

ISSN: 1668-9178

oet

N° 45

AÑO XXXII

Diciembre de 2023

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán



Ulises consultando el espíritu de Tiresias, quien asoma su canosa cabeza a los pies del héroe.
A los lados, Perimedes y Euríloco, compañeros de Ulises. Crátera, siglo IV a. C. Gabinete de medallas de la BNF, París.



UNIVERSIDAD
NACIONAL ✦
DE TUCUMÁN



ISSN 1668-9178



Dirección Científica: Dr. Ing. Nicolás Nieva
Dirección Ejecutiva: Dr. Ing. Nicolás Nieva
Diagramación y producción: Lic. Álvaro Astudillo
Revisión: P. Fanny Díaz

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN

Rector Ing. Sergio José Pagani
Vicerrectora Dra. Mercedes Leal

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA

Decano Dr. Ing. Miguel Ángel Cabrera
Vicedecano Mg. Ing. Eduardo Martel

cet Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería

Comisión Asesora: Dra. Paula Araujo, Dra. Georgina Elías, Dra. Cecilia Zapata.

Comité Editorial:

Dra. Liliana del Valle Abascal
Mg. Carlos Albaca Paraván
Dr. Carlos Albarracín
Dra. Paula Araujo
Dr. Adolfo María Ávila
Dra. Georgina Elías
Mg. María Isabel Giannini
Dra. Mariela González
Ing. Gustavo Eduardo Juárez

Ing. Nicolás Majorel Padilla
Dr. Eduardo Manzano
Dr. Oscar Alonso Marín Ramírez
Ing. Nora Perotti
Dr. Antonio Orlando
Ing. José Antonio Palacios
Dra. Sonia Vrech
Dra. Cecilia Zapata

Esta publicación figura en el **Directorio de Latindex**

Clasificación Decimal Universal (CDU): 501- 62

Director: Tel. +54-381-4364093 - Int. 7719

E-mail: revista@herrera.unt.edu.ar

El contenido de los trabajos firmados no representa necesariamente la opinión del editor, siendo de exclusiva responsabilidad de los autores.

Registro de Propiedad Intelectual: N° 303943 – ISSN 1668-9178

Este número cerró en Diciembre de 2023.

EDITORIAL

La mirada de Ulises 5

Escrito por Nicolás NIEVA

INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN

Diseño de un arreglo de antenas slot para banda X 8

Escrito por Juan E. ISE, Axel HEMSY, Mariano FAGRE, Mariano G. CARCAMO y Adán J.A. LEMA

Rehabilitación sísmica de puentes típicos en Argentina mediante aisladores elastoméricos con núcleo de plomo 14

Escrito por José A. SARACHO, Gustavo A. PÉREZ, Oscar DIP, Analía MOLINA TRIVIÑO y Sergio José PAGANI

Evaluación geológica ingenieril preliminar de la caída de rocas ("rockfall") en la RP N° 307, Tafí del Valle, Tucumán 25

Escrito por Luciano ANTOLINI, Liliana ABASCAL y Juan Carlos GUZMÁN

Análisis de variables que influyen en la cristalización de carbonato de litio calidad batería 35

Escrito por Diego Alejandro GONZÁLEZ, María Cecilia LUCENA, Mónica Beatriz GRAMAJO y Santiago BRANCHER

Orden y auto-organización en un modelo XY de dipolos magnéticos 43

Escrito por Jeremías BATTICH y Darío Javier ZAMORA

DOCENCIA

La importancia del croquis en ingeniería 50

Escrito por Luis Ariel GALVÁN y José Antonio PALACIOS

Modificaciones en la enseñanza de sistemas de representación y su impacto en la opinión estudiantil 56

Escrito por Hugo Roger PAZ, Carla CINQUEMANI, Valeria Irina RIVERO, Martín Jorge DONAIRE BURGOS y María Teresa CARDOZO

Determinación de la constante e/m por método helicoidal de Busch 65

Escrito por Gerónimo ÁVILA, Santiago PAZ, Ana ARAGÓN RODRÍGUEZ, Facundo Máximo ABACA, Miguel CARRILLO y José Valentín VENCHIARUTTI

Experimento de la gota de aceite de Millikan 71

Escrito por Alfredo Alejo SORAIRE, Enzo Fabrizio IRIARTE, Facundo Máximo ABACA, Miguel CARRILLO y José Valentín VENCHIARUTTI

INFORME TÉCNICO

- Cascada electromecánica convertidora de frecuencia para ensayos en transformadores de distribución 76
Escrito por Pablo Fernando DUBERTI, Javier GONZALEZ CHAMBEAUD, Elías GRANÉ y Oscar Eduardo SÁNCHEZ

NOTAS, ARTE Y OPINIÓN

- 14 años de un sueño. Y la dura realidad que lo hizo realidad 83
Escrito por Miguel CARRILLO

RESÚMENES Y POSTERS DE AFITA 2023

- Presentación 87
Escrito por Horacio G. BRIZUELA

- Adaptación del experimento de Leonardo da Vinci para estudiar la gravedad 88
Escrito por Horacio G. BRIZUELA

- Realidad Virtual: conflicto de acomodación y vergencia 91
Escrito por Lucas GUTIÉRREZ

- Estudio estructural, óptico y de transporte eléctrico en films de nanopartículas de ZnO 93
Escrito por Nelson L. PAZ, Nadia C. VEGA, Oscar MARIN RAMÍREZ y David COMEDI

- Software de simulación de óptica geométrica 96
Escrito por Gerónimo VARGAS HERRERA

PARA AUTORES

- Instrucciones para autores 98

La mirada de Ulises

Nicolás NIEVA

El Ulises de la Odisea es, sin duda, una de las figuras más inquietantes y elusivas de la mitología griega. Su astucia y versatilidad, que tanto lo distancian del heroísmo convencional, han intrigado a poetas y pensadores a lo largo de los siglos.

Preguntarnos por qué Ulises representa una amenaza para los dioses del Olimpo es, en cierto modo, preguntarnos por la naturaleza misma de lo divino. Pues ¿acaso no es la inteligencia de Ulises, su capacidad para burlar los designios de los dioses, una suerte de rebelión contra la soberanía de lo sobrenatural? En él vemos encarnada la tentativa del hombre por desafiar el misterio y las leyes que parecen regir el cosmos.

Su viaje de retorno a Ítaca, ¿no es acaso el símbolo de la búsqueda incesante del alma humana, su anhelo de hallar un lugar en el mundo, una morada donde poder reconocerse? Y en esa lucha por recobrar el hogar perdido, ¿no se evidencia la voluntad del ser mortal por imponer su identidad, por negar la arbitrariedad del destino?

Zeus, el padre de los dioses, parece oscilar entre la admiración y el temor ante la figura de Ulises. Reconoce su astucia, su ingenio, pero siente también la necesidad de doblegar ese espíritu indómito, de recordarle a los hombres los límites de su condición. Y en esa tensión entre castigo y clemencia se dibuja la eterna dialéctica entre la libertad y la necesidad, entre lo divino y lo humano.

La mirada de Ulises, esa mirada honda y reflexiva de que hablan los mitólogos, es en el fondo la mirada del hombre mismo, ese ser condenado a comprender, a interrogar, a desafiar lo que lo trasciende. Y en esa actitud irreverente reside, quizá, la verdadera grandeza del héroe de la Odisea.

La mirada de Ulises es, en el fondo, la mirada del hombre moderno. Ese ojo astuto y vigilante, como lo calificara alguien, no es sino el reflejo de nuestro propio anhelo por penetrar los misterios del mundo. Pues si Ulises supo burlar los designios de los dioses con su ingenio y perspicacia, nosotros, los hombres del siglo XXI, hemos osado desafiar las leyes mismas de la naturaleza. La ciencia y la tecnología son nuestros nuevos Olimpos, las fuerzas sobrenaturales que intentamos comprender y dominar.

Y así como Ulises interrogaba al viento y al mar, nosotros interrogamos a las partículas y a los algoritmos, buscando descifrar el orden oculto del universo. Esa mirada que se pierde en los vericuetos de la matemática o se deslumbra ante las imágenes del telescopio, ¿no es acaso el eco de aquella otra mirada, la del héroe griego, que se posaba sobre los monstruos y las divinidades?

Porque en el fondo, lo que mueve al hombre moderno no es sino la misma inquietud que guiaba a Ulises: la necesidad de hallar un sentido, de conquistar un hogar en medio del caos. Y es esa mirada, a un tiempo curiosa y desafiante, la que nos une a través de los siglos con el astuto navegante de la Odisea.



Odiseo y las sirenas (Trustees of the British Museum).

Al igual que Ulises, los científicos se enfrentan a peligros y obstáculos en su búsqueda del conocimiento. Deben sortear las limitaciones de la tecnología, las dificultades del experimento, e incluso las reticencias de sus pares y las instituciones. Su ingenio y perseverancia son puestos a prueba constantemente.

Así, en su lucha incansable por descifrar los enigmas de la realidad y comprender los misterios del universo, los científicos modernos se erigen como los nuevos héroes de nuestro tiempo, herederos de la tradición épica inaugurada por el ingenioso Ulises.

En este número 45 de la revista CET se publican cinco artículos de la categoría de Investigación, desarrollo e innovación (IDI), cuatro artículos de la categoría Docencia, un Informe técnico, una nota en la categoría Notas, arte y opinión y,

dentro de esta misma categoría, se incluye una breve sección dedicada al evento Afita 2023.

En la categoría de IDI, el trabajo de Juan ISE y colaboradores muestra el diseño de un arreglo lineal *broadside* de antenas *slot* en guía rectangular, alcanzando alta ganancia y buena relación de lóbulos secundarios, permitiendo escaneo variable ideal para aplicaciones radar en ámbito aeroespacial. En el trabajo de José SARACHO y colaboradores, se presenta una metodología para evaluar la vulnerabilidad sísmica de puentes usando análisis dinámico no lineal con elementos finitos, considerando interacción suelo-estructura. Por su parte, en el trabajo de Luciano ANTOLINI, desde una perspectiva geológica, se estudia el problema de los desprendimientos de rocas que afectan el tránsito La Ruta Provincial 307 en Tucumán y se sugieren algunas soluciones. En el artículo de Diego GONZÁLEZ y colaboradores se

hace mención al proceso de purificación de carbonato de litio, específicamente a la etapa de cristalización. Este proceso es importante en la producción de carbonato de litio de calidad batería. Finalmente, en el trabajo de Jeremías BATTICH y Javier ZAMORA se investiga sobre la autoorganización en dipolos magnéticos, observando cómo interacciones microscópicas generan estructuras complejas. Sus resultados respaldan la segunda ley de la termodinámica y ofrecen perspectivas sobre la dinámica y termodinámica de sistemas complejos, con implicaciones en diversos campos como física de la materia condensada y ciencias de la complejidad.

Dentro de la categoría Docencia, los autores Ariel GALVÁN y José PALACIOS presentan un trabajo que busca revalorizar el croquis como herramienta clave en el proceso creativo, brindando a estudiantes de ingeniería y diseño habilidades de dibujo analógico. Los resultados muestran que los alumnos lograron incorporar el croquis como herramienta de diseño y para organizar el proceso proyectual. Por otra parte, en el artículo de Roger PAZ y colaboradores se aborda el estudio de los cambios en la enseñanza de “Sistemas de Representación” durante la pandemia y su impacto en la percepción de los estudiantes. Mediante minería de texto y procesamiento de lenguaje natural, los resultados muestran que los cambios fueron bien recibidos, pero a partir de ciertos cuestionamientos los docentes proponen ajustes en las estrategias didácticas. Luego, los autores Gerónimo ÁVILA y colaboradores, alumnos y docentes de la asignatura “Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea” del Departamento de Física de la FACET, describen en su artículo el montaje de equipos e instrumentos para determinar experimentalmente la relación carga-masa del electrón mediante el método de Busch. Los resultados obtenidos concuerdan con el valor teórico dentro del margen de error experimental. Finalmente, dentro de esta misma categoría, Alfredo SORAIRE y colaboradores, al igual que el artículo anterior alumnos y docentes de la asignatura “Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea” del Departamento de Física de la FACET, realizaron un montaje experimental para emplear el método de Millikan para medir propiedades de gotas ionizadas de aceite, obteniendo

radios y cargas a escala microscópica. Si bien no determinaron directamente la carga del electrón, se realizaron deducciones al respecto.

En un trabajo de la categoría Informe Técnico, los autores Pablo DUBERTI y colaboradores expusieron el diseño e implementación de una cascada convertidora de frecuencia para alimentar equipos eléctricos a frecuencias de hasta 150 Hz y 800 V, con dos objetivos: 1) Realizar los protocolos de ensayo de tensión inducida para transformadores, según normas internacionales. 2) Crear un sistema didáctico para mostrar a estudiantes de ingeniería eléctrica los fenómenos electromagnéticos involucrados.

Para cerrar el contenido de este número, en la categoría Notas, Arte y Opinión, el autor Miguel CARRILLO relata la evolución de las alternativas virtuales brindada por el Laboratorio de Transductores y Física Nuclear, del Departamento de Física de la FACET, desde el año 2010 hasta la actualidad. En un principio, para cubrir las necesidades de una estudiante embarazada, se desarrolló un simulador interactivo de un experimento de radiación usando JClic, permitiendo a los estudiantes realizar la práctica de forma virtual. Este simulador, luego migrado a PowerPoint y Flash, brindó nuevas oportunidades, pero también enfrentó retos por la obsolescencia tecnológica. Durante la pandemia COVID-19, el equipo docente creó más experimentos virtuales usando JClic, PowerPoint y Geogebra, lo que permitió a los estudiantes participar de forma remota, incluso en el programa Laboratorio Cero de la Comisión Nacional de Energía Atómica. Tras la pandemia, estos recursos virtuales se mantienen como alternativa para aquellos que no pueden asistir presencialmente. Finalmente, incluido dentro de esta categoría se presenta una breve serie de resúmenes y pósters de la actividad Afita 2023. Con este encuentro la Asociación Física Argentina, Filial Tucumán, realizó una muestra local para dar a conocer los trabajos de investigación presentados por colegas en congresos científicos, incluyendo también proyectos estudiantiles y conferencias del Instituto de Física del Noroeste Argentino. Esto permite compartir estos valiosos trabajos con la comunidad académica, estudiantes y público en general.

Diseño de un arreglo de antenas slot para Banda X

ISE, Juan E. ¹; HEMSY, Axel ²; FAGRE, Mariano ¹;
CARCAMO, Mariano G. ¹; LEMA, Adán J.A. ¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología.
Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación, Tucumán. Argentina.

² Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología.
Departamento de Física, Tucumán. Argentina.

Resumen

Se presenta el diseño y simulación de un arreglo de antenas slot para Banda X, (10 Ghz), excitando en fase cada elemento, por lo que el patrón de radiación es de tipo broadside. Los resultados observados en la simulación muestran buenas características de radiación y eficiencia, el comportamiento del arreglo frente a variaciones de frecuencia también fue evaluado, comprobando la capacidad de barrido del haz de este tipo de antenas.

Palabras clave: Antenas Slot, Arreglo de antenas, Antenas microondas.

X Band Slot Antenna Array Design

Abstract

Design and simulation of a slot antenna array for Band X (10 Ghz) is presented, exciting each element in phase, so the radiation pattern is broadside. The results observed in the simulation show good radiation and efficiency characteristics, the behavior of the array against frequency variations was also evaluated, checking the beam scanning capacity of this type of antennas.

Keywords: *Slot antennas, Array antennas, Microwave antennas.*

Introducción

En el ámbito de las comunicaciones inalámbricas y la transmisión de señales, el diseño y desarrollo de antenas eficientes y versátiles ha sido una búsqueda constante. Entre las diversas estructuras, las antenas slot han emergido como una

alternativa prometedora debido a su buen rendimiento, diseño compacto, capacidad de manejo de potencia y simplicidad de fabricación, **Rengarajan** (2009).

Desde mediados del siglo pasado, las características de radiación de las ranuras en guías de onda, fueron estudiadas por **Watson** (1946) y fundamentadas por **Stevenson** (1948), básicamente

el funcionamiento de este tipo de antenas se basa en la abertura o ranura practicada en un material conductor, que permite la radiación electromagnética. Esta técnica ha evolucionado significativamente desde sus primeros diseños, utilizándose principalmente en el rango de frecuencias de UHF y microondas, con particular interés en aplicaciones de radar, **Sekretarov et al.** (2010). La simplicidad de su estructura, junto con su capacidad para integrarse en diferentes sustratos, ha despertado un interés creciente en la comunidad científica y tecnológica.

El propósito principal de esta investigación es explorar el diseño de antenas slot, centrándose en los fundamentos teóricos y prácticos que influyen en su eficacia, **Ripoll y Sierra** (2015). Se analizarán aspectos clave, las estrategias de diseño, las técnicas de simulación y caracterización.

En la Fig. 1 se muestra un esquemático de la antena propuesta, donde se puede ver que la misma consiste en una serie de ranuras prácticas sobre la cara más ancha de guía de onda, que al ser excitada en modo dominante TE₁₀, genera corrientes sobre las paredes de la misma, estas son captadas por las ranuras, que están desplazadas del centro de la pared, produciendo la radiación a través de las aberturas.

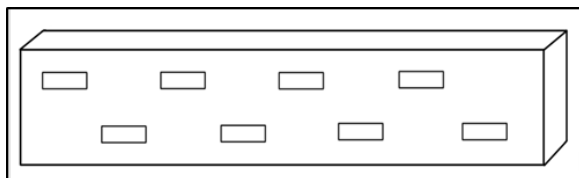


Figura 1: Esquemático de un Arreglo de Antenas Slot.

Para el diseño se utiliza una guía de onda rectangular WR-90, con dimensiones con un espesor de , Fig. 2, que puede operar en el rango de frecuencias que va de 8.2 Ghz a 12.4 Ghz, la frecuencia operación utilizada para el diseño es 10 Ghz.

El arreglo se formará con 16 antenas de tipo slot (ranura) implementadas sobre una de las caras de ancho “a” de la guía de onda rectangular. La guía se excita desde uno de sus extremos, cortocircuitando el extremo opuesto, la distancia de la última ranura al extremo en CC será de $\lambda_g/4$, o múltiplo impar, comportándose como un circuito abierto.

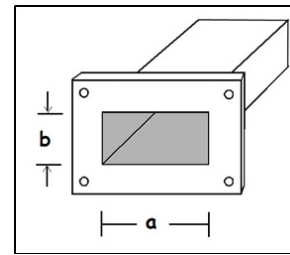


Figura 2: Dimensiones de la guía de onda WR-90.

Metodología y resultados

El diseño del arreglo requiere conocer, posición, ancho y longitud de las ranuras, que se realizarán en la pared de la guía de onda, los datos de inicio serán:

- Frecuencia de operación
- Número de ranuras
- Relación del lóbulo principal al secundario

Esto último si se optara por una distribución de amplitudes no uniforme, lo cual no es objeto en este trabajo.

Determinación de la posición de las ranuras

De acuerdo con **Misilmani et al.** (2015), los centros de las ranuras que limitan con los extremos de la guía de onda deben estar a $1/4$ o $3/4$ de λ_g (longitud de onda guiada) de los mismos y la distancia entre los centros de dos ranuras consecutivas debe ser de $1/2$ de λ_g , Fig. 3.

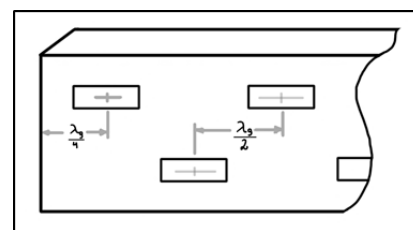


Figura 3: Dimensiones del Arreglo de Antenas Slot.

La longitud de onda de la antena, a la frecuencia de operación, es de $\lambda_0 = 2.998$ [cm], y la longitud de la onda guiada se la puede calcular empleando la siguiente ecuación, **Misilmani et al.** (2020):

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \rightarrow \lambda_g = 3.971[\text{cm}] \quad \frac{\lambda_g}{2} = 1.985[\text{cm}] \quad \frac{\lambda_g}{4} = 0.993[\text{cm}] \quad (1)$$

Ancho de ranura

En la experiencia, el ancho de ranura más utilizado en banda X es $w = 1.58$ [mm] para $a = 22.86$ [mm]. En caso de utilizar una guía de onda diferente, puede obtener el nuevo ancho w en forma proporcional, **Misilmani et al.** (2015), dado que no es una medida crítica.

$$w = a * \frac{1.58}{22.86} [mm] \quad (2)$$

Longitud de la ranura

Según **Stevenson** (1947) la longitud de la ranura debe ser cercana a la primera resonancia, tomando 0.98 de $\lambda_0/2$ o lo que es lo mismo, 0.49 de λ_0 . Teniendo en cuenta esto, y luego de algunas iteraciones, se fijó el largo de la ranura es de $L = 0.472 * \lambda_0 = 1.415$ [cm].

Desplazamiento de ranura respecto de línea media

Consideramos un arreglo con distribución uniforme, donde todas las antenas son excitadas con la misma fase, por lo tanto, todas las ranuras tendrán la misma distancia a la línea media, Fig. 4, de esta forma se obtiene una relación de lóbulo secundario en el orden de $SLR \leq -13$ [db].

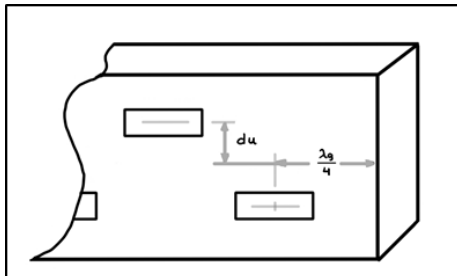


Figura 4: Dimensiones del Arreglo de Antenas Slot.

Otras distribuciones de amplitud son posibles, como Taylor o Chebyshev, para ajustar la relación entre el máximo y los lóbulos secundarios, **Balanis** (2005)

La separación de las ranuras, con respecto a la línea media, puede estimarse según (3), **Misilmani et al.** (2015)

$$du = \frac{a}{\pi} * \sqrt{\arcsin\left(\frac{1}{N+G}\right)} \quad (3)$$

Con N igual al número de ranuras y G :

$$G = 2.09 * \frac{a}{b} * \frac{\lambda_0}{\lambda_g} \left(\cos(0.464\pi * \frac{\lambda_0}{\lambda_g}) - \cos(0.464\pi) \right)^2 \quad (4)$$

Dando como resultado una separación de las ranuras con respecto al eje central de $du = 2.14$ [mm].

Simulaciones y resultados obtenidos

La estructura simulada se muestra en la Fig. 5 donde se pueden ver las ranuras y su disposición a lo largo del flanco de la guía.

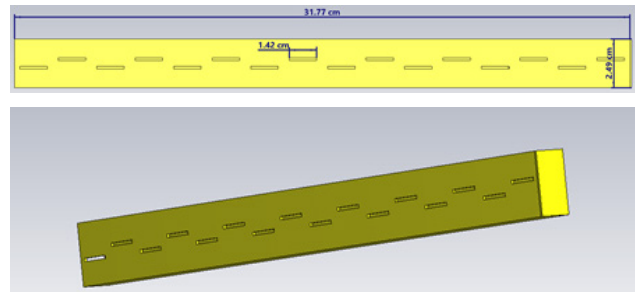


Figura 5: Estructura modelada en el Software.

El arreglo simulado presenta una buena respuesta dentro de la banda de operación de la guía de onda, con características resonantes en la frecuencia de diseño, Fig. 6.

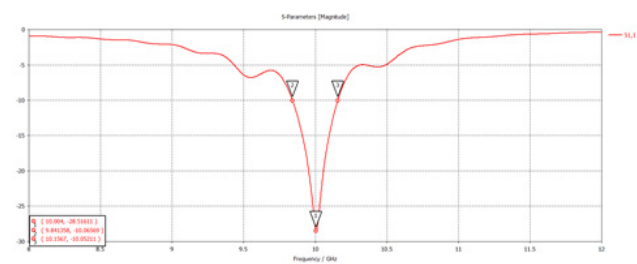


Figura 6: Coeficiente de reflexión del arreglo.

La relación de onda estacionaria se muestra en la Fig. 7, considerando como referencia el valor de $VSWR = 2$, el ancho de banda del arreglo es $AB = 340$ Mhz, siendo este tipo de estructuras muy resonante, los resultados obtenidos son aceptables, considerando que este tipo de arreglos no es de banda ancha.

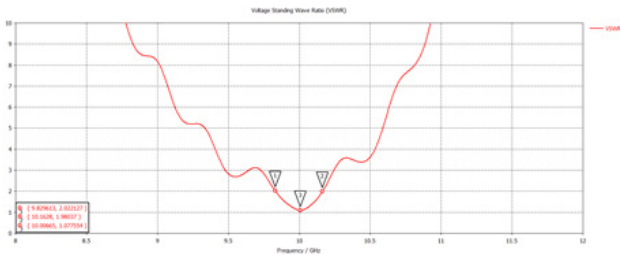


Figura 7: Relación de Onda Estacionaria, VSWR

El patrón de radiación del arreglo de antenas se muestra en Fig. 8 y Fig. 9, los datos se detallan en la Tabla 1.

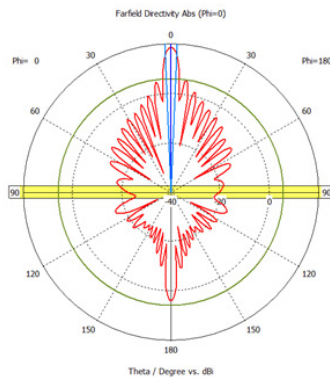


Figura 8: Diagrama polar con $\varphi = 0^\circ$ a una Frecuencia de 10[GHz].

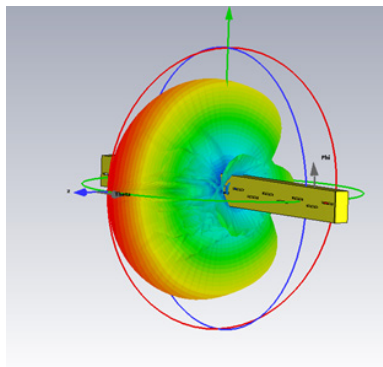


Figura 9: Patrón de Radiación 3D del arreglo de antenas a una Frecuencia de 10[GHz].

Tabla 1: Parámetros de radiación del arreglo

Frecuencia	10 Ghz
Directividad	18.72 dBi
Eficiencia de Radiación	-0.03305 dB
Eficiencia Total	-0.02641 dB
Dirección haz principal	0 °
Ancho de Banda 3 dB	4.7°
Relación lóbulo secundario	-12.9 dB

Variación de la dirección del máximo del arreglo

El arreglo diseñado tiene características de radiación broadside, por lo tanto, la excitación de cada elemento del arreglo es en fase, ahora bien, cuando la frecuencia de excitación varía, los elementos del arreglo dejan de estar en fase, por lo que el máximo del patrón de radiación cambia de dirección, Fig. 10 y se muestran en la Tabla 2.

Este comportamiento permite apuntar el haz principal del arreglo en diferentes direcciones, variando la frecuencia de excitación, lo cual es muy útil en aplicaciones de radar, por ej., en forma sencilla y compacta, puesto que no requiere variadores de fase en cada elemento.

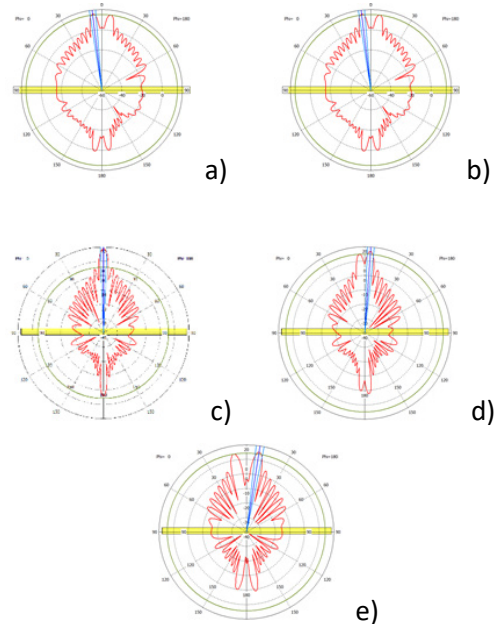


Figura 10: Variación del máximo de radiación a)11 Ghz b)10.5 Ghz c)10 Ghz, d)9.5 Ghz e)9 Ghz

Tabla 2: Variación del haz con la frecuencia

Frecuencia Ghz	Dirección Máximo	Directividad Dbi
9	9°	15.6
9.5	4°	16.9
10	0°	18.7
10.5	-4°	17
11	-7°	16.1

Conclusión

Se procedió al diseño de un arreglo lineal broadside de antenas slot sobre una guía de

onda rectangular WR-90, los datos presentados en la Tabla 1, muestran que la ganancia del arreglo obtenida fue de 18.7 dBi, a la frecuencia de diseño, la relación con los lóbulos secundarios es superior a -12.9 db, y la eficiencia del arreglo 0.026 db, obteniendo resultados similares a otros trabajos realizados.

La posibilidad de usar este tipo de antenas para hacer escaneos fue analizada, resultando en variaciones de 8° por Ghz, por lo que el uso de este tipo de antenas en arreglos planares, para aplicaciones de Radar, sobre todo en ámbito aeroespacial, sea de interés por su diseño simple y compacto.

Referencias bibliográficas

Balanis, C. (2005) "Antenna Theory", Wiley-Interscience.

Misilmani, H. El, Al-Husseini, M. y Kabalan, K. (2020) "Design procedure for planar slotted waveguide antenna arrays with controllable sidelobe level ratio for high power microwave applications", Wiley.

Misilmani, H. El, Al-Husseini, M. y Kabalan, K. (2015) "Design of Slotted Waveguide Antennas with Low Sidelobes for High Power Microwave Applications".

Misilmani, H. El, Al-Husseini, M., Kabalan, K. y El-Hajj, A. (2014) "A Design Procedure for Slotted Waveguide Antennas with Specified Sidelobe Levels", 2014 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS), IEEE.

Rengarajan, S. R. (2009) "A Tutorial on Design and Analysis of Waveguide-Fed Slot Array Antennas" Applied Electromagnetics Conference (AEMC), 14-16, Dec. 2009, pp 1-2.

Ripoll, L. y Sierra, M. (2015) "Design, Simulation and Test of a Slot Antenna Array Using One Parameter Taylor Synthesis in the GHz Range", IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 10.

Sekretarov, S., Vavriv, D. M. y Shevtsova, L. V. (2010) "Slotted Waveguide Antenna Arrays for Airborne Radars", 18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 14-16.

Stevenson, A.F. (1948) "Theory of slots in rectangular waveguides", J. Appl. Phys., 1948, 19, pp. 24-38.

Watson, W. H. (1946) "Resonant slots," Inst. Elec. Eng., vol. 93, pt. IIIa, pp. 141-711.

AUTORES

ISE, Juan E - ORCID  0000-0002-1009-0711

Ingeniero Electricista Orientación Electrónica (1989). Profesor Asociado Cátedra de Electromagnetismo, Profesor Adjunto Cátedra de Circuitos Eléctricos II, de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Director del Laboratorio de Telecomunicaciones.

E-mail: jjise@herrera.unt.edu.ar

HEMSY, Axel - ORCID  0000-0002-3810-3684

Licenciado en Física. Auxiliar Docente Graduado Cátedra de "Física Experimental II", de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Becario Doctoral CONICET.

E.mail: ahemtsy@herrera.unt.edu.ar

FAGRE, Mariano - ORCID  0000-0002-0073-6371

Dr. en Ciencias Exactas e Ingeniería. Investigador Asistente CONICET.

E-mail: mfagre@herrera.unt.edu.ar

CARCAMO, Mariano G.

Alumno de Ingeniería Electrónica, de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.

E-mail: marianocarcamo98@gmail.com.

LEMA, Adan J. A.

Alumno de Ingeniería Electrónica, de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.

E-mail: adanlema@hotmail.com



cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

Rehabilitación sísmica de puentes típicos en Argentina mediante aisladores elastoméricos con núcleo de plomo

SARACHO, José A.^{1,2}; PÉREZ, Gustavo A.¹; DIP, Oscar^{1,2};
MOLINA TRIVIÑO, Analía¹; PAGANI, Sergio José¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,
Departamento de Construcciones y Obras Civiles

² Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán.

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología para investigar la vulnerabilidad sísmica de puentes utilizando análisis dinámico no lineal. Se analizan dos ejemplos de puentes típicos de Argentina que se modelan en 3D mediante la plataforma de elementos finitos OpenSees. Se tiene en cuenta la interacción suelo-estructura, tanto en estribos como en pilas. La acción sísmica se representa por medio de acelerogramas compatibles con los espectros de pseudoaceleraciones obtenidos para los niveles de sismos requeridos para la evaluación. Se compara la demanda sísmica con la capacidad de los componentes críticos, determinándose así el grado de daño alcanzado en la estructura. Se determinó que ambos puentes no cumplen con los niveles de desempeño exigidos acorde a la vida útil remanente de cada uno de ellos, por lo que se propone rehabilitarlos empleando aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (Lead Rubber Bearing, LRB). Del análisis de las estructuras así modificadas se concluye que la técnica de rehabilitación utilizada resulta altamente efectiva, llevando a ambos puentes al nivel de desempeño requerido.

Palabras claves: Puentes, Rehabilitación sísmica, Aisladores.

Seismic retrofitting of typical bridges in Argentine using lead rubber bearing

Abstract

This paper presents a methodology to investigate the seismic vulnerability of bridges using nonlinear dynamic analysis. Two examples of typical bridges from Argentina that are modeled in 3D using the OpenSees finite element platform are analyzed. The soil-structure interaction is taken into account, both in abutments and in piles. The seismic action is represented by means of accelerograms compatible with the pseudoacceleration spectra obtained for the levels of earthquakes required for the evaluation. The seismic demand is compared with the capacity of the critical components, thus determining the degree of damage achieved in the structure. It was determined that both bridges do not meet the required performance levels according to the remaining useful life of each of them, so it is proposed to rehabilitate them using elastomeric insulators with lead core (Lead Rubber Bearing, LRB). From the structures modified analysis, it is concluded that the rehabilitation technique used is highly effective, bringing both bridges the performance level required.

Keywords: *Bridges, Seismic retrofitting, Isolators.*

Introducción

Los puentes son los componentes críticos de los sistemas carreteros. Si salen de servicio se producen interrupciones significativas de las redes de transporte, ocasionando grandes pérdidas económicas indirectas. Asimismo, ante la ocurrencia de un evento sísmico, es necesario mantener operativas dichas redes para la atención de la emergencia. Por esto, es muy importante que después del evento los puentes permanezcan en estado operacional total, o si es parcial, que la funcionalidad total sea restablecida en tiempos mínimos. Para eso es necesario verificar la aptitud estructural ante la acción sísmica de los puentes existentes, así como identificar los más vulnerables. Esto permitirá establecer prioridades y pautas relacionadas con la necesidad de rehabilitación, refuerzo o reemplazo de las estructuras más comprometidas. El presente trabajo apunta a analizar posibles soluciones a dicha problemática. Existen diversas medidas propuestas para la rehabilitación/refuerzo de estas estructuras, entre las cuales pueden citarse: apoyos de aislación sísmica, disipadores de energía, extensiones en anchos de apoyos, cables de sujeción de vigas a apoyos, reemplazo de columnas, encamisado de columnas, etc.

El propósito de este trabajo es presentar un método de avanzada de evaluación de la vulnerabilidad de puentes típicos, para casos ubicados en zonas caracterizadas como de elevada y muy elevada peligrosidad sísmica del territorio nacional. Dicha evaluación se aplicará para los estados original y rehabilitado.

Para la determinación de la vulnerabilidad se seguirá el camino determinístico prescripto por **Buckle et al.** (2006), en el Manual de Rehabilitación Sísmica de Puentes. Allí se contempla la realización de una evaluación detallada en el caso de que un puente fuera hallado deficiente en un análisis preliminar o en casos específicos. Dicha evaluación detallada puede realizarse con diferentes métodos, pero se considera al Análisis Dinámico No Lineal (ADNL) como el de mayor rigurosidad y complejidad, a costa de un mayor esfuerzo computacional y que requiere mayores conocimientos para la interpretación de los resultados. Además, corresponde aplicar el ADNL en casos de estructuras complejas e irregulares y en

aquellas ubicadas en la cercanía de fallas activas. La metodología permite evaluar cuantitativamente la capacidad sísmica de una estructura existente y también determinar la efectividad global de la técnica de rehabilitación utilizada.

Es conveniente destacar la importancia de esta metodología mediante ADNL para evaluar los puentes aislados sísmicamente, ya que la normativa existente al respecto, **AASHTO** (2014), se focaliza en los métodos más simples de análisis, brindando ejemplos de cálculo sólo para esos casos. En consecuencia, los ejemplos aquí tratados pueden tomarse como guía para situaciones de evaluación del desempeño que conllevan mayor complejidad.

Metodología

Selección de casos de estudio

Se seleccionaron dos puentes típicos ubicados en la provincia de Mendoza, Argentina, en los cuales las luces de tramo, número de tramos, altura de pilas y ancho de tablero se corresponden con los valores medios de un estudio estadístico llevado a cabo por **Saracho et al.** (2014) y **Saracho** (2024). La longitud total de ambas estructuras es de aproximadamente 66 m.

El primer puente (Fig. 1) sobre el Arroyo Tierras Blancas, sobre la Ruta Nacional 40, es de 2014 y consta de vigas de hormigón simplemente apoyadas, con dos pilas de tres columnas con viga cabecera. Las vigas descansan sobre apoyos de neopreno zunchado.



Figura 1: Puente sobre el Arroyo Tierras Blancas, RN 40.

El segundo puente estudiado (Fig. 2) es del año 1971, se encuentra en el acceso Este a la Ciudad de Mendoza sobre Ruta Nacional 7. Consta de

vigas cajón de hormigón continuas, con apoyos elastoméricos tanto sobre los estribos como sobre la pila central.



Figura 2: Puente Acceso Este a la Ciudad de Mendoza, RN 7 (Fuente: Google Maps).

Objetivos de desempeño estructural

En la metodología presentada en **Buckle et al.** (2006), se fijan los objetivos de desempeño estructural a cumplir por las estructuras de puentes. Primeramente, se determina la Vida Útil Remanente (VUR), considerando que la vida útil promedio de los puentes es de 75 años. Se establecen tres categorías de VUR (Tabla 1).

Tabla 1. Categorías de Vida Útil Remanente (VUR).

Categoría de VUR	Período de VUR
VUR1	0 – 15 años
VUR2	16 – 50 años
VUR3	Mayor a 50 años

Los objetivos de desempeño estructural se fijan para dos niveles de sismos definidos como:

- Sismo Menor: correspondiente a un período de retorno promedio de unos 100 años.
- Sismo Mayor: ídem para 1000 años.

A su vez, se definen cuatro niveles de desempeño, según lo indicado a continuación:

- Nivel de Desempeño 0 (ND 0): No se exige ningún nivel mínimo de desempeño.
- Nivel de Desempeño 1 (ND1): Seguridad de vida. Se asegura únicamente la vida, pero el daño permanente sufrido por el puente durante un terremoto es significativo y se interrumpe el servicio.

- Nivel de Desempeño 2 (ND2): Operacional. Después de ocurrido el sismo, el daño permanente es mínimo y puede ser puesto en servicio para los vehículos de emergencia después de una inspección y limpieza de escombros.
- Nivel de Desempeño 3 (ND3): Totalmente operacional. Después del sismo, el daño permanente es despreciable.

Finalmente, de acuerdo con el nivel de sismo, la importancia del puente y la vida útil remanente, se establecen los niveles mínimos de desempeño recomendados (ver Tabla 2).

Tabla 2. Niveles mínimos de desempeño.

Sismo	Importancia y vida útil remanente					
	Estándar			Esencial		
	VUR1	VUR2	VUR3	VUR1	VUR2	VUR3
Menor	ND0	ND3	ND3	ND0	ND3	ND3
Mayor	ND0	ND1	ND1	ND0	ND1	ND2

Sismicidad local. Obtención de acelerogramas

Las fuentes sísmicas potenciales cercanas a los puentes de estudio son la del Cerro La Cal, para el puente sobre RN 7 y la de Tupungato, para la estructura sobre la RN 40. En la Tabla 3 se resumen las características fundamentales de dichas fuentes sísmicas potenciales.

Tabla 3. Características de fuentes sísmicas potenciales cercanas a los puentes estudiados

Fuente sísmica	Terremoto Potencial Máximo	
	Magnitud [Ms]	Recurrencia [años]
Cerro La Cal	7.0	1300
Tupungato	7.0	1000

En cuanto a los espectros objetivos, el de 1000 años de recurrencia se corresponde con el de diseño fijado por el INPRES CIRSOC 103 (2019) para puentes de hormigón armado, el cual está basado en las especificaciones **AASHTO** (2011) para el diseño sísmico de puentes. Las ordenadas espectrales correspondientes al sismo menor se obtienen por aplicación de un coeficiente de reducción sobre las del espectro de diseño. Este coeficiente se obtuvo a partir del análisis de los espectros dados para las ciudades de San Juan y Mendoza en el estudio de **Cardona et al.** (2016).

