J](https://doi.org/10.1016/0039-6028(90)90714-J)
- Kreuzer, H. J., & Payne, S. H. (1988). Nonequilibrium thermodynamics of a two-phase adsorbate. *Surface Science*, 198(1–2), 235-262. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(88\)90482-7](https://doi.org/10.1016/0039-6028(88)90482-7).
- Payne, S. H., Kreuzer, H. J., Pavlovska, A. & Bauer, E. (1996). Multilayer adsorption and desorption Au and Cu on Mo (110), *Surface Science*, 345(1–2), L1-L10. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(95\)00969-8](https://doi.org/10.1016/0039-6028(95)00969-8).
- Payne, S. H., McEwen, J. S., Kreuzer, H. J., & Menzel, D. (2005). Adsorption and desorption of CO on Ru(0 0 1): A comprehensive análisis. *Surface Science*, 594(1–3), 240-262. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2005.07.031>
- Ree, F. H., & Chesnut, D. A. (1966). Phase Transition of a Hard-Core Lattice Gas. The Square Lattice with Nearest-Neighbor Exclusion. *The Journal of Chemical Physics*, 45, 3983–4003. <https://doi.org/10.1063/1.1727448>
- Rikvold, P. A., & Gunton, J. D. (1984). Scaling Function for the Structure Factor in First-Order Phase Transitions. *Physical Review Letters*, 49(4), 286-289. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.286>
- Steele, W. A., Zgrablich, G., & Rudzinski, W. (Eds.). (1996). *Equilibria and dynamics of gas adsorption on heterogeneous solid surfaces*. Elsevier.
- Van Santen, R.A., and Niemantsverdriet, J. W. (1995). *Chemical Kinetics and Catalysis*. Plenum Press. New York. Publisher Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9643-8>
- Zhdanov, V. P. (1986). Effect of lateral interactions of adsorbed molecules on adsorption and desorption rates. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2*, 82(2), 149-150. Doi 10.1039/F29868200149.

- Zhdanov, V. P., & Kasemo, B. (1997). Mechanism and kinetics of the NO CO reaction on Rh. *Surface Science Reports*, 29(2), 31-33, 35-90. [https://doi.org/10.1016/S0167-5729\(97\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0167-5729(97)00009-5).
- Zhdanov, V.P. (2013). *Elementary Physicochemical Processes on Solid Surfaces*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2373-8>

* * * * *

DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD DE POTENCIA UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET EMPÍRICA

Jesús Rubén Azor Montoya¹

Universidad de Mendoza, jesus.azor@um.edu.ar

Resumen: Con el objeto de garantizar un suministro eléctrico estable, seguro y eficiente, así como para mantener el funcionamiento óptimo de los equipos eléctricos y electrónicos en una amplia gama de aplicaciones industriales, comerciales y residenciales se ha dictado la norma IEEE Standard 1459-2000 que establece definiciones y métodos de medición para las cantidades de energía eléctrica en diferentes condiciones de operación. El presente trabajo establece una mecánica de trabajo que permite, a partir de una señal simulada compleja como las que se presentan en la práctica, descomponerla eficientemente mediante la Transformada Wavelet Empírica y desde allí calcular los citados índices. Dado que se cuenta con la señal original, es posible comparar los índices verdaderos con los obtenidos de la descomposición y así valorar los errores cometidos en su cálculo. Con esta propuesta se pretende desde las tareas de investigación en la Cátedra de Análisis de Señales, incorporar nuevas herramientas de procesamiento que permitan vincular los desarrollos teóricos con la realidad que el futuro profesional habrá de enfrentar. Además, se propone utilizar recursos disponibles en Internet y la utilización de softwares apropiados para internalizar los conceptos y promover aplicaciones, principalmente en trabajos de Tesis de Grado y Posgrado.

Palabras claves: Índices de Calidad de Potencia, Norma IEEE Standard 1459/2000, Transformada Wavelet Empírica

INTRODUCCIÓN

Los Índices de Calidad de Potencia (*Power Quality Indices*) son parámetros utilizados para medir y evaluar la calidad de la energía suministrada a un sistema eléctrico o a un equipo específico. Estos índices proporcionan información sobre la estabilidad, la eficiencia y la confiabilidad de la energía eléctrica en términos de su forma de onda, tensión, corriente y otros aspectos relacionados.

Ellos son herramientas importantes para identificar y cuantificar problemas y anomalías en la calidad de la energía, como armónicos, fluctuaciones de tensión, desequilibrios de fase, interrupciones momentáneas, caídas de tensión, sobretensiones, entre otros. Estos

problemas pueden afectar negativamente el funcionamiento de equipos eléctricos y electrónicos sensibles, causando mal funcionamiento, daños o una vida útil reducida. Así mismo, proporcionan información valiosa a los operadores de sistemas eléctricos y a los usuarios finales para tomar medidas correctivas y mejorar la calidad de la energía eléctrica suministrada. La monitorización constante de estos índices ayuda a prevenir problemas y a mantener la confiabilidad de los sistemas eléctricos.

Hay un estándar internacional llamado Norma IEEE Std. 1459-2000 promovida desde dicha institución que recibe su nombre desde el inglés como "*IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*" (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000; Mosquera, 2019).

La misma establece definiciones y métodos de medición para las cantidades de energía eléctrica en diferentes condiciones de operación, incluidas las condiciones no sinusoidales y desbalanceadas que a menudo se encuentran en sistemas eléctricos industriales y comerciales. La norma se centra en proporcionar una base común y precisa para la medición de energía eléctrica en estas condiciones más complejas. Algunos de los aspectos cubiertos por la norma IEEE Std. 1459-2000 incluyen:

- Definiciones de cantidades de energía eléctrica: La norma establece definiciones claras para términos relacionados con la medición de energía eléctrica, como potencia activa, reactiva, aparente, factor de potencia, distorsión armónica, etc.
- Métodos de medición: Proporciona directrices sobre cómo medir estas cantidades de energía eléctrica en diferentes condiciones, incluidas las no sinusoidales y desbalanceadas.
- Condiciones de operación: La norma aborda el funcionamiento de los sistemas eléctricos en condiciones balanceadas y desbalanceadas, y cómo medir la energía en estas situaciones.
- Definiciones de señales no sinusoidales: Se enfoca en la medición de energía en sistemas donde las formas de onda de tensión y corriente no son sinusoidales, lo que puede ser común en sistemas electrónicos de potencia.

En resumen, la norma IEEE Std. 1459-2000 proporciona una guía estándar para la medición precisa y coherente de cantidades de energía

eléctrica en diferentes condiciones operativas, lo que es esencial para comprender y evaluar el comportamiento de sistemas eléctricos complejos.

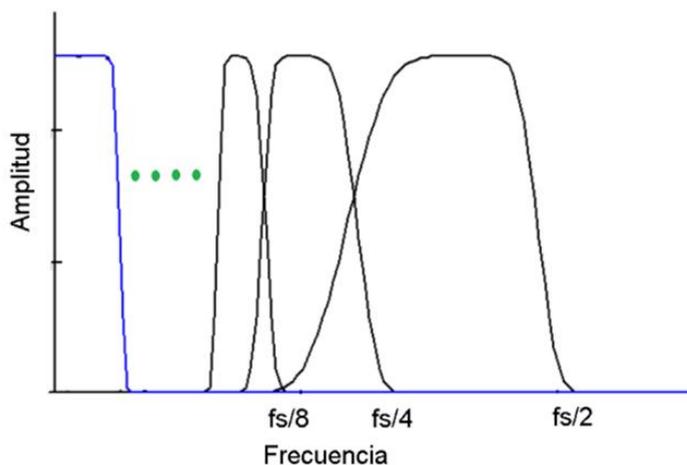
Materiales y métodos

EWT es un método de análisis de datos adaptivo que descompone una señal sin utilizar la “rigidez” de bases que proponen tanto la Transformada de Fourier (FT) como la Transformada Wavelet (WT). Esta transformada primero estima los componentes de frecuencia presentes en la señal dada, luego calcula los límites que encierran los más poderosos energéticamente y finalmente extrae los componentes oscilatorios conforme a los límites calculados (Azor, 2022; Giles, 2013;).

Al igual que la Transformada Wavelet (WT), se basa en la construcción de un conjunto de filtros pasa-banda, pero en este caso, circunscriptos a dónde se encuentre la información más relevante en el espectro de la señal. En la WT tradicional, los filtros pasa-banda presentan una respuesta en frecuencia como la mostrada en la Figura 1.

Figura 1

Respuesta en frecuencia del filtro pasa-banda (□, wavelets en negro) y paso-bajo (□ Escalante en azul) cubriendo la banda $[0 \text{ } fs/2]$ o equivalentemente $[0 \text{ } \square]$.

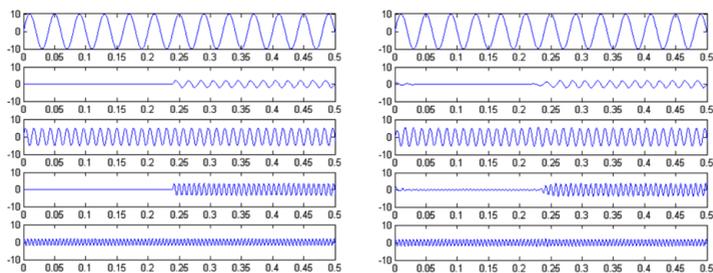


En cambio, en la EWT, se plantean filtros de Littlewood-Paley (Bahouri, 2019) asociados a los límites (*boundaries*) derivados de la Fast Fourier Transform (FFT) aplicada a la señal, más precisamente con los puntos de mayor energía de la misma. Esto se explicará más adelante.

De este modo, la EWT es una herramienta mucho más eficaz que la WT en la separación de modos en la señal en cuestión. Gilles, en su Toolbox (2019), suministra un paquete de funciones para el cálculo de la EWT y su análisis. En este trabajo se habrá de utilizar como entradas al algoritmo una señal de tensión y una de corriente que son simulaciones de casos posibles en un sistema de potencia monofásico, utilizada en el paper de Karthik, Umarikar, & Jain (2014) que se compone de cinco formas de onda, que se ven en la Figura 2, dadas a continuación:

Figura 2

A la derecha señal de tensión simulada, a la izquierda descomposición EWT de la misma.



Nota. Señal de tensión: 1) Senoide de 50 Hz, amplitud 10 V y fase 0° [0-0.50 s], 2.a) Senoide de 100 Hz, amplitud 2 V y fase 0° [0.12-0.28 s], 2.b) Senoide de 100 Hz, amplitud 2 V y fase 0° [0.37-0.50 s], 3) Senoide de 150 Hz, amplitud 5 V y fase 0° [0-0.37 s], 4) Senoide de 250 Hz, amplitud 3.5 V y fase 0° [0.12-0.50 s], 5.a) Senoide de 350 Hz, amplitud 2 V y fase 0° [0-0.28 s], 5.b) Senoide de 350 Hz, amplitud 2 V y fase 0° [0.37-0.50 s]. Señal de corriente: 1) Senoide de 50 Hz, amplitud 4 A y fase 30° [0-0.50 s], 2.a) Senoide de 100 Hz, amplitud 0.8 A y fase 60° [0.12-0.28 s], 2.b) Senoide de 100 Hz, amplitud 0.8 A y fase 60° [0.37-0.50 s], 3) Senoide de 150 Hz, amplitud 1.8 A y fase 48° [0-0.37 s], 4) Senoide de 250 Hz, amplitud 1.5 A y fase 86° [0.12-0.50 s], 5.a) Senoide de 350 Hz, amplitud 0.7 A y fase 75° [0-0.28 s], 5.b) Senoide de 350 Hz, amplitud 0.7 A y fase 75° [0.37-0.50 s]

Evidentemente las señales que surgen de la suma de estas cinco componentes, son no-estacionarias y un análisis con la Transformada de Fourier tradicional sería equivocado. Tanto la señal de tensión como la de corriente son muestreadas con una $F_s=5000$ muestras/s y conformarán sendas matrices, que para este caso tendrán $N=5000$ filas

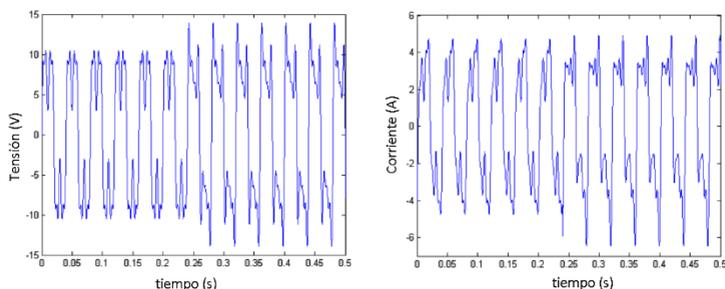
y $n=5$ columnas (cada una de ellas representa una de las 5 componentes).