En cuanto al factor de escala a utilizar, según las recomendaciones de **Wang et al. (2015)** se asigna un rango estrecho, entre 0.4 y 2.5.

También resulta determinante el rango de períodos de significancia estructural. Dada la falta de prescripciones sobre este aspecto en normas específicas para puentes, se tomó en consideración lo dispuesto en **ASCE/SEI 7-10 (2010)**.

Para la búsqueda de los acelerogramas se utilizó la aplicación web de la base de datos del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) - Next Generation Attenuation (NGA) **PEER (2020)**.

Niveles de daño según parámetros de demanda ingenieril

En **Buckle et al. (2006)** no se fijan de manera explícita y directa los Parámetros de Demanda Ingenieril (PDI) para caracterizar los distintos estados de daño luego de realizado el ADNL. Conforme a la revisión de la literatura científica y técnica efectuada, pudo observarse que el abordaje más claro en esta cuestión es realizado en distintos estudios de fragilidad sísmica: **Nielson (2005)**, **Avsar (2009)** y **DesRoches et al. (2012)**. En este último se utilizaron dos PDI para definir los Umbrales de Daño en Componentes (UDC) que ofician de límites para los distintos niveles de desempeño establecidos. Por su pertinencia, serán utilizados también en el presente caso.

El primero tiene que ver con la capacidad por curvatura de las columnas, denominado ductilidad por curvatura, que se determina según la ecuación 1.

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_{max}}{\phi_{Fluencia}} \quad (1)$$

Donde:

μ_{ϕ} = ductilidad por curvatura

ϕ_{max} = curvatura máxima alcanzada

$\phi_{Fluencia}$ = curvatura correspondiente a la primera fluencia de las barras.

El segundo parámetro está relacionado con la capacidad de desplazamiento de la superestructura en función de las dimensiones de los elementos que le sirven de apoyo. Así, entran en juego las medidas de los pedestales donde se ubican los elastómeros y los anchos de sustentación

disponibles en las vigas cabeceras de pilas y en la base de apoyo de estribos (ver Fig. 3).

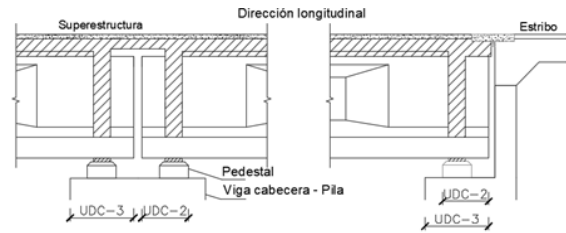


Figura 3: Longitud de apoyo disponible para la superestructura, en Pila y Estribos.

Según **Buckle et al. (2006)**, la Tabla 4 muestra los umbrales de daño referidos anteriormente con los respectivos niveles de desempeño que limitan, que conllevan a diferentes estrategias de reparación.

Tabla 4. Niveles de daño en componentes.

UDC	Niveles de daño en componente				
	0	1	2	3	
Rango de Daño	Ningún Daño	Daño Despreciable	Daño mínimo Reparación Menor	Daño significativo Reparación importante	Daño irreparable Reemplazo de Componentes
Nivel de desempeño	ND3		ND2	ND1	

El estudio de **Hwang et al.** (2001) es tomado como marco referencial por distintos trabajos sobre fragilidad sísmica de puentes para la definición de los límites de daño. Allí, dichos umbrales de daño se determinaron a través de la construcción del diagrama momento-curvatura correspondiente a la sección de columna en pila de un puente típico del Centro-Este de los Estados Unidos. Este mismo método se aplicó para los puentes del presente estudio. Se destacan a continuación los puntos característicos de dicho diagrama que ofician de umbrales de daño de los diferentes niveles de desempeño:

- Primera fluencia de armadura longitudinal: ϕ_1
- Límite de servicio: Curvatura de fluencia, ϕ_y
- Límite de control de daño: ϕ_2 , curvatura correspondiente a una deformación específica de la fibra externa del hormigón de 0.002 para el caso de la presencia de empalmes por yuxtaposición de armaduras en la zona de formación de rótulas plásticas. Curvatura ϕ_4 , ídem para la situación donde no se presentan dichos empalmes, con una deformación específica de 0.004.
- Límite de prevención de colapso: ϕ_u , curvatura asociada a la deformación específica de la fibra externa del hormigón correspondiente a la última del modelo de Mander para hormigón confinado.

En la Fig. 4 se presenta esquemáticamente el diagrama Momento-curvatura con su aproximación bilineal y los referidos puntos característicos.

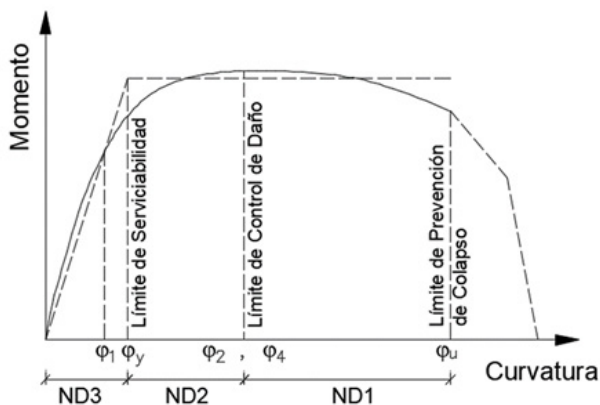


Figura 4: Diagrama Momento-Curvatura

En la Tabla 5, se muestran los distintos umbrales de daño con los correspondientes valores de los PDI adoptados para este trabajo.

Tabla 5. Umbrales de daño según Parámetros de Demanda Ingenieril.

PDI	Puente	UDC			
		0	1	2	3
Ductilidad por Curvatura ($\mu\phi$)	RN 7	1	1.2	2.65	7.67
	RN 40	1	1.69	3.49	7.77
Desplazamiento Superestructura. [mm]	RN 7	30	100	350	450
	RN 40	30	100	475	750

Modelos analíticos

Se desarrollaron modelos analíticos 3D de los puentes estudiados usando la plataforma de elementos finitos OpenSees, **McKena et al.** (2013). La superestructura de cada puente fue modelada usando elementos de barra, asumiendo que permanecen en el rango elástico según las prescripciones de **Caltrans** (2013). Para las pilas se adoptaron elementos de barra no lineales con plasticidad concentrada en los extremos, donde se formarán las rótulas plásticas. En este caso, las secciones son discretizadas con fibras longitudinales de acero para las armaduras longitudinales, hormigón confinado para el núcleo central y hormigón no confinado para el recubrimiento. Para las armaduras se utilizó un modelo bilineal con endurecimiento cinemático (modelo material Steel01 provisto por OpenSees). Dado que el confinamiento mejora la resistencia y la ductilidad del hormigón, se emplearon distintos modelos para el hormigón confinado y no confinado (modelo material Concrete01 con diferentes parámetros para uno y otro caso).

La interacción suelo-estructura en los estribos se modeló disponiendo resortes en los extremos del modelo con adecuadas relaciones no lineales de fuerza-deformación, las cuales están basadas en las disposiciones de **Caltrans** (2013).

En la Fig. 5 se muestra el modelo analítico del puente sobre RN 40 y detalles de los resortes ubicados en estribos y pilas, así como de las fibras en columnas, para lo cual se siguió el trabajo de **Nielson y DesRoches** (2007).

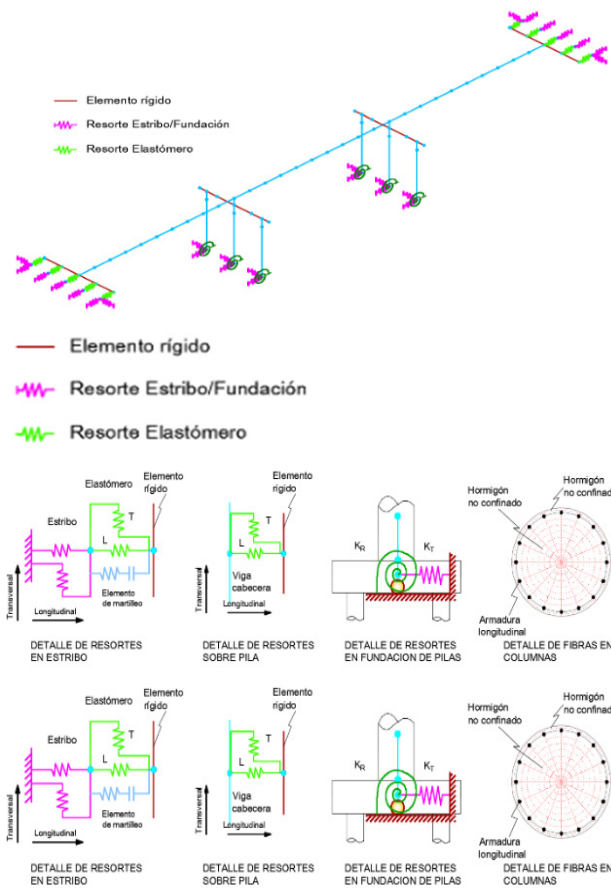


Figura 5: Modelo analítico 3D detallado del Puente sobre RN 40 y sus componentes

Se introducen en el modelo distintos resortes ubicados en los extremos, en correspondencia con los estribos. Por un lado, se considera el empuje pasivo del suelo de relleno sobre el muro pantalla. Por el otro, con un resorte conectado en paralelo al anterior, se consideran las acciones activa y pasiva de los pilotes. Esta situación se contempla en el caso del puente sobre RN 40. En el caso del modelo del puente sobre RN 7, solo se toma en cuenta la primera acción, dado que se trata de un estribo del tipo simple, con fundación sobre solera vinculada a la viga cabecera mediante dos contrafuertes.

Se introducen en el modelo elementos que representan el martilleo entre el extremo de la superestructura y el muro pantalla del estribo, considerando el espacio de la junta entre ambos. Por último, en el modelo analítico escogido para los elastómeros, la capacidad última por corte depende de la fricción entre el neopreno y el hormigón.

En cuanto a la interacción suelo-estructura en la

base de las pilas, se presentan situaciones diferentes en ambos puentes. Por un lado, el puente sobre RN 7 presenta fundación superficial, y el otro puente fundación profunda mediante pilotes. Se colocaron resortes rotacionales y traslacionales en la base de las columnas mediante una matriz acoplada de rigideces. Las rigideces se calcularon conforme a lo establecido en **Buckle et al. (2006)**, tomando en cuenta las características del suelo de fundación, la rigidez a flexión en el caso de los pilotes y las dimensiones de la base aislada.

En la propuesta de rehabilitación de ambos puentes se reemplazan los apoyos de neopreno por aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (Fig. 6).

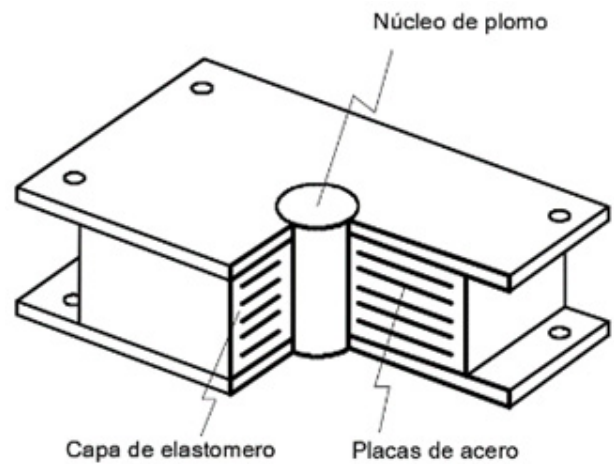
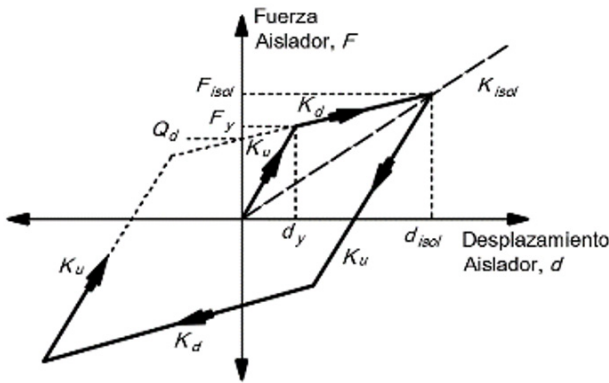


Figura 6. Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)

Los mismos se diseñaron de conformidad con lo establecido por **AASHTO (2014)**. Para ello, en primer lugar, se utilizó el denominado método simplificado basado en desplazamientos. Aquí, se asume una rigidez efectiva de la superestructura aislada sobre subestructuras flexibles, la cual resulta de la suma de las rigideces efectivas de las subestructuras individuales. Se considera una subestructura idealizada con un aislador soportado sobre una columna flexible, adoptando para el aislador un comportamiento bilineal y para la columna, elástico.

En una etapa posterior, con los valores obtenidos de resistencia característica, rigidez y desplazamiento de cada aislador, se procede al diseño de los mismos.

En Fig. 7 puede apreciarse el modelo bilineal adoptado para el aislador y las propiedades correspondientes según AASHTO (2014).



- d_{isol} : Desplazamiento aislador
- d_y : Desplazamiento de fluencia aislador
- F_{isol} : Fuerza cortante aislador
- F_y : Fuerza de fluencia aislador
- K_d : Rigidez post-elástica aislador
- K_u : Rigidez de carga y descarga (Rigidez elástica)
- Q_d : Resistencia característica aislador

Figura 7: Modelo bilineal adoptado para aislador (AASHTO, 2014).

Por último, en el modelo se reemplazan los apoyos elastoméricos existentes por los aisladores, y se realiza el análisis dinámico no lineal con cada sismo de entrada. Se usó el modelo de material Steel01 para representar los aisladores.

Resultados

En Fig. 8 se representan los espectros de los registros escalados obtenidos, observándose la buena aproximación del promedio de la serie respecto del espectro objetivo para el Sismo Mayor de 1000 años de recurrencia.

En la Tabla 6 se muestran los períodos fundamentales correspondientes a cada una de las estructuras analizadas. En todos los casos, el primer modo de vibración se da en la dirección longitudinal.

A continuación, se presentan algunos resultados correspondientes a la respuesta de ambas estructuras ante el Sismo Mayor para los estados original y rehabilitado.

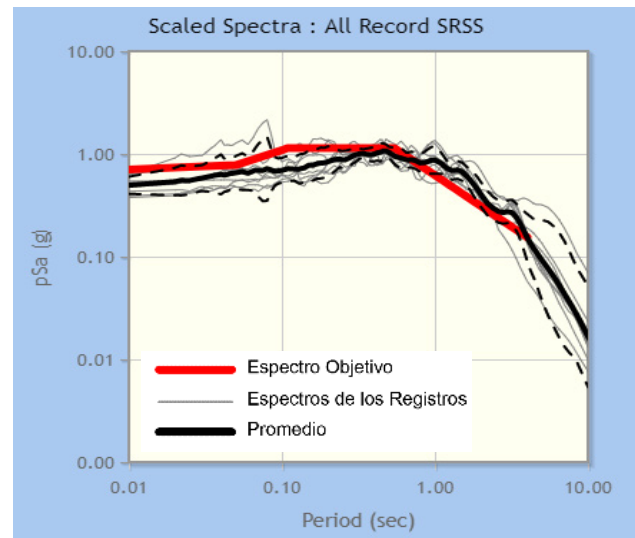


Figura 8: Espectros de registros escalados obtenidos.

Tabla 6. Períodos fundamentales de los puentes analizados

Puente	Condición	Período [seg]
RN 40	Original	0.9
	Aislado	2.21
RN 7	Original	1.25
	Aislado	2.34

La Fig. 9 muestra las respuestas de desplazamientos de la superestructura del puente sobre RN 40 en la dirección longitudinal, en la cual se registraron los mayores valores. En la Tabla 7 se ofrecen dichos valores máximos.

Tabla 7. Desplazamientos máximos de los puentes analizados en Dirección Longitudinal.

Puente	Condición	Desplazamiento máx. [m]
RN 40	Original	0.09
	Aislado	0.20
RN 7	Original	0.272
	Aislado	0.275

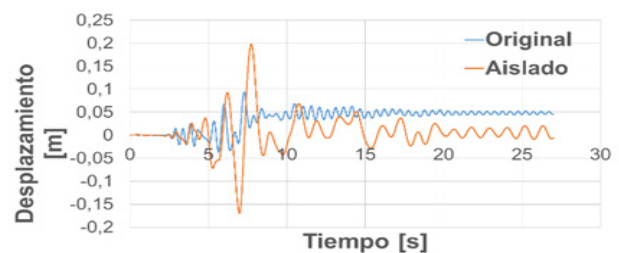


Figura 9: Desplazamientos de la Superestructura del Puente s/ RN 40 en Dirección Longitudinal.

En las Figs. 10 y 11 se muestran las respuestas Momento-Curvatura para ambos puentes en la dirección longitudinal (más desfavorables).

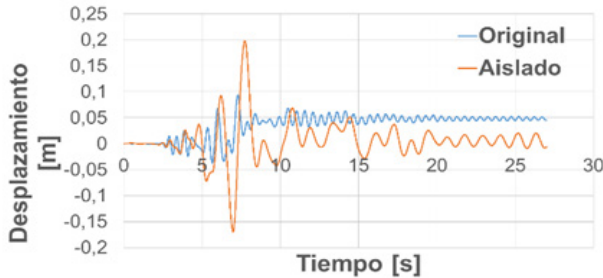


Figura 10: Diagrama Momento-curvatura en columna de pila del Puente sobre RN 40 en Dirección Longitudinal.

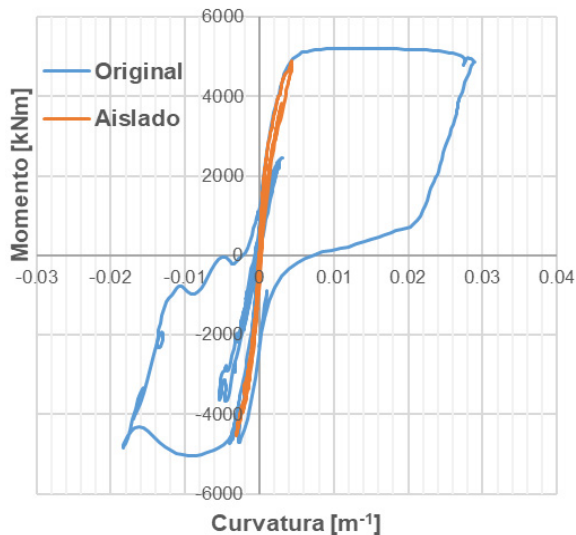


Figura 11: Diagrama Momento-curvatura en columna de pila del Puente sobre RN 7 en dirección longitudinal

En la Tabla 8 se muestran los resultados de las Curvaturas de Fluencia (ϕ_{Fluencia}), Curvaturas Máximas (ϕ_{max}) y las Ductilidades de Curvatura ($\mu\phi$) para las columnas de ambos puentes.

Tabla 8. Curvatura de Fluencia, Curvatura Máxima y Ductilidades de Curvatura en columnas de los puentes analizados

Puente	Estado	$[\phi \text{ Fluencia}]$	$[\phi \text{ max}]$	$[\mu\phi]$
RN 40	Original	0.00277	0.01	3.65
	Aislado		0.00348	1.26
RN 7	Original	0.00316	0.029	9.27
	Aislado		0.0044	1.39

La Fig. 12 muestra la respuesta de uno de los aisladores ubicados sobre la pila del puente sobre RN 7, en dirección longitudinal.

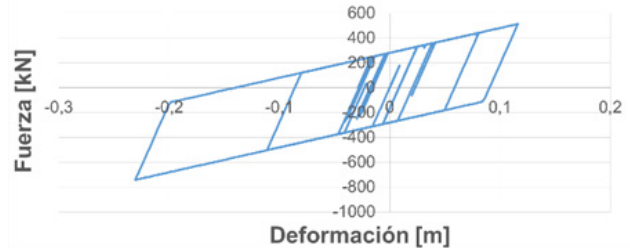


Figura 12: Respuesta de uno de los Aisladores sobre Pila en Puente s/ RN 7, en dirección longitudinal.

Discusión

El puente sobre RN 7, con menos años de vida útil remanente respecto al de RN 40, requiere un nivel de desempeño 1, que garantiza seguridad de vida con daños permanentes significativos (ver Tabla 2). Por su parte, el puente sobre RN 40, con más años para prestar servicio, requiere un nivel de desempeño 2, lo que implica mantenerse operacional luego del evento sísmico, con daños permanentes mínimos.

Para el Sismo Mayor, en ambos puentes en la situación original, según el análisis realizado la Ductilidad por Curvatura en el sentido longitudinal resultó superior que la transversal, siendo la del puente sobre RN 7 un 250 % mayor.

De acuerdo con las prescripciones de Caltrans (2013) la ductilidad por curvatura en la pila del puente sobre la RN 7 supera el límite de prevención de colapso, por lo cual se requeriría el reemplazo de dicha pila.

Por otra parte, el puente sobre RN 40 acusa un nivel de daño significativo, con necesidad de reparaciones importantes para llevarlo al estado operacional.

Conforme a los resultados obtenidos, ambos puentes en su estado original no cumplen con los requerimientos mínimos de desempeño para el sismo Mayor.

Por otro lado, los resultados arrojados en la situación de los puentes rehabilitados, muestran que el puente sobre RN 7 presenta un nivel de desempeño 2, operacional, en tanto que el de RN 40, un nivel 3, totalmente operacional.

Conclusiones

Se presentó una metodología de evaluación detallada mediante análisis dinámico no lineal aplicada a puentes típicos de Argentina, para los estados original y rehabilitado sísmicamente, conforme al estado actual del conocimiento, desde la evaluación de la sismicidad del sitio de implantación de la obra hasta la determinación de su desempeño estructural. Para la rehabilitación se consideró la

técnica basada en el uso de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.

A través de la limitación de fuerzas en componentes críticos como las pilas y la modificación de la respuesta dinámica, la medida de rehabilitación usada resulta altamente efectiva, permitiendo que las estructuras estudiadas puedan cumplir con los objetivos de desempeño esperados conforme a normativa.

Referencias bibliográficas

- AASHTO** (2011) Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC, USA
- AASHTO** (2014) Guide Specifications for Seismic Isolation Design. American Association of State Highway and Transportation Officials Washington, DC, USA
- ASCE/SEI 7-10** (2010) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers. Structural Engineering Institute. USA.
- AVŞAR O.** (2009) "Fragility Based Seismic Vulnerability Assessment of Ordinary Highway Bridges in Turkey," PhD Thesis, Middle East Technical University. Ankara, Turquia.
- Buckle, I.; Friedland, I.; Mander, J.; Martin, G.; Nutt, R. y Power, M.** (2006) Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 – Bridges. Federal Highway Administration; Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, USA.
- Caltrans** (2013) Seismic Design Criteria Version 1.7., California Department of Transportation, Sacramento, CA. USA. pag.124-129.
- Cardona, O., Barbat, A., Carreño, M., Bernal, G., Mora, M., Velásquez, C. y Salgado, M.** (2016) Perfil de Riesgo de Desastres. Informe Nacional para Argentina, CIMNE, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona. España.
- DesRoches, R., Padgett, J., Ramanathan, K. y Dukes, J.** (2012) Feasibility Studies for Improving Caltrans Bridge Fragility Relationships. Final Report CA12-1775. Georgia Institute of Technology. California Department of Transportation. USA.
- Hwang, H., Liu, J.B. y Chiu, Y.H.** (2001) Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges, Report No. MAEC RR-4, Center for Earthquake Research Information.
- INPRES CIRSOC 103** (2019) Proyecto de reglamento argentino para construcciones sismorresistentes. Parte VI Puentes de hormigón armado. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Argentina.
- McKenna, F., Fenves, G., Filippou, F., Scott, M., Elgamal, A. y Arduino, P.** (2013) Open System for Earthquake Engineering Simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA. <http://opensees.berkeley.edu>
- Nielson, B. G.** (2005) "Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones" PhD Thesis, Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia, USA.

Nielson, B. G. y DesRoches, R. (2007) Analytical Seismic Fragility Curves for Typical Bridges in the Central and Southeastern United States. *Earthquake Spectra*, Volume 23, No. 3, pag. 615–633.

PEER (2020) Ground Motion Database. Pacific Earthquake Engineering Research Center. <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>

Saracho, J. (2024) “Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes en Cuyo y el NOA a través de curvas de fragilidad.” Tesis de Doctorado en Ingeniería. Instituto de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.


Saracho, J.; Perez, G.; Barlek, J.; Dip, O. y Castelli, E. (2014) Clasificación de puentes en Argentina para la evaluación de su vulnerabilidad sísmica. Memorias de la 1a Conferencia Internacional de Puentes-Chile 2014. Santiago. Chile.

Wang, G., Youngs, R., Power, M. y Li, Z. (2015) Design ground motion library: an interactive tool for selecting earthquake ground motions, *Earthquake Spectra*, Vol. 31, pag. 617–635.

CONTEXTO


Este trabajo se realizó en el Instituto de Estructuras Ing. Arturo Guzmán de la FACET, UNT, durante el año 2023.

AUTORES

SARACHO, José Aníbal  - ORCID 0009-0005-0771-1264


Ingeniero en Construcciones y Civil de la Universidad Tecnológica Nacional. Magister en Ingeniería Estructural y Doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de Tucumán. Profesor Adjunto con Dedicación Exclusiva en la Cátedra “Puentes” (UTN FR Tucumán). Director del Área Estructuras (UTN FRT). Director del Proyecto de Investigación y Desarrollo: “Evaluación y rehabilitación de puentes” (UTN FRT). Profesor de Posgrado en la Asignatura “Estructuras Viales Especiales” (UTN FR La Plata). Integrante del Proyecto PIUNT “Vulnerabilidad y riesgo de grandes obras de ingeniería: aplicación a presas de embalse y puentes”. Asesoramiento técnico y transferencia de conocimientos a Dirección Provincial de Vialidad Tucumán y a Vialidad Nacional, Distritos de Tucumán, San Juan y Mendoza.

E-mail: joseanibalsaracho@yahoo.com.ar

PÉREZ, Gustavo Ariel  - ORCID 0000-0002-1538-6212

Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Estructural y Doctor en Ingeniería de la FACET de la Universidad Nacional de Tucumán. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Profesor Titular de Hormigón II de la Carrera de Ingeniería Civil y docente de posgrado en el Magister en Ingeniería Estructural y Doctorado en Ingeniería de la FACET UNT. Director del Instituto de Estructuras, FACET UNT. Áreas de investigación: Estructuras de hormigón, puentes, análisis no lineal, análisis dinámico. Director del Proyecto PIUNT “Evaluación, rehabilitación y monitoreo de obras de ingeniería civil”.

E-mail: gperez@herrera.unt.edu.ar

DIP, Oscar  - ORCID 0000-0003-2130-556X

Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Estructural de la FACET de la Universidad Nacional de Tucumán.

Profesor Asociado de Estabilidad I para las carreras de Ingeniería Civil y Mecánica y de posgrado en el Magister en Ingeniería Estructural de la Facet UNT. Codirector del Proyecto PIUNT "Evaluación, rehabilitación y monitoreo de obras de ingeniería civil".

E-mail: odip@herrera.unt.edu.ar

MOLINA TRIVIÑO, Analía  - ORCID 0009-0007-5579-2606

Ingeniera Civil egresada de la FACET, Universidad Nacional de Tucumán. Especialista en Educación y Nuevas Tecnologías de FLACSO (Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales). Profesora Titular de Estabilidad I, para las carreras de Ingeniería Civil y Mecánica. Integrante del Proyecto PIUNT "Evaluación, rehabilitación y monitoreo de obras de ingeniería civil".

E-mail: amolina@herrera.unt.edu.ar

PAGANI, Sergio José  - ORCID 0009-0002-9242-3870

Ingeniero Civil egresado de la Universidad Nacional de Tucumán. Magister en Informática de la Universidad Santo Tomás de Aquino. Profesor Titular de Mecánica de Suelos y de Cimentaciones de la carrera de Ingeniería Civil de la UNT. Área de investigación y de actuación profesional: geotecnia y estructuras. Integrante del Proyecto PIUNT "Evaluación, rehabilitación y monitoreo de obras de ingeniería civil". Rector de la Universidad Nacional de Tucumán.

E-mail: spagani@herrera.unt.edu.ar



cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

Evaluación geológica ingenieril preliminar de la caída de rocas (“rockfall”) en la RP N° 307, Tafí del Valle, Tucumán

ANTOLINI, Luciano¹; ABASCAL, Liliana¹; GUZMÁN, Juan Carlos¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Construcciones y Obras Civiles, Tucumán, Argentina.

Resumen

La RP N° 307 conecta San Miguel de Tucumán con la localidad turística de Tafí del Valle y da acceso a los Valles Calchaquíes. La ruta está labrada en macizos rocosos compuestos por rocas ígneas y metamórficas, fuertemente diaclasadas. Particularmente en verano, época de vacaciones, procesos de remoción en masa alteran drásticamente la circulación del tránsito, ponen en riesgo a las personas y suman pérdidas económicas por la interrupción de actividades. El presente trabajo analiza los fenómenos de caída de rocas (“rockfalls”) desde una perspectiva geológica-ingenieril. El análisis de las discontinuidades estructurales: diaclasas y planos de esquistosidad, permitió identificar un conjunto de planos críticos con rumbos NE-SW y buzamiento entre 30° y 70°. Esta orientación es desfavorable para la estabilidad del talud y favorece los desprendimientos de bloques. En la evaluación de medidas de mitigación, se seleccionó el sitio denominado “Fin del Mundo”, debido a que allí los eventos son más frecuentes y el tamaño de los bloques desprendidos es mayor, incrementando el riesgo. Se recomienda el reemplazo de sistemas de naturaleza rígida, existente actualmente, por un sistema de barreras flexibles con un sistema de estabilización de taludes y retención de cuñas con mallas de acero de alta resistencia.

Palabras clave: Caída de rocas, mitigación, Tucumán.

Preliminary engineering geological assessment of rockfall events at Provincial Route N° 307, Tafí del Valle, Tucumán

Abstract

Provincial Route N° 307 connects San Miguel de Tucumán with the tourist town of Tafí del Valle and provides access to the Calchaquí Valleys. The road is carved through rock massifs composed of igneous and metamorphic rocks, heavily jointed. Particularly in summer, during vacation season, mass wasting processes drastically affect traffic circulation, endangering people and causing economic losses due to activity interruptions. This work analyzes rockfall phenomena from a geological-engineering perspective. Analysis of structural discontinuities: joints and schistosity planes, allowed the identification of a set of critical planes with NE-SW orientations and dips between 30° and 70°. This orientation is unfavorable for slope stability and favors block detachment. In the assessment of mitigation measures, the site known as “End of the World” was selected because events there are more frequent and the size of detached blocks is greater, increasing the risk. Replacement of currently existing rigid systems with a flexible barrier system incorporating slope stabilization and wedge retention with high-strength steel mesh is recommended.

Keywords: *Rockfall, mitigation, Tucumán.*

Introducción

La Ruta Provincial N° 307 es la ruta de montaña más larga e importante de la provincia de Tucumán, emplazada en la quebrada Los Sosa, departamentos de Monteros y Taquí del Valle de la provincia de Tucumán, Figura (1).



Figura 1: Desarrollo completo de la Ruta Provincial N°307. Google Maps (2023).

La ruta atraviesa la sierra del Aconquija, se extiende entre las cotas de 375 m snm en la localidad de Acherál y 3.050 m snm en el Abra del Infiernillo, en 140 km de longitud. Es una vía de comunicación entre la llanura tucumana y los valles calchaquíes, donde se localizan las poblaciones de Taquí del Valle, Amaicha, Santa María, Quilmes, Colalao del Valle, Tolombón y Cafayate. Conecta dos rutas nacionales, la RN N° 38 y la RN N° 40, y dos provincias vecinas: Salta y Catamarca. La ruta provincial N° 307 tiene intensa circulación de tránsito con fines turísticos, agro-comerciales y mineros, que marca su importancia local y relevancia regional. Los cortes de la ruta por los eventos de movimientos de laderas cada verano, época de vacaciones, alteran drásticamente la circulación del tránsito, ponen en riesgo a las personas y suman pérdidas económicas por la interrupción de las actividades. Considerar otras vías alternativas de tránsito implican entre 200 y 300 kilómetros de recorrido adicional, mayores costos operativos y aumento de la huella de carbono (Argentina adoptó el Acuerdo de París mediante la Ley 27.270 para reducir las emisiones de CO₂).

Los eventos de remoción en masa, provocan daños en la calzada, cortes de ruta, accidentes y demandan de manera regular tareas de mantenimiento por parte del organismo encargado de la red vial de la provincia, lo que afecta el 30% del presupuesto disponible a tal fin (comunicación verbal).

Se eligió como área de estudio el tramo comprendido entre los km 23 y 40 porque registra numerosos eventos de caídas de rocas, con diámetros de bloques de hasta 6 metros. Algunos de los más recientes publicados en medios de comunicación, ocurrieron en los meses de enero del 2020, enero del 2021, marzo del 2022 y marzo del 2023.

El análisis de caída de rocas ("rockfall"), tipología de deslizamiento en la cual enfocamos este trabajo, es un procedimiento multiparamétrico que implica relevar y analizar la roca intacta y las discontinuidades en el macizo rocoso. El comportamiento del macizo, en el entorno natural o bajo la influencia de las obras de ingeniería civil, está condicionado por cambios en los estados tensionales y las condiciones hidráulicas. La heterogeneidad geomecánica distingue claramente a los macizos rocosos de los suelos y, consecuentemente, justifica tratar con metodología específica la estabilidad de taludes labrados en uno y otro tipo de sustrato.

Este trabajo pone énfasis en la determinación de los planos desfavorables para la estabilidad del talud y que contribuyen al desprendimiento de los bloques. Para ello se caracterizaron los macizos rocosos, la tipología del camino en zona de montaña, se tomó en consideración el régimen pluviométrico de la región y los caudales de tránsito vehicular.

Antecedentes

A lo largo de la RP N° 307 se reconocen diferentes tipos de movimientos en las laderas¹ del cordón montañoso, **Fernández y Lutz** (2003) y **Fernández** (2009). En este estudio nos enfocamos en los desprendimientos y caída libre de bloques de roca o "rockfall", **Ritchie** (1963), **Varnes** (1978), **Hungr et al.** (2014). La caída de rocas (rockfall) normalmente tiene impacto sobre áreas pequeñas. Sin embargo, el daño sobre las personas e infraestructura expuestas puede tener

¹ Movimientos de ladera: concepto definido por la Commission of Landslides, que forma parte de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG).

consecuencias graves, entre otras consideraciones debido a la alta velocidad de caída lo que deja escaso margen para la reacción. Como medida preventiva se instalan obras de defensa que contribuyen a reducir el nivel de riesgo, pero estas medidas a veces son insuficientes debido al gran volumen, elevado peso y alta energía cinética de los desprendimientos. Según la clasificación de los movimientos de masa en función de su velocidad de caída revisada por la "International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory", **WP/WLI** (1995) y **Cruden y Varnes** (1996), los desprendimientos de rocas son considerados movimientos muy a extremadamente rápidos, velocidad típica entre 3 a 5m/s y respuesta de reacción nula.

Desde su construcción (1940-1943) y hasta los tiempos actuales, la ruta ha demandado importantes esfuerzos humanos y recursos materiales para el mantenimiento, debido a recurrentes movilizaciones de material desde sus laderas. Este fenómeno se aprecia fundamentalmente entre los kilómetros 23 y 40, Figura (2), donde se destaca fundamentalmente la *caída de rocas* ("rockfall") como el proceso de remoción en masa de mayor criticidad por el riesgo que representa para los usuarios de la ruta y por la necesidad de cortes parciales o totales de tránsito ante dichos eventos para el mantenimiento y liberación de la calzada. Figuras (3, 4 y 5).

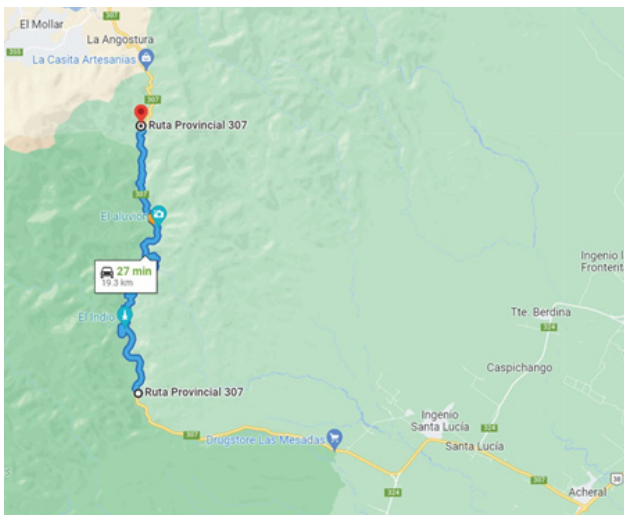


Figura 2: Tramo de mayor demanda de mantenimiento por derrumbes frecuentes, entre kilómetros 23 y 40. Google Maps (2023).



Figura 3: Caída de roca de gran tamaño en "El Fin del Mundo", km 31 de la ruta. La Gaceta - Habilitaron el tránsito en la ruta 307 tras el derrumbe en el "Fin del Mundo" (26 de marzo de 2023).



Figura 4: Caída de roca dentro de vehículo en movimiento en "El Fin del Mundo", km 31 de la ruta. La Gaceta - Una roca cayó sobre un auto en El Fin del Mundo y una mujer se salvó de milagro (14 de enero de 2021).



Figura 5: Caída de roca de gran tamaño obstruye el paso en km 40 de la ruta. La Voz - Inmensa roca obstruye la ruta de Tafí del Valle (9 de febrero de 2012).

El caso de la Ruta Provincial N° 307, entre sus kilómetros 23 y 40, representa un claro ejemplo de camino de montaña fundado en corte de ladera, donde el terreno de fundación expone fuertes pendientes longitudinales, salvando una diferencia de cotas de 870 m entre dichos kilómetros.

La fundación de rutas en corte de ladera es una de las prácticas empleadas con mayor frecuencia en la región para caminos de alta montaña. Este método constructivo implica la remoción de importantes volúmenes de roca de las laderas de la montaña a modo de obtener un perfil transversal de geometría aceptable, y un trazado horizontal y vertical lo más cómodo posible para la circulación de vehículos. Figura (6).



Figura 6: Ladera expuesta en RP N°307, kilómetro 28, configuración típica de caminos de montaña fundados en corte de ladera. (2023).

Por todo ello es recurrente que en los casos donde se practica un corte de ladera para la estabilización de la subestructura de la calzada, se exponga un talud descubierto de cara al camino y que la modificación del estado tensional producto de dichos movimientos de suelo y material rocoso en grandes volúmenes, pueda activar o desencadenar mecanismos de desprendimiento de material, conllevando un riesgo para los usuarios y una demanda periódica de tareas de control y mantenimiento.

A fin de cuantificar la importancia económico social de la ruta y evaluar la peligrosidad del problema, se ha consultado a Dirección Provincial de Vialidad la cantidad y categorización de vehículos en circulación diaria a lo largo de la misma, revelándose los valores de tránsito que se exponen en la Tabla (1), con un tránsito medio diario anual (TMDA) de 6.500 vehículos por día.

Tabla 1: Distribución del TMDA en Ruta Provincial N°307. Dirección Provincial de Vialidad Tucumán (2023).

Tipo de Vehículo	Porcentaje del TMDA	Cantidad [Veh/día]
Livianos	90,0%	5.850
Ómnibus	0,50%	32,5
Camiones 1-1	1,20%	78
Camiones 1-1-1-1	0,00%	0
Camiones 1-1-1-2	0,10%	6,5
Semirremolques 1-1-2	0,10%	6,5
Semirremolques 1-1-3	0,10%	6,5
Motos	8,00%	520
TOTAL	100%	6.500

Si bien este es un valor promedio, el mayor caudal de tránsito se aprecia en épocas de verano (diciembre a febrero) dada la accesibilidad de la ruta a las villas turísticas de los valles Calchaquíes. Se observa en horas diurnas un tránsito constante de vehículos tanto livianos como pesados, en su mayoría ómnibus, con una periodicidad menor a los 5 minutos en horas pico.

Dicha época, coincidente con los meses más húmedos de la región, Tabla (2), corresponde además a los meses donde se registra mayor cantidad de sucesos de deslizamiento de laderas y

caída de bloques sobre la calzada, con cortes parciales de tránsito e imposición de limitaciones temporales para su uso y circulación.