Así estarán disponibles dos matrices $N \times n$, que se notarán como *corver* para las corrientes y *tenver* para las tensiones. Esto es para tener como referencia los valores de señal sin aplicar la descomposición EWT y de ese modo obtener los verdaderos indicadores de calidad de potencia para establecer errores cometidos con la utilización de la transformación.

Ahora, sumando las columnas de la matriz *tenver* se obtiene un vector de dimensión $N \times 1$ (que expresa la señal de tensión a analizar) que se incorporará como entrada al algoritmo EWT de Gilles (2013). Otro tanto se hace para hallar el vector de entrada correspondiente para la tensión a partir de la suma de las columnas de *corver*. Ambas señales se pueden ver en la Figura 3.

Figura 3

A la derecha señal de tensión simulada, a la izquierda descomposición EWT de la misma.



Con este procedimiento se logra la Transformación Wavelet Empírica de la señal de tensión en una nueva matriz que se notará con *tenewt*, donde cada columna es la descomposición EWT de la señal de tensión, del mismo modo se procede con la señal de corriente obteniendo la matriz *corewt*. Ambas matrices serán los insumos para obtener los indicadores de calidad de potencia.

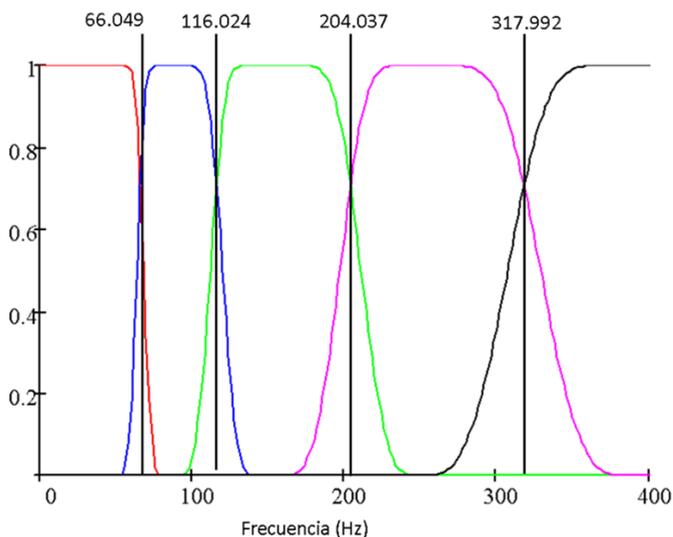
Ejecutado el algoritmo EWT de Gilles (2013), se podrá observar cómo forma los filtros de Littlewood-Paley a partir de la determinación de los

límites (boundaries) partiendo de la FFT de la señal para determinar las frecuencias en que son mayores energéticamente las señales (Figura 4).

A partir de este punto, mediante la utilización del Software Matlab™ (Mathwork) con el que está construido el Toolbox de Giles (2019), se determinan los Índices de Calidad de Potencia indicados por la norma IEEE Std. 1459-2000.

Figura 4

Respuesta en frecuencia de los filtros de Littlewood-Paley montados sobre las frecuencias de las componentes de las señales (50, 100, 150, 250 y 350 Hz).



RESULTADOS Y DISCUSIONES

Valor RMS de la corriente

Con el objeto de generalizar conceptos se definirán los índices $j=1\dots 5$ y $k=1\dots N$.

Para hallar el valor RMS de la corriente, la primera columna ($corewt_{1,k}$) corresponde a la fundamental y las restantes a las armónicas (Ecuaciones 1 a 3).

$$I_j = \sqrt{1/N \cdot \sum_k corewt(k, j)^2} \quad (1)$$

$$I_j = \sqrt{1/N \cdot \sum_k corewt(k, j)^2} \quad (2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{corewt(:,1)^2 + I_H^2} = \sqrt{corewt(:,1)^2 + \sum_{j>1} corewt(:, j)^2} \quad (3)$$

Para hallar los valores exactos (correspondientes a las señales sin transformar, en la matriz $corver$) se realizan los cálculos anteriores reemplazando $corewt$ por $corver$. La diferencia para todos los índices permite calcular el error relativo cometido (Ecuación 4).

$$e = \frac{|Indice_{Verdadero} - Indice_{Calculado}|}{Indice_{Verdadero}} \quad (4)$$

Los resultados para la corriente se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Resultados de Índice verdadero y calculado para las diversas corrientes

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_H	I_{rms}
I	2.8275	0.4211	1.0964	0.7420	0.4466	1.4592	3.1818
Calculado							
I	2.8284	0.4308	1.0949	0.7397	0.4482	1.4603	3.1832
Verdadero							
Error	0.0003	0.0226	0.0013	0.0031	0.0036	0.0007	0.0004

Valor RMS de la tensión

Del mismo modo que en el punto anterior, surgen las Ecuaciones 5, 6 y 7:

$$V_{\bar{j}} = \sqrt{1/N \cdot \sum_k \text{tenewt}(k, j)^2} \quad (5)$$

$$V_H = \sqrt{\sum_{j=2}^5 V_j} \quad (6)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\text{tenewt}(:,1)^2 + V_H^2} = \sqrt{\text{tenewt}(:,1)^2 + \sum_{j>1} \text{tenewt}(:, j)^2} \quad (7)$$

Los resultados para la tensión se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Resultados de V verdadero y calculado para las diversas tensiones

	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V _H	V _{rms}
V Calculado	7.0736	1.0725	3.0367	2.1667	1.2658	4.0828	8.1673
V Verdadero	7.0711	1.0770	3.0414	2.1575	1.2806	4.0872	8.1673
Error	0.0004	0.0042	0.0015	0.0042	0.0116	0.0011	0.0000

Distorsión armónica total (THD)

La distorsión armónica total de corriente y tensión está dada por las Ecuaciones 8 y 9:

$$I_{thd} = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^5 I_j}}{\sqrt{1/N \cdot \text{corewt}(:,1)}} \quad (8)$$

$$V_{thd} = \frac{V_H}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^5 V_j}}{\sqrt{1/N \cdot \text{newt}(:,1)}} \quad (9)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Resultados de distorsión armónica total de corriente y tensión verdadero y calculado

	I_{thd}	V_{thd}
Calculado	0.5161	0.5772
Verdadero	0.5163	0.5780
Error	$3.9589 \cdot 10^{-4}$	0.0014

Potencia aparente

La potencia aparente de cada componente se define a través de la Ecuación 10

$$S_j = I_j \cdot V_j \quad (10)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4*Resultados de distorsión armónica total de corriente y tensión verdadero y calculado*

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S _H	S _{Total}
S	20.0005	0.4516	3.3294	1.6077	0.5653	5.9541	25.9545
Calculado							
S	20.0000	0.4640	3.3300	1.5960	0.5740	5.9640	25.9640
Verdadero							
Error	0.0000	0.0267	0.0002	0.0074	0.0151	0.0017	0.0004

Potencia activa

La potencia activa de cada componente se define a través de la Ecuación 11

$$P_j = S_j \cdot \cos(\varphi_j) \quad (11)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5*Resultados de potencia activa verdadera y calculada*

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P _H	P _{Total}
P	17.3209	0.2258	2.2278	0.1122	0.1463	2.7121	20.0330
Calculado							
P	17.3205	0.2320	2.2282	0.1113	0.1486	2.7201	20.0406
Verdadero							
Error	0.0000	0.0267	0.0002	0.0074	0.0151	0.0030	0.0004

Potencia reactiva

La potencia reactiva de cada componente se define a través de la Ecuación 12

$$Q_j = S_j \cdot \sin(\varphi_j) \tag{12}$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Resultados de potencia reactiva verdadera y calculada

	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q _{Total}
Q	10.0002	0.3911	2.4742	1.6038	0.5460	15.0154
Calculado						
Q	10.0000	0.4018	2.4747	1.5921	0.5544	15.0231
Verdadero						
Error	0.0000	0.0267	0.0002	0.0074	0.0151	0.0005

La *potencia de distorsión de corriente* y la *potencia de distorsión de tensión* se pueden definir a través de las Ecuación 13 y 14 respectivamente

$$D_I = V \cdot I_H \tag{13}$$

$$D_V = V_H \cdot I_1 \tag{14}$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Resultados de potencia de distorsión de corriente y la potencia de distorsión de tensión verdadera y calculada

	D_I	D_V
Calculado	10.3297	11.5439
Verdadero	10.3259	11.5603
Error	$3.6051 \cdot 10^{-4}$	0.0014

La *potencia aparente de armónicas* y la *potencia de distorsión de armónicas* se pueden definir a través de las Ecuación 15 y 16 respectivamente

$$S_{HH} = V_H \cdot I_H \quad (15)$$

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (16)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados de potencia aparente de armónicas y la potencia de distorsión de armónicas verdadera y calculada

	S_{HH}	D_H
Calculado	5.9577	5.3046
Verdadero	5.9685	5.3127

Error	0.0018	0.0015
-------	--------	--------

El *factor de potencia total* es la relación entre la potencia activa total y la potencia aparente total y queda definida por la Ecuación 17

$$PF = \frac{P}{S} \tag{17}$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Resultados de factor de potencia total verdadero y calculado

	PF
Calculado	0.7718
Verdadero	0.7719
Error	1.5419.10 ⁻⁵

Para medir la *calidad de la potencia transmitida*, especialmente el comportamiento de oscilación, Willems (2004) propuso el uso del *factor de potencia de oscilación*, dado por la Ecuación 18

$$PF_{osc} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + 0.5.S^2}} = \frac{PF}{\sqrt{0.5 + PF^2}} \tag{18}$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10*Resultados de factor de potencia de oscilación verdadero y calculado*

	PF _{osc}
Calculado	0.7595
Verdadero	0.7595
Error	7.0358.10 ⁻⁶

Contaminación Armónica

La contaminación armónica se define como la relación entre la potencia aparente no fundamental y la potencia aparente fundamental. Queda definida por la Ecuación 19

$$HP = \frac{S_N}{S_1} \quad (19)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11*Resultados de contaminación armónica verdadera y calculada*

	HP
Calculado	0.8256
Verdadero	0.8256

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se puede observar el grado de exactitud que tiene la Transformada Wavelet Empírica en descomponer las distintas armónicas de las señales de tensión y corriente para evaluar los Índices de Calidad de Potencia.

Del mismo modo, se puede apreciar que la eficiencia de cálculo respecto a la Transformada Wavelet tradicional está en la concentración de EWT en los segmentos de mayor energía y generando filtros ad hoc para ellos.

Además, a lo largo de la exposición se aprecia un mecanismo replicable que permite verificar todo lo calculado y contrastarlo con las herramientas propuestas.

Finalmente, el trabajar sobre estos conceptos permite complementar prácticamente el desarrollo teórico que promueve la comprensión significativa de la Transformada Wavelet Empírica en un curso de Análisis de Señales avanzado.

REFERENCIAS

- Azor, J. R. (2022). Recursos computacionales para la comprensión de la Transformada Wavelet Empírica (EWT). In J. E. Calderón, J. Huespe & E. Anzoise (Ed.) *Investigación y educación en ciencias de la ingeniería* (Vol. 3, 2da ed. ampliada), pp. 139-152. Universidad Tecnológica Nacional.
- Bahouri, H. (2019). The Littlewood-Paley theory: a common thread of many works in nonlinear analysis. *EMS Newsletter*, 112, 15-23. DOI 10.4171/NEWS/112/4.
- Gilles, J. (2013). Empirical Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(16), 3999-4010. DOI: 10.1109/TSP.2013.2265222
- Gilles, J. (2025). Empirical Wavelet Transforms Toolbox. *MATLAB Central File Exchange*. Recuperado 11 junio, 2025 de https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42141-empirical-wavelet-transforms?s_tid=prof_contriblnk
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2000). *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-*

- Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions* (Norma number IEEE Std. 1459-2000). Doi: 10.1109/IEEESTD.2000.93398.
- Karthik, T., Umarikar A. C., & Jain, T. (2014). Empirical wavelet transform based single phase power quality indices. *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)* (pp. 1-6). Curran Associates. DOI: 10.1109/NPSC34096.2014.
- Mosquera, D. (2019). Análisis detallado del Standard IEEE 1459-2010 para sistemas eléctricos monofásicos lineales y no lineales. *Revista Vínculos*, 16(2), 327-332. DOI:10.14483/2322939X.16661
- Willems, J. L. (2004). Reflections on Apparent Power and Power Factor in Nonsinusoidal and Polyphase Situations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(2), 835-840. Doi: 10.1109/TPWRD.2003.823182.