Esto no es casual, dado que rara vez ocurren procesos de remoción en masa sin que haya procesos hidrológicos involucrados.

Tabla 2: Registros pluviométricos mensuales medios, máximos y mínimos históricos de la zona (1993-2023). Sistema Nacional de Información Hídrica (2023).

Mes	Prom. [mm]	Máx. [mm]	Mín. [mm]
Septiembre	48,57	152,50	0,00
Agosto	117,01	258,00	10,50
Octubre	201,75	359,50	20,50
Noviembre	263,84	424,00	118,50
Diciembre	401,70	724,00	120,00
Enero	345,81	690,20	81,30
Febrero	316,74	574,50	109,00
Marzo	185,95	378,50	42,50
Abril	101,30	286,00	27,00
Mayo	50,06	108,00	4,50
Junio	21,59	68,00	0,00
Julio	16,41	134,50	0,00

Procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa o movimientos de laderas, son fenómenos de desplazamiento de los materiales geológicos por la acción de la gravedad. La mayoría de las clasificaciones que caracterizan estos procesos tienen en cuenta el tipo de material involucrado (roca o materiales finos), y el tipo cinemático de movimiento: caídas, vuelcos, deslizamientos, flujos; **Terzaghi** (1950); **Varnes** (1978); **Cruden** (1991); **Hungr et al.** (2014).

La comprensión de estos procesos requiere analizar también los potenciales factores que determinan los movimientos. Para **Palmquist y Bible** (1980), existen factores que favorecen la activación de los movimientos, denominados “determinantes”, los cuales se subdividen en factores que condicionan la aparición del movimiento “factores condicionantes” y los que desencadenan los mismos “factores desencadenantes”. Los factores condicionantes

actúan de manera pasiva en la inestabilidad de las laderas, dado que pueden mantenerse estables durante largos períodos de tiempo, se agrupan en cuatro conjuntos: los de naturaleza topográfica, geológica, la vegetación y el clima. Respecto a los factores desencadenantes, **Palmquist y Bible** (1980) los clasifican como: sismicidad, actividades antrópicas, tectonismo, relajación litostática y clima. Cada uno de estos factores provoca que cambien las condiciones de equilibrio del sistema y se origine la rotura.

Los desprendimientos de rocas generalmente son iniciados por algún evento climático o biológico que provoca un cambio en las fuerzas que actúan sobre una roca. Estos eventos pueden incluir aumentos en la presión de los poros debido a la infiltración de lluvia, erosión del material circundante durante fuertes tormentas, procesos de congelación y descongelación en climas fríos, degradación química o meteorización de la roca, crecimiento de raíces o apalancamiento de raíces que se mueven con vientos fuertes. Una vez que se ha iniciado el movimiento de una roca, el factor más importante que controla su trayectoria de caída es la geometría de la pendiente.

La presencia de discontinuidades (como diaclasas, foliaciones, fallas, etc.) en las rocas generan planos de debilidades que afectan la estabilidad del talud actúa como factor geológico condicionante.

Metodología

Las actividades desarrolladas consistieron en tareas de gabinete y relevamientos en el terreno. En gabinete se trabajó con la interpretación de fotografías aéreas a escala 1:30.000, facilitadas por el Servicio Geológico Minero Argentino, Centro Tucumán, y de imágenes satelitales de acceso libre del USGS (United States Geological Survey) para la identificación de rasgos geológico-estructurales lineales y mapeo de la cobertura vegetal. También se consultaron las Hojas Geológicas 2766-II “San Miguel de Tucumán” y 2766-IV “Concepción”. Con ello se confeccionó un mapa guía preliminar marcando los puntos con rasgos visibles de desprendimientos de rocas en las laderas, los que fueron inspeccionados durante las visitas de campaña al área de estudio.

En esta etapa además se compiló y analizó información sobre los antecedentes históricos, material obtenido a través de la Biblioteca Central de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, para comprender el contexto social, político y económico existente cuando se decidió la construcción de la RP N° 307 y las distintas opciones de trazas evaluadas en el proyecto vial. La compilación y análisis de los registros pluviométricos, datos de tránsito, datos sismológicos, antecedentes de eventos de caída de rocas registrados por medios periodísticos y la restitución de la planialtimetría fueron utilizados para la evaluación de los factores que inciden en las causas de la caída de rocas (rockfall).

En el terreno se realizaron tres campañas entre los kilómetros 23 y 40, se identificaron 14 puntos de referencia, 13 de ellos con evidencias de desprendimiento de rocas de tamaños entre 10 cm y 10 metros, tratándose en algunos puntos de material disgregado, resultado de procesos de meteorización en las rocas. Cada punto fue posicionado mediante GPS y altimetría, se realizaron descripciones de la litología y se tomaron mediciones de tamaño de los bloques sueltos.

Debido a que los procesos de remoción en masa detectados en estos 14 puntos respondían a distintas tipologías de desprendimiento de material (Figura (7)), se descartaron las ubicaciones donde no se evidenciaba el fenómeno de “rockfall” propiamente dicho y se seleccionaron 4 localidades para ser estudiadas con más detalle.

En las 4 laderas remanentes en estudio se midieron las orientaciones de los planos de debilidad y se profundizó en la descripción de la litología. Entre dichos puntos se relevaron en total 151 planos de discontinuidad, mediante el uso de una brújula tipo Brunton, y se identificaron dos litologías del macizo rocoso bien diferenciadas: por un lado, roca metamórfica, representada por esquistos fragmentados, y por otro, roca ígnea, representada por granitos. Esta información se condensó en la Tabla (3).

Cada uno de los planos relevados, queda fielmente caracterizado en el espacio con dos parámetros angulares, el ángulo de rumbo, medido entre el norte y la línea de intersección entre el plano geológico y un plano horizontal, y el ángulo de buzamiento, medido entre la línea de intersección del plano geológico con un plano vertical y su proyección horizontal.



Figura 7: Puntos relevados en primera visita de campo. Abascal (2023).

Tabla 3: Síntesis de relevamiento de planos de discontinuidad y tipología del macizo en las cuatro laderas más críticas del camino. (2023).

N° Punto y toponimia	Km de la ruta	Tipología del Macizo Rocosos	Cantidad de Mediciones
3 – Punto bajo de El Indio	23	Metamórfica / Granito	52
7 – El Fin del Mundo	31	Granito	41
10 – Paredón en Rancho de Cáscara	33	Granito	20
11 – Ladera de Roca Metamórfica	35	Metamórfica	28

La medición de dichos planos permitió la caracterización de algunos de los “factores condicionantes” de sucesos de caída de rocas, como ser el grado de fracturación del macizo rocoso y la orientación de las familias de planos respecto a la inclinación del talud de roca expuesto, lo que brinda una noción de la posibilidad de deslizamiento de bloques a lo largo de tales planos de falla.

Análisis

Los cuatro conjuntos de planos de discontinuidad medidos en el campo, cada uno de estos definidos por el par rumbo-buzamiento, fueron procesados mediante el uso del software de uso libre Stereonet, desarrollado por Rick Allmendinger.

Stereonet es una herramienta gráfica que representa el hemisferio de una esfera y permite el análisis tridimensional de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso. Se obtiene una representación de los mismos en redes estereográficas que brindan una visualización más clara y sintetizada de los planos de debilidad, permitiendo detectar conjuntos de discontinuidades con igual o similar dirección. Además, es posible la representación de cualquier plano en el espacio a partir de un punto único en coordenadas bidimensionales, para una visualización más limpia de los datos; dichos puntos se denominan polos.

El análisis de los datos procesados evidenció un claro caso desfavorable para el denominado “Punto 7 – El Fin del Mundo”, cuya representación específica se aprecia en la Figura (8).

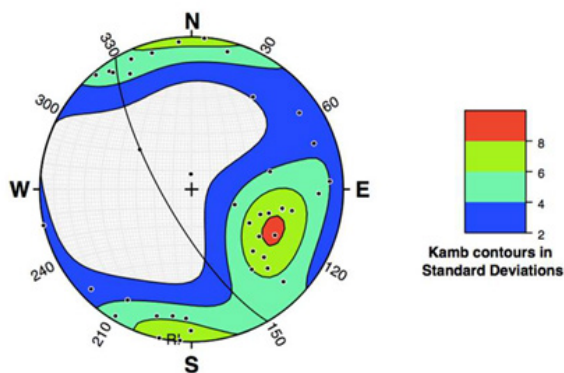


Figura 8: Representación en red estereográfica de los planos relevados en el Punto 7 – El Fin del Mundo mediante polos y contorno de Kamb. (2023).

Se aprecia una concentración de polos en el cuadrante sudeste de la red estereográfica; esto representa una familia de planos de rumbo aproximado NE-SW y un buzamiento que varía entre los 30° y los 70°. Dicha acumulación de planos conserva una configuración desfavorable respecto al talud relevado, el cual se representó en la red estereográfica con un rumbo de 30° respecto al norte, hacia el oeste, y una inclinación casi vertical.

Discusión y propuestas ingenieriles

Los datos graficados por el software indican un grado de peligrosidad considerable para el punto de “El Fin del Mundo”. Allí se observa un elevado grado de fracturación del granito, el cual a su vez se encuentra muy meteorizado, combinado con la existencia de una familia de discontinuidades con posicionamiento desfavorable respecto a la inclinación del talud principal que las contiene.

Estos resultados son concordantes con los frecuentes eventos de caída de bloques observados en esta ubicación, lo que ha llevado al desarrollo de obras de mitigación consistentes de muros de hormigón armado con barreras metálicas en su parte superior.

En cuanto a dichas obras de mitigación, las mismas han resultado poco efectivas ante los eventos de caída de bloques de gran porte, siendo las barreras metálicas destruidas en varias oportunidades y colmatándose el espacio libre entre el muro de hormigón y la ladera con material desprendido, lo cual resulta muy difícil de limpiar para recuperar la capacidad de retención del muro.

La naturaleza de esta y otras obras de mitigación observadas entre los kilómetros 23 y 40 de la ruta, representan fundamentalmente estructuras rígidas y frágiles con poca capacidad de deformación y disipación de energía, aptitudes necesarias para detener bloques en caída libre.



Figura 9: Sistema de contención de malla flexible y anclajes aplicado a ladera inestable en Castello di San Terenzo, Italia. Geobrugg AG (2017).



Figura 10: Sistema de contención de malla flexible y anclajes aplicado a ladera inestable en Mar del Plata, Argentina. Geobrug AG (2020).

En ese sentido se ha investigado al respecto y se ha arribado a la necesidad imperante de reemplazar estos sistemas por mallas de alta resistencia y de naturaleza flexible que puedan adaptarse a las irregularidades de las laderas fracturadas y atenuar la caída de bloques sueltos antes de que puedan desarrollar altas velocidades. Se trata de sistemas de gran difusión y aplicación en el resto del mundo con resultados ampliamente favorables. Figuras (9) y (10).

Conclusiones

En la zona de estudio se reconocen rocas ígneas de tipo granito y rocas metamórficas, tipo esquistos. La aplicación del software Stereonet, permitió identificar en “El Fin del Mundo” un conjunto de planos con rumbo NE-SW y buzamiento entre 30° y 70°. Esta concentración de planos de discontinuidades representa las orientaciones desfavorables para la estabilidad del talud y por ende favorecen los desprendimientos de bloques. En este punto aflora roca granítica fragmentada y es dónde ocurren los desprendimientos de bloques de mayor tamaño debido al intenso grado de meteorización que presenta. Se concluye que el reemplazo de sistemas rígidos por sistemas flexibles y un sistema de estabilización de taludes con retención de cuñas con mallas de acero de alta resistencia, son medidas de mitigación adecuadas para el control de la caída de bloques y la protección de los usuarios de la ruta.

Agradecimientos

Se agradece a Dirección Provincial de Vialidad de Tucumán, a la Biblioteca Central de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología y al Servicio Geológico Minero Argentino por su estrecha colaboración y sus aportes de logística y/o información, que resultaron esenciales para el desarrollo de este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Corominas, J. y García Yagüe, A.** (1997). Terminología de los movimientos de ladera, En: *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Granada, España*, Vol. 3, pp. 1051-1072.
- Cruden, D. M.** (1991) “A simple Definition of a Landslide”, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 43, pp. 27-29.
- Cruden, D. M. and Varnes, D.J.** (1996) “Landslide Types and Processes, Special Report”, *Transportation Research Board, National Academy of Sciences*, 247: 36-75.
- Fernández, D. S. y Lutz, M. A.** (2003) “Procesos de remoción en masa y erosión fluvial en la quebrada del río Los Sosa, provincia de Tucumán”, *Rev. Asoc. Geol. Argent.* Vol.58, No 2, pp. 255-266.
- Fernández, D. S.** (2009) “Eventos de remoción en masa en la provincia de Tucumán: tipos, características y distribución”, *Rev. Asoc. Geol. Argent.* Vol.65, No 4, Buenos Aires, pp. 748-759.
- Hungr, O., Leroueil, S. and Picarelli, L.** (2014) “The Varnes classification of landslide types, an update”, *Landslides*, Vol. 11, pp. 167-194.

Palmquist, R. C. and Bible, G. (1980) "Conceptual modelling of landslide distribution in time and space". Bull. I.A.E.G., No 21, pp. 178-186.

Ritchie, A. M. (1963) "Evaluation of rock fall and its control" *Highway Research Record*, No 17, pp. 13-28.

Terzaghi, K. (1950) "Mechanics of landslides", Geological Society of America, Berkeley volume, pp. 83-124.

Varnes, D. J. (1978) "Slope movement types and processes", Special report 176, Landslides: analysis and control. Transportation research Board. pp. 11-33.

Bibliografía

Agudelo Ospina, J. J. (2002) "Diseño Geométrico de Vías, Ajustado al Manual Colombiano". Trabajo de grado. Especialidad en Vías y Transporte. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas.

Allmendinger, R. W., Cardozo, N. and Fisher, D. M. (2012) *Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology*. Cambridge University Press, Cambridge, England.

Azzoni, A., La Barbera, G. and Zaninetti, A. (1995) "Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 32, N° 7, pp 709-724.

Bozzolo, D., Pamini, R. y Hutter, K. (1988) Rockfall analysis - a mathematical model and its test with field data, En: *Proc. 5th Intl symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland*, pp. 555-563.

De Stefano, R. (2015) "Estabilización de Taludes Utilizando una Alternativa Ambiental más Viable", *PLANETA Minería y Construcción*, N° 18, pp. 8-12.

González de Vallejo, L. (2002) *Ingeniería Geológica*. Prentice-Hall, Madrid, España.

Gray, D. H. and Leiser, A. T. (1982) *Biotechnical slope protection and erosion control*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, E.E.U.U.

Hoek, E. and Bray, J. W. (1981) *Rock Slope Engineering. Revised third edition*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, England.

Hoffmann, H. and Shevlin, T. (2019) Advances in Rockfall Protection: A Preliminary Design Tool for Attenuators, En: *70th Highway Geology Symposium*, Portland, Oregon, E.E.U.U.

Hungry, O. and Evans, S. G. (1989) *Engineering aspects of rockfall hazard in Canada*. Thurber Consultants and Geological Survey of Canada, Open File 2061. Vancouver, Canadá.

Pierson, L. A., Davis, S. A. and Van Vickle, R. (1990) *Rockfall Hazard Rating System, Implementation Manual*. Federal Highway Administration (FHWA) Report FHWA-OR-EG-90-01. FHWA, U.S. Department of Transportation.

Pierson, L. A. and Van Vickle, R. (1993) *Rockfall Hazard Rating System, Participant's Manual*. Federal Highway Administration (FHWA) Report FHWA-SA-93-057. U.S. Department of Transportation.


Spang, R. M. and Rautenstrauch, R. W. (1988) Empirical and mathematical approaches to rockfall prediction and their practical applications, En: *Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, Switzerland*, pp. 1237- 1243.

Varnes, D. J. (1984) *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Natural Hazards N° 3, UNESCO, Paris, France.

CONTEXTO

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto Final de grado en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán del Ing. Luciano Antolini y como parte de la línea de investigación del PIUNT E757. 04/08/2023

AUTORES

ANTOLINI, Luciano - ORCID  0009-0000-7395-3070

Ingeniero Civil graduado de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT) desde agosto de 2023. Entre diciembre de 2021 y marzo de 2024 se desempeñó como ayudante de cátedra en las asignaturas “Estabilidad I” y “Estabilidad & Resistencia de Materiales”. Actualmente realiza sus estudios de posgrado de la carrera “Maestría en Ingeniería Geotécnica” de la UNT, la cual se enmarca en un programa de doble titulación con la Technische Universität München (TUM) de Alemania, y participa como investigador en los Proyectos y Programas de Investigación PIUNT (convocatoria 2022), formando parte del equipo de trabajo del proyecto código E757.

E-mail: luciano_antolini@hotmail.com

ABASCAL, Liliana del V. - ORCID  0000-0002-4043-2620

Geóloga graduada en la Facultad de Ciencias Naturales e IML de la Universidad Nacional de Tucumán. Doctora en Geología, orientación Geología Estructural en la UNT y Mastère Spécialisé® “Gestion de l’Eau” (BAC+6) Ecole AgroParisTech-ENGREF, Francia. Desarrollé mi carrera profesional en el ámbito de las Ciencias de la Tierra, como docente universitaria, investigadora y consultora. Me desempeñé en cargos de gestión universitaria y actualmente soy profesora en la carrera de ingeniería civil e integro la Comisión Académica de Ingeniería Civil en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la UNT. Directora del proyecto PIUNT E757.

E-mail: labascal@herrera.unt.edu.ar

GUZMÁN, Juan Carlos - ORCID  0000-0002-4606-8735

Ing. Civil (UNT), Profesor Asoc. y Adjunto Dpto. Construcciones y Obras Civiles FACEyT, Diplomado en Formación Pedagógica. Investigador. Especialista en Obra Pública, Proyectista y Ejecutor de obras de Ingeniería Urbana y Viviendas, Representante Técnico y Auditor de Obras. Co-director del proyecto PIUNT E757.

E-mail: jcguzman@herrera.unt.edu.ar

Análisis de variables que influyen en la cristalización de carbonato de litio calidad batería

GONZÁLEZ, Diego Alejandro¹, LUCENA, María Cecilia¹, GRAMAJO, Mónica Beatriz¹ y BRANCHER, Santiago.¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Laboratorio de Físicoquímica Teórica y Aplicada.

Resumen

El proceso de purificación de carbonato de litio tiene como finalidad refinarlo desde 96% al 99% que corresponde a la calidad batería. La cristalización, dentro de ese proceso, está influenciada por tres variables: la temperatura, el caudal de recirculación de la pasta purificada y el caudal de alimentación del cristizador que proviene de las columnas de intercambio iónico. Estas variables y su control son de vital importancia dado que modifican el tamaño de las partículas afectando su buen crecimiento y la estabilidad de sus diámetros. Con la finalidad de evaluar la influencia de estas variables se tomaron muestras en los cristalizadores y se midió el tamaño de la partícula mediante difracción láser MICROTRAC MRB teniendo en cuenta las variaciones en temperatura, caudal de recirculación y caudal de alimentación. Se pudo evidenciar que a mayor temperatura ocurren dos situaciones; a mayor caudal de alimentación es mayor el tamaño de partículas, y, por el contrario, a mayor recirculación es menor el tamaño de partículas.

Palabras claves: Litio, Extracción, Cristalizadores.

Factors Influencing Battery Quality Lithium Carbonate Purification

Abstract

The purpose of the lithium carbonate purification process is to refine it from 96% to 99%, which corresponds to battery quality. Crystallization, within this process, is influenced by three variables: temperature, the recirculation flow of the purified paste, and the flow rate of the crystallizer that comes from the ion exchange columns. These variables and their control are of vital importance since they modify the size of the particles, affecting their good growth and the stability of their diameters. In order to evaluate the influence of these variables, samples were taken in the crystallizers and the particle size was measured by means of MICROTRAC MRB laser diffraction, taking into account the variations in temperature, recirculation flow and feed flow. It was possible to show that at higher temperatures two situations occur; the higher the feed flow rate, the larger the particle size, and, conversely, the higher the recirculation, the smaller the particle size.

Keywords: *Lithium, Extraction, Crystallizers.*

Introducción

El litio es un elemento que presenta relativa abundancia en la corteza terrestre, se lo puede encontrar tanto en rocas como también disuelto en aguas marinas y continentales. Las salmueras naturales, son depósitos que tienen mayor concentración de litio, en ellos se encuentra el elemento disuelto como ión, también está presente en aguas subterráneas de algunos salares, acompañado de potasio, magnesio y boro **Jiang et al.** (2014). Por lo general la mayor parte del litio en estos depósitos proviene de aguas geotermales, o tal vez en parte de la lixiviación de cenizas volcánicas, arcillas o de otras rocas ricas en este elemento. Por lo tanto, cuando estas aguas geotermales diluidas llegan a la superficie terrestre a cuencas cerradas e impermeables, más precisamente a los salares y en un clima árido, se concentran por el proceso de evaporación solar. Estas salmueras de litio dan lugar a un número reducido de grandes depósitos a nivel mundial. En Sudamérica existe un área conocida como el “Triángulo del litio” que concentra aproximadamente el 85% de este elemento en el mundo. Lo integran el salar de Atacama en Chile, el salar del Hombre Muerto en Argentina y el salar de Uyuni, en Bolivia; este último contiene el 45% de las reservas mundiales de litio. La extracción de salmueras de litio se realiza a través del bombeo debajo de la corteza salina (30 a 50 metros de profundidad), las que son depositadas en piletones de baja profundidad y grandes dimensiones, en las cuales, y a partir del proceso de evaporación solar, comienzan a decantar secuencialmente un conjunto de sales. El proceso de evaporación, eleva la concentración de las sales, haciendo que la salmuera concentre mayor cantidad de litio. Hay que destacar que la evaporación no consume energía artificial, es decir aquella que se obtiene por acción del hombre a través de procesos físicos o químicos. Este proceso depende de las condiciones meteorológicas del lugar (radiación solar, vientos, velocidad de evaporación y régimen de lluvias). La tasa de evaporación es una medida de la cantidad de agua que se evapora en un determinado tiempo, la medida de la misma en las piletas in situ resulta compleja, es por ello que la estimación de la misma se realiza a través de evaporímetros o tanques de evaporación que de manera análoga respondan a las mismas variables climáticas. El concentrado

obtenido por evaporación, rico en cloruro de litio (LiCl), es llevado a un proceso de purificación, y luego se añade carbonato de sodio (Na_2CO_3) para generar carbonato de litio (Li_2CO_3). En los últimos años, con el desarrollo de las industrias de baterías y monocristales en el mundo, la demanda está creciendo dramáticamente, mientras que su oferta es deficiente en cierta medida. En consecuencia, promover la producción de Li_2CO_3 de alta pureza se ha vuelto altamente necesario en la actualidad. Este compuesto puede ser utilizado en varias aplicaciones (fabricación de vidrios y cerámicas, industria del aluminio, grasas lubricantes, etc.). De todos los usos aplicables del litio, como se mencionó anteriormente, las baterías son las que tienen mayor trascendencia debido a que constituyen la fuente de energía de diversos equipos electrónicos teléfonos celulares, notebooks, tablets. Además de su uso en dispositivos electrónicos, las baterías de litio tienen una aplicación destacada en el sector automotriz, siendo la principal fuente de energía en vehículos eléctricos. Estas baterías permiten mayor autonomía y eficiencia, facilitando la transición hacia un transporte más sustentable y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles, **Gruber et al.** (2011). Estos dispositivos están diseñados para almacenar energía eléctrica, que emplea como electrolito una sal de litio que contiene los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. Sin estas baterías no hubiera sido posible el desarrollo de la tecnología actual, y cada vez son más compactas y pequeñas, **De la Hoz et al.** (2013).

Para obtener carbonato de litio al 99%, debe tenerse en cuenta el proceso que lo antecede:

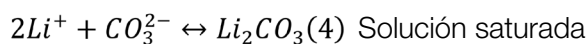
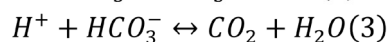
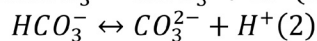
La salmuera es extraída de piletas donde previo al ingreso al proceso industrial es pretratada mediante un proceso de apagado de cal (conversión de óxido de calcio a hidróxido de calcio mediante agregado de agua) para abatir al ion calcio, **González et al.** (2020). En esta instancia la salmuera ingresa a la planta industrial donde atraviesa una serie de operaciones unitarias, la primera es la reacción química que se produce cuando la misma reacciona con un licor madre remanente del proceso para producir bicarbonato el cual atravesará un tándem de centrifugas y posterior filtrado, para eliminar sulfatos y magnesio presentes.

Luego de las etapas mencionadas la solución es recibida en un tanque pulmón que alimentará a los reactores tipo TAC (tanque agitado continuo) los cuales, además, son alimentados con carbonato de sodio y en donde bajo ciertas condiciones de presión temperatura y velocidad de agitación se produce carbonato de litio, que finalmente es enviado a un filtro banda donde la fase rica en carbonato de litio tiene una composición al 96%.

Proceso de purificado de carbonato de litio 96%

El carbonato de litio con una composición al 96% debe pasar por un proceso de "purificación" que consiste en un método de carbonatación-descomposición a fin de producir Li_2CO_3 de alta pureza, **Trócoli et al.** (2014). Por ser una operación relativamente simple, de bajo costo, alta eficiencia y baja contaminación, es uno de los procesos más utilizados. Para este método, el Li_2CO_3 primario (96%) debe convertirse primero en LiHCO_3 soluble en agua mediante carbonatación con soluciones de CO_2 - H_2O ; las impurezas del Li_2CO_3 crudo se solubilizan o precipitan y las impurezas disueltas se separan de las soluciones de LiHCO_3 mediante métodos de purificación adecuados, como intercambio iónico o extracción con disolventes; luego, el Li_2CO_3 de alta pureza se precipita calentando la solución de LiHCO_3 purificada.

La precipitación de Li_2CO_3 descrita anteriormente implica diversas reacciones químicas en serie y el posible mecanismo puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones:



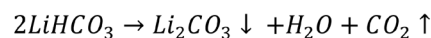
Li_2CO_3 : Solución saturada \rightarrow Li_2CO_3 solución supersaturada

Li_2CO_3 : Solución supersaturada \rightarrow Li_2CO_3 solución supersaturada \rightarrow cluster molecular

Li_2CO_3 : Cluster molecular \rightarrow Li_2CO_3 núcleos de cristalización

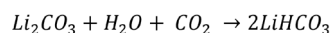
Li_2CO_3 : Núcleos de cristalización \rightarrow Li_2CO_3 cristal granulado

De manera que la ecuación general del proceso puede ser descrita por:



(Yi et al. (2010))

Este proceso consiste en alimentar el tanque de repulpeo con el carbonato de litio 96% obtenido de la primera etapa del proceso, y luego la pulpa es bombeada a los absorbedores dispuestos en serie. En cada absorbedor se inyecta CO_2 esto permite que el carbonato de litio se convierta en bicarbonato de litio soluble, que se acumula en el tanque de recepción de absorbedores, tal como se indica en la siguiente reacción:



La solución acumulada en dicho tanque es filtrada para separar la solución rica en bicarbonato de litio y el carbonato sin reaccionar. El material sólido es enviado a un tanque de acumulación, mientras que la solución se somete a un proceso de intercambio iónico con resinas, en dos etapas.

Intercambio iónico

La operación del sistema de Intercambio iónico tiene como finalidad disminuir el contenido de impurezas en la solución de bicarbonato de litio, en particular Calcio, Magnesio, Boro. Este proceso utiliza dos resinas especialmente adaptadas al tratamiento de soluciones de bicarbonato de litio. Estas se encuentran en dos grupos de tres equipos de lechos de resina. En la primera etapa se utiliza un tipo de resina, que permite la remoción de la dureza y metales presentes (Ca y Mg), en la solución de bicarbonato de litio mientras que en la segunda etapa se utilizará otra resina de distintas características, que permite la remoción del boro, **Calvo** (2018). En ambas etapas, se utilizan dos equipos en serie, de modo que en el primero se lleva a cabo la primera etapa de remoción que contempla concentraciones más elevadas del metal a extraer mientras que la otra columna elimina los restos que pueden haber quedado de la etapa anterior. Es decir, habrá cuatro equipos trabajando en serie. Cada etapa dispone de un total de tres equipos, de modo que siempre puedan estar dos trabajando en serie, mientras

el tercero se regenera o queda en espera una vez regenerado. En todos los casos, la operación de intercambio y de regeneración se realizan con dirección de flujo, de arriba hacia abajo. Las resinas están constituidas por una superficie recubierta con cationes sodio, reteniendo la dureza, metales y boro, que son reemplazados por iones sodio. Sin embargo, dado que estas resinas están especialmente adaptadas al tratamiento de soluciones concentradas, retienen fuertemente los iones mencionados, evitando que la misma solución actúe como regenerante. Por ello, para la regeneración debe utilizarse un ácido fuerte, sulfúrico o clorhídrico, y luego mediante el pasaje de soda cáustica convertir la resina a la forma sódica original para volver a las condiciones de servicio. Este hecho ocasiona que el proceso de regeneración requiera de un tiempo considerable respecto al del proceso y en varias etapas (si se lo compara con un proceso común de un ablandador). El tiempo que demanda la regeneración es relativamente de 6 horas. La planta dispone de un conjunto de instrumentos cuyas señales son enviadas a un tablero de control provisto de un PLC que permite implementar todas las funciones de control requeridas, así como registrar estas variables y los eventos que se producen. Cada unidad de Intercambio posee una altura de 3,2 m y 1,9 m de diámetro, tiene una capacidad para 4000 l de resina, con revestimiento interior de ebonita, un falso fondo con strainers, una trampa de resinas y por diseño, una pérdida de carga de 3 bar a 65m³/h y 4,5 bar, **Hoshino (2013); Intaranot et al. (2014), Liu et al. (2015).**

Previamente al ingreso a los cristalizadores la solución refinada de bicarbonato de litio se calienta a 70°C en un intercambiador de calor en espiral. En los cristalizadores se continúa con el calentamiento siendo de 70°C en el cristalizador A, 75°C en el cristalizador B y 83°C en el cristalizador C. En este último, se produce la cristalización del carbonato de litio, por desorción de CO₂. El producto final se retira por rebalse y se envía al espesador por medio de bombas, **Yi et al. (2010).**

La etapa de cristalización es una de las más importantes porque determina las condiciones óptimas del tamaño de las partículas para una buena filtración de la pasta rica en carbonato de litio. Fig.1

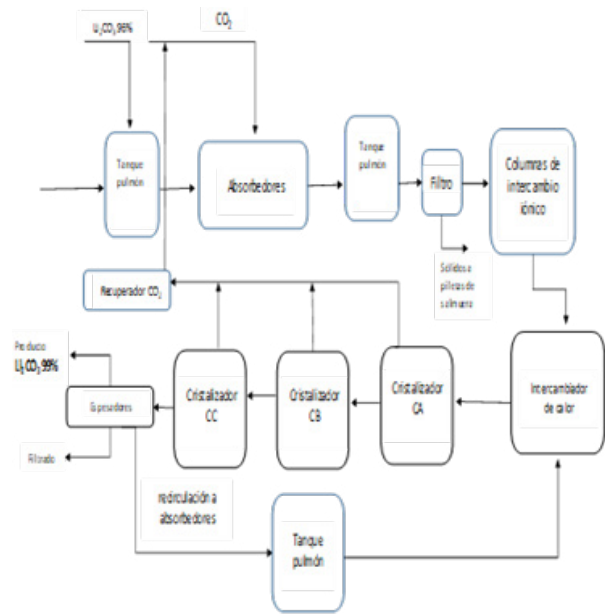


Figura 1: Proceso de obtención de carbonato de litio calidad batería.

Planteo del problema

A menudo se observan variaciones significativas en los tamaños finales de los cristales, ocasionando un aumento en la recirculación a absorbedores, lo que lleva a una disminución en la concentración de entrada al cristalizador CA y por lo tanto a una disminución de la eficiencia del proceso en los cristalizadores.

Las condiciones operativas como caudal de pulpa rica en carbonato de litio, caudal de recirculación, temperatura de cristalización, deben ser controladas en detalle para un buen crecimiento y estabilidad en el diámetro de los cristales. Los cristales de gran tamaño presentan la ventaja de un producto con una humedad adecuada a la hora de filtrarse.

Para obtener un buen control de las variables, temperatura, caudal de recirculación de la pasta purificada y caudal de alimentación del cristalizador que proviene de las columnas de intercambio iónico, se tomaron muestras de los cristalizadores y se midió tamaño de la partícula mediante difracción láser MICROTRAC MRB y caudal con el equipo MAG teniendo en cuenta las variaciones en temperatura, caudal de recirculación y caudal de alimentación, **Holcombe (1998).**

Materiales y métodos

Procedimiento

El ensayo se llevó a cabo durante seis días corridos en una empresa dedicada al desarrollo y producción de litio en la provincia de Jujuy en el mes de enero de 2023. Las muestras fueron tomadas cada 4 horas en los diferentes puntos que se observan en la figura 2. En cada muestra se analizó la distribución de diámetros de partículas. Las variables medidas para el análisis de cada muestra analizada fueron: temperatura, agitación de cada cristizador y caudal de recirculación, de esta manera se podrá conocer con mayor detalle cómo trabaja cada uno de los cristalizadores. Una vez analizados el tren de cristalización, se realizará un análisis del espesador, para conocer la distribución de tamaños con la cual opera.

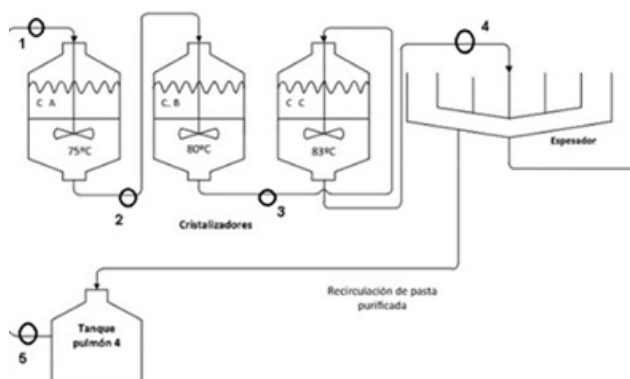


Figura 2: Puntos críticos de muestreo para analizar las posibles causas de la disminución de rendimiento en la etapa de cristalización: 1. Entrada de pulpa rica (caudal de pulpa rica +caudal de recirculación), 2. Salida de cristales de Cristalizador A, 3. Salida de Cristalizador B, 4. Ingreso a Espesador, 5. Salida de Tanque pulmón (caudal de recirculación)

Equipos

El Microtrac MRB modelo S3500, sistema óptico trípode, rojo, multidetector, multiángulo, capacidad de medición de 0,02 a 2800 μm , principio de medición Difracción láser, láseres 3x rojo 780 nm, poder del láser 3 mW nominal, dos detectores fotoeléctricos fijos con segmentos espaciados logarítmicamente colocados en ángulos correctos para una detección de luz dispersa óptima de 0.02 a 165 grados usando 151 segmentos detectores

MAG Siemens modelo 6000: son transmisores con un display alfanumérico incorporado en varios idiomas. Los transmisores evalúan las señales moduladas por los sensores electromagnéticos correspondientes y realizan además la función de una fuente de alimentación que abastece a las bobinas de excitación con corriente constante. Error de medición máx. $\pm 0,2 \pm 1$ mm/s, excelente resolución de señales para una relación caudal máx./mín. óptima.

Resultados

Las condiciones operativas para el proceso de cristalización fueron:

Agitación: 50Hz

Temperatura CA: 75°C

Temperatura CB: 80°C

Temperatura CC: 83°C

Caudal de recirculación de espesador a CA: 20 l/h

El análisis se focalizó en el cristizador CA, que destaca por la abundancia de corrientes de entrada y salida, además de numerosas variables que interactúan simultáneamente.

La solución refinada de bicarbonato de litio se calienta a 70°C en un intercambiador de calor antes del ingreso a los cristalizadores. La Fig. 3 muestra el seguimiento de temperatura, caudal de recirculación, agitación, caudal de entrada y tamaño de partícula durante los días que se realizó el estudio

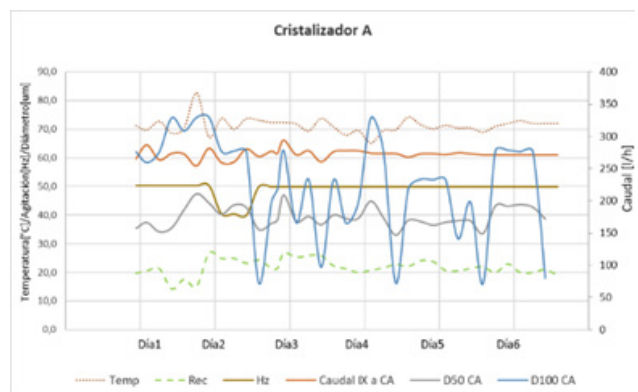


Figura 3: Monitoreo de Variables del Proceso en Cristalizadores

Para evaluar la homogeneidad en la distribución de tamaños, se realizó el seguimiento del cristal mediante el equipo Microtrac MRB; una vez que ingresa al tren de cristalizadores. En la Figura 4 se muestra la variación del tamaño de partícula (diámetro D₉₀) a lo largo de los días del estudio.

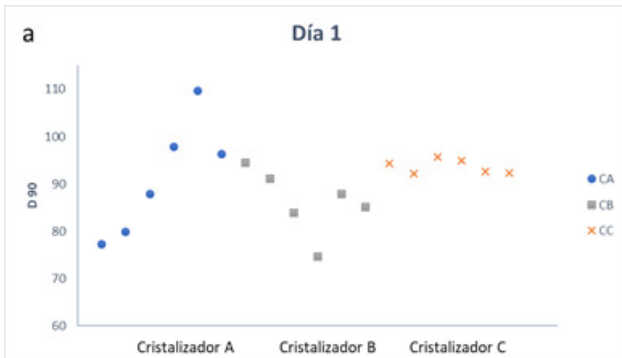


Figura 4a: Distribución del tamaño de las partículas del 1er día

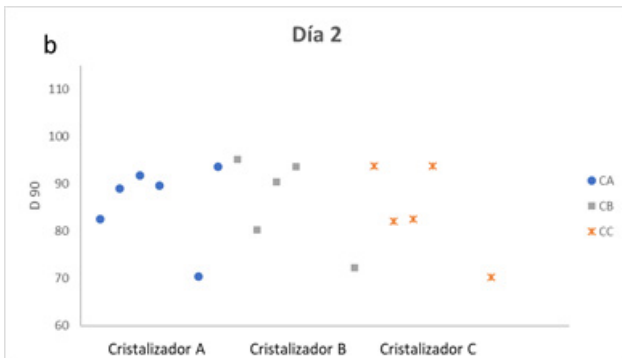


Figura 4b: Distribución del tamaño de las partículas del 2do día

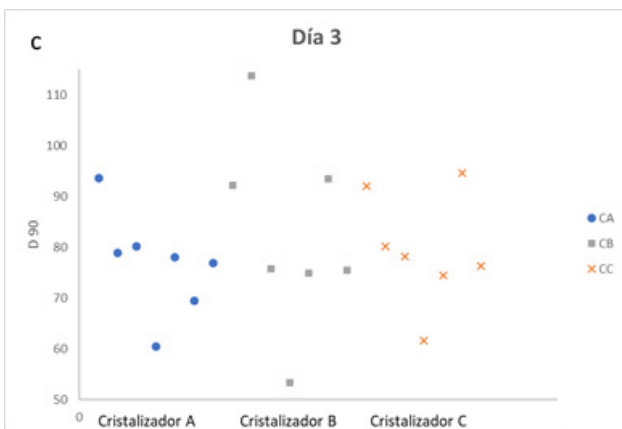


Figura 4c: Distribución del tamaño de las partículas del tercer día

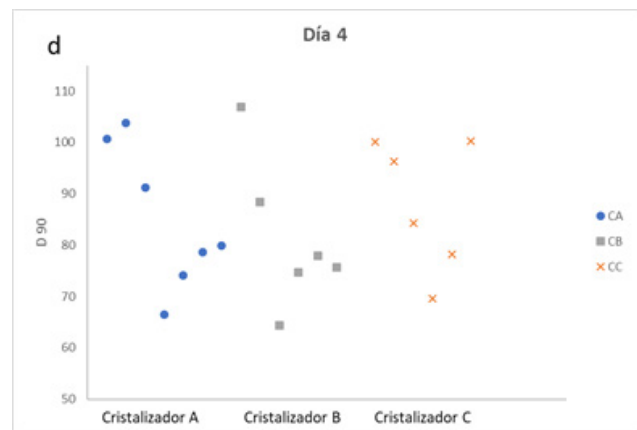


Figura 4d: Distribución del tamaño de las partículas del cuarto día

En las gráficas de la Fig. 4 se observa que los cristalizadores CB y CC operan de manera similar, con una tendencia de crecimiento y homogeneidad influenciada principalmente por el cristalizador CA. Este comportamiento sugiere que las condiciones en el cristalizador CA son determinantes en el desarrollo de los cristales en los otros dos cristalizadores.