* * *

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE VARIABLES PRELIMINARES EN EL PROCESO DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO

Alicia Carla Tapia¹; Hugo F. Tapia²

¹Universidad Nacional de San Juan– Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño / a.carla.tapia.r@gmail.com

²Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

Resumen: El proceso de diseño arquitectónico es un sistema complejo y dinámico debido a las interdependencias de tareas que deben coordinarse entre las diferentes partes involucradas. A medida que el proceso de diseño avanza, aumenta su complejidad; donde las primeras etapas son las más engorrosas para gestionar. En el proceso de diseño, es común utilizar información temprana de actividades precedentes para acortar la duración del proyecto; en lugar de tener que esperar a que lleguen los valores de los parámetros confirmados después de un análisis completo. El concepto de variable preliminar estimada es concurrente a lo largo de la historia del proceso de diseño arquitectónico. En la literatura científica se hallaron un gran número de artículos vinculados al tema, brindando un gran porcentaje de información, la cual requeriría ser ordenada para representar una base integral del tema. Detectando la necesidad de un marco integral que sintetice y clasifique las variables y parámetros de diseño, a fin de simplificar el proceso creativo en proyectos complejos. Es por ello que este artículo propone el desarrollo de un marco integral para sintetizar las variables detectadas en el proceso proyectual arquitectónico. El objetivo general del artículo es identificar y recabar las variables preliminares empleadas en el proceso de diseño arquitectónico; a través de una revisión y análisis de la literatura científica, en la base de datos Google académico, IGLC, Lean Construction Institute, Dialnet y ScieLO. Para, posteriormente, reflejar dicha información en un marco integral que represente una síntesis del tema desde el primer artículo registrado en la muestra bibliográfica al presente, mayo del 2024. La investigación a presentar es un primer paso hacia la comprensión de las diferentes variables preliminares empleadas en el proceso de diseño arquitectónico y la construcción de un marco unificado para futuros esfuerzos de investigación.

Palabras claves: Diseño edilicio, Diseño paramétrico basado en patrones, Parámetros de diseño, Variables preliminares, Metodología Lean-BIM.

INTRODUCCIÓN

El proceso de diseño es una fase de alta complejidad en el ciclo de vida de un proyecto debido a su naturaleza interactiva y generativa. Las iteraciones pueden resultar en mejoras, agregando valor, o en retrocesos que no aportan beneficios (Ballard & Zabelle, 2000). La toma de decisiones, en muchas ocasiones independiente, incrementa la complejidad, ya que puede impactar negativamente en la gestión del flujo de trabajo entre los actores implicados involucradas. Asimismo, las interdependencias entre disciplinas dificultan la extracción de información y la coordinación en esta fase (Khalife et al., 2018).

Dentro de las organizaciones, la participación de un mismo miembro en múltiples actividades complica aún más la coordinación del diseño (Chua & Hossain, 2011). En este sentido, Alarcón y Mardones (1998), identifican la falta de información completa como un problema crítico en el diseño, ya que los arquitectos, al entregar datos insuficientes, crean un escenario caótico que puede dilatar los tiempos de entrega, esenciales en un mercado competitivo.

Investigadores como Krishnan, Miller & Judge (1997), Bogus, Molenaar & Diekmann, (2005), y Maheswari & Varghese (2005) sugieren que disponer de información temprana puede agilizar el proceso de diseño. Sin embargo, el uso de datos preliminares puede derivar en rediseños si esta información cambia a medida que el proyecto progresa. Estudios como los de Bogus, Molenaar & Diekmann (2006) y Peña-Mora & Li (2001) proponen estrategias de superposición de tareas con cierto grado de independencia para reducir los tiempos en la fase de diseño.

Según Mallar (2010), las interdependencias en el proceso de diseño se organizan en tres dominios:

1. El dominio del proceso, que implica la red de actividades;
2. El dominio de la organización, siendo la red de personas; y
3. El dominio del producto, que se define por una red de componentes.

Estas interdependencias interrumpen el flujo de información, originando errores, demoras y rediseños. El rediseño se considera una tarea necesaria que utiliza información preliminar en forma de parámetros estimados para reducir las actividades dependientes en esta fase. La precisión de estos parámetros impacta en la probabilidad de rediseño, lo cual debe considerarse en la planificación (Chua & Hossain, 2011).

Así, este estudio plantea las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles son los parámetros estimados reconocidos en la academia de arquitectura y en metodologías Lean-BIM? En el contexto de la arquitectura paramétrica, basada en patrones, ¿qué parámetros se emplean para diseñar proyectos edilicios? ¿Es posible construir una matriz que los sintetice y permita su aplicación en el diseño arquitectónico?

Este estudio, por lo tanto, se orienta a identificar y recopilar los parámetros preliminares utilizados en el ámbito académico de la arquitectura y metodologías Lean-BIM, basados en la estimación de información temprana en el diseño conceptual arquitectónico y considerando las dependencias con disciplinas relacionadas, como estructuras e instalaciones (MEP).

OBJETIVOS

Objetivo general

Establecer una base de conocimiento exhaustiva sobre los parámetros y variables de diseño utilizados en la arquitectura paramétrica basada en patrones y en las metodologías Lean- BIM, mediante una revisión sistemática de la literatura académica.

Objetivos específicos

1. Buscar y seleccionar artículos relevantes en bases de datos académicas mediante fórmulas optimizadas.
2. Analizar y clasificar los artículos para verificar su relevancia y alineación con el tema de estudio.
3. Explorar términos y enfoques alternativos para ampliar la búsqueda sobre "variables y parámetros de diseño".
4. Crear una muestra representativa de literatura sobre diseño arquitectónico paramétrico, basado en patrones, y metodologías Lean-BIM.
5. Documentar el proceso de búsqueda y selección de artículos para futuras investigaciones en arquitectura y diseño.
6. Sistematizar y sintetizar la información recopilada para lograr una visión integral del tema investigado.
7. Publicar los resultados y las conclusiones obtenidas en el congreso ECEFI 2024 y en la revista perteneciente al instituto Lean, "Lean Construction Institute", en 2025.

METODOLOGÍA

Inicialmente, se consultó en Google académico (Scholar), en el cual se debe corroborar la integridad y precisión de la información en cada referencia seleccionada. La fórmula empleada aquí, fue la siguiente: “design parameter architecture”; con el filtro aplicado “In the title of the article”. Como resultado se obtuvieron 12 artículos. Luego de su fichaje y análisis, estos fueron descartados en su totalidad por no guardar relación con la temática trabajada

A continuación, se aplica una nueva fórmula: “design parameter” AND “architecture” OR “lean” OR “BIM”; aplicando el filtro “artículos de revisión”. Se obtuvieron 40 publicaciones, que luego del fichaje y primer análisis, fueron seleccionado 4 artículos como parte de la muestra y 5 más que deben analizarse en profundidad para definir si formarán parte de esta.

En segundo lugar, se recurrió a los artículos de conferencia publicados en la red de internacional de investigadores del ámbito académico y práctico de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC), denominado con las siglas IGLC, que significan “Grupo internacional para la construcción eficiente”. En esta ocasión, se empleó la fórmula: “design parameter”; dando como resultado 2 artículos encontrados, que luego del fichaje y primer análisis de contenido, pasaron a formar parte de la muestra de la presente investigación. A partir de los resultados obtenidos, se decidió continuar con el rastreo de artículos vinculados a la temática; para ello se decidió cambiar la palabra “parameter”, por: “variable”, “restriction” y “guideline” en IGLC. No se hallaron nuevos resultados.

En tercer lugar, se explora el repositorio existente en la página web “Lean Construction Institute” (LCI), la cual fue creada por la organización que lleva su nombre, en busca reunir a creadores de cambios, visionarios, líderes de opinión en todos los niveles de la industria AEC. En la línea de investigación “lean design”, se encontraron 6 artículos y 2 libros que pasaron a formar parte de la muestra en cuestión, una vez fichados y analizados.

A partir de la muestra obtenida, se decidió recurrir a otros motores de búsqueda y a una nueva fórmula a aplicar. En ScieLO, se empleó la fórmula: (ti:(arquitectura paramétrica) OR (lenguaje de patrones) OR (Christopher Alexander))”; donde se encontraron 4 artículos, de los cuales se rescató sólo 1 para la muestra. A continuación, se dividió la fórmula en: “((variables de diseño) or (parámetros de diseño) en

arquitectura paramétrica)” y “(Lenguaje de patrones de Christopher Alexander)”); para generar nuevas búsquedas. Dando como resultado en la exploración de la primera fórmula: 5 publicaciones, descartando una por no pertenecer al campo de investigación y otra por estar registrada en la exploración anterior-; de esta manera se suman 3 artículos más a la muestra. En cuanto a la segunda busca, no se encontraron resultados.

En Dialnet se hallaron 165 artículos, empleando la fórmula: “variables o parámetros de diseño en arquitectura paramétrica”; y 5 documentos, empleando: “lenguaje de patrones de Christopher Alexander”. Se rescataron 15 publicaciones y 2 respectivamente para la muestra. En Google académico, se halló 1 artículo, a través de la fórmula: “allintitle: parametric architecture and variable OR parameter”; y 2 artículos, empleando “allintitle: pattern language and variable OR parameter”. Para la muestra sólo se seleccionó la primera publicación encontrada.

Por último, se decidió proceder a una exploración más, empleando una nueva fórmula basada en la busca de “modelos paramétricos de diseño”, aplicado a los tres buscadores antes empleados. De esta manera se llegó a los resultados que se muestran en la Tabla 1. Como resultado, se obtuvo una muestra de 66 artículos, los cuales serán analizados en profundidad para extraer variables y/o parámetros de diseño empleados en el ámbito académico.

RESULTADOS

La investigación ha permitido clasificar las variables y parámetros de diseño edilicio presentes en la muestra bibliográfica en diferentes categorías, proporcionando una estructura clara para comprender los factores que influyen en la concepción arquitectónica. A continuación, se presenta un marco integral como síntesis del tema investigado:

Tabla 1

Búsqueda basada en “modelos paramétricos de diseño”

Motor de búsqueda	Fórmula aplicada	Artículos	
		Hallados	Muestra
Google académico	Modelo paramétrico de diseño	10	3
	Parametric model of building design	25	10
ScieLO	Parametric model of building design	6	3
	Parametric model of building design	1	1
Dialnet	Modelo paramétrico de diseño edilicio	4	1
	Parametric model of building design	50	17 ^a

Nota. Exploración basada en “modelos paramétricos de diseño” en los motores de búsqueda mencionados.

^a De la muestra seleccionada en este apartado, 5 artículos corresponden a artículos relacionados al primero de la búsqueda realizada.

- 1) Geometría y forma:
 - a) Geometría de los componentes: Forma y dimensiones de los elementos arquitectónicos (Larrondo Lizarraga, 2017).
 - b) Variantes de diseño: Capacidad de generar y evaluar diferentes variantes de diseño (Camporeale & Czajkowski, 2018).
 - c) Geometría de las formas libres: Modelado de geometrías complejas desde las fases iniciales del diseño (Larrondo Lizarraga, 2017).
 - d) Relaciones entre elementos geométricos: Interacción y relación entre diferentes elementos del diseño (Pires & Vieira, 2019).
 - e) Relación de ventana a pared: Influencia en la luz natural y consumo energético (Pratt & Bosworth, 2011).
- 2) Materiales y construcción:
 - a) Materiales: Selección y propiedades de los materiales (peso, resistencia, durabilidad) (Camporeale & Czajkowski, 2018).
 - b) Materialidad: Evaluación de la materialidad de la envolvente (Alsafafi, Alzahrani & Mehmood, 2023).

- c) Conexiones estructurales: Importancia de las conexiones para la integridad estructural (Campos & Celani, 2017).
 - d) Selección de Especies Vegetales: Consideración de características de especies para optimizar cubiertas verdes (Ortega Mendoza et al., 2010).
- 3) Condiciones ambientales y eficiencia energética:
 - a) Condiciones ambientales: Luz solar, ventilación y clima local (Camporeale & Czajkowski, 2018).
 - b) Eficiencia estructural: Optimización para soportar cargas y fuerzas (Larrondo Lizarraga, 2017).
 - c) Cargas térmicas: Consideración de cargas térmicas solares y de ocupación (Alсахafi, Alzahrani & Mehmood, 2023).
 - d) Índices bioclimáticos: Evaluación del desempeño energético en diferentes condiciones climáticas (Alсахafi, Alzahrani & Mehmood, 2023).
 - e) Aislamiento térmico: Estrategias para mejorar el aislamiento térmico (Alсахafi, Alzahrani & Mehmood 2023).
 - f) Factores de solar: Uso del factor solar para optimizar el diseño (Alсахafi, Alzahrani & Mehmood, 2023).
 - 4) Funcionalidad y uso del espacio:
 - a) Funcionalidad del espacio: Necesidades específicas del uso del edificio (Camporeale & Czajkowski, 2018).
 - b) Requerimientos funcionales: Influencia en la distribución de espacios (Park & Holt, 2010).
 - c) Interacción entre componentes: Cómo los diferentes elementos interactúan entre sí (Larrondo Lizarraga, 2017).
 - 5) Sostenibilidad y confort:
 - a) Sostenibilidad: Variables relacionadas con la eficiencia energética y el uso de materiales sostenibles (Camporeale & Czajkowski, 2018).
 - b) Condiciones de confort térmico: Análisis de confort térmico para los habitantes (Park & Holt, 2010).
 - 6) Metodologías y proceso de diseño:
 - a) Metodologías de trabajo estructuradas: Propuestas para la generación y control de formas libres (Park & Holt, 2010).
 - b) Protocolo de comunicación: Comunicación entre el modelo geométrico y los procesos de fabricación (García Del Valle Lajas, 2015).
 - 7) Aspectos estéticos:
 - a) Estética y acabados: Consideraciones estéticas y de acabados desde las etapas iniciales del diseño (Campos & Celani, 2017).

Esta clasificación facilita la comprensión de las múltiples dimensiones a considerar en el diseño edilicio, apoyando la planificación y ejecución de proyectos arquitectónicos complejos (Alsahafi, Alzahrani & Mehmood, 2023; Campos & Celani, 2017; García Del Valle Lajas, 2015; Khidmat et al., 2021; Larrondo Lizarraga, 2017; Park & Holt, 2010).

CONCLUSIONES

La relevancia de este estudio radica en la creación de un marco integral que sintetiza las variables preliminares del proceso de diseño arquitectónico, basado en un análisis exhaustivo de literatura científica sobre diseño arquitectónico y metodologías Lean-BIM, desde las primeras publicaciones hasta mayo de 2024.

El artículo evidencia cómo el diseño arquitectónico ha evolucionado de un proceso aislado y secuencial a uno más integrado y estructurado, priorizando la obtención de información temprana y el uso de herramientas colaborativas para reducir la complejidad y errores en el diseño. Este cambio refleja una evolución hacia enfoques que aprovechan tecnologías avanzadas, promoviendo la innovación y mejoras en las prácticas arquitectónicas.

Se observa en la historia de la industria AEC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción) una tendencia de transformación hacia la eficiencia y colaboración en el diseño, donde el proceso de diseño arquitectónico ha evolucionado mediante la integración de parámetros específicos. La revisión y análisis de la muestra literaria destacan la importancia de las variables preliminares en las primeras etapas del diseño, cuya identificación y clasificación mejoran la gestión de la información y el tiempo, minimizando errores futuros.

Asimismo, se subraya la complejidad del proceso de diseño arquitectónico, debido a la interdependencia entre disciplinas, lo que complica la planificación y coordinación entre los involucrados y afecta directamente el flujo de información y trabajo en los proyectos edilicios. Se concluye que el uso de información temprana, ya sea preliminar o estimada, puede acelerar el proceso de diseño, donde la precisión de esta información es clave para reducir el tiempo invertido en tareas de rediseño.

Además, este estudio aporta al conocimiento sobre la interdependencia de tareas y disciplinas en el diseño arquitectónico, promoviendo el uso de información temprana para optimizar el flujo de trabajo y reducir tiempos, una ventaja crucial en el contexto competitivo actual. Un marco

integral de variables preliminares en el diseño arquitectónico no solo es esencial para el diseño conceptual edilicio, sino que también tiene un marcado potencial para enriquecer futuras investigaciones y prácticas en metodologías avanzadas de diseño Lean-BIM dentro de la arquitectura paramétrica basada en patrones.

REFERENCIAS

- Alarcón, L. F., & Mardones, D. (1998, agosto 13-15). *Improving the design-construction interface* [Conference session]. 6th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Guarujá, Brazil. <https://iglc.net/Papers/Conference/8>
- Alsahafi, R., Alzahrani, A., & Mehmood, R. (2023). Smarter Sustainable Tourism: Data-Driven Multi-Perspective Parameter Discovery for Autonomous Design and Operations. *Sustainability*, 15(5), Article Number 4166. <https://doi.org/10.3390/su15054166>
- Ballard, G., & Zabelle, T. (2000). *Project Definition* (Informe N° LCI White Paper-9). http://p2sl.berkeley.edu/wp-content/uploads/2016/03/W009-Ballard_Zabelle-2000-Project-Definition-LCI-White-Paper-9.pdf
- Bogus, S. M., Molenaar, K. R., & Diekmann, J. E. (2005). Concurrent Engineering Approach to Reducing Design Delivery Time. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(11), 1179–1185. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2005\)131:11\(1179\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:11(1179))
- Bogus, S. M., Molenaar, K. R., & Diekmann, J. E. (2006). Strategies for overlapping dependent design activities. *Construction Management and Economics*, 24(8), 829–837. <https://doi.org/10.1080/01446190600658529>
- Camporeale, P. E., & Czajkowski, J. D. (2018). Optimización de Consumo Energético de un Modelo de Diseño Paramétrico. *Estudios del hábitat*, 16(1), Article Number e041. <https://doi.org/10.24215/24226483e041>
- Campos, F. M. de, & Celani, G. (2017). Subdivisão de formas livres em arquitetura com o objetivo de viabilização de sua fabricação: métodos e aplicações. *Interações (Campo Grande)*, 18(3), 3–22. <https://doi.org/10.20435/inter.v18i3.1463>
- Chua, D. K. H., & Hossain, M. A. (2011). A simulation model to study the impact of early information on design duration and redesign. *International Journal of Project Management*, 29(3), 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.02.012>
- García Del Valle Lajas, M. (2015). *Diseño para fabricación digital definición unívoca entre forma y fabricación en arquitectura*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/40011/1/MATIAS_GARCIA_DEL_VALLE_LAJAS_01.pdf
- Khalife, S., Mneymneh, B. E., Tawbe, A., Chatila, M. H., & Hamzeh, F. (2018). *Employing simulation to study the role of design structure matrix in*

- reducing waste in design*. In V. A. González (Eds.), IGLC 2018 - Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Evolving Lean Construction Towards Mature Production Management Across Cultures and Frontiers (pp. 879–889). <https://doi.org/10.24928/2018/0249>
- Khidmat, R. P., Fukuda, H., Kustiani, K., & Wibowo, A. P. (2021). A Benchmark Model for Predicting Building Energy and Daylight Performance in the Early Phase of Design Utilizing Parametric Design Exploration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (ESS)*, 830, Article Number 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/830/1/012008>
- Krishnan, H. A., Miller, A., & Judge, W. Q. (1997). Diversification and top management team complementarity: Is performance improved by merging similar or dissimilar teams? *Strategic Management Journal*, 18(5), 361–374. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199705\)18:5<361::AID-SMJ866>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199705)18:5<361::AID-SMJ866>3.0.CO;2-L)
- Larrondo Lizarraga, A. (2017). *Generación y control de formas libres en entornos BIM*. [Tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/112206>
- Maheswari, J. U., & Varghese, K. (2005). Project Scheduling using Dependency Structure Matrix. *International Journal of Project Management*, 23(3), 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.10.001>
- Mallar, M. A. (2010). Process management: an effective management approach. *Visión de Futuro*, 13(1). <https://hdl.handle.net/20.500.12219/4765>
- Ortega Mendoza, A. R., Morales Ramírez, J. D., López De Juambelz, I. R., & Canseco Martínez, M. A. (2010). Diseño del modelo paramétrico para evaluar el desempeño térmico de una cubierta verde. Caso de estudio: vivienda de interés social en la zona sur de la ciudad de México. *Memorias de la XXXIV Semana Nacional de Energía Solar* (Article Number SNES2010-ABC-038). Ed. Asociación Nacional de Energía Solar. https://www.paginaspersonales.unam.mx/files/251/_DISENO.pdf
- Park, K., & Holt, N. (2010). Parametric Design Process of a Complex Building In Practice Using Programmed Code As Master Model. *International journal of architectural computing*, 08(03), 359–376. DOI:10.1260/1478-0771.8.3.359
- Peña-Mora, F., & Li, M. (2001). Dynamic planning and control methodology for design/build fast-track construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127 (1), 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2001\)127:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:1(1))
- Pires, B., & Vieira, D. R. (2019). Projects as dynamic, multi-level temporary organizations: Advantages of an agent-based modeling approach. *Journal of Modern Project Management*, 6(3), 164–181. <https://journalmodernpm.com/manuscript/index.php/imp/article/view/JMPM01811/317>

Pratt, K. B., & Bosworth, D. E. (2011). A method for the design and analysis of parametric building energy models. *Proceedings of Building Simulation 2011 - 12th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp. 2499-2506). International Building Performance Simulation Association.
https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2011/papers/bs2011_1780.pdf

* * *

La Serie Selección de Textos es una producción editorial del Centro de Estudios en Filosofía, Lógica y Epistemología (CeFiLoE), del Instituto de Filosofía de la Universidad de Valparaíso, Chile. Nace en el año 2013 con el propósito de abrir un espacio a los autores para la publicación de libros y capítulos en el área de la filosofía y disciplinas afines. Todos los trabajos son sometidos a arbitraje a doble ciego (double blind review).

La Serie es dirigida por los profesores Juan Redmond y Rodrigo López Orellana y es editada por Jorge Budrovich. Su Comité Científico lo componen destacados académicos nacionales e internacionales, cuya responsabilidad es asegurar la calidad de las publicaciones.

Sus objetivos generales son: i. ofrecer publicaciones académicas de calidad científica; ii. proporcionar a la comunidad de académicos y estudiantes un medio de publicación sin fines de lucro; y iii. publicar libros que sean accesibles para todos, sin un costo asociado.

Volumen 1 - 2013

Ciencia, Tecnología e Ingeniería. Reflexiones filosóficas sobre problemas actuales

Editores: Carlos Verdugo Serna & Juan Redmond Cesarino

Volumen 2 - 2013

Amauta y Babel. Revistas de disidencia cultural

Editores: Osvaldo Fernández D. & Patricio Gutiérrez D. & Braulio Rojas C.

Volumen 3 - 2015

Conceptos y lenguajes, en ciencia y tecnología

Editores: Guillermo Cuadrado & Juan Redmond & Rodrigo López Orellana

Volumen 4 - 2015

Hacer filosofía con niños y niñas. Entre educación y filosofía

Editores: Juan Estanislao Pérez & Juan Pablo Álvarez & Claudia Guerra Araya

Volumen 5 - 2015

Estudios y preludios. Contribuciones a la filosofía desde Valparaíso

Editores: Jorge Budrovich Sáez & Rodrigo López Orellana

Volumen 6 - 2016

De camino a la filosofía. Sobre el aprendizaje de la filosofía escribiendo

Editores: Juan Redmond & Rodrigo López Orellana & Jorge Budrovich Sáez

Volumen 7 - 2019

Discusiones contemporáneas en filosofía de la mente. Voces Locales

Editor: Pablo López-Silva

Volumen 8 - 2020

El jardín de senderos que se bifurcan y confluyen: Filosofía, Lógica y Matemáticas

Editores: Diego P. Fernandes & Rodrigo López-Orellana

Volumen 9 - 2022

Filosofía y crisis

Editores: Marcelo Arancibia Gutiérrez, Valentina Vera Cortés & Yerko Mejías Rabet

Volumen 10 - 2025

Estudios sobre Filosofía y Ciencia

Editores: Mario Tapia Ramírez & Lucas Hinojosa-López

<https://rhv.uv.cl/index.php/SST>