En el día 1 de estudio los tubos se incrustaron razón por la cual se inyectó vapor directo, este cambio brusco de temperatura se aprecia mejor en la Fig. 6. Los días 2 y 5 el crecimiento fue controlado y estable, obteniendo una pasta homogénea para el espesador y filtro.

Análisis en el espesador

Con el fin de conocer la distribución de tamaños en cristales que ingresa al espesador, se realizó un análisis general a lo largo de los días del estudio.

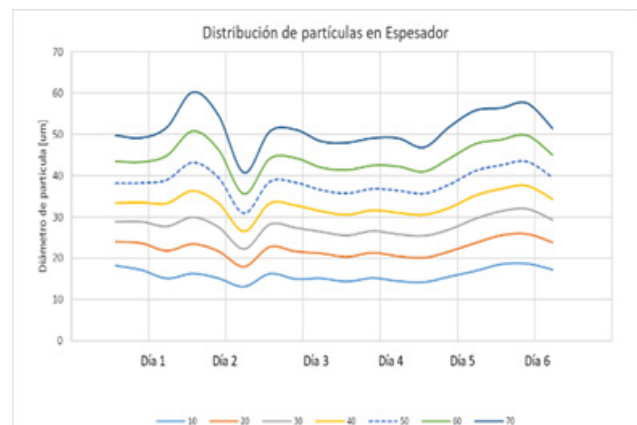


Figura 5: Distribución general de tamaños de partículas que ingresan al espesador

En la Fig. 5 se observa que durante el día 1, un aumento de tamaño de los cristales y luego una disminución de los mismos debido a la inyección de vapor que se debió efectuar a causa de la incrustación de los tubos. Los días posteriores se obtuvieron tamaños estables en los cristales, coincidiendo con los gráficos mostrados anteriormente

Contraste de Tamaños de Partículas en Cristalizadores y Espesador

En la Fig. 6 se presenta una gráfica comparativa del tamaño D90 en el tren de los cristalizadores y el espesador. D90 designa el tamaño de partícula correspondiente al percentil 90, es decir, el valor de diámetro aerodinámico que divide la población de partículas de manera que el tamaño del 90 % de las partículas sea menor que dicho valor; D50 corresponde al diámetro aerodinámico mediano. Se observa la fluctuación en la distribución de tamaño de los cristales, con picos pronunciados en los diferentes días, esto es una causa del rendimiento no esperado que presenta el proceso.

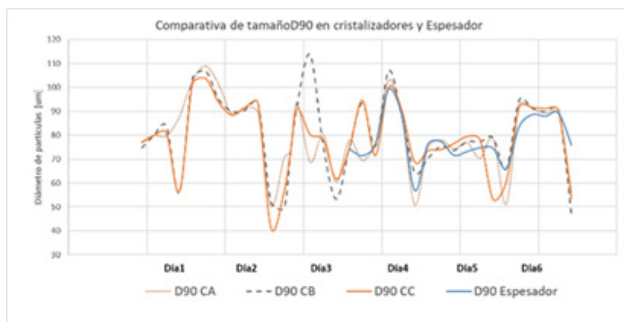


Figura 6: Comparativa de tamaño D90 en tren de cristalizadores y espesador.

Conclusiones

En el proceso de purificación de carbonato de litio, se busca obtener cristales de tamaño elevado debido a las siguientes ventajas:

Poseen menor área superficial, esto dificulta la humectación, obteniendo cristales más secos para el proceso siguiente.

Cristales grandes en los equipos CB y CC dan lugar a crecimiento rápido de los mismos, como consecuencia, se baja la cantidad de carbonato de litio en solución.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, el análisis se basó en interpretar cómo afectan las variables del proceso la distribución de tamaño de los cristales llegando a las siguientes conclusiones:

El factor con mayor incidencia en la etapa de cristalización de carbonato de litio es la temperatura en el cristizador CA, donde inicia el crecimiento del cristal a una temperatura de 75°C, en tanto en los cristalizadores CB y CC se observó una constancia en el tamaño de partículas operando a 80°C y 83°C respectivamente. La frecuencia de agitación a 50Hz y el caudal de alimentación con un valor promedio de 60lt/h de salmuera evidenciaron un mayor rendimiento en el proceso.

En ocasiones los intercambiadores de calor sufren incrustaciones propias del proceso, por lo cual deben ser asistidos con vapor inyectado proveniente de calderas, esta inyección genera un crecimiento heterogéneo, dando como resultado una pasta fuera de especificación para el ingreso al espesador, esto puede observarse en Fig. 5 y Fig. 6. El ingreso de este tipo de pasta provoca un aumento en el caudal de recirculación y por lo tanto una disminución en la concentración inicial de la pasta rica en carbonato de litio, es por ello que tanto la inyección como la recirculación deben ser cuidadosamente controladas. Realizar la limpieza de cañerías y equipos para eliminar incrustaciones tales como intercambiadores, y evitar la inyección de vapor al proceso es fundamental para mantener la eficiencia de intercambio de calor y mantener los estándares de temperatura de las corrientes de proceso, así mismo en tanques y reactores para evitar daños en las paredes y aspas de agitadores. Otro aspecto a considerar es la verificación periódica en los puntos de medición de instrumentos y en accesorios como válvulas neumáticas, etc., donde también se acumulan incrustaciones.

Se considera necesario realizar una mayor cantidad de ensayos durante un tiempo más prolongado para tener un mejor seguimiento. Se sugiere un periodo de al menos dos semanas con una frecuencia de toma de muestra de dos horas, a fin de recabar datos más certeros que evidencien la consecuencia que tiene el cambio de las variables estudiadas en el crecimiento de los cristales, y así obtener una representación completa del proceso.

Agradecimientos

A las instituciones a las que pertenecen los autores y sus respectivas Direcciones de Investigación PIUNT 26E621 por el apoyo otorgado para la realización de la presente investigación.

Referencias bibliográficas

González, D. A., Bruhl, G. J. y Gramajo M. B. (2020) Estudio preliminar del contenido de aluminio en el proceso de extracción de litio. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 11(2), 1-9.

Calvo E. J. (2018) Almacenamiento de Energía: Presente y Futuro de Baterías de Litio. *Ciencia e Investigación*, Tomo 68 (2), 5-21.

De la Hoz, M., Martínez, V. R. y Media, J. L. (2013) El litio: desde los salares de la Puna a nuestros celulares Red de Repositorios Latinoamericanos. Vol. 3, Núm. 3, 58-67.

Gruber, P. W., Medina, P. A., Kelekian, G. A., Kesler, S. E., Eversion, M. P. and Wallington, T. J. (2011) Global lithium availability a constraint for electric vehicles. *J. Ind. Ecol.*, 15, 760-775.

Holcombe, H. (1998) *The Fitness for Purpose of Analytical Methods. A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics.* EURACHEM Guide. Eddington.

Hoshino, T. (2013) Preliminary studies of lithium recovery technology from sea water by electro dialysis using ionic liquid membrane. *Desalination*, 317, 11-16.

Intaranot, N., Garcia-Areas, N., Hector, A.L., Milton, J.A. y Owen, J.R. (2014) Selective lithium extraction from brines by chemical reaction with battery materials. *J. Mater. Chem. A.*, 18, 6374-6377.

Jiang, Ch., Wang, Y., Wang, Q., Feng, H. y Xu, T. (2014) Production of lithium hydroxide from lake brines through electro-electrodialysis with bipolar membranes (EEDBM). *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 6103-6112.

Liu, X.H., Chen, X.Y., He, L.H. and Zhao, Z.W. (2015) Study on extraction of lithium from Salt Lake brine by membrane electrolysis. *Desalination*, 376, 35-40.

Trócoli, R., Batiste, A. and Mania, F.L. (2014) Selectivity of a Lithium- recovery process based on LiFePO_4 . *Chem. Eur. J.*, 20 (32), 9888-9891.

Yi, W., Yan, C. and Ma, P. (2010) Crystallization Kinetics of Li_2CO_3 from LiHCO_3 Solutions, *Journal of Crystal Growth* 312, 2345-2350.

AUTORES

GONZALEZ, Diego - ORCID  0009-0006-1734-096X

E-mail: dgonzalez@herrera.unt.edu.ar

LUCENA, María Cecilia - E-mail: mclucena@herrera.unt.edu.ar

GRAMAJO, Mónica - E-mail: mgramajo@herrera.unt.edu.ar

BRANCHER, Santiago - E-mail: santiagomatias495@gmail.com

Orden y auto-organización en un modelo XY de dipolos magnéticos

BATTICH, Jeremías¹; ZAMORA, Dario Javier ^{2,3}

¹ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Tucumán, Argentina.

² Instituto de Física del Noroeste Argentino (INFNOA), Universidad Nacional de Tucumán y CONICET.

³ Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia, Università degli Studi dell'Insubria, Como, Italia

Resumen

Este artículo investiga la ordenación y autoorganización en un modelo XY compuesto por dipolos magnéticos, enfocándose en la generación espontánea de estructuras como vórtices y anti-vórtices mediante simulaciones computacionales. Se explora cómo las interacciones simples a nivel microscópico conducen a complejidades a gran escala, y cómo la alineación de espines a bajas temperaturas puede interpretarse como un esfuerzo del sistema por minimizar su energía libre de Helmholtz, en línea con la segunda ley de la termodinámica. Se discute la relevancia de la energía libre de Helmholtz, especialmente a bajas temperaturas, donde la minimización de la energía se vuelve más crítica que el incremento de la entropía. Este trabajo contribuye a una mejor comprensión de la dinámica y termodinámica de los sistemas complejos, ofreciendo perspectivas interdisciplinarias para el estudio de fenómenos de emergencia, transiciones de fase y autoorganización.

Palabras claves: Autoorganización, Modelo XY, Termodinámica.

Order and self-organization in an XY model of magnetic dipoles

Abstract

This paper investigates ordering and self-organization in an XY model composed of magnetic dipoles, focusing on the spontaneous generation of structures such as vortices and anti-vortices through computational simulations. It explores how simple microscopic interactions lead to large-scale complexities and how the alignment of spins at low temperatures can be interpreted as the system's effort to minimize its Helmholtz free energy, in line with the second law of thermodynamics. The relevance of Helmholtz free energy is discussed, especially at low temperatures, where energy minimization becomes more critical than entropy increase. This work contributes to a better understanding of the dynamics and thermodynamics of complex systems, offering interdisciplinary perspectives for studying emergence phenomena, phase transitions, and self-organization.

Keywords: Self-organization, XY Model, Thermodynamics.

Introducción

Un sistema complejo es una entidad compuesta por múltiples componentes interrelacionados o interdependientes que, en su conjunto, exhiben propiedades y comportamientos que no son evidentes a partir de las partes individuales. Estos sistemas son característicos por su dinámica no lineal, lo que significa que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales pueden llevar a resultados ampliamente divergentes, un fenómeno conocido como sensibilidad a las condiciones iniciales o efecto mariposa, **Scott** (2005).

Los componentes de un sistema complejo suelen estar conectados entre sí en redes no triviales, que pueden incluir conexiones locales y de largo alcance, con patrones de conexión que pueden influir significativamente en el comportamiento del sistema. Los sistemas complejos pueden exhibir transiciones de fase y puntos críticos donde el sistema cambia radicalmente su comportamiento en respuesta a pequeñas variaciones en los parámetros, **Bar-Yam** (2002).

Los sistemas complejos se encuentran en una amplia gama de disciplinas, incluyendo la biología (ecosistemas, evolución de especies, redes neuronales), la socioeconomía (mercados financieros, redes sociales, sistemas políticos), la tecnología (internet, sistemas de transporte, redes eléctricas) y muchos otros campos, **Boccara** (2010). El estudio de sistemas complejos se centra en entender cómo las propiedades colectivas emergen de la interacción entre partes y cómo estos sistemas pueden ser modelados, analizados y, en algunos casos, controlados.

Dos de las principales características de los sistemas complejos son la emergencia, que es la capacidad de generar propiedades y patrones nuevos y a menudo sorprendentes que emergen a nivel macroscópico a partir de las interacciones entre los componentes a nivel microscópico, sin que estos comportamientos estén programados o determinados de manera explícita por las reglas que gobiernan dichas interacciones, y la autoorganización, es decir, la habilidad de un sistema para formar espontáneamente estructuras y patrones ordenados a partir de condiciones iniciales desordenadas, sin la intervención de un agente externo o una planificación centralizada **Thurner et al.** (2018).

El modelo XY es un modelo físico teórico utilizado para estudiar fenómenos de transiciones de fase y comportamientos críticos en sistemas de materia condensada, **Chaikin y Lubensky** (2000). Este modelo se centra en sistemas de dos dimensiones compuestos por dipolos magnéticos (o espines) que pueden rotar libremente en el plano. A diferencia del modelo de Ising, donde los espines solo pueden apuntar hacia arriba o hacia abajo, en el modelo XY los espines tienen una orientación continua en 360 grados en el plano XY, lo que permite una descripción más rica de las interacciones y correlaciones entre partículas, ver Fig. 1.

El interés principal del modelo XY radica en su capacidad para describir fenómenos físicos como la superfluidez y la transición de fase de Kosterlitz-Thouless, que se caracteriza por la aparición de vórtices y antivórtices en el sistema a temperaturas críticas, **Kosterlitz y Thouless** (1973). Estas singularidades topológicas juegan un papel crucial en la transición de fase del sistema, que no puede ser explicada por el mecanismo convencional de ruptura espontánea de simetría. El modelo XY ha sido fundamental para entender la física de sistemas de baja dimensionalidad y ha inspirado numerosas investigaciones teóricas y experimentales en el campo de la materia condensada, particularmente en lo que respecta a las propiedades dinámicas y termodinámicas de sistemas cuasi-bidimensionales.

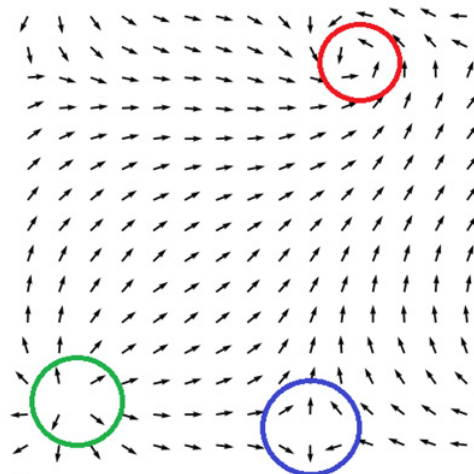


Figura 1: Ejemplo de modelo XY, una red de 15x15 dipolos magnéticos que interactúan a primeros vecinos y son capaces de generar espontáneamente estructura, como el vórtice (rojo), anti-vórtice (azul) y la fuente (verde) que se ven en el ejemplo.

El modelo XY es importante para estudiar sistemas complejos debido a varias razones clave que lo hacen un marco ideal para explorar fenómenos de emergencia, transiciones de fase y autoorganización. El modelo XY exhibe emergencia y autoorganización, ya que los patrones complejos y las estructuras, como vórtices y antivórtices, surgen espontáneamente de las interacciones simples entre los espines. Estos fenómenos son ejemplos de cómo la macro complejidad puede emanar de reglas microscópicas simples, un tema central en el estudio de sistemas complejos. El modelo permite investigar cómo las interacciones locales entre los componentes de un sistema pueden conducir a un comportamiento colectivo a gran escala. Este aspecto es fundamental para comprender la dinámica de sistemas complejos, donde las propiedades macroscópicas emergen de las interacciones a nivel microscópico. Aunque el modelo XY se originó en la física para estudiar sistemas magnéticos, sus principios se han aplicado a una variedad de campos, como redes neuronales, cristales líquidos, y películas superconductoras. Esto subraya la relevancia del modelo XY para explorar la complejidad en diversos contextos científicos y tecnológicos.

El estudio del modelo XY ha impulsado el desarrollo de avanzadas técnicas matemáticas y computacionales, como el método de Montecarlo, que son esenciales para analizar sistemas complejos, Ota et al. (1992). Estas herramientas permiten simular y estudiar la evolución temporal de sistemas con un gran número de componentes interactivos, facilitando la comprensión de la dinámica compleja y la predicción de comportamientos emergentes. En resumen, el modelo XY ofrece un laboratorio teórico y computacional para desentrañar cómo las interacciones simples a nivel microscópico pueden generar una amplia gama de comportamientos complejos a nivel macroscópico, lo que lo convierte en un pilar fundamental para el estudio interdisciplinario de sistemas complejos. En este trabajo nos limitaremos a estudiar la generación espontánea de orden, es decir, la autoorganización de la configuración de dipolos, a través de una simulación computacional y discutiremos su implicancia termodinámica.

Métodos

El código desarrollado implementa una simulación del modelo XY utilizando el algoritmo de Metropolis. El algoritmo Metropolis es un método de Monte Carlo en cadena de Markov para obtener una secuencia de muestras aleatorias a partir de una distribución de probabilidad a partir de la cual es difícil el muestreo directo. Esta secuencia se puede usar para aproximar la distribución (por ejemplo, para generar un histograma) o para calcular una integral (por ejemplo, un valor esperado), **Metropolis et al.** (1953). El modelo XY está compuesto por un sistema de dipolos magnéticos que pueden orientarse en cualquier dirección dentro de un plano, caracterizado por un ángulo que varía de 0 a π . En nuestro caso, estos espines están dispuestos en una red bidimensional de 15×15 , y la simulación explora la configuración de estos espines bajo diferentes temperaturas. La decisión de utilizar una red de 15×15 es que es suficientemente pequeña para que los tiempos de computación no sean grandes, pero de tamaño suficiente para que los efectos de orden puedan ser apreciables. Las condiciones de borde son periódicas.

El código permite inicializar el sistema definiendo parámetros como la temperatura, el tamaño de la red y las configuraciones iniciales de los espines (siempre aleatorias en nuestro caso). El algoritmo de Metropolis se aplica en el método `sweep`, donde se intenta cambiar la orientación de cada espín de manera aleatoria, y se acepta o rechaza el cambio basado en la diferencia de energía resultante y la temperatura del sistema, siguiendo el principio de minimización de la energía y la distribución de Boltzmann. La energía de interacción, E_{ij} , entre dos primeros vecinos, s_i y s_j , es:

$$E_{ij} = -s_i \cdot s_j = -\cos(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

De modo que cuando $\theta_i = \theta_j$, es decir, están alineados (orden ferromagnético), la energía es mínima ($E_{ij} = -1$). El código calcula la energía total y otras propiedades termodinámicas como la entropía y la distribución de ángulo a través de sus métodos correspondientes. Estas cantidades se utilizan para analizar el comportamiento del sistema a medida que evoluciona hacia un estado de equilibrio. A partir del

algoritmo Metropolis se obtiene un histograma de la distribución de ángulos, $p(\theta)$, para cada momento, y con él se puede calcular la entropía como:

$$H = - \int_0^{2\pi} p(\theta) \ln \ln (p(\theta)) d\theta \quad (2)$$

Resultados

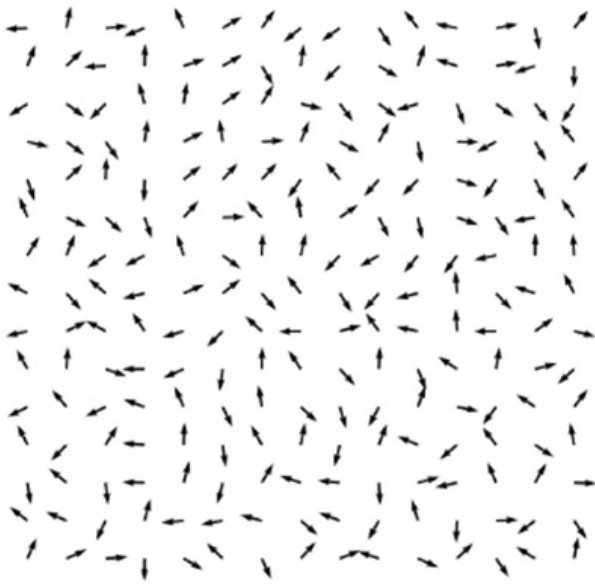


Figura 2.a

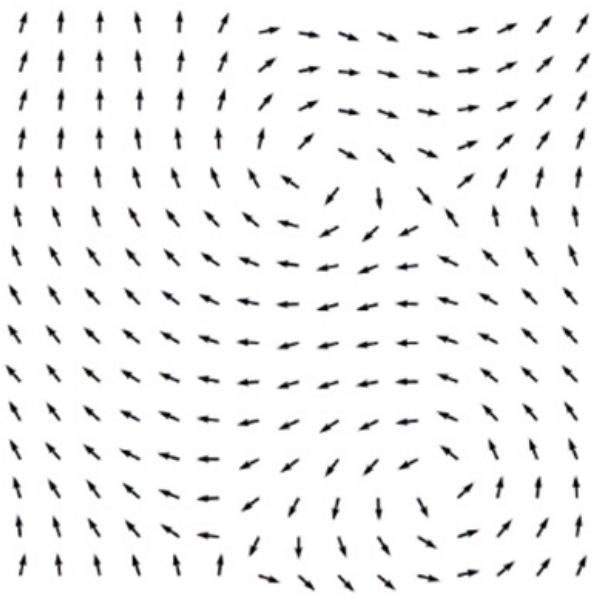


Figura 2.b

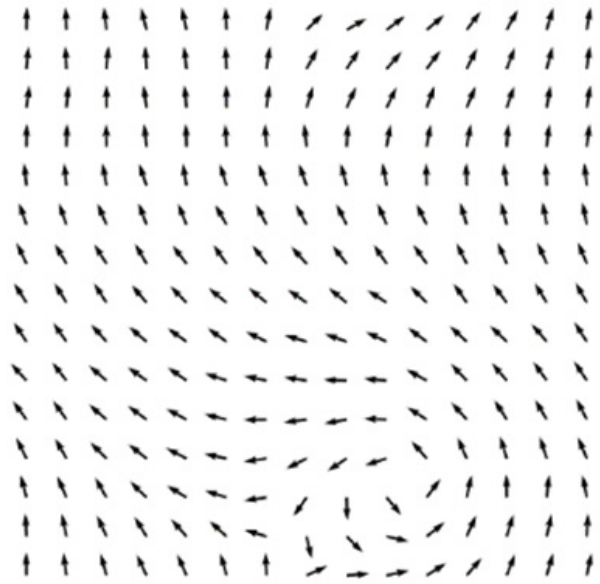


Figura 2.c

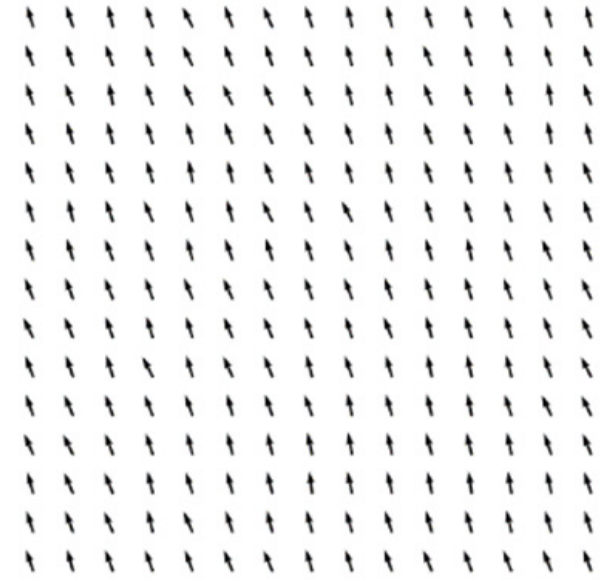


Figura 2.d

Figura 2: Evolución temporal de configuraciones de una red de 15x15 dipolos magnéticos. (a) paso 1, (b) paso 2000, (c) paso 4000 y (d) paso 10000 de la simulación. Simulación a $T=0.01K$.

En la Fig. 2 mostramos un ejemplo de una simulación a $T=0.01K$. Los espines comienzan con dirección aleatoria, por lo que cada orientación θ es igualmente probable, o sea, la probabilidad $p(\theta)=p=cte$. Para calcular el valor de p se

utiliza la condición de normalización, es decir,

$$\int_0^{2\pi} p(\theta)d\theta = 1 \Rightarrow p = 1/2\pi \quad (3)$$

Este tipo de configuración es desordenada, a veces llamada ‘gas-like’, ya que la variable microscópica de importancia (el ángulo) tiene una distribución aleatoria. Esta configuración es de baja complejidad descriptiva, ya que basta una simple instrucción para reconstruirla: colocar los espines con direcciones aleatorias.

En el otro extremo, si se espera tiempo suficiente, se observa que todas las simulaciones a bajas temperaturas terminan con todos los dipolos alineados, o sea, ahora la distribución es una delta de Dirac. Una orientación tiene probabilidad 1 y el resto 0. Y por lo tanto la entropía es mínima, ya que existe un orden total. Este tipo de configuración es llamada ‘cristal-like’. La complejidad es baja nuevamente en este caso, ya que una configuración fácil de reconstruir: sólo se deben colocar todos los espines apuntando en una dirección.

La parte más interesante son los tiempos medios de la simulación, cuando se forman patrones. En estos tiempos intermedios la entropía es media, y la complejidad es máxima, ya que es donde se forman estructuras como vórtices (dos en el ejemplo de paso 2000). Estas configuraciones presentan una combinación de orden y aleatoriedad, llamado orden parcial, por lo que no es fácil de reconstruir, ya que algunos dipolos deben tomar direcciones muy particulares. Además, este orden parcial es dinámico, es decir, cambia con el tiempo.

En la Fig. 3 mostramos los histogramas (suavizados) de la distribución de ángulos para los casos presentados en la Fig. 2. Los histogramas fueron construidos con 225 bins. Se puede observar cómo la distribución angular pasa de equiprobable a delta de Dirac. En la primera figura, la distribución no es perfectamente equiprobable porque estamos trabajando con una red finita (y relativamente pequeña) de 15x15 dipolos, es decir, estamos graficando como una función continua algo que en realidad es discreto.

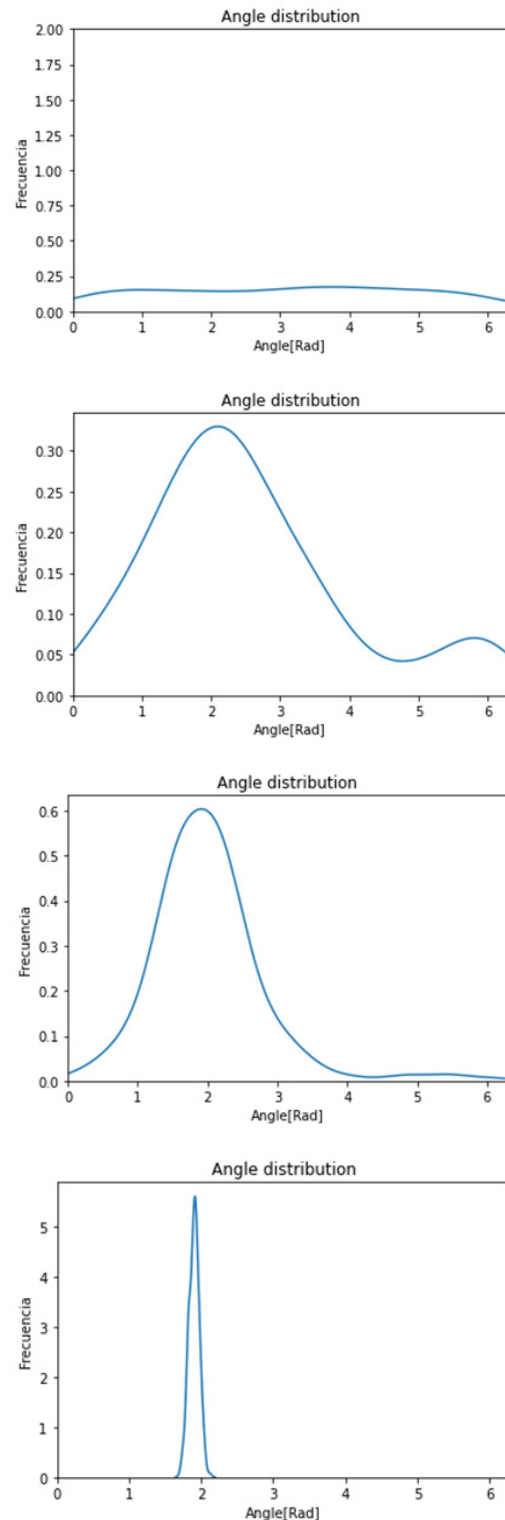


Figura 3: Evolución temporal de distribución angular de una red de 15x15 dipolos magnéticos. De arriba hacia abajo: (a) paso 1, (b) paso 2000, (c) paso 4000, (d) paso 10000 de la simulación. Simulación a T=0.01K.

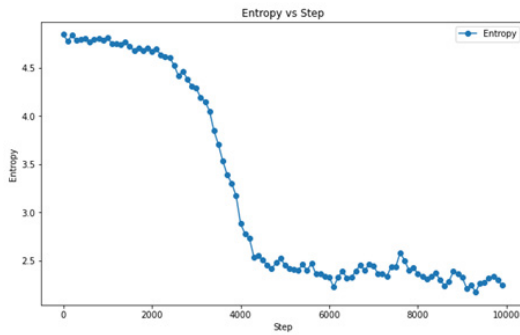


Figura 4: Evolución de la entropía en función del tiempo para el caso de simulación mostrado en la Fig. 2.

En la Fig. 4 presentamos la entropía en función del tiempo. Se observa claramente un descenso, indicando el paso del desorden (alta entropía) al orden parcial (entropía media) y luego orden total (mínima entropía).

Discusión

Si se presta atención, se ve que en el modelo XY, a medida que pasa el tiempo, la entropía disminuye. La segunda ley de la termodinámica establece que la entropía de un sistema aislado tiende a aumentar o permanecer constante con el tiempo. Sin embargo, es importante notar que la segunda ley de la termodinámica no se viola en este escenario. La aparente contradicción entre la alineación de dipolos en el modelo XY y la segunda ley de la termodinámica puede resolverse considerando el papel de la energía y la entropía en el sistema. En el modelo XY, la alineación de dipolos ocurre como resultado de minimizar la energía del sistema. La energía está dada por la interacción entre espines vecinos, como se describe en el Hamiltoniano del modelo XY, Ec. (1).

La energía libre de Helmholtz, denotada como F , es una función termodinámica fundamental que se define como $F = U - TS$, donde U es la energía interna del sistema, T es la temperatura absoluta y S es la entropía. La importancia de la energía libre de Helmholtz radica en que proporciona un criterio para la espontaneidad de los procesos a temperatura y volumen constantes: un proceso es espontáneo si conlleva una disminución en F .

En el contexto del modelo XY de espines y la segunda ley de la termodinámica, la relevancia de la energía libre de Helmholtz se hace evidente al considerar

las contribuciones relativas de la energía interna y la entropía al comportamiento termodinámico del sistema, especialmente a bajas temperaturas. Es decir, existe un compromiso del sistema entre disminuir la entropía o disminuir la energía.

A temperaturas bajas, el segundo término en la ecuación se vuelve pequeño, lo que significa que el término de la entropía tiene una influencia relativamente menor en la energía libre de Helmholtz en comparación con el término de la energía. En este régimen, disminuir la energía se vuelve más importante para minimizar F que aumentar la entropía. Esto implica que los procesos que conducen a una alineación de los espines, y por lo tanto a una disminución de la energía interna, pueden ser termodinámicamente favorables incluso si resultan en una disminución de la entropía del sistema de espines.

Por lo tanto, la alineación de los espines en el modelo XY a bajas temperaturas puede entenderse como un esfuerzo del sistema para minimizar su energía libre de Helmholtz. Este proceso es consistente con la segunda ley de la termodinámica, ya que la ley se refiere al aumento de la entropía del universo en su conjunto, no necesariamente a la entropía de sistemas individuales en aislamiento. En el caso de sistemas abiertos o partes de sistemas más grandes, la disminución de la entropía (y por ende de la energía libre de Helmholtz) en un subsistema puede compensarse con aumentos de entropía en otras partes del sistema o en el entorno, asegurando que la segunda ley se cumpla en un sentido global.

De hecho, cuando aumentamos la temperatura en nuestras simulaciones, las fluctuaciones térmicas hacen que el estado ordenado se llegue en tiempos de computación muchos mayores, o que directamente el sistema se mantenga en una configuración desordenada, manteniendo la entropía alta.

Conclusión

En este trabajo presentamos una simulación Monte Carlo del modelo XY de dipolos magnéticos, el cual fue utilizado para estudiar la auto-organización de los espines en función del tiempo, un concepto clave en la física de los sistemas complejos. Utilizando un algoritmo Metropolis, fuimos capaces de deducir la distribución angular de los dipolos,

y con ella calcular la entropía del sistema. Luego presentamos un análisis del orden en el sistema a bajas temperaturas y discutimos su relación con la segunda ley de la termodinámica.

El estudio del modelo XY demuestra su importancia en la comprensión de sistemas complejos, particularmente en lo que respecta a la emergencia y autoorganización de estructuras a partir de interacciones básicas. A través de simulaciones computacionales, se muestra que la alineación de

espines y la formación de estructuras como vórtices y anti-vórtices pueden entenderse en términos de la minimización de la energía libre de Helmholtz, sin violar la segunda ley de la termodinámica. Este enfoque termodinámico proporciona una valiosa herramienta para explorar la complejidad en diversos sistemas físicos y podría inspirar futuras investigaciones en campos relacionados, enfatizando la interconexión entre la física estadística, la termodinámica y la teoría de sistemas complejos.

Referencias bibliográficas

- Bar-Yam, Y.** (2002) "General Features of Complex Systems". UNESCO Publishers, Oxford.
- Boccara, N.** (2010) "Modeling complex systems", volume 1. Springer.
- Chaikin, P. M. and Lubensky, T. C.** (2000) "Principles of Condensed Matter Physics". Cambridge University Press.
- Kosterlitz, J. M. and Thouless, D. J.** (1973) "Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems", *Journal of Physics C: Solid State Physics* 6 (7): 1181-1203.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. and Teller, E.** (1953) "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines", *J. Chem. Phys.* 21, 1087.
- Ota, S., Ota, S. B. and Fahnle, M.** (1992) "Microcanonical Monte Carlo simulations for the two-dimensional XY model". *Journal of Physics: Condensed Matter.* 4 (24): 5411.
- Scott, A.** (2005) "Encyclopedia of nonlinear science". New York.
- Thurner, S., Hanel, R. and Klimek, P.** (2018) "Introduction to the Theory of Complex Systems". Oxford.

AUTORES

BATTICH, Jeremías

Es estudiante de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT), y está realizando su Tesis de Licenciatura en la temática de este trabajo bajo la dirección del Dr. Javier Zamora y co-dirección del Dr. Blas de Haro Barbas.

E-mail: jerebattich@gmail.com

ZAMORA, Dario Javier - ORCID  0000-0001-5672-6212

Es Doctor en Física (Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata). Es Investigador Asistente de CONICET en INFINOA (CONICET-UNT).

E-mail: javierzamora055@gmail.com

La importancia del croquis en ingeniería

GALVÁN, Luis Ariel ¹, PALACIOS, José Antonio ¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán,
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,
Departamento de Construcciones y Obras Civiles.

Resumen

El objetivo de este trabajo es revalorizar, dentro del marco de la Asignatura "Dibujo Analógico en Proyectos", la importancia del Croquis como paso primero en todo el proceso de elaboración creativa, brindando a los estudiantes herramientas de representación analógica, o dibujo a mano, que les permitieran abordar diversas situaciones a lo largo de toda la etapa proyectual.

El Siglo XXI, caracterizado por el permanente desarrollo tecnológico, impone a los profesionales la necesidad del trabajo en equipo, colaborativo y multi-disciplinario. Esto trae como consecuencia inmediata una verdadera obligación; la de brindar a los estudiantes universitarios las herramientas para posicionarse en este marco con la amplitud de criterio necesaria. De ahí que las líneas de pensamiento más actuales en la formación en las disciplinas tecnológicas ahonden en este punto.

En esta línea conceptual, en el año 2017, la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, abordó la creación y el dictado de la Asignatura mencionada, como Materia Electiva para las Carreras de Ingeniería Industrial, Ingeniería Biomédica y Diseñador de Iluminación.

En cuanto a la modalidad adoptada para el dictado fue la de clases teórico-prácticas en las que se elaboraron croquis de objetos variados, piezas de máquina y dispositivos mecánicos, y croquis arquitectónicos y urbanísticos, enfocándolos siempre desde su función de herramienta proyectual. Si bien la presentación de los trabajos fue individual, se incentivó en forma constante y permanente el trabajo grupal.

Es necesario consignar que en todo momento se buscó centrar en la idea de las representaciones ingenieriles de equipos, procesos y maquinarias dentro de una determinada industria, distinguiéndolas de las representaciones de índole arquitectónico.

Esta competencia permite la posibilidad de analizar el impacto ambiental que produciría, por ejemplo, la instalación de un determinado emprendimiento fabril ubicado en un cierto lugar. Si se piensa en el croquis de un predio donde funcionaría una fábrica, este dibujo mostraría la cantidad de máquinas en el lugar y cómo estarían distribuidas, lo que permitirá determinar de qué manera impactará en el entorno inmediato y próximo a ese predio.

Por todo lo dicho, podemos considerar que los objetivos de la Asignatura fueron alcanzados en tanto los estudiantes lograron incorporar:

a) El uso del boceto analógico como herramienta de diseño, y b) La organización de estos bocetos en una bitácora, o compilado de trabajos, que contiene la historia del proyecto.

Se realizaron entrevistas informales a fin de coleccionar las opiniones de los alumnos acerca de la Asignatura, como la importancia que la misma tenía en el marco de su carrera y la mecánica de dictado implementada, entre otras. Las opiniones, dentro de los márgenes de diversidad lógicos, coincidieron en cuanto a la fortaleza de este nuevo recurso expresivo, destacando la riqueza comunicacional del croquis y la plasticidad que brinda al proceso proyectual.

Palabras claves: Dibujo, Analógico, Croquis.

Introducción

El Siglo XXI, caracterizado por el permanente desarrollo tecnológico y la enorme complejidad que este trae aparejado, impone a los profesionales la necesidad del trabajo en equipo, colaborativo y multi-disciplinario. Esto trae como consecuencia inmediata una verdadera obligación; la de brindar a los estudiantes universitarios de ingeniería las herramientas para posicionarse en este marco con la amplitud de criterio necesaria. De ahí que las líneas de pensamiento más actuales en la formación en las disciplinas tecnológicas ahonden en este punto.

En esta línea conceptual, en el año 2017, la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT), consideró y abordó la creación y el dictado de la Asignatura "Dibujo Analógico en Proyectos" (DAP), como Materia Electiva para las carreras de Ingeniería Industrial, Ingeniería Biomédica y Diseño de Iluminación.

Siendo innegable el formidable potencial del Croquis como herramienta base en todo el proceso de elaboración creativa de los profesionales de las carreras de ramas técnicas, pero sobre todo en los primeros balbuceos del mencionado proceso, el objetivo de este trabajo fue revalorizar, dentro del marco de la Asignatura, la importancia de la mencionada herramienta. Por ello se procuró brindar a los estudiantes las técnicas y conceptos de representación analógica que les hicieran posible abordar en forma eficiente la multitud de situaciones factibles de presentarse a lo largo del proceso proyectual, entendiéndose el mismo como un conjunto de procedimientos empleados para resolver un problema de diseño.

La representación analógica tiene importancia fundamental en el aprendizaje del dibujo técnico,

debido a su adaptación a la naturaleza no binaria de la mente humana, posibilitando desarrollar la inteligencia espacial a través del dibujo.

Desarrollo

A lo largo del recorrido del programa de la Asignatura, se pone en relieve, en forma permanente, las características comunicacionales y expresivas de la representación analógica, desde su condición de lenguaje gráfico, en tanto se iba aportando los conocimientos técnicos que hacían a las diferentes modalidades de la representación, tales como perspectivas cónicas, axonométricas, proyecciones múltiples, etc. (Fig.1).

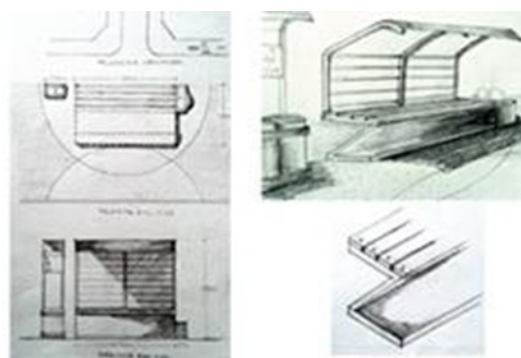


Figura 1: Representación en diferentes modalidades.

La modalidad adoptada para el dictado fue la de clases teórico-prácticas en las que se elaboraron croquis de variados objetos, tales como piezas de máquina y dispositivos mecánicos, y de croquis arquitectónicos y urbanísticos, enfocándolos siempre desde su función de herramienta de diseño proyectual.

Es necesario consignar que en todo momento se buscó centrarse en la idea de las

representaciones ingenieriles de equipos, procesos y maquinarias dentro de una determinada industria, distinguiéndolas de las representaciones de índole arquitectónico.

Si bien la presentación de los trabajos fue individual, se incentivó en forma constante y permanente el trabajo grupal, como un modo de inducir a los estudiantes a ser permeables a los conceptos y criterios distintos, de modo de aprovechar la interacción entre las diversas disciplinas, para ampliar y enriquecer los diferentes puntos de vista que las respectivas formaciones otorgan. En este punto el Croquis, entendido como herramienta proyectual, facilitó la articulación al reunir como características, además de su potente condición comunicacional y expresiva, el constituir en sí un tópico de interés para los estudiantes.

La asignatura estuvo dirigida a estudiantes que ya habían aprobado la Asignatura "Sistemas de Representación", por lo tanto contaban con conocimientos sólidos de la representación de la realidad tridimensional sobre soportes bidimensionales, ya sea a través de modelos de vistas múltiples (proyecciones, planta y cortes) o modelos de vista única (perspectivas cónicas y axonométricas). Además contaban con un manejo fluido del espacio, de la forma y de las proporciones.

En consecuencia, desde una concepción constructivista (Vygotsky), se aprovechó el bagaje de conocimientos que los alumnos traían para desarrollar, a partir de allí, el soporte conceptual y sistemático sobre el que se basaban los objetivos de la asignatura.

Todo proyecto implica la representación de una prefiguración futura. En consecuencia, en la Asignatura, en forma paulatina y a través de pequeños ejercicios de diseño, se fue pasando de la gráfica de representación de la realidad vivida a la gráfica de creación, en la que se muestra la realidad imaginada, futura.

Al desarrollar su tarea, el diseñador va construyendo en su interior un elemento que da vida a una realidad aún no existente.

Por lo tanto, además de los mecanismos que incentiven su capacidad creativa, debe poseer

los medios que le permitan comunicar esa realidad con exactitud, lo que posibilitará el pasaje desde el espacio intra-personal al mundo representacional, tangible y comunicacional.

La base conceptual sobre la que se apoyaron las técnicas impartidas a lo largo del dictado de la Asignatura, fue el estudio geométrico de la forma. Se funda en la idea de que las formas, aún las más complejas, son el resultado de la sumatoria de formas geométricas elementales. Estas formas serán figuras geométricas (círculos, polígonos, etc) si la representación es en dos dimensiones, o volúmenes elementales (cilindros, conos, poliedros, etc.) para el caso de la representación tridimensional.

Consecuentemente, se llevó al estudiante a "desmembrar" el objeto a representar hasta reducirlo a formas geométricas elementales. Esta tarea se fue elaborando en capas, sobre papel transparente (Fig. 2), lo que permite, por una parte "avanzar sobre el error" y por otra relacionar este método de trabajo con el arreglo en capas de los programas CAD. A partir de este andamiaje, que permite el estudio de la estructura "alambre" de la escena a representar, se estuvo en condiciones de hacer crecer en complejidad la representación hasta llegar al nivel del detalle.

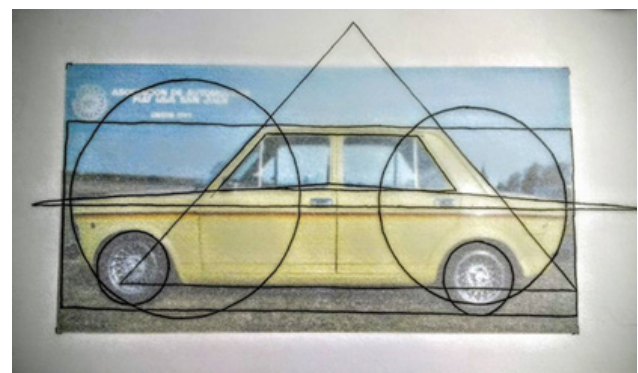


Figura 2: Estudio de las formas.

En esta instancia, la representación se centró fundamentalmente en las formas y las proporciones, procurando optimizar los criterios visuales con el objeto de fluidificar al máximo el aspecto comunicacional. Esto implicó dotar al dibujo, además de rigurosidad formal, de una fuerte carga expresiva (sombras, tramas, etc.) (Fig. 3).

El proceso proyectual es dinámico, evolutivo, se desarrolla en pasos sucesivos. Una idea primaria e intangible surge en la mente del diseñador. Haciendo uso de las técnicas de representación gráfica, deposita esa idea sobre el soporte dando lugar entonces al surgimiento de la forma.

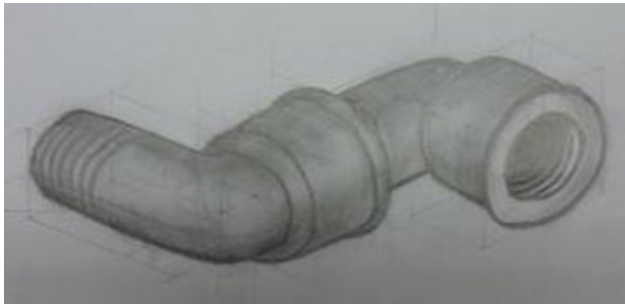


Figura 3: Sombras y tramas

Esto dispara una intensa "discusión" perteneciente a la esfera intrapersonal del diseñador, la que se va expresando gráficamente, en un proceso retroalimentado, que se va plasmando en nuevos dibujos, hasta que se arriba a un resultado satisfactorio. Incluso estos dibujos pueden enriquecerse con datos aclaratorios escritos. (Fig.4)

Pero esto no significa que se haya llegado al final del proceso. La carpeta técnica, los planos de representación sistemática de acuerdo a normas, todavía están lejos. Por ahora sólo hemos arribado al punto de la presentación del proyecto.

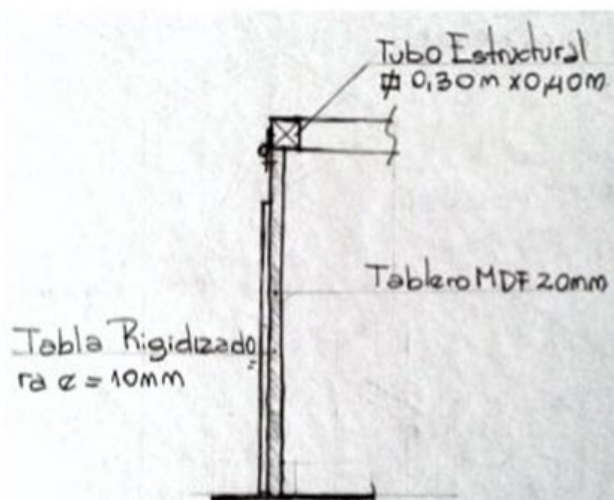


Figura 4: Boceto con datos aclaratorios

Otro de los objetivos perseguidos durante el cursado de la asignatura fue el de proveer al estudiante de distintas pautas que le permitieran dar organización a la serie de bosquejos y dibujos que, como hemos visto, van acompañando al desarrollo del diseño a lo largo de todo el proceso proyectual. La idea era ayudarlo a organizar y ordenar esa verdadera "bitácora", que es capaz de contar la historia del proyecto, con el objeto de hacerla más detallada y eficiente, permitiendo en todo momento retornar a un punto cualquiera del desarrollo proyectual a fin de revisar, modificar o explicar el mismo.

Por último, a modo de aplicación de lo aprendido, y como condición para la aprobación de la Asignatura, se elaboró un Proyecto Final en el que, desde nuestro punto de vista docente, se puso énfasis en la representación, tanto en lo que hace al seguimiento como en la evaluación.

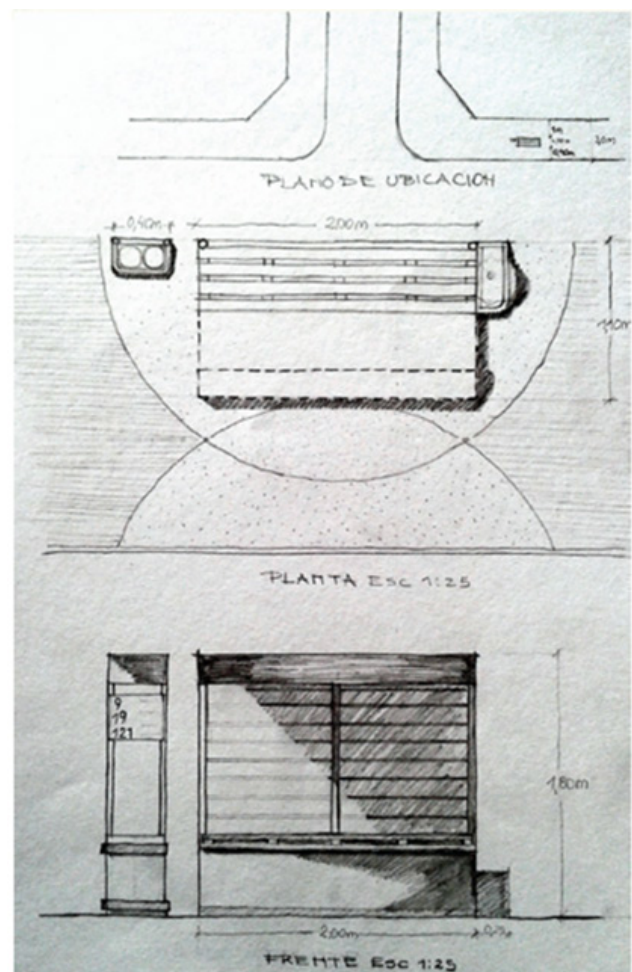


Figura 5: Vista y planta

Sin perder de vista que los dibujos fueron realizados con el objetivo de transmitir la idea del modo más claro y preciso, la presentación del Proyecto Final incluyó entonces perspectivas cónicas para las vistas generales o de porciones importantes del elemento proyectado, como así también perspectivas axonométricas, en particular isométricas, para las vistas de detalle o acercamientos.

Por último, incluyó también proyecciones ortogonales, en vistas y cortes (Fig.5), con el objeto de incorporar acotaciones generales que den idea de escala y de ubicación del elemento de diseño dentro del contexto de contención.

Conclusiones

Tratándose de proyectos de índole ingenieril, las representaciones serán en general de equipos, procesos y maquinarias que actuarán en el ámbito de una determinada industria.

La representación analógica, por sus propias características, que hemos estado analizando, se presta en forma más que particular para ser usada como una herramienta de diseño versátil, práctica y ligera, sin que por esto llegue a perder su intensa potencia comunicativa. Su fortaleza expresiva constituye un valor insoslayable que el diseñador debe aprender a usar a su servicio, en proyectos de las más diversas características y también en la materialización y elaboración del objeto de estos proyectos.

Uno de los usos particulares en que podríamos aplicar el dibujo analógico como herramienta proyectual, sería en estudios medioambientales. Su aplicación permitiría, analizar el impacto ambiental que produciría, por ejemplo, la instalación de un determinado emprendimiento fabril ubicado en un cierto lugar, el trazado de una vía de circulación automotriz o férrea, la canalización de un cauce de agua, el tendido de redes de transmisión de energía, etc.

Si se piensa en croquis que representen un predio donde funcionaría una fábrica, el uso de estos dibujos mostraría la cantidad de máquinas en el lugar y cómo estarían distribuidas, lo que permitiría analizar, por ejemplo, de qué

manera impactaría en el entorno inmediato y próximo a ese predio. Con la ayuda de estos dibujos se haría posible visualizar el grado de impacto en cuanto a contaminación del suelo, del entorno aéreo, de las napas, la contaminación visual, etc.

Estudios de esta naturaleza se incorporarán en los Proyectos Finales de la asignatura DAP, en los próximos cuatrimestres.

Por último, analizando el desarrollo del cursado y a modo de conclusión, debemos poner en relieve que entre las condiciones de partida estuvo el hecho de que los estudiantes que cursaron la asignatura DAP ya tenían conocimientos sólidos de los sistemas de representación gráfica, los que han hecho posible, desde una posición constructivista, alcanzar los objetivos de esta asignatura.

La ejercitación en la elaboración de bocetos, siguiendo pautas claras, y donde el docente estuvo siempre presente para acompañar su ejecución, así como incidir en la corrección o ajuste, permitió al estudiante manejarse con la soltura necesaria para poder aplicar estos dibujos al proceso proyectual.

El trayecto cronológico del desarrollo de cada proyecto, materializado por la bitácora construida con los dibujos y grafos que se fueron gestando durante el trayecto, se estructuró y organizó sistemáticamente.

Por todo lo dicho, podemos considerar que los objetivos de la Asignatura fueron alcanzados en cuanto que los estudiantes hayan logrado incorporar:

- El uso del boceto analógico como herramienta de diseño.
- La organización de estos bocetos en una bitácora que contiene la historia de cada proyecto.
- Una actitud de trabajo predispuesta a aceptar criterios diferentes provenientes de personas con formaciones distintas, lo que les facilitará, en el futuro, el trabajar en equipo.

Bibliografía

Ching, F. (2016) *Manual de Dibujo Arquitectónico*. Editorial GG, Barcelona, España.

Leborg, C. (2016) *Gramática Visual*. Editorial Gustavo Gili, SL, Barcelona, España.

Doberti, R. (2008) *Espacialidades*. Ediciones Infinito, Buenos Aires, Argentina.

Palacios, J. y Lorenzo, V. (2017) El pensamiento gráfico en el proceso de diseño, En : *IV Jornadas de Innovación Educativa*, Jujuy, Argentina.

AUTORES

GALVÁN, Luis Ariel. Docente en la Cátedra "Diseño Asistido" de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Es Ingeniero Electricista y Especialista en Docencia Universitaria.

E-mail: agalvan@herrera.unt.edu.ar

PALACIOS, José Antonio. Ex Docente en la Cátedra "Sistemas de Representación" de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Es Ingeniero Electricista.

E-mail: japalacios@herrera.unt.edu.ar



Modificaciones en la enseñanza de sistemas de representación y su impacto en la opinión estudiantil

PAZ, Hugo Roger¹, CINQUEMANI, Carla¹,
RIVERO, Valeria Irina¹, DONAIRE BURGOS,
Martín Jorge¹, CARDOZO, Maria Teresa²

¹ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Dpto. Construcciones y Obras Civiles
² Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,
Universidad Nacional de Tucumán

Resumen

El artículo aborda los cambios en la enseñanza de la asignatura “Sistemas de Representación” debido a la pandemia de la COVID-19 y su impacto en la percepción de los estudiantes. Se utilizó minería de texto y procesamiento de lenguaje natural (NLP por sus siglas en inglés), para analizar las respuestas de las encuestas de los estudiantes al final del curso.

Los resultados indican que los cambios en la asignatura son bien recibidos por los estudiantes, pero también revelan inquietudes sobre la utilidad de los conocimientos adquiridos en su vida profesional. Estos hallazgos proporcionan información valiosa para que los docentes diseñen estrategias didácticas que tiendan a modificar esta percepción en los estudiantes.

Palabras claves: Sistemas de Representación, modelo didáctico, Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP).

Modifications in the teaching of representation systems and their impact on student opinion

Abstract

The article addresses the changes in the teaching of the subject “Representation Systems” due to the COVID-19 pandemic and its impact on student perception. Text mining and natural language processing or NLP were used to analyze student survey responses at the end of the course.

The results indicate that the changes in the subject are well received by students, but they also reveal concerns about the usefulness of the knowledge acquired in their professional lives. These findings provide valuable information for teachers to design teaching strategies that tend to modify this perception in students.

Keywords: Representation Systems, teaching model, Natural Language Processing (NLP).

Introducción

La cátedra de Sistemas de Representación ha experimentado muchos cambios a lo largo de su historia. En este artículo, nos centraremos en los acontecimientos de los últimos 2 o 3 años, donde la pandemia ha tenido un impacto significativo en más de una cátedra.

En 2019, se implementó una nueva forma de trabajo grupal con el objetivo de fomentar el aprendizaje entre pares. Los resultados fueron positivos, reflejados en un aumento de los porcentajes de promovidos y regulares. La intención era continuar con esta modalidad el año siguiente, pero la pandemia impidió que esto sucediera.

Teniendo en cuenta la complejidad que implica la realización de una clase virtual sincrónica, se tomó la decisión de implementar la modalidad de aula invertida. En esta nueva modalidad, se subieron videos que contenían los temas teóricos a desarrollar en la clase presencial junto a ejemplos prácticos. Asimismo, se habilitaron consultas en tiempo real a través del aula virtual. Por otra parte, se emplearon diversas metodologías, como la gamificación. Esta palabra procede del inglés *gamification*. “Gamificar es aplicar estrategias (pensamientos y mecánicas) de juegos en contextos no jugables, ajenos a los juegos, con el fin de que las personas adopten ciertos comportamientos”, **Ramírez** (2014), para lograr una mejor comprensión de los temas tratados.

La aplicación de todas estas técnicas en la vuelta a la presencialidad demostró una marcada mejora en el rendimiento de los estudiantes y una percepción positiva de la materia y su enseñanza.

Sin embargo, los estudiantes no tienen una opinión positiva sobre la aplicación de la materia en su vida profesional. Por lo tanto, el principal objetivo de mejora de la cátedra debe ser la actualización del programa.

En este artículo se presentarán los resultados de encuestas que muestran la diferencia en la percepción de los estudiantes entre la enseñanza de la materia y su aplicación profesional.

Universo de análisis y descripción de las encuestas

Se han realizado encuestas a estudiantes de las carreras de Agrimensura, Ingeniería Geodésica y Geofísica, Ingeniería Mecánica e Ingeniería Azucarera que cursan la asignatura en el primer cuatrimestre (téngase en cuenta que en 2020 Ingeniería Civil no cursaba en el primer cuatrimestre dado que aún no estaba implementada la carrera de Ingeniería en informática, cuestión que sí ocurrió en 2021). Las encuestas se realizaron a través de *Google Forms* durante los períodos lectivos de 2020 y 2022. En este artículo se analizará sólo el primer cuatrimestre del año 2022.

Las respuestas obtenidas para cada encuesta realizada son las siguientes:

Los alumnos encuestados fueron 300 y el número de respuestas obtenidas fue de 192. La encuesta se dividió en secciones que contenían preguntas cuantitativas y cualitativas. Se dejó un espacio para que los estudiantes se expresaran libremente sobre los temas que se estaban consultando.

La encuesta se centró en los siguientes temas: rendimiento académico en la materia, estructura curricular, autoevaluación de profesores y evaluación curricular, **Sánchez-Gelabert y Elias-Andreu** (2017).

En este trabajo sólo se analizan las respuestas de tipo textual.

Estado del arte: análisis de datos cualitativos

Los datos cualitativos se nos presentan como registros que dan fe de una realidad o informan de sus cualidades. En general, según **Lofland y Lofland** (1984) los datos cualitativos son elaboraciones de naturaleza descriptiva, es decir, recogen una amplia y diversa gama de información que alude a un período de tiempo relativamente prolongado; son polisémicas (muestran y ocultan múltiples significados), se consideran válidas, pero de poca fiabilidad, difícilmente reproducibles, dado que no son específicas de un contexto y un momento determinados.

Para **Rodríguez et al.** (1996) en p. 22, “los datos cualitativos son elaboraciones primarias que nos informan acerca de la existencia de una realidad, sus propiedades o el grado en que éstas se manifiestan”.

Cualquier procedimiento que se utilice para analizar datos cualitativos implica tareas conceptuales y mecánicas. Para Sibert y Shelly, citado por **Rodríguez et al.** (1996):

“las tareas conceptuales son aquellas en las que el investigador genera los productos del proceso de análisis, es decir, categorías de codificación, relaciones, generalizaciones o incluso teorías, a las que llega tras la lectura, la reflexión, la inducción, etc. En cambio, las tareas mecánicas son aquellas en las que el investigador manipula los productos del análisis, es decir, el almacenamiento, organización y recuperación de datos a través de categorías de codificación”, **Rodríguez et al.** (1996) en p. 240.

El análisis textual en sus diversas formas fue un ejemplo típico de trabajo de datos cualitativos. Las herramientas y técnicas metodológicas que suelen emplearse en este tipo de abordajes están más relacionadas con el análisis literario o discursivo y con métodos dirigidos a la comprensión profunda del corpus. Estos enfoques han sido criticados de diferentes formas. Para **Reynoso** (1995), las posiciones interpretativas suelen centrarse en la capacidad subjetiva del investigador para interpretar o analizar, **Rosati** (2022).

Una combinación de técnicas de minería de texto y NLP puede ser útil para que se resuelvan estos problemas, **Abram et al.** (2020); **Guetterman et al.** (2018); **Huner y Suárez** (2022); **Watkins et al.** (2020); **Watkins** (2017). En particular, las técnicas de NLP permiten aplicar métodos de análisis cuantitativo a una amplia gama de tareas (clasificación de texto, identificación de temas, identificación de estructura semántica, etc.). También brindan la oportunidad de escalar el trabajo de manera efectiva.

Con base en lo expuesto anteriormente, se han utilizado técnicas de NLP, para realizar los análisis cualitativos a las respuestas de tipo textual

de las encuestas. A continuación, se detallan los procedimientos realizados.

Metodología

Aplicación de Técnicas de NLP al Análisis de Respuestas Textuales de las Encuestas

Para el análisis de las respuestas de tipo textual de opinión libre, primeramente, se realizó la determinación de tópicos mediante la aplicación de técnicas de NLP. Para ello se utilizó el software KNIME, **Berthold et al.** (2007).

El procesamiento de los textos se realizó mediante los siguientes pasos:

1.- Se realiza la lectura de los datos, los cuales se encuentran en una planilla Excel, en la cual una celda corresponde a la opinión de un encuestado.

2.- *StringtoDocument*: Convierte las celdas correspondientes a la opinión de cada estudiante en documentos que pueden ser utilizados para NLP. Para comprender y generar texto, los sistemas basados en NLP deben ser capaces de reconocer palabras, gramática y muchos matices del lenguaje. Para ello se ha desarrollado una técnica llamada “*wordembeddings*” la que convierte las palabras en sus representaciones numéricas. Este procedimiento mapea las palabras como vectores numéricos. Lo hace tokenizando cada palabra en una secuencia (u oración) y convirtiéndolas en un espacio vectorial. Este procedimiento tiene como objetivo capturar el significado semántico de las palabras en una secuencia de texto. Asigna representaciones numéricas similares a palabras que tienen significados similares. Para realizar la tokenización se utilizó el modelo propuesto por la Universidad de Stanford: Stanford NLP Spanish Tokenizer, **Qi et al.** (2018).

3.- Se realiza un preprocesamiento del documento generado de manera de facilitar su análisis. Para ello se aplicaron los siguientes operadores:

- Filtro de palabras vacías (Stop Words): Se filtraron las palabras que no contribuyeron al significado en el análisis textual. Se utilizó el correspondiente algoritmo y diccionario existente en KNIME Text Processing, proporcionado por KNIME AG, Zurich, Suiza.
- Lematización: El lema es la forma que se

acepta como representativa de cada forma flexionada de una sola palabra. Se utilizó la biblioteca Stanford Core NLP, Manning et al. (2014).

- POS Tagger: con este operador se asigna a cada palabra (y/o token) una parte del discurso u oración presente en el documento, como sustantivo, verbo, adjetivo, etc., Toutanova et al. (2004); **Toutanova y Manning** (2002).

4.- Extracción de tópicos mediante el operador desarrollado por KNIME. El mismo realiza un preprocesamiento del documento generado de manera de facilitar su análisis. Para ello se utilizó una implementación simple de subprocesos paralelos de LDA (*Latent Dirichlet Allocation*), **Blei et al.** (2003), el cual es un modelo estadístico generativo que explica un conjunto de observaciones a través de grupos no observados y cada grupo explica por qué algunas partes de los datos son similares. En esto, las observaciones (por ejemplo, palabras) se recopilan en documentos y la presencia de cada palabra es atribuible a uno de los temas del documento. El proceso se utiliza la metodología propuesta por **Newman et al.** (2009), con esquema de muestreo propuesto por **Yao et al.** (2009).

5.- A cada tópico extraído del operador anterior, se le asigna un color de manera de poder generar una nube de palabras en donde además de asignar el tamaño de la palabra a la frecuencia de aparición de esta, se asigna un color distinto en función del tópico al cual pertenezca.

6.- Finalmente se genera la nube de palabras en función de la frecuencia de aparición de estas y del tópico al que pertenece. El resultado generado por el operador es una figura.

Por otra parte, se realizó un análisis de sentimiento mediante la utilización de técnicas de NLP desarrolladas en Python, utilizando el modelo “finiteautomata/beto-sentiment-analysis”, **Pérez et al.** (2021).

Finalmente, se ha utilizado el software KH Coder, **Higuchi** (2016), para realizar la determinación de la red de deco-ocurrencia de palabras (esto permite realizar una escala multidimensional en las palabras extraídas y dibujar los resultados en diagramas de dispersión de 1 a 3 dimensiones). Se utiliza esta función para encontrar combinaciones o grupos de

palabras que tienen patrones de apariencia similares relacionados con otro parámetro presente en el análisis, como es el puntaje de sentimiento asignado a cada opinión.

Presentación de resultados

Encuesta Cuatrimestre 1 – 2022 – Turno Mañana y Tarde

En estas encuestas, las preguntas analizadas fueron las siguientes:

Pregunta 1: ¿Cómo calificarías el contenido que se da en la materia con relación a la carrera que elegiste?

Pregunta 2: Te dejamos esta casilla para que puedas contarnos todo lo que sentiste durante el cursado, lo que te pareció algún evento en especial o cualquier sugerencia o crítica constructiva para que sigamos creciendo como cátedra.

Resultados para Pregunta 1

En primer lugar, se realizó el análisis de NLP de extracción de tópicos, el cual arroja la nube de palabras correspondiente a la Pregunta 1, que se observa en la Fig. 1.



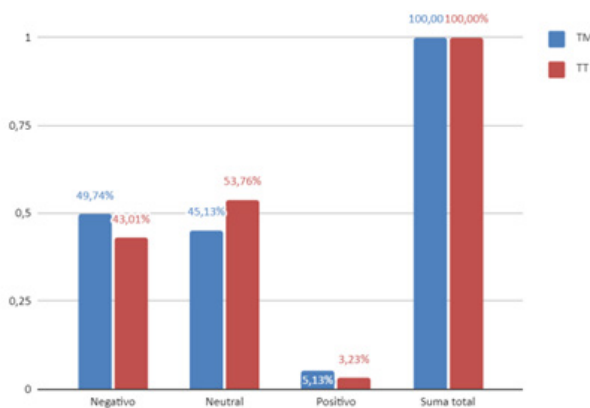
Figura 1: Determinación de tópicos – Nube de palabras – Cuatrimestre 1 – 2022- Pregunta 1.

Referencias: Elaboración propia

El tamaño de las letras indica la frecuencia de ocurrencia de esta en el texto, en tanto que el color indica que el análisis de tópicos realizado muestra que las mismas están relacionadas en las opiniones expresadas.

Del análisis de respuestas surge que las palabras con mayor ocurrencia están relacionadas a la misma temática, las palabras de color verde se destacan y se identifican 4 de ellas como relevantes: *siento, útil, carrera y futuro*, las cuales sugieren, teniendo en cuenta la ocurrencia de las mismas, que un mayor porcentaje de alumnos consideran que el contenido de la materia dictada les resultará útil en el futuro de la carrera y/o trabajo. Del mismo modo, en 2do orden de ocurrencia se identifican las palabras en color azul: *piezas, ingeniería, planos y máquinas*. Lo destacable acá, es que todas las palabras son sustantivos, carecen de un verbo que permita generar o identificar una idea o afirmación concreta, sin embargo, se logra identificar un tópico más amplio relacionado con la ingeniería, las máquinas, planos y piezas. Y por último las palabras en color rojo, las cuales tienen la ocurrencia más baja, motivo por el cual no se logra identificar el tópico o idea general.

El gráfico de barras de la Fig. 2 nos permite analizar, en primer lugar, un comparativo de respuestas de alumnos de los turnos mañana y tarde y en segundo lugar, el nivel de impacto positivo, negativo o neutro de las respuestas obtenidas.



TM : Turno mañana.
TT: Turno tarde.

Figura 2: Resultados de análisis de sentimiento por opinión – Pregunta 1.

Se destaca que en ambos turnos, tanto las respuestas negativas como las neutras coinciden y su porcentaje es alto, quintuplicando a las respuestas positivas.

Este análisis destaca la coincidencia de que ambos turnos tienen una percepción similar en cuanto al contenido de la materia.

En el gráfico de la Fig. 3, se identifican 3 palabras: *ser, útil y temas*, las cuales se relacionan con los 3 sentimientos positivo, neutro o negativo, haciendo referencia al contenido dictado por la materia en cuestión.

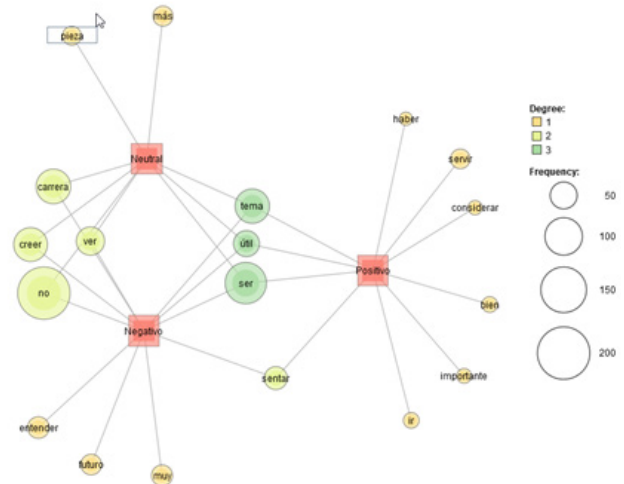


Figura 3: Gráfica de Correspondencia entre palabras y sentimientos asociados para Pregunta 1.

De la observación realizada surge que palabras con mayor frecuencia están asociadas a respuestas negativas y neutras y las de menor frecuencia corresponden a una frecuencia positiva.

Resultados para Pregunta 2

Al aplicarse el análisis de NLP de extracción de tópicos, el cual arroja la nube de palabras correspondiente a la Pregunta 2, que se observa en la Fig. 4.



Figura 4: Determinación de tópicos – Nube de palabras – Cuatrimestre 1 – 2022- Pregunta 2.

Las palabras con mayor ocurrencia son: *clases, materia, cursado, bastante, temas*. Estas palabras pertenecen a 2 tópicos diferentes, pero teniendo en cuenta que las 4 últimas palabras que se

mencionan corresponden al mismo tópico, ya que corresponden al color verde, por lo que la conclusión del tópico a la cual se refieren puede identificarse como: durante el cursado de la materia consideran que son bastantes los temas desarrollados.

El gráfico de la Fig. 5 nos permite comparar el nivel de impacto de las respuestas de ambos turnos.

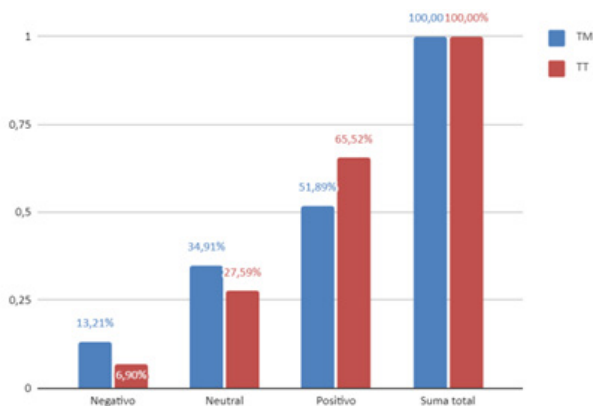


Figura 5: Resultados de análisis de sentimiento por opinión – Pregunta 2.

Se puede observar en ambos turnos un incremento gradual del sentimiento de las respuestas negativas a las positivas, siendo bajo el porcentaje de las negativas con un incremento mayor de las positivas del turno tarde, con respecto al turno mañana. mostrando claramente una buena percepción con respecto al cursado de la materia.

En el gráfico de la Fig. 6, las palabras con mayor ocurrencia son: *ser* y *más*, las cuales están asociando e interrelacionando los aspectos positivos y neutros.

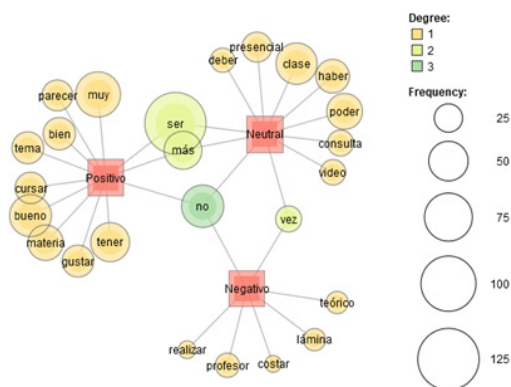


Figura 6: Gráfica de Correspondencia entre palabras y sentimientos asociados para Pregunta 2.

Analizando las frecuencias de ocurrencia de los aspectos positivos, se destacan las palabras tales como: *muy*, *bueno*, *gustar*, *tener*, *materia*, *tema*. Del mismo modo se analizan la frecuencia de las palabras con aspecto neutro más destacadas: *presencial*, *clase*, *poder*, *haber*, *consultas*. De lo anterior se puede interpretar como el deseo o preferencia de los alumnos por las clases presenciales, las cuales les permiten hacer consultas en forma personalizada.

Conclusiones

Se ha realizado el análisis de las respuestas obtenidas en la encuesta realizada a estudiantes que cursaron la asignatura Sistemas de Representación en el primer cuatrimestre del año 2022. Del análisis de las respuestas de opinión obtenidas se pueden sacar las siguientes conclusiones:

1.- Existe un predominio de sentimientos negativos en las respuestas obtenidas con relación a la utilidad de la asignatura en el desarrollo de su carrera y en el de su futura profesión.

Entre las opiniones expresadas manifestaban:

“Que no le encontraban una aplicación práctica en la carrera y que no le encontraban sentido”.

2.- Por el contrario, el predominio de sentimientos positivos está fuertemente relacionado con la forma de la didáctica de clases adoptada. Como ejemplo se puede ver los siguientes comentarios;

Las opiniones expresadas manifestaron:

“Que las correcciones eran rápidas y personalizadas, destacan lo productivo del trabajo en grupo, la dinámica fué muy útil y que disfrutaron del cursado”.

3.- El modelo didáctico que se está aplicando en la asignatura muestra sus resultados con relación a cómo los alumnos han mejorado, no sólo su rendimiento, sino también su actitud en relación a la asignatura. Esto está claramente demostrado en lo expresado en el punto anterior. Sin embargo, como todo proceso evolutivo, seguramente el modelo didáctico se irá

ajustando un poco todos los años, atendiendo a la experiencia ganada del año anterior y a los nuevos alumnos, los cuales no siempre serán iguales. Por otra parte, deberá atender a lo expresado en el punto 1, es decir, se deberán buscar estrategias pedagógicas que permitan mostrar a los estudiantes las aplicaciones de los

conocimientos y habilidades que adquieren en el cursado de la asignatura y que hasta ahora no son capaces de visualizar. Esto seguramente demandará imaginación y entrega por parte del cuerpo docente, valores que están disponibles y que se pondrán a disposición para mejorar este aspecto.

Referencias bibliográficas

- Abram, M. D., Mancini, K. T. and Parker, R. D.** (2020) "Methods to Integrate Natural Language Processing Into Qualitative Research". *International Journal of Qualitative Methods*, 19, 1609406920984608. <https://doi.org/10.1177/1609406920984608>
- Berthold, M. R., Cebron, N., Dill, F., Gabriel, T. R., Kötter, T., Meinl, T., Ohl, P., Sieb, C., Thiel, K. and Wiswedel, B.** (2007) "KNIME: The Konstanz Information Miner". *Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization (GfKL 2007)*.
- Blei, D., Ng, A. and Jordan, M.** (2003) "Latent Dirichlet Allocation". *Journal of Machine Learning Research*, 3, pp. 993-1022. <https://doi.org/10.1162/jmlr.2003.3.4-5.993>
- Guetterman, T. C., Chang, T., DeJonckheere, M., Basu, T., Scruggs, E. y Vydiswaran, V. V.** (2018) "Augmenting qualitative text analysis with natural language processing: Methodological study". *Journal of medical Internet research*, 20(6), e9702.
- Higuchi, K.** (2016) "A two-step approach to quantitative content analysis: KH Coder tutorial using Anne of Green Gables (Part I)". *Ritsumeikan social sciences review*, 52(3), pp. 77-91.
- Huner, E. and Suárez, J. L.** (2022) "The SAGE Handbook of Social Media Research Methods" *SAGE Publications Ltd.*, Vol. 1-0, pp. 173-184. <https://doi.org/10.4135/9781529782943>
- Lofland, J. and Lofland, L. H.** (1984). "Analyzing social settings: A guide to qualitative observation and analysis. (Second)". *Wadsworth Publishing Company*.
- Manning, C. D., Surdeanu, M., Bauer, J., Finkel, J., Bethard, S. J. and McClosky, D.** (2014) "The Stanford CoreNLP Natural Language Processing Toolkit". *Association for Computational Linguistics (ACL) System Demonstrations*, pp. 55-60. <http://www.aclweb.org/anthology/P/P14/P14-5010>
- Newman, D., Asuncion, A., Smyth, P. and Welling, M.** (2009) "Distributed Algorithms for Topic Models". *Journal of Machine Learning Research*, 10, pp. 1801-1828. <https://doi.org/10.1145/1577069.1755845>
- Pérez, J. M., Giudici, J. C. y Luque, F.** (2021) "pysentimiento: A Python Toolkit for Sentiment Analysis and SocialNLP tasks", disponible en el repositorio <https://huggingface.co/>
- Qi, P., Dozat, T., Zhang, Y. and Manning, C. D.** (2018) "Universal Dependency Parsing from Scratch". *Proceedings of the CoNLL 2018 Shared Task: Multilingual Parsing from Raw Text to Universal Dependencies*, pp. 160-170. <https://nlp.stanford.edu/pubs/qi2018universal.pdf>
- Ramírez, J. L.** (2014) *Gamificación: mecánicas de juegos en tu vida personal y profesional*. Alpha Editorial.
- Reynoso, C.** (1995) "El lado oscuro de la descripción densa". *Revista de antropología*, 16, pp. 17-43.

Rodríguez, G., Gil, J. y García, E. (1996) Metodología de la Investigación Cualitativa. Granada: Aljibe

Rodríguez, G., Gil, J. y García, E. (1996) Tradición y enfoques en la investigación cualitativa. *Metodología de la investigación cualitativa*, 14, 24-26.

Rosati, G. (2022) "Procesamiento de Lenguaje Natural aplicado a las Ciencias Sociales. Detección de tópicos en letras de tango". *Revista Latinoamericana de Metodología de la Investigación Social*, 23, pp. 38-60.

Sánchez-Gelabert, A. y Elías-Andreu, M. (2017) Los estudiantes universitarios no tradicionales y el abandono de los estudios.

Toutanova, K., Klein, D., Manning, C. and Singer, Y. (2004) "Feature-Rich Part-of-Speech Tagging with a Cyclic Dependency Network". *Proceedings of the 2003 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics on Human Language Technology—NAACL '03*, 1. <https://doi.org/10.3115/1073445.1073478>

Toutanova, K. and Manning, C. (2002) "Enriching the Knowledge Sources Used in a Maximum Entropy Part-of-Speech Tagger". <https://doi.org/10.3115/1117794.1117802>

Watkins, D. C. (2017). "Rapid and Rigorous Qualitative Data Analysis: The "RADaR" Technique for Applied Research". *International Journal of Qualitative Methods*, 16(1), 1609406917712131. <https://doi.org/10.1177/1609406917712131>

Watkins, J., Fabielli, M. and Mahmud, M. (2020) Sense: a student performance quantifier using sentiment analysis. In *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1-6). IEEE.

Yao, L., Mimno, D. and McCallum, A. (2009) "Efficient Methods for Topic Model Inference on Streaming Document Collections". *Proceedings of the 15th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 937-946. <https://doi.org/10.1145/1557019.1557121>

Bibliografía

Coronel Chucos, L. G. (2020) "Factores académicos asociados al lugar y tipo de maltrato en universitarios de la Sierra Central del Perú".

Garcés Estrada, C., Santos Pérez, A. y Castillo Collado, L. (2020). "Universidad y Violencia de Género: Experiencia en Estudiantes Universitarios de Trabajo Social en la Región de Tarapacá". *Revista latinoamericana de educación inclusiva*, 14(2), pp. 59-77.

Goetz, J. P. y Lecompte, M. D. (1988). "Etnografía y diseño cualitativo en investigación educativa", *Morata Madrid*, Vol. 1.

Leeson, W., Resnick, A., Alexander, D. and Rovers, J. (2019) "Natural Language Processing (NLP) in Qualitative Public Health Research: A Proof-of-Concept Study". *International Journal of Qualitative Methods*, 18, 1609406919887021. <https://doi.org/10.1177/1609406919887021>

Paz, H. R. y Abdala, N. C. (2021). "Currículum Formal Real y Oculto de la Carrera de Ingeniería Civil—FACET - UNT". *Actas 2021 - CADI-CLADI-CAEDI. 11° Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería (CAEDI), Buenos Aires - Argentina*.


Sosa Mendoza, W. A. y otros. (2019). "El maltrato: Un secreto a gritos en la educación universitaria en medicina".

AUTORES

PAZ, Hugo Roger - ORCID  0000-0003-1237-7983


Ingeniero Civil egresado de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán. Magister en Ingeniería Hidráulica egresado de la Universidad de Cantabria, España. Doctorando en Educación en la Facultad de Filosofía y Letras de la UNT. Profesor Titular de la FACET en la cátedra “Hidráulica Básica”. Docente e Investigador - Categoría III.

E-mail: hpaz@herrera.unt.edu.ar

CINQUEMANI, Carla - ORCID  0000-0002-2530-0777


Ingeniera en Computación egresada de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán. Especialista en Integración de Tecnologías Informáticas egresada de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán. Estudiante de la Especialización y Maestría en Docencia Universitaria de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Tucumán. Docente de la FACET en la cátedra “Sistemas de Representación”. Docente e Investigador - Sin Categorizar.

E-mail: ccinquemani@herrera.unt.edu.ar

RIVERO, Valeria Irina - ORCID  0009-0003-9942-9447

Ingeniera Mecánica egresada de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán. Bachiller Universitario en Física (BUF) egresada de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán. Profesora de Educación Técnica egresada del instituto de enseñanza superior (IES). Doctorando en Educación en la Facultad de Filosofía y Letras de la UNT. Docente de la FACET en la cátedra “Sistemas de Representación”. Docente e Investigador - Sin categorizar.

E-mail: vrivero@herrera.unt.edu.ar

DONAIRE BURGOS, Martín Jorge - ORCID  0009-0000-7829-5409

Ingeniero Mecánico egresado de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán. Docente de la FACET en la cátedra “Diseño Asistido”. Docente e Investigador - Sin Categorizar.

E-mail: mjdonaireburgos@herrera.unt.edu.ar

CARDOZO, Maria Teresa - ORCID  0009-0008-8933-3392

Ingeniera en Computación egresada de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán. Docente de la FACET en la cátedra “Programación I” y “Programación II”. Docente e Investigador - Categoría V.

E-mail: tcardozo@herrera.unt.edu.ar

Determinación de la constante e/m por método helicoidal de Busch

ÁVILA, Gerónimo.¹; PAZ, Santiago.¹;
ARAGÓN RODRÍGUEZ, Ana. P.¹; ABACA, Facundo Máximo¹;
CARRILLO, Miguel¹; VENCHIARUTTI, José Valentín¹

¹Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea. Tucumán. Argentina

Resumen

En el siguiente informe se desea determinar y acotar el valor de la razón de las constantes e/m mediante el método helicoidal de Busch, mediante un aparato conformado principalmente por un solenoide y un tubo de rayos catódicos. Los valores obtenidos en dos grupos de mediciones fueron

$$\frac{e}{m} = (1,7 \pm 0,4) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \text{ y } \frac{e}{m} = (1,7 \pm 0,5) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \text{ Mientras que el valor aceptado por la comunidad}$$

científica es $\frac{e}{m} = (1,758 \pm 0,001) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$, por lo tanto son iguales dentro del error.

Palabras claves: Carga del electrón, Método de Busch, Tubo de rayos catódicos.

Introducción

El experimento de Thomson y el tubo de rayos catódicos

En 1897, J. J. Thomson demostró experimentalmente que la carga de un electrón es negativa a partir de experiencias realizadas con rayos catódicos. Luego estos resultados fueron divulgados, las experiencias de Millikan en 1909 mostraron que el valor de la carga del electrón que es igual a $1,602177 \cdot 10^{19} C$. Dado que la masa del electrón es igual a $9,109 \cdot 10^{-31} kg$, la relación e/m del electrón es igual a $1,758 \times 10^{11} C/kg$.

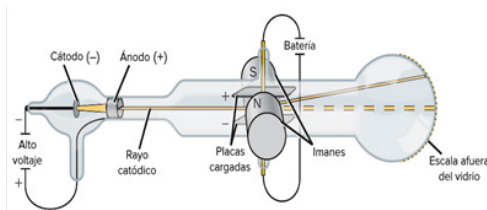


Figura 1: Tubo de rayos catódicos utilizado por Thomson, Sears (2009).

La Fig. 1 muestra el aspecto básico del aparato utilizado por Thomson. Es un tubo de vacío, que tiene un gas a baja presión, utilizado en equipos cotidianos de laboratorios, como osciloscopios.

El trabajo pionero de Thomson, continuó con el entusiasmo de otros investigadores, a finales de la década de 1920 se disponía de varias técnicas para determinar cargas específicas de partículas elementales. En este experimento utilizamos el método de hélice desarrollada en 1922 por Busch. Este método utiliza un tubo de rayos catódicos o CRT (por sus siglas en inglés) con una pantalla fluorescente en un extremo, sumergido en presencia de un campo magnético producido en el interior de un solenoide.

Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético

Cuando una partícula cargada se mueve en un campo magnético, sobre ella actúa una fuerza magnética, y su movimiento está determinado por las leyes de Newton.

La Fig. 2, muestra una partícula con carga positiva q está en el punto O , moviéndose con velocidad \mathbf{v} en un campo magnético uniforme \mathbf{B} dirigido hacia el plano de la figura. Los vectores \mathbf{v} y \mathbf{B} son perpendiculares, por lo que la fuerza magnética $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ tiene una magnitud $F = qvB$ y la dirección que se indica en la figura. La fuerza siempre es perpendicular a \mathbf{v} , por lo que no puede cambiar la magnitud de la velocidad, únicamente su dirección. Es decir, la fuerza magnética nunca tiene una componente paralela al movimiento de la partícula, de modo que la fuerza magnética nunca realiza trabajo sobre la partícula. Esto se cumple aún, si el campo magnético no es uniforme.

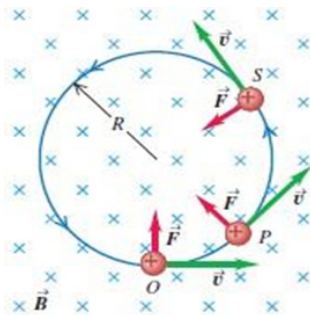


Figura 2: Órbita de una partícula cargada positivamente, q , en un campo magnético uniforme \mathbf{B} , Sears (2009).

El movimiento de una partícula cargada bajo la sola influencia de un campo magnético siempre ocurre con rapidez constante.

Con este principio, se observa en la Fig. 2, que la magnitud tanto de \mathbf{F} como de \mathbf{v} , permanecen constantes. En puntos tales como P y S , las direcciones de fuerza y velocidad han cambiado, pero sus magnitudes son las mismas. Por lo tanto, la partícula se mueve bajo la influencia de una fuerza de magnitud constante que siempre forma ángulos rectos con la velocidad de la partícula. Si se comparan estas condiciones con el análisis del movimiento circular, se observa que la trayectoria de la partícula es un círculo trazado con velocidad constante v . La aceleración centrípeta es v^2/R , y la única fuerza que actúa es la fuerza magnética, por lo que de acuerdo con la segunda ley de Newton, $F = |q|vB = m v^2/r$, donde m es la masa de la partícula. Al despejar el radio r de la ecuación para la trayectoria circular, se obtiene: $r = mv/|q|B$, radio de una órbita circular en un

campo magnético. Si la carga q es negativa, en la fig. 2 la partícula se movería en sentido horario alrededor de la órbita.

Si la dirección de la velocidad inicial no es perpendicular al campo, la componente de la velocidad paralela al campo es constante porque no hay fuerza paralela al campo. Así que la partícula se mueve en un patrón helicoidal como lo indica la Fig. 3.

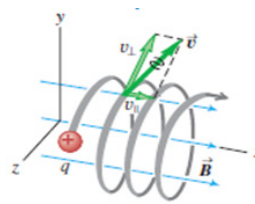


Figura 3: Trayectoria helicoidal de un partícula cargada positivamente, q , sumergida en un campo magnético, \mathbf{B} , Sears (2009).

El movimiento de esta partícula tiene componentes tanto paralelos como perpendiculares al campo magnético, por lo que se mueve en una trayectoria helicoidal.

El radio de la hélice está dado por la ecuación de r , donde v ahora es el componente de la velocidad perpendicular al campo \mathbf{B} .

Deducción de la ecuación

Cuando un electrón se mueve en un campo eléctrico E , la fuerza que actúa sobre él es:

$$F = -eE \quad (1)$$

Supongamos que el CRT está alineado con su eje longitudinal (que lo llamaremos eje Z), coincidente con el eje de un solenoide largo. Las direcciones X e Y van a hacer referencia a las deflexiones horizontal y vertical. En el interior del tubo los electrones son generados por un filamento calentado y acelerados a lo largo del eje Z por una diferencia de potencial V entre el cátodo y el ánodo. Los electrones adquieren una energía cinética dada por:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad (2)$$

En donde v_z es la velocidad del electrón a lo largo del eje Z dada por:

$$v_z = \sqrt{2V \left(\frac{e}{m}\right)} \quad (3)$$

Si el solenoide se somete a una corriente I , aparecerá un campo magnético B paralelo a la velocidad v_z .

$$F = ev \times B \quad (4)$$

Dado que en este caso v es paralelo a B , ninguna fuerza actuará sobre el electrón y su trayectoria será a lo largo de una línea recta entre el ánodo y la pantalla fluorescente del tubo de rayos catódicos. Sin embargo, si utilizamos una de las placas deflectoras aparecerá una componente de velocidad hacia afuera del eje Z , por ejemplo, v_y . Esta componente de velocidad provocará la aparición de una fuerza magnética cuya dirección coincide con el eje X :

$$F_x = ev_y B_z \quad (5)$$

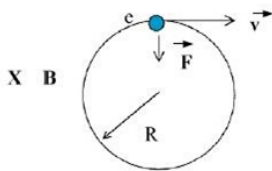


Figura 4: Esquema de la trayectoria del electrón en el plano XY, Sears (2009).

Esta nueva fuerza hará que el electrón tome una trayectoria helicoidal, como se muestra en la Fig. 4 y el radio de la órbita se puede determinar de la siguiente manera: $\frac{mv_y^2}{r} = ev_y B_z$ (6)

Dando: $r = \frac{mv_y}{eB_z}$ (7)

Además, el período del electrón a lo largo del eje z , adquirido por la velocidad es la siguiente:

$$T = \frac{2\pi r}{v_y} = \frac{2\pi m}{Be} \quad (8)$$

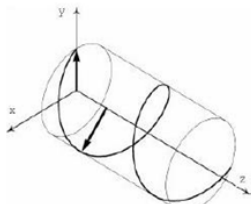


Figura 5: Trayectoria helicoidal del electrón (Sears, 2009).

y el radio del cilindro descrito, pero depende de la relación e/m .

Sistema experimental

Partes del sistema

El equipamiento utilizado (Fig 7a) fue el siguiente:

Solenoide de largo $L = (49,5 \pm 0,1) \text{cm}$, diámetro exterior, $d_{\text{ext}} = (12,286 \pm 0,002) \text{cm}$, diámetro interior, $d_{\text{int}} = (8,884 \pm 0,002) \text{cm}$ y el diámetro de cada espira, $d_e = (0,17 \pm 0,01) \text{mm}$ (Ver Fig. 6a y 6b).



Figura 6a (arriba); Sistema experimental y **Figura 6b** (abajo); vista frontal del solenoide utilizado. En el interior del mismo se observa el CRT.

La fuente de energía utilizada (ver Fig. 7a), tiene incorporado un voltímetro que mide la tensión en el ánodo, y un amperímetro que mide la corriente que circula por el solenoide. El primero está implementado en base a un microamperímetro de $50 \mu\text{A}$ de alcance, que corresponden a 2500V , y $1 \mu\text{A}$ de apreciación (50V). El amperímetro es capaz de medir corriente continua y cuenta con un alcance de 250mA y apreciación de 5mA .



Figura 7a (arriba): Parte delantera de la fuente.

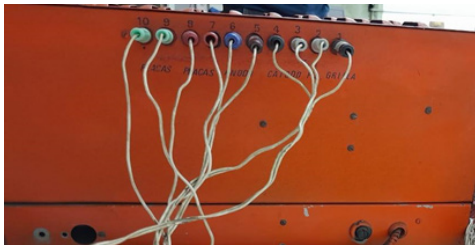


Figura 7b (abajo): Parte trasera de la fuente.

Debajo del amperímetro se encuentran dos salidas, estas son las que se utilizan para energizar la bobina.

Contamos en la parte inferior del aparato de la Fig. 7, con el interruptor de encendido, y un potenciómetro que permite manipular la corriente de la bobina, cuyos valores se pueden monitorear en el amperímetro.

Observemos además que hay seis perillas en la parte central del instrumento. Las primeras dos permiten manipular la intensidad y el foco del haz visible en el tubo de rayos catódicos. Debajo de ellas, hay otras dos que nos permiten modificar la ubicación del haz, realizando un movimiento horizontal y un movimiento vertical. Esto nos permite centrar la línea visible para mayor comodidad. Debajo de estas, hay otras dos perillas que permiten modificar la tensión de ánodo del CRT, una por paso fino y otra por paso grueso (aumentar cada 500V). En la parte trasera de la fuente (Fig. 7b) están los diez conectores que sirven para alimentar al CRT.

Un componente fundamental es el CRT, marca "Tung-Sol", modelo "3BP1", año 1944 (Fig. 8) con 10 terminales en uso y 4 sin conexión. Estas 10 terminales se conectan de la manera que se señala en Fig. 9.



Figura 8: Vista superior del CRT.

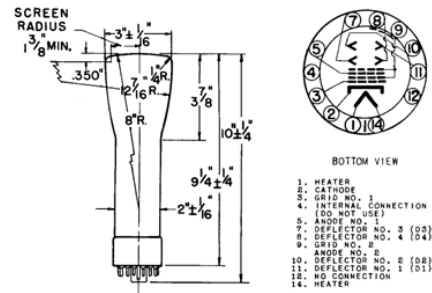


Figura 9: Especificaciones del CRT (TUNG-SOL 3BP1, 1944).

Las 4 terminales no conectadas son la 12, 13, 4 (para conexiones internas entre electrodos, no se debe realizar ninguna conexión porque se provocaría un cortocircuito) y 6, como se especifica en la Fig. 9. A nivel industrial, estos conectores llamados zócalos son universales y, por lo tanto, cada fabricante de tubos puede o no utilizar todas las terminales.

Mediciones

Determinación del número de vueltas del solenoide:

Para determinar el número de vueltas del alambre en el solenoide, se utiliza la siguiente ecuación:

$$N = \frac{L}{d_{cable}} \cdot \frac{R-r}{d_{cable}} \quad (12)$$

la cual se deduce fácilmente de la Fig. 10.

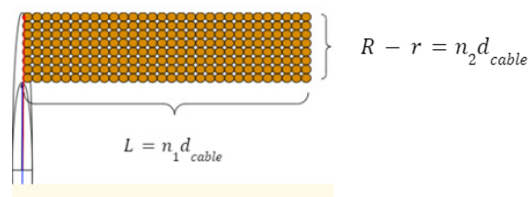


Figura 10: Esquema de la bobina formada por n_1 vueltas por capa de alambre de diámetro d_{cable} .

Realizando la propagación de error de N ;

Con los valores medidos, se obtiene el siguiente valor acotado:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta R + \Delta r}{R - r} + 2 \frac{\Delta d_{cable}}{d_{cable}}$$

El valor acotado de N queda:

$$N = (1,2 \pm 0,1) 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

Proceso de medición:

Una vez energizado el CRT y el solenoide, se mantuvo fijo el valor de corriente I . Luego se varió la tensión del ánodo, hasta visualizar un punto en la pantalla del tubo (primer nodo), como se muestra en la Fig. 11. Si se sigue variando la tensión en el ánodo, se puede observar un segundo nodo. Los valores obtenidos se graficaron en dos grupos de mediciones, mostrados en la Fig. 12.

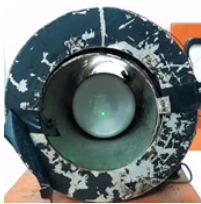


Figura 11: Nodo visible en el tubo.

Análisis de datos

Con las mediciones realizadas se realizó un ajuste lineal para cada grupo de mediciones. El primer grupo, corresponde al caso donde el electrón realiza una sola vuelta antes de llegar a la pantalla, y el segundo grupo, cuando realiza 2 vueltas antes de llegar a la pantalla.

Tomando la ecuación (11), y reemplazando el campo magnético producido por una bobina $B = \mu NI/L$, nos queda como sigue:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 v n^2}{(\mu NI)^2},$$

siendo μ la permitividad magnética del vacío, N el número de vueltas calculado en (12) e I la corriente del solenoide. Se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\text{Para un nodo: } \frac{e}{m} = (1,7 \pm 0,4) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

$$\text{Para dos nodos: } \frac{e}{m} = (1,7 \pm 0,5) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

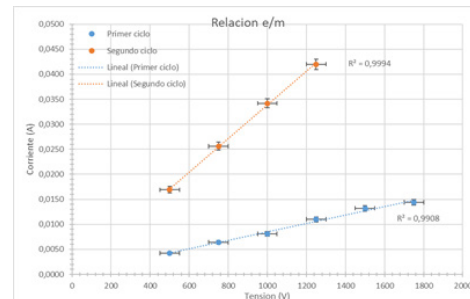


Figura 12: Tensión de aceleración en el CRT vs. la corriente que circula por el solenoide.

Conclusiones

Los valores determinados de e/m , para el primer ciclo (nodo) y el segundo ciclo (segundo nodo en la pantalla) es de

$$(1,7 \pm 0,4) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

y

$$(1,7 \pm 0,5) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

respectivamente, en relación, al valor aceptado por la comunidad científica, el cual es de

$$1,758 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

(Sears, 2009). Ambos valores coinciden dentro del error. Para futuros experimentos sería posible reducir las fuentes de error, ya sea determinando el número de vueltas del solenoide con mayor precisión, o midiendo el diámetro del alambre del solenoide con mayor precisión.

Bibliografía

Measurement of Electronic Charge-to-Mass Ratio for the General Physics Laboratory. *George Bradley. Western Michigan College, Kalamazoo, Michigan.*

An Inexpensive Arrangement for Determining e/m by Busch's Method. *Rollin K. McCombs and William B Philtentpol. University of Colorado, Boulder, Colorado.*

Bases Experimentais da Mecânica Quântica. Determinação de carga específica do elétron: Método de Busch e Hoag

TUNG-SOL 3BPI. High Vacuum Cathode-Ray Tube. Electrostatic deflection and focusing. PRINTED IN USA, PLATE, 1397.. MARCH 15, 1944.

Referencia bibliografía

Sears, F., Zemansky, Young y Freedman (2009) Física Universitaria con Física Moderna, Vol. 2.


CONTEXTO

Este trabajo fue realizado por los alumnos Gerónimo Ávila, Santiago Paz y Ana P. Aragón Rodríguez, como proyecto para promocionar el espacio curricular “Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea” de la carrera de Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Para ello contaron con la orientación de los docentes, Lic. Valentín Venchiarutti, Ing. Miguel Carrillo y Lic. Facundo Abaca.


AUTORES

ÁVILA, Gerónimo. Estudiante de la Lic. en Física, perteneciente al Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Actualmente cursa el 4^{to} año de dicha carrera.


E-mail: geronimoavila@gmail.com

PAZ, Santiago - ORCID  0009-0009-6598-9810. Estudiante de la Lic. en Física, perteneciente al Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Actualmente cursa el 4^{to} año de dicha carrera.


E-mail: santiagopaz1998@hotmail.com

ARAGÓN RODRÍGUEZ, Ana P. - ORCID  - 0009-0002-8827-6134. Estudiante de la Lic. en Física, perteneciente al Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Actualmente cursa el 4^{to} año de dicha carrera.


E-mail: anitaaragonrodriguez@gmail.com

ABACA, Facundo Máximo - ORCID  0009-0005-1458-1533. Actualmente se desempeña como Auxiliar Docente Graduado, de la Cátedra de Física Experimental I y II, perteneciente al Departamento de Física, FACET de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. En el momento de colaborar con este trabajo, era Ayudante Estudiantil de la Cátedra de Física Moderna y Contemporánea.

E-mail: facundoabaca123@gmail.com, <https://orcid.org/>

CARRILLO, Miguel - ORCID  0009-0006-7277-7208. Ingeniero Electrónico, Es Director del Laboratorio de Transductores y Física Nuclear de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, docente en Electrónica y Física Nuclear (FACET-UNT) y colabora con el Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea (FACET-UNT).

E-mail: mcarrillo@herrera.unt.edu.ar

VENCHIARUTTI, José Valentín - ORCID  0009-0009-4960-5143. Lic. en Física, docente de Física Moderna y Contemporánea, Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea, Mecánica Cuántica I y II, Meteorología y Climatología, y Introducción a la Física de la Atmósfera. Estudiante del último año de Doctorado de Ciencias Exactas e Ingeniería.

E-mail: venchiarutti@herrera.unt.edu.ar

Experimento de la gota de aceite de Millikan

SORAIRE, Alfredo Alejo¹, IRIARTE, Enzo Fabrizio¹, ABACA, Facundo Máximo¹,
CARRILLO, Miguel¹, VENCHIARUTTI, José Valentín¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea. Tucumán. Argentina

Resumen

Se midieron propiedades de gotas ionizadas de aceite comercial usando el método descrito por R. A. Millikan, obteniendo radios del orden de milésimas de milímetro y cargas del orden de unos pocos electrones. No obstante, no fue posible determinar la carga del electrón de forma directa, sino mediante un razonamiento, este valor es $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, siendo el valor aceptado actualmente $1,67492728(29) \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Palabras clave: Millikan, gota de aceite, carga eléctrica.

Introducción

En 1897, J. J. Thompson en su famoso experimento con rayos catódicos descubrió algo sorprendente, estos se debían a una partícula más chica que el menor átomo, el de hidrógeno, como sugería la relación de carga por unidad de masa. Pero no fue capaz de determinar por separado estas cantidades.

Fue el físico irlandés G. J. Stoney quien propuso el término electrón, al considerar que los rayos catódicos debían estar formados por partículas elementales de carga.

En 1912, R. A. Millikan realizaría su experimento con gotas ionizadas de aceite, Fig. 1, haciendo que estas cayesen dentro de un capacitor de placas paralelas, midiendo sus velocidades de caída libre y de ascensión ante el campo eléctrico de dicho capacitor a una cierta tensión, o la tensión a la que se detiene la gota. Encontró que ambas velocidades

(de subida y de bajada) eran múltiplos enteros de una velocidad determinada, al relacionar esas velocidades con la carga adquirida por cada gota, encontró que siempre era un múltiplo entero de: $(4,770 \pm 0,005) 10^{-10} \text{ e.s.u}$ o $(1,591 \pm 0,002) 10^{-19} \text{ C}$ (según la conversión $1 \text{ C} = 3,335640951982 \text{ e.s.u}$). Con el tiempo este valor se corrigió al actual.

En este proceso de medición indirecta de la carga de las gotas encontró un comportamiento anómalo; para bajas velocidades, correspondientes a diámetros pequeños, se obtienen cargas grandes. Interpretó que esto se debía a que para ese tamaño de gota el aire ya no se comporta como un medio homogéneo. También, como no usó un condensador infinitamente ancho, tuvo que considerar el efecto de la proximidad de las paredes. La corrección de estas observaciones las hizo por medio del factor de Landenburg.

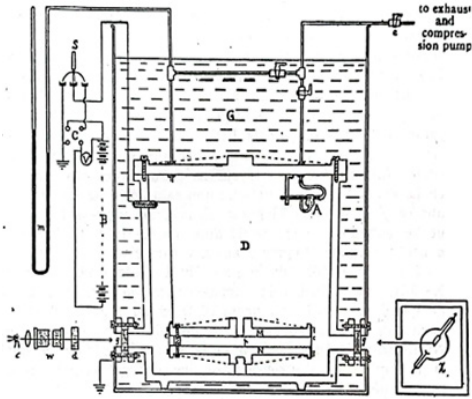


Figura 1: Sistema experimental de R. A. Millikan. Millikan (1913)

Sistema experimental

Sistema de alimentación

Se utilizó un reóstato como fuente de tensión variable de corriente alterna. Deslizando el cursor de este se lograba variar la relación de resistencias, y por lo tanto la tensión entregada. Este alimentaba directamente a un transformador que elevaba el valor de la tensión eficaz por un valor de 4,5. Su tensión eficaz nominal de entrada era de 170V, pero trabajamos solo hasta 150V.

Luego se conectó un circuito que constaba de un triplicador de tensión que a su vez la rectificaba, por lo que la tensión de salida era continua y su valor igual a la tensión eficaz del secundario del transformador multiplicada por . Esta corriente pasaba por la resistencia R1 que hacía de límite ante posibles cortocircuitos en el capacitor. De aquí se tenían dos pares de salidas, una con un reductor por un factor de 1000 donde se conectaba un multímetro para hacer las lecturas, y otra directa, que se conectaba al condensador.

Condensador

Este estaba conformado de dos placas circulares metálicas de 10cm de diámetro y una separación promedio de . Los cables de alimentación estaban conectados en la parte inferior y superior de las placas inferior y superior respectivamente para evitar alterar el campo eléctrico entre estas. Esta última contaba con un agujero en su centro por donde caerían las gotas. Estaba apoyado sobre una superficie de silicona que lo aislaba de una base metálica, y recubierto por un biombo de vidrio con aperturas adecuadas para sacar los cables de alimentación del condensador e introducir el aceite pulverizado en la recámara. Para esto último se acopló una caja de cartón para que no se ensucie el laboratorio y el experimentador en el proceso de medición.

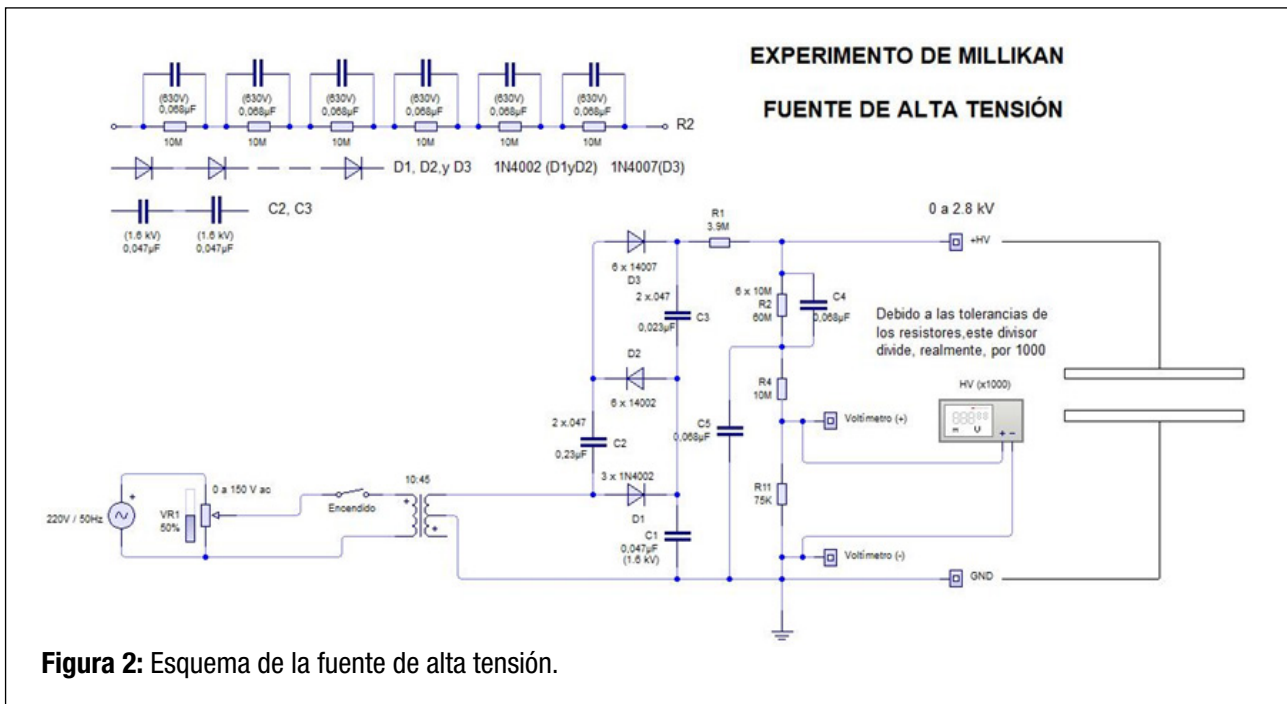


Figura 2: Esquema de la fuente de alta tensión.

Ocular

Se utilizó una lente magnificadora con unas guías que tenían la finalidad de proporcionar una referencia de distancia recorrida por la gota para el cálculo de velocidad. En su plano focal, que coincidía con el agujero labrado en la placa superior del condensador, las guías representaban un desplazamiento de $d=(2,6\pm 0,2)\text{mm}$. Debido a la lente ocular, se observaba una imagen invertida, o sea, se veían “caer hacia arriba” las gotas.

Para poder apreciar bien el movimiento de las gotas, se iluminó desde un lateral con la linterna LED de un smartphone dentro del espacio entre placas, y en lugar de depender de que alguien cronometre el proceso de caída, se grabó el proceso con otro smartphone para luego analizar el video con el software *Tracker*.



Figura 3: Sistema experimental.

Proceso de medición

Una vez conectado todo en su lugar, se colocaba el sistema de alimentación a medio rango de tensión V , se echaba el aceite pulverizado dentro de la recámara y se observaba qué gota se veía con mejor detalle y no caía demasiado rápido, para proceder con su detención. Una vez detenida la gota se procedía a grabar 30 fotogramas por segundo con el smartphone ubicado en el ocular y se “cantaba” la lectura del multímetro, se le proporcionaba más tensión para elevarla hasta la guía superior para luego dejarla caer bajo su propio peso, cortando el suministro del condensador.

Luego se transfería el video a una computadora para su análisis con el software *Tracker*. Allí se estableció un sistema de ejes coordenados con el eje Y

perpendicular a las guías, con referencia en la distancia entre éstas. Por la digitalización, se consideró un error de visualización de las guías en píxeles, igual a la suma de los semi-anchos, eligiendo un fotograma que representará las condiciones promedio de observación (Fig. 4). Así, el error de desplazamiento es igual a la suma de los errores relativos de la calibración del ocular en mm y en píxeles.

Con el software *Tracker* solo se medía el tiempo que se demoraba la gota en caer y su velocidad de caída, aunque esto solo se lo hacía para tener una noción del orden de magnitud para verificar que no se cometan errores en la medición verdadera. Así la velocidad de caída libre se midió a partir del tiempo que le tomó a la gota pasar por las guías superior e inferior o una cierta distancia determinada por el software. En este último caso, se consideró el error relativo de apreciación de las guías debido a la digitalización.

Medimos el radio por medio de la velocidad de caída libre:

$$6\pi r v \eta = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_{\text{aceite}} - \rho_{\text{aire}}) g \quad (1)$$

$$r = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{v_1 \eta}{(\rho_{\text{aceite}} - \rho_{\text{aire}}) g}} \quad (2)$$

De esta forma observamos que la mayoría de las gotas eran del orden de unas pocas milésimas de milímetro, habiendo algunas de centésimas pero que eran difíciles de frenar al caer muy rápido.

Para obtener su carga consideramos la situación de equilibrio en la que la gota queda suspendida en medio de las placas:

$$\frac{v}{d} Q = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_{\text{aceite}} - \rho_{\text{aire}}) g \quad (3)$$

$$Q = \frac{4}{3} \frac{\pi r^3 (\rho_{\text{aceite}} - \rho_{\text{aire}}) g d}{v} \quad (4)$$



Figura 4: Calibración en píxeles del microscopio.

Resultados

Tabla 1: Magnitudes medidas de las gotas.

Medición	V(V)	Δ (V)	V_1 (10^{-3} m/s)	Δ (10^{-3} m/s)	r (10^{-6} m)	Δ (10^{-6} m)	Q (10^{-19} C)	Δ (10^{-19} C)	N	Δ	E%
1	1940	20	1,3	0,2	3,5	0,3	22	10	14	6	43
2	1850	30	1,0	0,1	3,1	0,2	16	5	10	3	30
3	595	15	0,37	0,06	1,9	0,1	11	4	7	2	30
4	1320	20	0,37	0,06	1,9	0,1	4	2	3	1	37
5	1790	10	0,57	0,07	2,3	0,1	8	3	5	2	38

Conclusiones

Se logró medir la velocidad de caída de las gotas de unos pocos micrómetros por segundo y sus radios del orden de los micrómetros (10^{-6} m) con un error mínimo del 6%. Sin embargo, como se puede observar en la tabla 1, no fue posible encontrar gotas que tuvieran una diferencia de carga igual a la unidad.

Propagando la ec. 2 y 4:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 3 \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta \rho_{aceite} + \Delta \rho_{aire}}{\rho_{aceite} - \rho_{aire}} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta V}{V} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta \rho_{aceite} + \Delta \rho_{aire}}{\rho_{aceite} - \rho_{aire}} + \frac{\Delta \eta}{\eta} + \frac{\Delta g}{g} \right) \quad (6)$$

encontramos que le corresponden un factor de 3/2 al error relativo del desplazamiento y del tiempo de caída; con el primero en el peor de los casos se encuentra que le corresponde un 25% del error de la medición, mientras que, con el último, con la precisión que brinda los 30 fps solo llegaría al 3% del total. En ambos casos sería recomendable mejorar la medición.

También se observa para el caso de la 3ra y 4ta medición que se obtienen iguales velocidades de caída libre, y por lo tanto radio. Esto se puede deber a diferencias en la cantidad de cargas adquiridas como se puede ver en la columna 10 de la tabla 1. Si nos enfocamos en los valores de esta columna, se obtuvieron tanto números pares como impares, con diferencias entre ellos tanto de 2 como de 3, y siguiendo esta lógica, si se hubieran realizado un número suficiente de mediciones sería factible obtener diferencias de valores de n de 1. Esto quiere decir, que existe un número cuantizado tal que relaciona las columnas octava y décima, este número en el hipotético caso de ser n=1, sería $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Los errores estarían determinados por la ecuación (2). Este valor coincide con el valor aceptado por la comunidad científica $1,67492728(29) \cdot 10^{-19}$ C.

Se observó que cerrando la llave de paso del sistema de alimentación no cortaba inmediatamente la corriente de alimentación, por lo que se tuvo que desconectar uno de los bornes del condensador. Esto se debía a que, al cortar la alimentación al transformador, todos los capacitores internos de la fuente tardaban en descargarse provocando que la tensión de salida bajara lentamente.

Por último, se grabaron las mediciones con una lente de apertura focal considerable del smartphone, por lo que se debería corroborar que no haya algún tipo de deformación en el centro de su plano focal.

Bibliografía

Millikan R. A. (1913), "On the elementary electrical charge and the avogadro constant", *Physical Review Journal*, Vol. 2, No. 109, pp. 109-143.


Sears F. W. (1963), Campo Eléctrico, En: *Fundamentos de Física II, Electricidad y Magnetismo*, Aguilar, Madrid, España, pp. 42-45.

Young H. D. y Freedman R. A. (2009), *"Física universitaria"*, 12ª ed, Vol. 2, Pearson Educación, México.


CONTEXTO

Este trabajo fue realizado por los alumnos Alejo Soraire y Enzo Iriarte, como proyecto para promocionar el espacio curricular "Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea" de la carrera de Licenciatura en Física, (FACET-UNT). Para ello contaron con la orientación de los docentes, Lic. Valentín Venchiarutti, Ing. Miguel Carrillo y Lic. Facundo Abaca.


AUTORES

SORAIRE, Alfredo Alejo - ORCID  [0009-0000-2128-9411](https://orcid.org/0009-0000-2128-9411). Estudiante de la Lic. en Física, perteneciente al Departamento de Física, FACET, UNT. Actualmente cursa el 4º año de dicha carrera.

E-mail: alejosoraire3@gmail.com

IRIARTE, Enzo Fabrizio - ORCID  [0009-0000-8764-5562](https://orcid.org/0009-0000-8764-5562). Estudiante de la Lic. en Física, perteneciente al Departamento de Física, FACET, UNT. Actualmente cursa el 4º año de dicha carrera.

E-mail: enzoiriartee@gmail.com

ABACA, Facundo Máximo - ORCID  [0009-0005-1458-1533](https://orcid.org/0009-0005-1458-1533). Actualmente se desempeña como Auxiliar Docente Graduado, de la Cátedra de Física Experimental I y II, perteneciente al Departamento de Física, FACET, UNT. En el momento de colaborar con este trabajo, era Ayudante Estudiantil de la Cátedra de Física Moderna y Contemporánea.

E-mail: facundoabaca123@gmail.com

CARRILLO, Miguel - ORCID  [0009-0006-7277-7208](https://orcid.org/0009-0006-7277-7208). Ingeniero Electrónico, Es Director del Laboratorio de Transductores y Física Nuclear (FACET-UNT), docente en Electrónica y Física Nuclear (FACET-UNT) y colabora con el Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea (FACET-UNT).

E-mail: mcarrillo@herrera.unt.edu.ar

VENCHIARUTTI, José Valentín - ORCID  [0009-0009-4960-5143](https://orcid.org/0009-0009-4960-5143). Lic. en Física, docente de Física Moderna y Contemporánea, Laboratorio de Física Moderna y Contemporánea, Mecánica Cuántica I y II, Meteorología y Climatología, y Introducción a la Física de la Atmósfera. Estudiante del último año de Doctorado de Ciencias Exactas e Ingeniería.

E-mail: vvenchiarutti@herrera.unt.edu.ar

Cascada electromecánica convertidora de frecuencia para ensayos en transformadores de distribución

DUBERTI, Pablo Fernando ^{1,2}, GONZALEZ CHAMBEAUD, Javier ¹, GRANÉ, Pablo Elías ¹, SÁNCHEZ, Oscar Eduardo ¹.

¹Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Tucumán, Argentina.

² Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán. Tucumán, Argentina.

Resumen

En los sistemas eléctricos de potencia hay conectados una gran cantidad de equipos y máquinas eléctricas que están diseñados para ser operados con tensiones y corrientes de frecuencias industriales de 50 Hz. En algunos casos, pueden presentarse transitoriamente, frecuencias más elevadas de lo normal. Es por este motivo, que la normas nacionales e internacionales establecen los protocolos de ensayo de tensión inducida para los transformadores conectados a las redes eléctricas. En este trabajo se llevó a cabo el diseño e implementación de una cascada convertidora de frecuencia, para alimentar equipos eléctricos de hasta 160 kVA de potencia, a frecuencias de hasta 150 Hz y con tensiones de hasta 800 V, para ser sometidos a ensayos. Las máquinas e instrumentos empleados, pertenecen al laboratorio de la Facultad de Ciencias exactas y Tecnología (FACEyT) de la Universidad Nacional de Tucumán. Un propósito adicional de este estudio fue, idear un sistema didáctico para mostrar a los alumnos de la carrera de ingeniería eléctrica, los fenómenos electromagnéticos involucrados.

Palabras clave: convertidor, electromecánico, frecuencia.

Electromechanical Cascade Frequency Converter for Testing Distribution Transformers.

Abstract

A large number of electrical equipment and machines are connected to electrical power systems, which are designed to be operated with voltages and currents at industrial frequencies of 50 Hz. In some cases, higher than normal frequencies may temporarily occur. For this reason, national and international standards establish induced-voltage test protocols for transformers connected to electrical power grids. In this work, the design and implementation of a frequency converter cascade was carried out to feed electrical equipment up to 160 kVA of power, at frequencies up to 150 Hz and voltages up to 800 V, to be tested. The machines and instruments used belong to the laboratory of the Faculty of Exact Sciences and Technology of the National University of Tucumán. An additional purpose of this study was to devise a didactic system to show electrical engineering students the electromagnetic phenomena involved.

Keywords: *converter, electromechanical, frequency.*

Introducción

Desde hace bastante tiempo ya, están bien establecidos los principios fundamentales de los generadores eléctricos; de los cuales, existe una clase en particular denominada *generadores de inducción*. Una variante de estos, está construida de manera tal que tanto su rotor y estator puedan ser accesibles para alimentarse eléctricamente desde el exterior por medio de anillos rozantes con rotor bobinado, **Chapman** (2005).

El principio de funcionamiento de esas máquinas de inducción se sustenta en la generación de un campo giratorio en el estator de la máquina, lo que genera corrientes en el rotor por corte de líneas de campo. Esta clase de máquinas son muy empleadas como motores a nivel industrial, aunque encuentran otras aplicaciones en, por ejemplo, sistemas de energías renovables basados en aerogeneradores. Sin embargo, existe otro campo de aplicación muy interesante: *una máquina capaz de convertir o cambiar la frecuencia*, para alimentar cargas de potencias elevadas (del orden de los kW). Son precisamente estas máquinas agrupadas, denominadas *cascadas convertidoras*

(**Patin et al.** (2009); **Patin et al.** (2010)) que posibilitan ensayos eléctricos en equipos a frecuencias que son múltiplos fraccionarios de la red eléctrica (por ej. 100 Hz, 120 Hz, 150 Hz). En este estudio se implementó una cascada convertidora en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la FACEyT, para explorar la factibilidad de ensayar transformadores de distribución de empresas del sector eléctrico e industrial.

Un objetivo adicional fue la calibración y puesta a punto de la cascada convertidora para el estudio de los fenómenos electromagnéticos de las máquinas (**Jiménez-González et al.** (2016)), relacionados a un modelo denominado Máquina Generalizada, que se encuentra en el laboratorio.

Conversión de frecuencia

Para el estudio del comportamiento y operación de las máquinas eléctricas es muy útil apelar a un modelo electro-matemático denominado: *la máquina generalizada* de cuatro anillos rozantes. Para ello se emplea además la *Transformada de Clark*, que convierte tensiones y corrientes de un sistema trifásico a un sistema rotativo con ejes

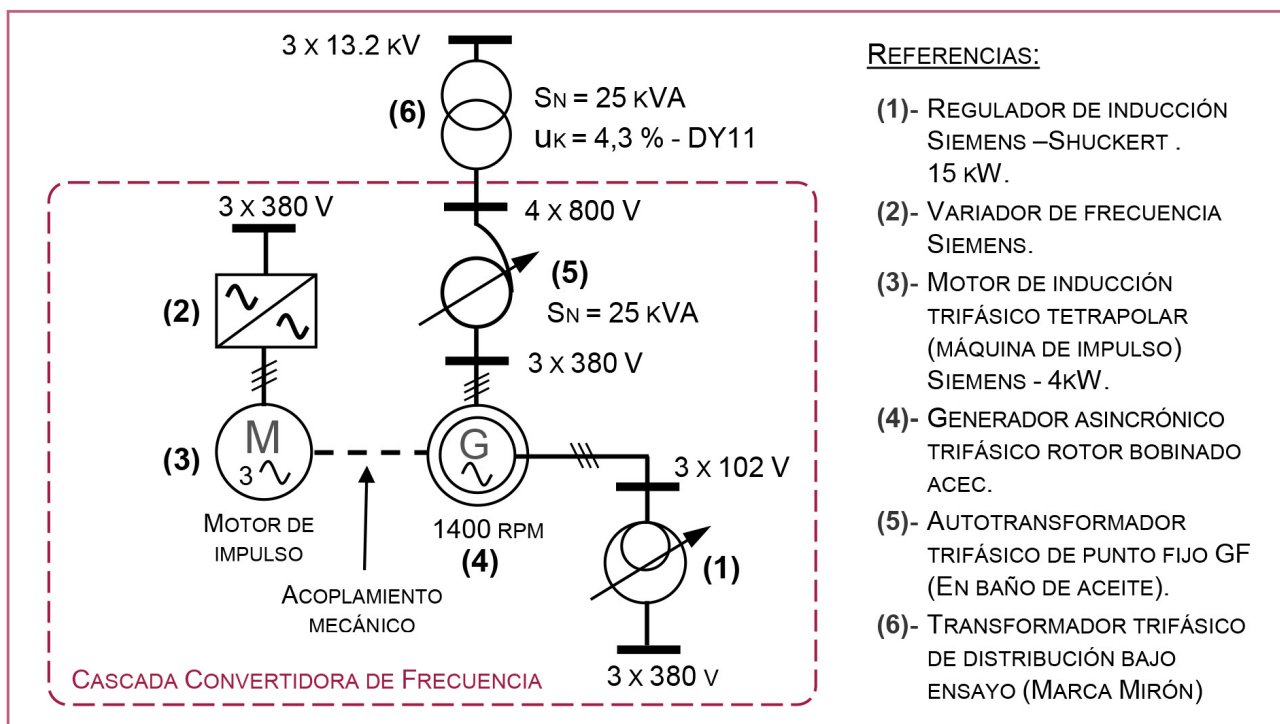


Figura 1: Esquema eléctrico de la cascada convertidora frecuencia.

en cuadratura α - β (**Garat** (2016)). Este modelo es aplicado a una máquina asincrónica de tres anillos rozantes destinada a la conversión de frecuencia. La idea central de la cascada convertidora, consiste entonces, en trasladar el concepto de Transformada de Clark, analizado y probado en una máquina rotativa generalizada de 4 anillos, a una máquina asincrónica alterna rotante de 3 anillos, logrando funcionar esta última como una "máquina convertidora de frecuencia.

Materiales y métodos

En la Figura 1 se puede observar un esquema del sistema convertidor de frecuencia empleado en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la FACET de la UNT. A partir de un regulador de inducción (1) se energiza, a través de anillos rozantes, el rotor de la máquina asincrónica (4), generándose en el entrehierro una excitación giratoria de amplitud constante a frecuencia industrial. A continuación, se pone en movimiento el rotor de la máquina convertidora mediante un motor de inducción trifásico tetrapolar (3), acoplado mecánicamente y controlado mediante un variador de frecuencia (2)

que controla la velocidad; obteniéndose frecuencias de campo de 100 Hz. Debido al bajo deslizamiento de la máquina de impulso, las velocidades y frecuencias mecánicas son prácticamente iguales a las de su campo. En tales condiciones, el motor asincrónico (4) opera como generador de inducción ($s < 0$) (**Chapman** (2005)).

Si el motor primario externo acciona la máquina de inducción a una velocidad mayor a la de sincronismo, se invierte la dirección de su par inducido y comienza a operar como generador. Conforme se incrementa el par que aplica el motor primario a su eje, se incrementa, hasta un cierto límite, la cantidad de potencia producida por el generador de inducción. Al no existir independencia con la velocidad, en cada una de las fases del devanado trifásico distribuido en la periferia circular del estator de la máquina convertidora, se inducirán *tensiones del triple de la frecuencia industrial*, puesto que el sentido de giro de la excitación giratoria de la alimentación por anillos, es coincidente con el sentido de giro del rotor. Para conseguir tensiones equivalentes al *doble de la tensión nominal de línea* del lado de baja tensión del transformador bajo ensayo (6), se conecta en cascada con

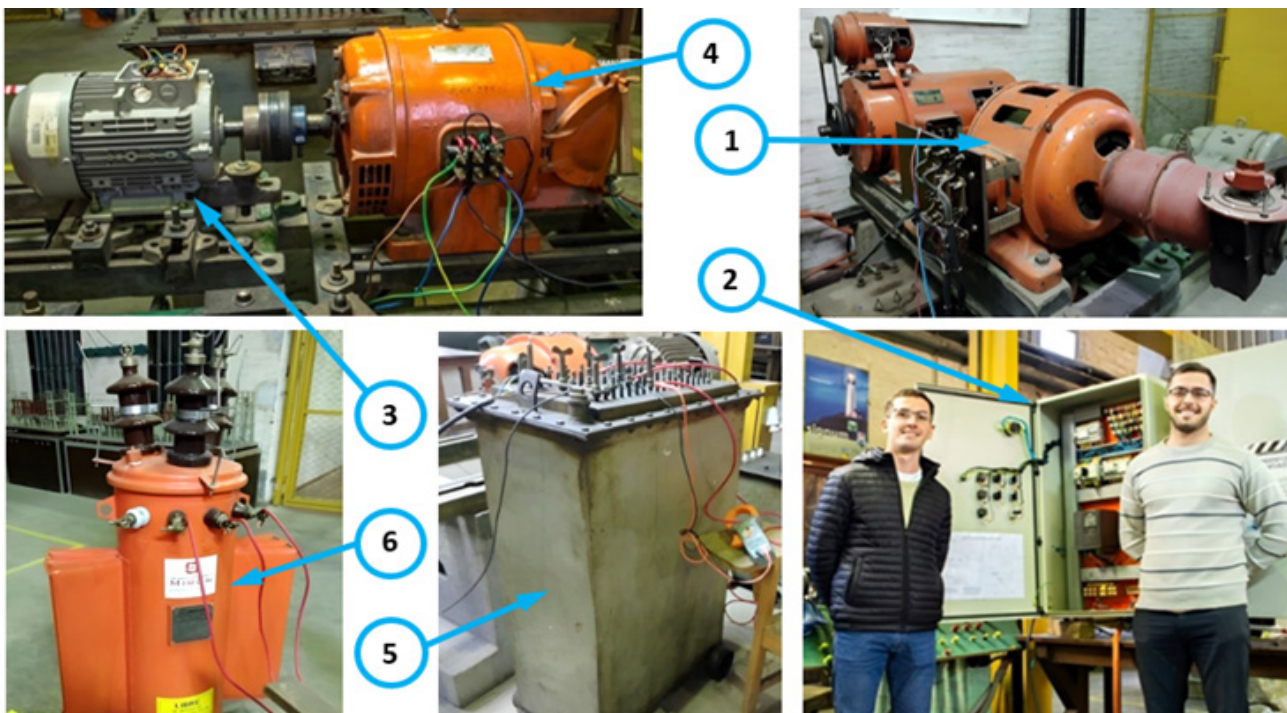


Figura 2: Fotografías de los componentes de la cascada convertidora de frecuencia. Abajo a la derecha, se muestran alumnos de la carrera de ingeniería eléctrica.

la convertidora, un autotransformador trifásico de punto fijo en baño de aceite; con lo cual se obtienen tensiones de línea de 800 V y frecuencias de 150 Hz. La Norma **IRAM 2105** (1987) recomienda esos valores para conseguir una relación U/f (Tensión/frecuencia) baja y asegurar que el transformador a ensayar trabaje en la zona lineal de su curva B-H.

Si solamente se aumentara la tensión y se mantuviera la frecuencia de 50 Hz, aumentaría el flujo en el interior de la máquina, ingresando en zona de saturación, con el consecuente aumento de pérdidas en el núcleo y distorsión de la onda de corriente.

Una vez alcanzados los valores de tensión y de frecuencia del ensayo dieléctrico, se está en condiciones de verificar aislación entre espiras y entre capas de los arrollamientos del transformador.

Otro factor a tener en cuenta, es que, valores más elevados de frecuencia eléctrica permiten disminuir el tiempo de sollicitación dieléctrica al que puede ser sometida la máquina durante el ensayo. La Norma **IEC 60076-3** (2013) establece una reducción del tiempo de duración de ensayo, respecto a la frecuencia $f = 50$ Hz:

$$t_{\text{ensayo}} = \frac{f}{f_{\text{ensayo}}} \cdot 120 \text{ [s]} \quad (1)$$

En los ensayos de este estudio, se realizaron dos etapas de pruebas en el Laboratorio: uno con frecuencias de 120 Hz, es decir tiempos de ensayo de 50 s; y el otro con frecuencias de 150 Hz, es decir, tiempos de ensayo de 40 s. Estos fueron aplicados al transformador trifásico de distribución de 25 kVA (marca Mirón), relación 13,2/0,4 kV, perteneciente al Laboratorio de Máquinas Eléctricas. Se alimentó por el lado de baja tensión, obteniéndose del lado de alta (sin carga), elevadas tensiones del orden de los kV, a 120 y 150 Hz respectivamente.

Análisis de los flujos de potencias activa transferidos a la carga

Para decidir cuál es la potencia máxima de carga que puede ser ensayada en el laboratorio de máquinas eléctricas, se debe realizar un análisis de los flujos de potencias activas y reactivas

transmitidas por las máquinas alternas rotativas al transformador de distribución bajo ensayo; y por el variador de frecuencia. Los cálculos que siguen están realizados con la tensión de 800 V. La potencia disipada en el transformador debida a pérdidas por histéresis y corrientes parásitas (**Chapman** (2005)) (despreciando del cobre) es:

$$P_{FE} = K_h \cdot f \cdot B^2 + K_p \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (2)$$

Despreciando el primer término de la ecuación (2), por ser lineal con la frecuencia, y reemplazando el valor las frecuencias de 50 Hz y 120 Hz de esta ecuación, se puede encontrar relaciones aproximadas haciendo el cociente:

$$\frac{P_{FE(120)}}{P_{FE(50)}} \cong \frac{120^2 \cdot K_p(120) \cdot B_{(120)}^2}{50^2 \cdot K_p(50) \cdot B_{(50)}^2} \quad (3)$$

Como $K_p(120) = K_p(50)$, por ser independiente de K_p la frecuencia, y además se cumple la igualdad de los cocientes tensión/frecuencia:

$$\left(\frac{E}{f}\right)_{50} = 1,2 \cdot \left(\frac{E}{f}\right)_{120}$$

entonces: $B_{(50)} = 1,2 \cdot B_{(120)}$; y resulta: $P_{FE(120)} \cong 4P_{FE(50)}$.

Valores orientativos para pérdidas en Watts a 50 Hz de transformadores trifásicos ONAN (**IRAM 2105** (1987)), para una potencia aparente nominal de 25 kVA (similar al transformador bajo ensayo), está en el orden de 160 W. De los resultados anteriores, se desprende que la potencia P_{FE} esperable a 120 Hz es: . Como la potencia de placa la máquina de inducción convertidora de frecuencia es 9,5 CV (), se podrían ensayar transformadores de hasta 630 kVA. Sin embargo, la máquina de impulso del generador impone la limitación practica de una potencia mecánica equivalente a 4 kW; por lo cual *solo pueden ensayarse transformadores de hasta 160 kVA.*

Análisis de los flujos de potencia reactiva transferidos a la carga

El generador de inducción no puede producir potencia reactiva, ya que no dispone de un circuito de campo separado. Es por esto que la absorbe de la red para controlar la tensión en bornes de su salida; además de los requerimientos de potencia reactiva del transformador bajo ensayo.

Para estimar esa potencia reactiva necesaria en el transformador a 120 Hz y 800 V, con respecto a la absorbida a tensiones y frecuencias nominales de operación, puede considerarse que las inductancias de bobinas concéntricas por fase (diseño de transformadores de potencia y de distribución), montadas en cada columna, no modifican su valor entre 50 y 150 Hz. Sus valores dependen de parámetros electro-geométricos, como resulta evidente en las ecuaciones (4) y (5) (Schwab (2019)):

$$S_{\text{COLUMNA}} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,75 \cdot \sqrt[4]{S_N})^2 \cdot F_u \cdot F_{\text{emp}} \quad (4)$$

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \frac{S_{\text{COLUMNA}}}{1} \cdot N^2 \quad (5)$$

Donde F_u y F_{emp} son los factores de llenado y empaquetamiento, respectivamente; y S_N la potencia nominal. Por lo tanto si se considera que, se obtiene la relación entre reactancias a distintas frecuencias:

$$X_{L(120)} = 2,4 \cdot X_{L(50)} \quad (6)$$

$$Q_{(120)} = 1,67 \cdot Q_{(50)} \quad (7)$$

De la ecuación (6) se desprende que si se duplica tensión de línea en el ensayo (800 V), y la frecuencia es 2,4 veces la nominal (120 Hz), la máquina absorberá un 67% más de potencia reactiva

inductiva (en términos comparativos) de la necesaria en un ensayo normal sin carga a 50 Hz. Con el mismo razonamiento, para el ensayo a una frecuencia a 150 Hz, los resultados obtenidos serán similares.

Resultados de la prueba de laboratorio

En la tabla 1 se muestran los resultados de las mediciones con y sin carga (Transformador bajo ensayo).

Es interesante destacar que, con el transformador conectado, utilizado como carga del generador, no fue necesaria una compensación de reactivo; evitando el riesgo de posibles fenómenos ferro-resonantes no deseados. Se aprecia de tablas que la cascada convertidora suministra las tensiones y frecuencias deseadas.

Conclusiones

Entre los objetivos que fueron trazados en el presente estudio, el principal fue montar un sistema que pudiera realizar de manera eficaz la conversión de la frecuencia de red de 50 Hz a múltiplos de esta. La puesta a punto y mediciones de funcionamiento del sistema hasta una frecuencia de 150 Hz, demostraron que el sistema funciona correctamente y es capaz de ser empleado para ensayar transformadores de empresas del medio de hasta 160 kVA.

Tabla 1: Mediciones eléctricas en la cascada convertidora de frecuencia para 120 Hz y 150 Hz.

Puntos de medición a f =120 Hz	Ensayo Sin carga	Ensayo con carga
Salida variador de velocidad	No medido	I = 2,7 A - U_L = 410 V - f = 70 Hz
Salida regulador de inducción	No medido	I = 9,4 A - U_L = 23,6 V - f = 50 Hz
Salida generador	No medido	I = 5 A - U_L = 75 V - f = 120 Hz
Salida autotransformador	No medido	U_L = 614 V - I = 0,7 A - f = 120 Hz
Puntos de medición a f = 150 Hz	Ensayo Sin carga	Ensayo con carga
Salida variador de velocidad	I = 2,7 A - U_L = 411 V - f = 100 Hz	I = 2,7 A - U_L = 440 V - f = 100 Hz
Salida regulador de inducción	I = 5,5 A - U_L = 25,2 V - f = 50 Hz	I = 11,4 A - U_L = 27,4 V - f = 50 Hz
Salida generador	I = 0,5 A - U_L = 241 V - f = 150 Hz	I = 3,2 A - U_L = 97,6 V - f = 150 Hz
Salida autotransformador	U_L = 800 V - f = 150 Hz	U_L = 800 V - f = 150 Hz

Adicionalmente, desde su implementación, la cascada convertidora permite llevar a cabo pruebas de laboratorio con fines académicos, de manera tal que los alumnos de la carrera de ingeniería eléctrica, comprendan con mayor profundidad los fenómenos electromagnéticos

presentes en los contenidos teórico-prácticos de las asignaturas Maquinas Eléctricas I y II. Al proporcionar salidas de frecuencia variable, se pueden combinar ensayos en conjunto con la máquina generalizada de prueba que posee el laboratorio.

Referencias bibliográficas

Chapman S. J. (2005). *Máquinas Eléctricas* (4° Ed.). Editorial Mac Graw Hill. México.

Garat E. (2016). Modelo General de Máquina Eléctrica, En: *Teoría de máquinas eléctricas rotativas: generalidades sobre máquinas eléctricas rotativas. La máquina sincrónica en régimen estacionario y transitorio*. (2° Ed.). FACEyT- Universidad Nacional de Tucumán, pp. 276-347.

Jiménez-González, J., López-García, I., Campero-Littlewood, E., Canseco-García, H. A., Olivares-Galván, J. C., & González-Montañez, F. J. (2016). *La máquina de inducción como variador de frecuencia en los laboratorios de docencia de ingeniería eléctrica*. Simposio Internacional de Generación Distribuida, La Habana, Cuba, pp. 1-10.

Norma IRAM 2105 (1987). *Transformadores para transporte y distribución de la energía eléctrica*". Niveles de aislación y ensayos dieléctricos.

Norma IEC 60076 (2013). "*Power transformers*". Part3: *Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*.

Patin, N., Monmasson, E., & Louis, J. P. (2009). "Modeling and control of a cascaded doubly fed induction generator dedicated to isolated grids". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10), 4207-4219.


Patin, N., Monmasson, E., & Louis, J. P. (2010). "Modeling and control of a cascaded doubly-fed induction generator based on dynamical equivalent circuits. *Mathematics and Computers in Simulation*", 81(2), 225-238.


Schwab H.G. (2019) Protecciones de Transformadores, En: "*Sistemas eléctricos de potencia*". *Análisis de fallas eléctricas* (1° Ed.). Editorial Grupo de Escritores Argentinos. Argentina, pp. 371-424.

Agradecimientos


Este trabajo fue presentado en el marco de un proyecto de perfeccionamiento para la formación en Máquinas eléctricas. Recibió aporte económico de la empresa TECHINT, a través de la fundación HERMANOS AGUSTIN Y ENRIQUE ROCCA. Con ello, se financió la compra de instrumentos y equipos para el laboratorio de máquinas eléctricas de ingeniería eléctrica de la FACEyT- UNT.


AUTORES

DUBERTI, Pablo Fernando - ORCID  [0009-0005-0534-6398](https://orcid.org/0009-0005-0534-6398). Ingeniero electricista, egresado de la UTN - FRT (2013). Profesor Asociado de Máquinas Eléctricas I y II (FACEyT-UNT). Profesor adjunto de Instrumentos y Mediciones Eléctricas (Ingeniería en Energía Eléctrica - UTN-FRT). E-mail:

GONZALEZ CHAMBEAUD, Javier - ORCID  [0009-0006-1666-8314](https://orcid.org/0009-0006-1666-8314). Ingeniero electricista egresado UNT (2004). Jefe de Trabajos Prácticos de la cátedra de Maquinas Eléctricas I y II de ingeniería eléctrica (FACET-UNT). Doctorado del Instituto en Luz, Ambiente y Visión (ILAV) UNT-CONICET.

E-mail: jchambeaud@herrera.unt.edu.ar

GRANÉ, Pablo Elias -  [0009-0000-6979-1873](https://orcid.org/0009-0000-6979-1873). Ingeniero electricista egresado de la UNT (2013). Profesor adjunto de la cátedra de Maquinas Eléctricas I y II de ingeniería eléctrica (FACET- UNT).

SANCHEZ, Oscar -  [0009-0006-9614-2733](https://orcid.org/0009-0006-9614-2733). Ingeniero electrónico egresado de la UNT (2011). Jefe de trabajos prácticos de la cátedra de M.E. I y II de la FACET- UNT.

cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

14 Años de un sueño virtual. Y la dura realidad que lo hizo realidad

CARRILLO, Miguel Angel¹

¹Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Laboratorio de Transductores y Física Nuclear. Tucumán. Argentina.

Corría el año dos mil diez y dos cosas pasaban simultáneamente:

Un imprevisto inconveniente se presentaba en las clases de Física nuclear de la FACET y yo, auxiliar docente de esa asignatura, estaba tomando un curso virtual con un presuntuoso título “Experto en Educación a Distancia”. Aunque ya llevaba un par de años en esa temática, hoy, 14 años después de haberlo aprobado, creo que todavía estoy muy lejos de serlo.

El problema que se presentaba en nuestra cátedra por primera vez, era que una joven estudiante embarazada quería cursar la asignatura como cualquiera de sus compañeros, pero su estado no le permitía acercarse a fuentes radiactivas. Se iba a perder lo mejor de la materia, su parte experimental...

En ese curso virtual, que en realidad era una de mis primeras incursiones en herramientas de producción de contenidos digitales, tuve la suerte de conocer una, muy interesante, llamada JClic. Estaba basada en applets Java y permitía desarrollar juegos didácticos multimedia e interactivos con mucha facilidad para colgar en la web.

Entonces surgió una idea. ¿Por qué no tomar un experimento completo con su instrumental y su fuente radiactiva como si fuese un juego didáctico? Así encaramos con la responsable de la asignatura, la Dra. Josefina Mangussi, el primer experimento de nuestro programa que consistía en medir el campo de radiación alrededor de una muestra de uranio natural.

En una primera versión (fig. 1) y, basándome en mediciones reales tomadas por nuestros alumnos en años anteriores, le presenté a mi jefa un tablero on-line donde uno podía ubicar el medidor en distintos puntos y el applet le decía cuánta radiación había en ese lugar. Yo estaba feliz pero ella, con mucho criterio, me dijo

“El mundo real no es así. El medidor tiene una aguja que fluctúa constantemente por la aleatoriedad del fenómeno radiactivo y el estudiante tiene que ingeniárselas para saber qué valor tomar”.

La felicidad se me extinguió en un instante pero en seguida me recuperé y, haciendo uso de las capacidades multimedia del entorno JClic, inserté en cada punto videos reales del instrumento midiendo en esa ubicación con su aguja fluctuante. Esto ya satisfizo a Josefina y, en 2012, lo comenzamos a usar en las prácticas, tanto para el caso de jóvenes embarazadas, como para estudiantes que, por razones de salud, no habían podido estar presentes en el laboratorio para esa práctica.

También le vimos otra ventaja. En el laboratorio teníamos solo un equipo de medición y los alumnos debían repartirse los puntos a medir para poder experimentar todos. En la Web, cada alumno podía contar con su propio equipo sin gastar un peso, ni él ni nosotros. Por otra parte, podríamos tener alumnos de cualquier parte del país (y del mundo) haciendo el experimento como en nuestro laboratorio. La idea nos pareció genial y la presentamos en un par de congresos y la publicamos.

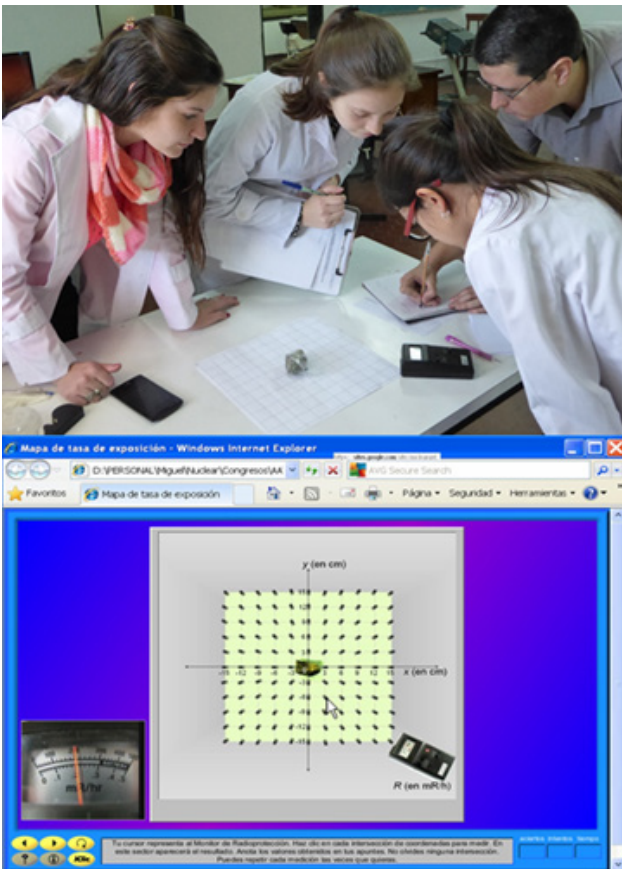


Figura 1: Laboratorio real y primer laboratorio virtual

Pero nada es perfecto. Después de usarla algunos años y comenzar a pensar en virtualizar otros experimentos, la tecnología nos echó un balde de agua fría. Los navegadores comenzaron a rechazar nuestro applet Java (y a todos en general) por considerarlos “inseguros”

Inmediatamente, me puse a buscar la manera de reemplazarlo. No era fácil porque mi fuerte nunca fue la programación pero no desistí y en 2016 descubrí que podía hacer lo mismo con un simple Power Point aprovechando su conocida capacidad multimedia y su no tan conocida capacidad de saltar a cualquier diapositiva mediante la inserción de hipervínculos. En la computadora ya funcionaba pero ¿Cómo hacer para “colgar” ese archivo de Power Point en la Web y que se lo pudiera usar On-line? Ahí descubrí otra joyita informática que convertía muy fácilmente archivos de Power Point a aplicaciones Flash. El software, por entonces todavía gratuito, se llamaba “I-Spring”. Alentados por este hallazgo, encaramos con una alumna, Lourdes Robles Madrid, la virtualización de una segunda experiencia de laboratorio, la

medición de la absorción a la radiación por distintos materiales de blindaje tales como plomo, aluminio o papel. Logramos un primer prototipo en 2017 (fig. 2) siempre basándonos, no en modelos, sino en resultados de los experimentos reales durante los años previos.

La felicidad volvió a nuestros rostros. Ya teníamos de nuevo funcionando el primer experimento y un prototipo, todavía no usable, de un segundo. ¡Caso solucionado!

(...o no tanto).



Figura 2: Prototipo del segundo laboratorio virtual

El avance de la tecnología es vertiginoso. ¡Y la obsolescencia, implacable! En apenas un par de años, Flash también sucumbió a la sospecha de inseguridad de la Web y fue rechazado por los navegadores. Afortunadamente, también para eso encontramos una solución o, mejor dicho, un paliativo. No podíamos ofrecer la experiencia en la Web para medir on-line pero ofrecíamos, en el aula virtual, la aplicación Flash y un reproductor para descargarlos y ejecutarlos en la PC.

Como el sueño de virtualizar los laboratorios venía desde 2010 y muchos sabían que estaba muy arraigado en mí, unos años antes, en 2014, un exalumno de la asignatura, el Ing. Facundo Lucianna, se había acercado al laboratorio a mostrarme una virtualización que había hecho de otra de las experiencias, la medición de espectros de radiación gamma de distintas fuentes. Estaba buenísima y avanzamos sobre ella logrando un producto de primera calidad (fig. 3) pero que tenía

un inconveniente muy grande: Necesitaba que los alumnos tuviesen instalado Matlab en su computadora y no podía operarse on-line.

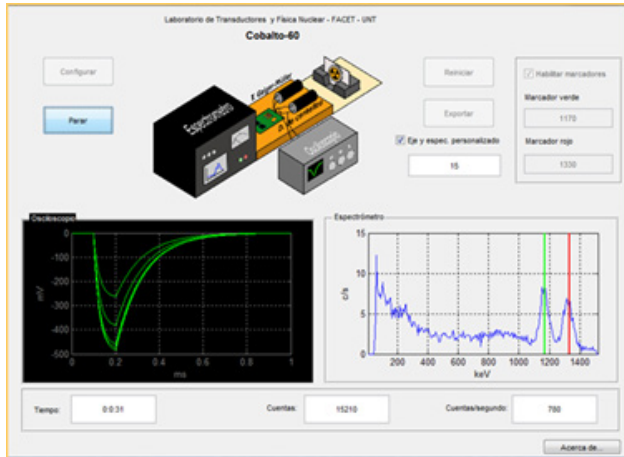


Figura 3: La gran virtualización que no pudimos usar

Así llegamos a comienzos del 2020. ¡Qué año! ¡Un virus desde un rincón de China paralizaba al mundo! Millones y millones de víctimas. Los estudiantes, en todo el planeta, solo podían estudiar desde sus casas. La educación tuvo que adaptarse vertiginosamente a la situación y solo funcionar en forma virtual.

Afortunadamente ya teníamos desde hacía años nuestra aula virtual funcionando como “aula extendida” (apoyo a las clases presenciales) pero ¿Qué hacíamos con los laboratorios que no podíamos ofrecer en forma virtual?

En un primer momento, pensamos desde la cátedra “ya va a pasar” y postergamos las clases de laboratorio al final del semestre pero... la pandemia no pasaba... Tuvimos que tomar decisiones drásticas. Teníamos un experimento virtual totalmente operativo, un prototipo de otro que había que pulir y un producto terminado de otro que no se podía usar salvo que el estudiante contara con Matlab. ¡Había que hacer algo urgente!

Como la urgencia y la presión agudizan el ingenio, mi compañero de cátedra, el Dr. Benjamín Straube, tomó la posta y el 21 de junio, mientras yo terminaba de poner a punto el prototipo en flash del experimento de blindajes, me dio la buena noticia de que, quizás, podía desarrollar la experiencia de espectrometría para utilizarla on-line con una herramienta muy popular y gratuita. Le pregunté ¿Qué herramienta? A lo que me respondió muy tranquilo... Geogebra.

Quedé desorientado. Yo ya conocía Geogebra pero, para mí, era una hermosa herramienta para hacer representaciones gráficas interactivas y resolución didáctica de problemas de Álgebra, geometría, Física... pero... ¿Experimentos virtuales de física Nuclear? ¿Equipos de medición operativos?

Pues bien, por la premura del caso, en 10 días tuvo funcionando al primer nuevo experimento y, en 10 días más al segundo.

Eso nos alcanzó para poder dictar Física Nuclear en forma íntegramente virtual con todos sus laboratorios. Los dos primeros en la vieja combinación de Power Point y Flash y los otros en la flamante utilidad de Geogebra, descubierta por Benjamín, combinada con Javascripts.

Esto merecía ser llevado a congresos y así lo hicimos. Por supuesto, fueron congresos virtuales, como funcionaba todo en ese momento. Así, en la reunión anual de la Asociación Física Argentina de 2020, lo presentamos, y un gran docente investigador de la Comisión Nacional de Energía Atómica “CNEA”, el Dr. Andrés Arazi, se interesó muchísimo y nos invitó a desarrollar un taller on-line dentro del marco del Laboratorio Cero, un histórico laboratorio abierto para estudiantes secundarios dependiente de la CNEA, la Universidad San Martín, el Instituto Sábató y la Universidad Favaloro.



Figura 4: Uno de los encuentros en Laboratorio Cero

Yo hacía años que soñaba, con ese laboratorio (no en participar sino, simplemente, en acercarme a ver un poco de todo lo bueno que allí se hacía)

Jamás imaginé trabajar un día allí como invitado ¡y lo hicimos! (con Benjamín y un par de estudiantes nuestros, Emanuel y Rosa). Era como tocar el cielo...

Bueno, no fue solo un día. Fuimos invitados a participar en ese 2020, en 2021 (fig 4) y en 2022. Lo más lindo fue que nuestros laboratorios virtuales fueron también muy importantes para el Laboratorio Cero. Desde el comienzo de la pandemia, habían tenido que convertir sus acostumbrados encuentros netamente experimentales de los sábados en el Centro Atómico Constituyentes, a excelentes charlas por Zoom pero sin ninguna actividad experimental. La nuestra fue la única posibilidad, durante 2020 y 2021, de que sus participantes “entren a un laboratorio”, midan y saquen conclusiones. Una broma que surgió en ese momento es que, con nuestra participación, habíamos evitado que, durante la pandemia, el Laboratorio Cero sea “cero laboratorio”... En 2021, hasta tuvimos participantes desde Paraguay, Perú y México y, por si eso fuera poco, forjamos una gran amistad con quien nos invitó.

Al pasar los años, Benjamín fue actualizando las viejas virtualizaciones y hoy ya tenemos todo funcionando en Geogebra (fig. 5).

Terminada la pandemia, seguimos ofreciendo la alternativa virtual para aquellos estudiantes que, por

una u otra razón no pueden concurrir a la facultad y ofrecimos la asignatura en programas de intercambio virtual tales como PILA y AUGM. Ahora, nuestros laboratorios virtuales se encuentran disponibles Online para uso público en [una página de la cátedra](#), en el **portal educativo** de la CNEA, en la página principal del **Laboratorio Cero** y en el portal internacional de laboratorios remotos **LABREM-FCEIA** de la Univ. Nacional de Rosario.



Figura 5: Todos los laboratorios actuales

Como bien dice el título, fue un sueño virtual de 14 años que se volvió realidad, paradójicamente, gracias a algo tan duro como la trágica pandemia que sufrimos...



Acceso a todos los laboratorios: <https://sites.google.com/view/medicionesnuclearesvirtuales>

AUTOR

CARRILLO, Miguel Ángel – ORCID 0009-0006-7277-7208

Ingeniero Electrónico y Especialista en Educación Superior y TICs. Director del Laboratorio de Transductores y Física Nuclear (FACET-UNT). Docente en Electrónica y Física Nuclear (FACET-UNT). Miembro del comité ejecutivo de la división Física Nuclear de la Asociación Física Argentina. Miembro de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear. Fue referente tecnológico y administrador del campus virtual del Instituto 9 de Julio en el marco de la red del Instituto Nacional de Formación Docente.

E-mail: mcarrillo@herrera.unt.edu.ar

Muestra AFITA 2023 y otras exposiciones de alumnos de la FACET

La grata experiencia de participar en un congreso científico tiene una contracara: muchas veces nos resulta imposible asistir a las conferencias, charlas o sesiones de pósters de los colegas de nuestra propia institución. Y así, a pesar de vernos a diario y de colaborar en las tareas docentes, no sabemos en qué están trabajando nuestros colegas investigadores del laboratorio de al lado. Asimismo advertimos que por lo general los trabajos de investigación pasan desapercibidos para el resto de nuestra comunidad académica. Particularmente los estudiantes, foco del grueso de la tarea universitaria, no tienen una forma orgánica de acceder a estos trabajos, de indudable valor didáctico y motivacional.

La actual Comisión Directiva de la Asociación Física Argentina, Filial Tucumán (AFA-FT), consideró que una manera natural y práctica de dar a conocer los productos de investigación a colegas docentes, estudiantes de todas las carreras, trabajadores no-docentes y al público en general, es la de organizar una muestra local que incluya todos los trabajos que fueron presentados en congresos científicos celebrados durante el año, aprovechando el material impreso disponible.

Se consideró oportuno incluir en dicha muestra la valiosa producción de proyectos científicos realizados por estudiantes de carreras de ingeniería para la promoción de la asignatura Física III, y versiones en póster de conferencias presentadas en los Coloquios del Instituto de Física del Noroeste Argentino (INFNOA), que de otro modo tienen una efímera vida y un muy restringido alcance, en desmedro del esfuerzo invertido en ellos.

El Sr. Decano y su distinguido gabinete recibieron con beneplácito el pedido de autorización y auspicio para la organización de esta muestra, a la que sumaron la acertada decisión de incluir en la nueva edición de la Revista CET una pequeña muestra de los resúmenes de los trabajos presentados y los enlaces digitales para acceder a la totalidad de los mismos. Es conocido por todos que la Revista CET, medio por excelencia de divulgación de la producción científico – académica de nuestra Facultad, viene redoblando esfuerzos para incrementar tanto la temática como la extensión de los artículos publicados.

Horacio BRIZUELA, Nadia VEGA

Secretaría de Asociación Física Argentina (AFA), Filial Tucumán.

Adaptación del experimento de Leonardo da Vinci para estudiar la gravedad

BRIZUELA, Horacio G. ¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Laboratorio de Física del Sólido. Av. Independencia 1800, 4000 S.M. de Tucumán. Argentina.

Leonardo de Vinci (Anchiano, Italia, 1452; Ambroise, Francia, 1519) no sólo dejó un legado de maravillosas obras artísticas, sino también sorprendentes e innovadores estudios de geometría, anatomía, botánica, geología, ingeniería e hidráulica, entre otros temas. Este autodidacta fue tan prolífico como desordenado. Sus celebrados textos en escritura especular contienen, además del desarrollo de algún tema principal, anotaciones dispersas para un posterior tratamiento, bosquejos de todo tipo y ocurrencias de momento. A pesar de intentarlo muchas veces, nunca logró ordenar sus manuscritos, y sólo llegó a agruparlos en cuadernos, hoy conocidos como “códices” o “codex”. A su muerte, los herederos los vendieron sin registro a coleccionistas particulares. Algunos llegaron finalmente a bibliotecas públicas, pero otros se perdieron o se dañaron por haber sido tratados con torpeza. La búsqueda y recopilación de esta heterogénea obra se inició a mediados del s. XX, y en la actualidad se ha recuperado una parte sustancial, que está siendo redescubierta y revaluada. Así, en 2017, Morteza Gharib **Gharib et al.** (2022), investigador del CalTech, advirtió

en el Codex Arundel la poco conocida faceta de Leonardo como físico experimental: encontró dibujos que representan un experimento diseñado para develar la naturaleza de la gravedad. Consiste de un gran recipiente que se mueve horizontalmente con aceleración constante, mientras va dejando caer verticalmente unas esferitas. Se interpreta que el objetivo es ajustar la aceleración del recipiente a la de las esferitas. Cuando esto ocurre, las esferitas en caída forman una línea a 45°. Gharib y sus colaboradores recrearon exitosamente el experimento **Perkins** (2023). En el presente trabajo se realizó una adaptación del mismo, que le confieren mayor simpleza pero conservan su espíritu. Consiste en dos simplificaciones: a) Las esferitas están alineadas fuera del móvil que causa su caída, y así éste tiene masa constante y su aceleración se puede ajustar con un simple mecanismo de roldana y contrapeso. b) Como lo haría otro gran renacentista, Galileo Galilei, las esferitas no caen verticalmente, sino que ruedan por un plano de inclinación ajustable a conveniencia. Así la aceleración disminuye y se facilita la observación del alineamiento.

Referencias bibliográficas

Gharib, M., Roh, C. y Noca, F. (2022). “Leonardo da Vinci’s Visualization of Gravity as a Form of Acceleration”, *Leonardo*, vol. 56 (1), pp. 21-27.

Perkins, R. (2023). “Leonardo da Vinci’s forgotten experiments explored gravity as a form of acceleration” <https://www.caltech.edu/about/news/leonardo-da-vincis-forgotten-experiments-explored-gravity-as-a-form-of-acceleration>. rperkins@caltech.edu.



Adaptación del experimento de Leonardo da Vinci para estudiar la gravedad



Horacio G. Brizuela ^{1, 2, 3}

hbrizuela@herrera.unt.edu.ar

¹ Laboratorio de Física del Sólido

² Laboratorio de Física Experimental "Leonor G. de Guzmán"

³ Cátedra de Epistemología e Historia de la Física



Introducción: En un artículo publicado en la revista "Leonardo", M. Gharib y col. ⁽¹⁾ reportaron el hallazgo en el Codex Arundel ⁽²⁾ de evidencia sobre un posible experimento propuesto por Leonardo da Vinci para corroborar la conjetura de que la gravedad actúa acelerando los cuerpos que caen. Consistía en acelerar un recipiente en dirección horizontal, mientras se caen cuerpos esféricos. Los dibujos y textos sugieren que si se ajusta la aceleración del recipiente para igualar la aceleración de caída de las esferas, estas formarían una línea recta (figs. 1 y 2). En este trabajo se propone una adaptación de dicho experimento, para controlar fácilmente las aceleraciones, corroborar la conjetura de Leonardo, y usar el dispositivo con fines didácticos,

El experimento de Leonardo

La fig. 1 muestra la una vasija que aparentemente se mueve en dirección horizontal, mientras caen esferas. En la fig. 2 se ve el detalle de ese dibujo, y otros similares.

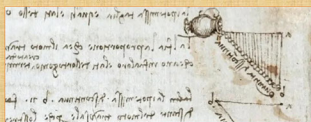


Figura 1. Recreación de una página del Codex Arundel, con el dibujo del experimento

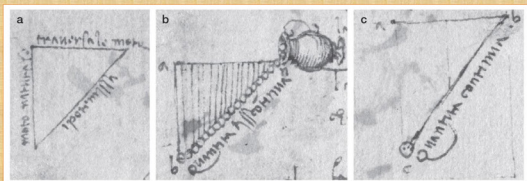


Figura 2. Detalle de los dibujos y anotaciones puestos "al descubierto". Según Gharib y col., la leyenda "equalione di moti" (igualdad de movimientos), es la clave para su interpretación.

Lo sugerente de la fig. 1, que se aprecia mejor en la fig. 2 b), es cómo las esferas se alinean como la hipotenusa de un triángulo rectángulo isóscele. Gharib y col. sostienen que este rasgo, más la leyenda "equalione di moti", son los que permiten interpretar la conjetura de Leonardo: cuando la vasija se mueve con igual aceleración que la de caída de las esferas, la alineación de estas debe estar a 45°. El experimento fue realizado en Caltech y resultó exitoso ⁽³⁾.

Adaptación sugerida

En este trabajo se proponen dos importantes cambios respecto del experimento original, que implican su realización pero a la vez conservan su esencia.

1) Un recipiente que deja caer las esferas constituye un móvil de masa variable, lo que torna complejo el control de su aceleración. A fin de emplear un móvil de masa constante, las esferas están fuera del mismo, de modo que éste tiene masa constante.

Esto permite fijar su aceleración con un simple mecanismo de tornillos y contrapeso.

2) Con el fin de lograr aceleraciones modeladas que permitan realizar filmaciones de

vídeo y tomar fotografías con cámaras de velocidades modeladas, se apela a un recurso experimental ampliamente utilizado por otra destacada personalidad del Renacimiento, Galileo Galilei. Las esferas no caen libremente, sino que ruedan por un plano inclinado. A fin de que el móvil en su desplazamiento inicie la caída de las esferas al pasar frente a cada una de ellas, se montó una serie de actuadores que transforman el impulso del móvil en la dirección de su movimiento en un impulso en la dirección perpendicular al mismo (fig. 3). Se llegó a esta configuración tras muchos ensayos fallidos.

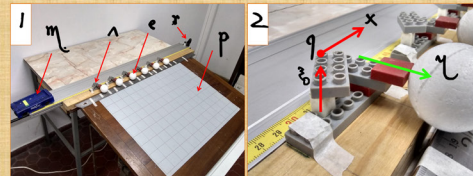


Figura 3. 1) Vista general del móvil (m), los actuadores (a), las esferas (e), la toballina (x) y el plano inclinado (p). No está a la vista el contrapeso. 2) Detalle de un actuador y una esfera. Cuando el móvil toca el actuador en el punto q en la dirección x, este pivota alrededor del eje z y empuja fuertemente la esfera en la dirección y. Las esferas descansan en una angosta brecha entre un listón de madera muy regular y bien pulido, y el borde del plano inclinado. Para que este borde tenga buena definición, se hizo con cinta una regla metálica. Esta brecha retiene muy debidamente las esferas. Por su verticalidad, los actuadores se construyeron con Ravioli®.

Resultados

Para un plano inclinado a 11,1° y un móvil de 251,0 g, se debe fijar el contrapeso en 48,7 g. La inclinación del plano se midió con una aplicación de celular, y con plomada y transportador. Se registraron videos con un teléfono Motorola G52.



Figura 4. i) El móvil tiene una aceleración menor que la de las esferas. ii) Ambas aceleraciones son iguales. iii) El móvil tiene una aceleración mayor que la de las esferas

Conclusiones

1. Se logró una recreación simplificada y satisfactoria de un experimento sugerido por Leonardo, y se confirmó su conjetura (fig. 4). 2. Desde el punto de vista histórico este experimento muestra el aspecto de científico del múltiple Leonardo. Abre la discusión de cómo esperaba el "ver" la línea alineación de las esferas. También puede destacarse el enfoque epistemológico de que una conjetura de Leonardo se pueda demostrar con la metodología de Galileo. 3. La sencillez del montaje del experimento y la riqueza potencial si además se miden las aceleraciones mediante software, permite a implementarlo como actividad de Laboratorio.

Agradecimientos: El autor agradece 1) al Laboratorio "Leonor G. de Guzmán" del Depto. de Física, la CSEI, UNT, por permitir el uso del equipamiento experimental. 2) Al Dr. Gustavo Jiménez (UNJONCA CONUCSEI) por la filmación de videos de alta resolución. 3) Al Dr. Germán Brizuela y al Dr. Diego Corzo, por la colaboración en la realización de algunos ensayos.

Referencias: (1) Morteza Gharib, Chris Roh, Flavio Noca. Leonardo da Vinci's Visualization of Gravity as a Form of Acceleration. Leonardo, 2022; 21 DOI: 10.1162/leon_a_02322 (2) https://www.bl.uk/manuscripts/FullDisplay.aspx?ref=Arundel_MS_263 (3) https://www.caltech.edu/about/news/leonardo-da-vincis-forgotten-experiments-explored-gravity-as-a-form-of-acceleration

CONTEXTO

Este trabajo se realizó con el espíritu de reactivar la División Historia de la Física de la Asociación Física Argentina, pero finalmente, en vista del potencial de diseñar una práctica de Laboratorio adecuada para estudiantes de primer año de Licenciatura en Física, se presentó en la División de Docencia en la 108° Reunión de la Asociación Física Argentina de 2023.

AUTOR

BRIZUELA, Horacio G. - ORCID  0000-0003-2096-4133.

Es docente e investigador del Departamento de Física de la FACET con más de 20 años de trayectoria. Actualmente es docente de Laboratorio de Física II y Laboratorio de Física III de carreras de Ingeniería, Ciencia de los Materiales de Ingeniería Industrial, y Epistemología e Historia de la Física de la Licenciatura en Física. Es Director del Proyecto PFI-TUC-04. Es el actual Presidente de la Filial Tucumán de la Asociación Física Argentina.

E-mail: hbrizuela@herrera.unt.edu.ar



cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

Realidad virtual: conflicto de acomodación y vergencia

GUTIÉRREZ, Lucas¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología.
Tucumán. Argentina.

Resumen

La *realidad virtual* emplea la estereoscopía para que los objetos virtuales dentro del mundo generado por computadora tengan la ilusión de ser un objeto real, los visores de realidad virtual generan dos imágenes distintas en una pantalla con un separador de ojos en el medio, denominada pantalla estereoscópica. Cada una de las imágenes mostradas muestra la escena desde un ángulo levemente distinto, creando el efecto estereoscópico.

El conflicto de acomodación y vergencia (VAC) es un fenómeno óptico que ocurre en los sistemas de Realidad Virtual, el cual consiste en que hay una disparidad entre las pistas visuales que reciben los ojos y la distancia focal que tienen que mantener. Esto provoca incomodidad y fatiga, además de que los objetos se pueden ver borrosos.

La acomodación es el proceso en el cual el ojo cambia su potencia óptica con el músculo ciliar para mantener una imagen enfocada o enfocar un elemento mientras su distancia varía. La vergencia es el movimiento simultáneo de ambos ojos en direcciones opuestas para mantener u obtener visión binocular. Estas dos funcionalidades del ojo normalmente actúan como un reflejo al tener que realizar un cambio de enfoque.

El VAC se puede medir en diopters, la misma unidad en la que se mide la potencia del ojo. Para este cálculo, se usa la Ecuación $D_{VAC} = D_V - D_A$, donde D_{VAC} es el Conflicto medido en diopters, D_V es la distancia de vergencia medida en diopters (igual a la inversa de la distancia del ojo al objeto virtual) y D_A es la distancia de acomodación medida en diopters (igual a la inversa de la distancia percibida a la pantalla).

La simulación se probó con diferentes personas con distintos trastornos de la visión, para ver el efecto que se veía en cada caso. Se les preguntó a las personas a cuantos diopters comenzaron a ver borroso el objeto de prueba, y si les dolió la cabeza, se marearon o sintieron fatiga visual en algún momento de la simulación. Estos datos se recopilaron en la tabla mostrada en el poster.

Desde estos datos podemos concluir que la experiencia de RV se ve perjudicada principalmente por trastornos de visión que afectan la potencia del ojo y la visualización de cerca. Además, el mirar el objeto cercano produce dolores de cabeza y mareo, que tiene correlación con los efectos del VAC, el cual se amplifica mientras más cerca esté el objeto.

CONTEXTO

Este trabajo fue realizado en el contexto del Trabajo Final para la asignatura Física III de la carrera Ingeniería en Computación.

AUTOR

GUTIÉRREZ, Lucas

Es estudiante avanzado de Ingeniería en Computación en la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Tucumán, donde además es ayudante de cátedra en las materias Diseño Lógico I y Sistemas con Microprocesadores y Microcontroladores. El trabajo se realizó en la misma Facultad, el 3 de marzo de 2023.

E-mail: lucasgutie2003@gmail.com

Realidad Virtual: Conflicto de Acomodación y Vergencia

Gutiérrez, Lucas

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán

Resumen

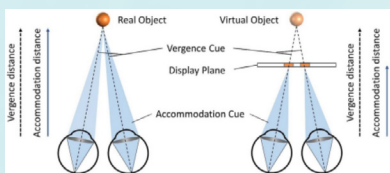
Investigación sobre el funcionamiento de los visores de Realidad Virtual desde el punto de vista de la óptica, con un enfoque en la estereoscopia de los ojos.

Creación de una simulación para ver el efecto del Conflicto de Acomodación y Vergencia sobre la visión, resultando en una investigación sobre cómo un trastorno de visión afecta a la experiencia de Realidad Virtual.

El conflicto de acomodación y vergencia (VAC) es un fenómeno óptico que ocurre en los sistemas de Realidad Virtual, el cual consiste en que hay una disparidad entre las pistas visuales que reciben los ojos y la distancia focal que tienen que mantener. Esto provoca incomodidad y fatiga, además de que los objetos se pueden ver borrosos.

Objetivos

- 1) Entender el funcionamiento de la tecnología de Realidad Virtual.
- 2) Comprender qué es el fenómeno del Conflicto de Acomodación y Vergencia.
- 3) Investigar cómo afecta a la experiencia de usuario este fenómeno, específicamente en personas con trastornos de la vista.

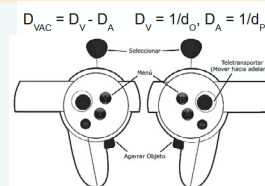


Materiales y Métodos

Para la muestra se utilizó un Visor de RV Oculus Quest 2, con sus respectivos controles.

Se utilizó una simulación en Unreal Engine 5 para medir los datos tomados de las personas participantes en la investigación.

Como el VAC se mide en Diopters, se utilizó la siguiente fórmula para calcular.



Resultados

Se organizó en una tabla los resultados, separados por el trastorno de la visión de cada persona

Trastorno de la Visión	Edad	Diopters al ver borroso	¿Sintió mareo o dolor de cabeza?
Ninguno	20	Ninguno	Si, al mantener el objeto cercano (> 4 D) por mucho tiempo
Miopia	14	Ninguno	No
Miopia	22	Ninguno	Si, al ver el objeto fijamente
Presbicia	55	~ 7 D	No, pero le incomodaba ver al objeto borroso
Presbicia	52	Ninguno	Si, al ver el objeto de cerca
Hipermetropia	35	~ 5 D	No

Conclusiones

Podemos concluir que la experiencia de Realidad Virtual se ve perjudicada por trastornos de visión que afectan la potencia del ojo y la visualización de cerca. Además, el mirar el objeto cercano produce dolores de cabeza y mareo, que tiene correlación con los efectos del Conflicto de Acomodación y Vergencia.

Google Drive:



Estudio estructural, óptico y de transporte eléctrico en films de nanopartículas de ZnO

PAZ, Nelson Leandro^{1,2}; VEGA, Nadia Celeste^{1,2};
MARIN-RAMÍREZ, Oscar^{1,2}; COMEDI, David Mario^{1,2}

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Laboratorio de Física del Sólido (LAFISO) y Laboratorio de Nanomateriales (LN). NanoProject. C.P. 4000, Tucumán. Argentina.

² Instituto de Física del Noroeste Argentino (INFINOA). Universidad Nacional de Tucumán-CONICET. Laboratorio de Física del Sólido (LAFISO) y Laboratorio de Nanomateriales (LN). NanoProject. C.P. 4000, Tucumán. Argentina.

Resumen

En este trabajo, se busca comprender los efectos de los parámetros nanoestructurales de films de nanopartículas (NPs) de ZnO sobre sus propiedades optoelectrónicas para su aplicación en el desarrollo de celdas solares de tercera generación. En primer lugar, se sintetizaron ZnO en cuatro sustratos de vidrio recubierto de óxido de estaño con flúor (FTO), por un abordaje *bottom-up*, desde la fase líquida, mediante la técnica solvotermal. Cada sustrato se colocó en una solución con metanol como solvente y acetato de zinc y hexametilentetramina (HMTA) como precursores químicos dentro de un reactor. Se varió la concentración de ambos precursores en los rangos 0,75 M - 4,5 M, manteniendo la relación molar 1:1 entre ellos.

Las muestras fueron estudiadas por microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de fotoluminiscencia (PL). De las caracterizaciones de las mismas, se observó arreglos de NPs aproximadamente isotrópicas en tamaño (congruente con lo reportado en **Marín et al.** (2019) y en general, un depósito uniforme de estas NPs en el sustrato, formando films que a medida que se aumenta la concentración de precursores aumenta tanto el tamaño de NPs como el recubrimiento de la superficie del sustrato (a excepción de la muestra con mayor concentración). Los espectros de PL, por otro lado, exhibieron una banda de emisión en el UV y otra en el visible, centrada en el amarillo, asociada con la vacancia de oxígeno **González et al.** (2018).

Se estudiaron las propiedades optoelectrónicas de las muestras (tanto en oscuridad como bajo iluminación, en aire o en vacío) midiendo curvas I-V y resistencia (R) en función de: la temperatura (T), el tiempo y longitud de onda (luz incidente). Sorprendentemente, la conductancia eléctrica aumenta muy lento con la T de la muestra y se observan tiempos de formación y decaimiento de la fotoconductividad relativamente cortos, del orden de segundos. Este comportamiento es muy distinto del observado en films nanoestructurados de ZnO fabricados por métodos tradicionales, donde hay una fuerte dependencia de la conductividad con T y fotoconductividad persistente de decenas de horas. Los posibles motivos de esta profunda diferencia de comportamientos serán discutidos en términos de los diferentes mecanismos de transporte en función de la morfología y los tamaños de NPs.

108 Reunión de la Asociación Física Argentina – Universidad Nacional del Sur- Bahía Blanca, Argentina (19 al 22 de Septiembre 2023)

Estudio estructural, óptico y de transporte eléctrico en films de nanopartículas de ZnO

Paz N. L., Vega N. C., Marin-Ramírez O. A., Comedi D. M.

Nanoproject-Laboratorio de Nanomateriales, Departamento de Física, FACET, UNT
Laboratorio de Física del Sólido, Departamento de Física, FACET, UNT
Instituto de Física del Noroeste Argentino (INFNOA), CONICET/UNT
paznelsonleandro@gmail.com



Resumen
En este trabajo se busca comprender los efectos de los parámetros nanoestructurales de films de nanopartículas (NPs) de ZnO sobre sus propiedades optoelectrónicas para su aplicación en el desarrollo de celdas solares de tercera generación. Se sintetizaron ZnO en sustratos de vidrio recubierto de óxido de estaño con flúor (FTO), por un abordaje bottom-up, desde la fase líquida, mediante la técnica solvotermal. Cada sustrato se colocó en una solución con metanol como solvente y acetato de zinc y hexametilentetramina (HMTA) como precursores químicos dentro de un reactor. Se varió la concentración de ambos precursores para la primera serie de muestras en el rango de 1,5 M – 4,5 M y para la segunda serie en el rango de 0,75 M – 4,5 M, manteniendo la relación molar 1:1 entre ellos. Las muestras fueron estudiadas por microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de fotoluminiscencia (PL). Finalmente, se estudiaron las propiedades eléctricas de las muestras midiendo curvas I-V en oscuridad, resistencia eléctrica en oscuridad e iluminadas con fuentes de luz visible-UV en función del tiempo, resistencia eléctrica en función de la longitud de onda y conductancia eléctrica en función de la temperatura en vacío y oscuridad.

ZnO

- Gap directo: 3,37 eV (UV)
- Dopaje nativo: tipo n
- Alta energía excitónica: 60 meV
- Estructura cristalina wurzita
- Fácil crecimiento y control de morfología/tamaño de nanoestructuras

Síntesis de NPs de ZnO mediante Reacción Solvotermal

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

	Tamaño promedio de NPs	Espesor del film	Homogeneidad en el crecimiento	Pico de banda de emisión UV	Centro de banda de emisión visible	Fotoconductividad	Conductancia vs temperatura
M1 (Acetato de Zinc y HMTA=1,5M)	25±7 nm	150-500 nm	Si	375 nm	Alrededor de los 530 nm (verde)	No medida	No medida
M2 (Acetato de Zinc y HMTA=3M)	28±8 nm	150-500 nm	Si	378 nm	Alrededor de los 530 nm (verde)	Si	Aumenta poco con el aumento
M3 (Acetato de Zinc y HMTA=4,5M)	38±7 nm	Zona sin islas de esferas de NPs	No	378 nm	Alrededor de los 530 nm (verde)	No medida	No medida
M0 (Acetato de Zinc y HMTA=0,75M)	19±5 nm	No se forma film	No	380 nm	Alrededor de los 600 nm (amarillo)	Si	No medida (muestra cortocircuitada)
M1 (Acetato de Zinc y HMTA=1,5M)	28±8 nm	A determinar	Si	377 nm	Alrededor de los 600 nm (amarillo)	No medida	No medida
M2 (Acetato de Zinc y HMTA=3M)	30±9 nm	A determinar	Si	375 nm	Alrededor de los 600 nm (amarillo)	No medida	No medida
M3 (Acetato de Zinc y HMTA=4,5M)	37±10 nm	Zona sin islas de esferas de NPs	No	380 nm	Alrededor de los 600 nm (amarillo)	No	Aumenta en dos ordenes de magnitud con el aumento
M3 (Acetato de Zinc y HMTA=4,5M)	25±7 nm	Zona con islas de esferas de NPs	No	380 nm	Alrededor de los 600 nm (amarillo)	No	Aumenta en dos ordenes de magnitud con el aumento

Espectroscopía de fotoluminiscencia (PL)

Caracterización eléctrica

Conclusiones

- A excepción de las muestras con mayor concentración de precursores (M3 y M3'), a medida que se aumenta la concentración de precursores, aumenta el tamaño de NPs y hay un mayor recubrimiento del sustrato.
- La PL presenta la emisión típica del ZnO: banda UV correspondiente a transiciones de borde de banda y banda en el visible asociada a defectos. Hay detalles que no se reproducen perfectamente entre muestras crecidas en condiciones idénticas.
- La resistencia eléctrica presenta en general una dependencia débil con la temperatura. Se observan tiempos de formación y decaimiento de la fotoconductividad muy cortos (del orden de algunos segundos), mucho menor que en films nanocristalinos de ZnO (del orden de decenas de horas).
- En algunos casos, hay cambios erráticos de la resistencia eléctrica que pueden deberse a cambios en la interconectividad de las nanopartículas con el paso de la corriente. En un caso (M0) se detectó la formación de un corto circuito irreversible.

Financiación: Proyectos PUE, PIP, PICT

Muchas gracias!
Conocé nuestro trabajo en <https://www.facet.unt.edu.ar/nanoproject>

Referencias bibliográficas

González, V., Marin, O., Tirado, M. y Comedi, D. (2018). "Metastability effects on the photoluminescence of ZnO nano-micro structures grown at low temperatura and influence of the precursors on their morphology and structure", *Mater. Res. Express*, Vol. 5, 125003.

Marin, O., González V., Tirado, M. y Comedi, D. (2019) "Effects of methanol on morphology and photoluminescence in solvothermal grown ZnO powders and ZnO on Si", *Mater. Lett.*, Vol. 251, pp. 41–44.

CONTEXTO

Este trabajo de investigación se realizó durante el año 2023, en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología-Universidad Nacional de Tucumán, en el marco del trabajo de Beca CONICET Doctorales-Temas Generales convocatoria 2020, bajo la dirección del Dr. David Mario Comedi, además es parte del trabajo de tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Exactas e Ingenierías, cuya dirección está a cargo del Dr. David Mario Comedi y la codirección de la Dra. Nadia Celeste Vega.

PRIMER AUTOR

PAZ, Nelson Leandro - ORCID  0009-0000-0103-4526

Ingeniero Electromecánico, título otorgado por la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE). Durante su carrera de grado fue abanderado y representante del claustro de estudiantes, siendo delegado de la carrera de ingeniería electromecánica y consejero directivo de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías (FCEyT) de la UNSE. Desde junio de 2022, está haciendo el Doctorado en Ciencias Exactas e Ingeniería en la Universidad Nacional de Tucumán (UNT) con una beca del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), bajo la dirección de los Doctores David Comedi y Nadia Vega y trabajando en el Instituto de Física del Noroeste Argentino (INFINOA), de doble dependencia UNT-CONICET, en el Grupo de Investigación "NanoProject". Desde el 2023, es integrante de los Proyectos PIUNT E749, PICT2019-03795 y PIP 1122020-0100970CO.

E-mail: paznelsonleandro@gmail.com

Software de simulación de óptica geométrica

VARGAS HERRERA, Gerónimo¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán.
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología.
San Miguel de Tucumán, Tucumán. Argentina.

Resumen

Para el proyecto de promoción de Física III se desarrolló una aplicación para la computadora con fines didácticos, esta aplicación sería una simulación interactiva en la que el usuario podría realizar de manera virtual experimentos relacionados a la óptica geométrica en tiempo real.

En la aplicación se crea un mundo o espacio virtual en el que el usuario puede agregar objetos para hacer experimentos, específicamente en la simulación se pueden utilizar punteros láseres que emiten un haz con una longitud de onda determinada por el usuario, espejos de distintas formas y proporciones, ya sean planos, circulares, parabólicos entre otros que el usuario puede crear y por último también se puede experimentar con objetos con índices de refracción determinados por el usuario como cubos, prismas o lentes de distintos tipos que se pueden diseñar dentro del programa. A su vez el programa cuenta con herramientas para medir ángulos y distancias dentro del mundo virtual.

Para lograr replicar el comportamiento de la luz en el espacio virtual se modeliza a los haces de luz a partir de un punto de origen y una dirección inicial que vienen dados por la posición y dirección de los punteros láseres dentro de la simulación, a partir de esta información el programa chequea si este haz de luz se intersecta con alguna superficie, en caso de hacerlo, guarda el punto de intersección en una lista y analiza qué nueva dirección debe tomar el rayo de luz, si se encuentra con una pared el rayo simplemente se detiene, si se encuentra con un espejo, este se refleja con el mismo ángulo con el que incide respecto a la normal de la superficie con la que se encuentra y por último si el haz de luz pasa por un medio como un acrílico cambia de dirección siguiendo la forma vectorial de la ley de Snell y como en los casos anteriores guarda los puntos de intersección con la superficie. Al final de cada fotograma de la simulación el programa renderiza el láser a partir de su punto de origen y cada uno de sus puntos de intersección, la simulación repite este procedimiento con cada láser presente en la simulación en cada fotograma de la misma.

De esta manera se consigue una simulación interactiva en tiempo real, es como un banco óptico virtual.

CONTEXTO

Este trabajo fue realizado en el contexto del Trabajo de Promoción para la asignatura Física III de segundo año de la carrera Ingeniería en Computación.

AUTOR

El autor, Gerónimo Vargas Herrera es un estudiante de la carrera de Ingeniería en Computación en la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Tucumán, el trabajo se desarrolló durante el mes de julio del año 2023. E-mail: gerovargasherrera@gmail.com

DESCARGAS

<https://drive.google.com/drive/folders/1wU4XJnOQalxWGj4MVFF0W1NvDTN-AHT5?usp=sharing>

SOFTWARE DE SIMULACIÓN DE ÓPTICA GEOMÉTRICA



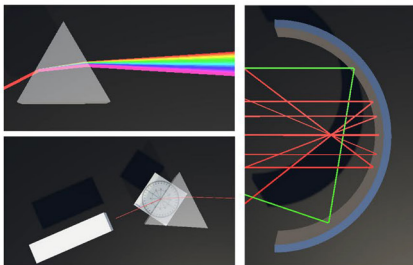
Alumno: Vargas Herrera, Gerónimo; Docente a cargo: Vazquez, Juan Pablo
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán

Objetivo:

Desarrollar un programa interactivo para la computadora capaz de simular los distintos fenómenos de la óptica geométrica que estudiamos durante el cursado para poder experimentar con ellos desde la comodidad de una PC sin la necesidad ni las limitaciones de un banco óptico o laboratorio.

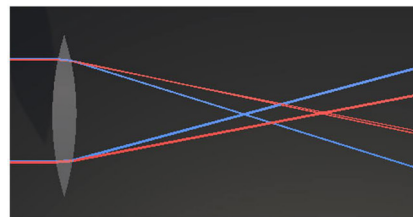
Desarrollo de la aplicación:

Para programar la simulación se utilizó como base un motor gráfico llamado "Unity" el cual trabaja con el lenguaje de programación C#, este software provee de facilidades a la hora de renderizar escenarios e imágenes virtuales en la pantalla del usuario, así como también cuenta con librerías que asisten a la hora de trabajar con matemáticas, vectores, interfaces gráficas, entre otros. A partir de esta base se puede programar la simulación que es lo que nos interesa sin preocuparnos por muchos aspectos técnicos sobre como hacer una aplicación.



Otras funcionalidades

Una de las grandes ventajas de la simulación es que permite la creación de distintos objetos por parte del usuario para usar dentro del mundo virtual, como cubos o prismas así como también lentes de varios tipos, como por ejemplo lentes biconvexas, de menisco, etc.



Fuentes:
Documentación de la librería de Unity:
<https://docs.unity3d.com/Manual/index.html>
Pagina de wikipedia de la ley de Snell:
https://en.wikipedia.org/wiki/Snell%27s_law

Funcionamiento de la aplicación:

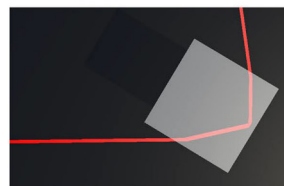
Para lograr recrear el comportamiento de los rayos de luz que observamos en la vida real en el programa se definen rayos dentro del mundo virtual a partir de un punto de origen, una dirección original y una lista de puntos por donde pasa el rayo, cada vez que este se encuentra con una superficie se guarda el punto de intersección en la lista y se redefine la dirección del rayo dependiendo de con qué superficie este se intersecta. Así con cada punto de intersección y cambio de dirección queda definido el camino que sigue el haz de luz.

En el código del programa se interpretan las leyes que rigen el comportamiento de los rayos, que se resumen en tres casos distintos:

- 1) El rayo se encuentra con una pared:
Aquí el programa cierra la lista de puntos que define al rayo y no le da una nueva dirección, causando así que este no se siga propagando.
- 2) El rayo se encuentra con una superficie reflectante:
En este caso se usa una función que está definida en una de las librerías que trae integradas el motor gráfico que nos da la dirección del reflejo de un vector respecto a la normal de una superficie.
- 3) El rayo se encuentra con un medio refractante:
Calculamos la dirección de refracción de un rayo en el espacio 3D con la forma vectorial de la ley de Snell

$$\vec{v}_{\text{refract}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \vec{i} + \left(\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 - \cos \theta_2\right) \vec{n}$$

Los fenómenos del mundo de la óptica geométrica como el foco de los espejos y las lentes, la aberración cromática o la reflexión interna total son consecuencias de estos 3 casos que el programa simula.



Instrucciones para Autores

La revista cuenta con distintas **categorías**, clasificadas según el **tipo de trabajo** presentado. Las categorías corresponden a trabajos de: INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN; DOCENCIA; EXTENSIÓN; INFORME TÉCNICO; NOTAS, ARTE Y OPINIÓN; HOMENAJES; COMUNICACIONES CORTAS.

Las **instrucciones** que se presentan a continuación tienen el propósito de **estandarizar la presentación de trabajos**.

El texto completo se debe presentar solamente en versión digital, editado con un procesador de texto (documento en Word o compatible). Debe estar formateado para hoja tamaño DIN A4 (210 x 297 mm), a simple espacio y con márgenes de 2,5 cm en los cuatro lados de la página. Podrá tener una extensión de hasta 8 páginas para trabajos de INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN y de hasta 5 páginas para las categorías: DOCENCIA; EXTENSIÓN; INFORME TÉCNICO; NOTAS, ARTE Y OPINIÓN; HOMENAJES.

Las COMUNICACIONES CORTAS son pertinentes si ellas resultan de un trabajo que muestre una contribución nueva o de **importancia inmediata**. Deben ser escritas en no más de 1000 palabras. Se acepta como máximo una tabla o gráfico y una fotografía; en este caso, el número máximo de caracteres debe reducirse a 800. Deben satisfacer las instrucciones para los artículos originales y pueden o no tener subtítulos.

En todas las categorías el texto principal debe estar escrito con tipografía **Arial**, tamaño de fuente de **10 pt**, con párrafos sin sangría y **a dos columnas**.

La versión digital se debe enviar como archivo adjunto al correo electrónico revista@herrera.unt.edu.ar. El autor debe consignar la **categoría** en la que considere que debe ser incluido su trabajo. El **asunto** del correo electrónico debe contener la siguiente información y formato: "Apellido del primer autor – Categoría" (Ej.: "Pérez - INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN"). La categoría puede ser modificada por los editores.

Los títulos de los artículos deben ser sucintos y suficientemente informativos y precisos, en lo que se refiere al contenido, como para que tengan un interés práctico en las listas de títulos, así como para la codificación. No deben contener abreviaturas. No pueden exceder los **100 caracteres**, incluyendo los espacios. En el caso de los trabajos de la categoría Investigación, Desarrollo e Innovación, los títulos deben ser presentados en castellano y en inglés.

Luego del título del artículo deben identificarse los autores con sus filiaciones. En la firma de la publicación debe aparecer siempre la **filiación institucional** después del nombre de los autores, en idioma español, sin siglas, abreviaturas ni traducciones. Ejemplos:

Apellido/s, nombre/s¹

¹ a) Universidad Nacional de Tucumán. Facultad (denominación completa). Y, según corresponda: Departamento / Instituto / Cátedra / Escuela / Secretaría. Dirección postal (si correspondiera), Tucumán. Argentina.

Dirección de correo electrónico institucional (si correspondiera). Código ORCID.

¹ b) En otro tipo de centros, institutos u organismos, públicos o privados.

Denominación completa del centro, instituto u organismo, seguida de su sigla en paréntesis si existiera. Y, según corresponda: Área / Departamento / Instituto / Otro.

Dirección postal (si correspondiera), Provincia / Estado. País. Dirección de correo electrónico institucional (si correspondiera). Código ORCID.

Apellido/s, nombre/s^{1,2}

² a) En centros o institutos con dependencia compartida con CONICET.

Denominación completa del centro o instituto seguida de su sigla en paréntesis si existiera. Universidad Nacional de Tucumán-CONICET.

Dirección postal (si correspondiera), Provincia / Estado. País.

Dirección de correo electrónico institucional (si correspondiera). Código ORCID.

² b) En centros o institutos con múltiple dependencia.

Denominación completa del centro o instituto seguida de su sigla en paréntesis si existiera. Universidad Nacional de Tucumán-CONICET -Tercera institución – Cuarta institución (según corresponda)

Dirección postal (si correspondiera), Provincia / Estado. País.

Dirección de correo electrónico institucional (si correspondiera). Código ORCID.

Los trabajos de INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN a editarse serán acompañados por un **Resumen** en castellano de no más de 200 palabras y otro en inglés de igual límite de extensión.

Para facilitar la búsqueda temática, a continuación de los resúmenes se incluirán **tres palabras clave** en castellano y las correspondientes tres en inglés. Los editores podrían sugerir una corrección del idioma o introducir correcciones menores cuando se considere necesario. El resumen es generalmente la parte leída por el mayor número de interesados. Es una condensación informativa de los principales logros del trabajo, no una descripción de los contenidos del trabajo. El resumen debe presentar tanta información cualitativa y cuantitativa como sea posible, siendo al mismo tiempo breve, específica y autocontenida. El resumen no deberá contener detalles experimentales triviales, figuras o ecuaciones.

El **Resumen** será seguido por la **Introducción**, en la cual los autores deberán compendiar las motivaciones del trabajo, especificar claramente los objetivos del estudio e incluir una búsqueda actualizada de la literatura. En la sección **Desarrollo** o **Material** y **Métodos** deberán ser incluidos: descripciones de experimentos, técnicas, métodos, instrumentos o aparatos y procedimientos empleados, con la precisión adecuada, para permitir a otros observadores que reproduzcan sus resultados. Los **Resultados** serán seguidos por la **Discusión** y finalmente por las **Conclusiones**, al final del manuscrito. Los reconocimientos a instituciones, soportes financieros, discusiones, etc, deberán ser incluidos en los **Agradecimientos**, al final de las Conclusiones.

Las **Referencias** son trabajos citados en el texto. Debe seguirse el sistema Harvard. En el caso de un autor, nombre del autor en negrita y año de publicación entre paréntesis. Ej.: **Jones** (1999). En el caso de dos autores, ambos apellidos deben mencionarse. Ej.: **Fisher y Holleberg** (1963). Para tres autores o más, el nombre del primer autor debe ser seguido por “et al.”. Ej.: **Fisher et al.** (1980). La **Bibliografía** se refiere a textos relacionados con el tema, que el autor considera oportuno listar, al final del trabajo, en orden alfabético por el apellido del autor principal.

La **Información Biográfica** sobre el autor o autores debe presentarse con una extensión máxima de 160 palabras por cada autor. Se incluirá la dirección electrónica del autor/es indicando la Institución donde se realizó el trabajo y la fecha.

Dentro del texto, los **títulos** y **subtítulos** no deben numerarse.

Las unidades correspondientes a las distintas magnitudes deben ser indicadas sin punto.

Las **fórmulas** deben ser señaladas por números progresivos ubicados sobre la derecha, entre paréntesis.

Las **figuras** o **fotografías** deben ser numeradas progresivamente para su identificación. Se presentarán fuera del texto, deben tener la referencia precisa de ubicación y ser citadas en el cuerpo del texto. Las figuras y las fotografías deben ser originales de los autores. Si son modificaciones o reproducciones de otro artículo, es necesario acompañar el permiso del editor correspondiente, para salvaguarda de los derechos del autor. Los **epígrafes** de las figuras serán escritos todos juntos en hoja aparte. Las figuras por publicarse en una columna deben tener 8 cm de ancho aproximadamente, mientras que las que se van a publicar a dos columnas, 17 cm de ancho aproximadamente. Para fotografías, las dimensiones se pueden tomar con más tolerancia. Debe

verificarse que la resolución de la imagen sea la adecuada para la publicación digital de la Revista. Los **rótulos** insertos en figuras y fotografías deben ser **legibles**, el tamaño de letra no debe ser inferior a un equivalente de 10 pt. Identifique y explique todo símbolo, flecha, número o letra que haya empleado para señalar alguna parte de las ilustraciones.

Las **tablas** serán creadas con el procesador de texto. Deben ser numeradas progresivamente para su identificación, se presentarán fuera del texto, deben tener la referencia precisa de ubicación y ser citadas en el cuerpo del texto. Los epígrafes de las tablas serán escritos todos juntos en hoja aparte. En las secciones **Referencias** y **Bibliografía**, al final del artículo, las citas deben ser presentadas en orden alfabético por el apellido del primer autor, de acuerdo con los siguientes ejemplos:

Cuando se refiere a un artículo de revista:

Apellido e inicial del nombre del autor (Año, subdivididos en a, b, c, etc. para trabajos del mismo año). "Título del artículo" entre comillas, *Nombre de la revista*, volumen, número, página inicial y final del artículo.

Ejemplo: Hibbs, R. G., Burch, G. E., Phillips, J. H. (1958). "The fine structure of the small blood vessels of normal dermis and subcutis", *Am Heart J.*, Vol. 56, pp. 662-670. Por favor, tenga en cuenta el modo de puntuación usado en el ejemplo de arriba. Para abreviar correctamente los nombres de las revistas consulte ISI Journal Abbreviations Index: <http://library.caltech.edu/reference/abbreviations/>.

Cuando se refiere a un artículo de revista consultado electrónicamente:

Apellido e inicial del nombre del autor (Año) "Título del artículo", *Nombre de la revista*, volumen, número, página inicial y final del artículo. Dirección con el formato <http://www.../> ... y fecha del último acceso. E-mail del autor.

Cuando se refiere a un libro completo:

Apellido e inicial del autor (Año) *Nombre del libro*. Editorial, lugar.

Ejemplo: Happel, J. and Brenner, H. (eds.) (1985) *Low Reynolds Number Hydrodynamics with Special Applications to Particulate Media*. Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, New Jersey, E.E.U.U.

Cuando se refiere a un capítulo de un libro:

Apellido e inicial del nombre del autor del capítulo (Año) Título del capítulo, En: *Título y subtítulo del libro*, (Editores del libro), Editorial, Lugar de edición, Página inicial y final del Capítulo. **Ejemplo:** Green, K.P., Smith, P. and Martin, K. (1993) Exitatory amino acids, En: *Glutamate Receptors*, (Jones, T., ed.), J. Wiley Press, New York, E.E.U.U., pp. 24-59.

Cuando se refiere a un libro consultado electrónicamente:

Apellido e inicial del nombre del autor. *Título del libro*. Nombre del editor, compilador o traductor. Datos de la publicación. Fecha de consulta. Acceso (dirección completa de Internet).

Ejemplo: Austen, J. *Pride and prejudice*. Ed. Henry Churchyard. 1996. 10 Sept. 1997. <<http://www.pemberley.com/janeinfo/pridprej.html>>

Cuando se refiere a un trabajo publicado en anales de un congreso (*proceedings*), conferencia o reunión:

Apellido e inicial del nombre del autor del trabajo (Año) Título del trabajo, En: *Nombre del congreso, conferencia o reunión*, lugar, Página inicial y final del trabajo.

Ejemplo: Billings, C. y Wilder, J. (1974) Major applications of fabric filters, En: *Proceedings of EPA Symposium on Control Emission*, San Francisco, California, E.E.U.U., pp. 120-133.

Cuando se refiere a una tesis o trabajo de grado:

Apellido e inicial del nombre del autor (Año) "Nombre de la tesis o trabajo de grado" entre comillas. Grado Académico. Nombre de la Institución.

Ejemplo: Ramírez, M. (2004) "Violencia en relaciones de pareja y conductas autodestructivas en mujeres". Tesis. Maestría en Psicología Clínica y Psicoterapia. Universidad Iberoamericana de Puebla.

cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología