Energía & Sostenibilidad

Volumen 2, Número 2, 2026

GEOVOLTAICA

Revista de Energía y Sostenibilidad

Donde la energía del sol y la tierra se unen para construir un futuro sostenible y en armonía con el ambiente.

ISSN: 3061-8681

DOI: 10.5281/zenodo.22287067

CC BY-NC-SA 4.0

Información Legal

Geovoltaica Revista de Energía y Sostenibilidad, Año 2, Número 2. Mayo-Agosto de 2026, es una publicación cuatrimestral, editada por el Dr. Néstor Daniel Galán Hernández, Mazatlán, Sinaloa, México. https://www.revistageovoltaica.com, E-mail: editor@revistageovoltaica.com. Editores responsables: Dr. Eber Enrique Orozco Guillén, Dr. Guillermo Rubio Astorga y Dr. Erik Vázquez Fernández. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2025-053013375900-102, ISSN: 3061-8681. Ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dr. Néstor Daniel Galán Hernández, Mazatlán, Sinaloa. Fecha de última Actualización 31 de Agosto de 2026. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación.

GEOVOLTAICA

Revista de Energía y Sostenibilidad

revistageovoltaica.com

CC BY-NC-SA 4.0

Editorial

Innovar, colaborar y transformar: Nuestro rol en la construcción de un futuro sostenible"

Hoy en día, la transición hacia un futuro sustentable va más allá de buscar nuevas fuentes de energía renovable; requiere que integremos el desarrollo de materiales avanzados, la inteligencia artificial, una planificación estratégica ante la incertidumbre y, sobre todo, una educación sólida para las próximas generaciones de ingenieros y científicos. Por ello, en este Volumen 2, Número 2 de GEOVOLTAICA Revista de Energía y Sostenibilidad nos enorgullece presentar cuatro artículos que abordan, desde distintas perspectivas, los retos tecnológicos de nuestra era.

Comenzamos destacando el papel de la educación con el artículo "Diseño e Implementación de un Sistema Electrónico de Potencia en la Rehabilitación de un Robot Educativo". En él, los autores nos muestran cómo recuperaron un robot de seis grados de libertad, una pieza clave para la enseñanza en mecatrónica y robótica. El texto detalla la creación de una etapa de potencia utilizando un puente H para un servomotor específico, lo que sienta las bases físicas y electrónicas para futuros sistemas de control de velocidad y posición. Es un claro ejemplo de que la innovación sustentable nace en los laboratorios universitarios.

En el área de las energías limpias, el artículo "Obtención de Hidrógeno Verde Electrolítico y Fotocatalítico Mediante la Actividad del Grafeno" nos acerca al mundo de los nanomateriales. Aquí se explica cómo el uso de grafeno y óxido de grafeno es fundamental para hacer más eficientes los procesos de división global del agua, ya sea mediante electrólisis o fotocatálisis, abriendo nuevas vías para la producción de este recurso energético.

Además, exploramos el impacto de la inteligencia artificial en sectores altamente complejos con el "Análisis del Uso de Redes Neuronales en Procesos de Energía Nuclear y Altas Energías". A través de una cuidadosa revisión literaria, el artículo contrasta dos realidades: por un lado, cómo la física de altas energías ya ha consolidado el uso de redes neuronales artificiales (ANN) para simular, optimizar y analizar colisiones de partículas; y, por otro, los retos técnicos y operativos que el sector nuclear aún debe superar para adoptar estas herramientas de aprendizaje automático.

Para cerrar, tocamos un tema estratégico con el "Marco metodológico para evaluar la pertinencia de la lógica difusa en la planificación de la demanda de litio asociada a la electromovilidad en México". Frente a la inminente adopción de los vehículos eléctricos, este trabajo propone una metodología sistemática para la toma de decisiones bajo incertidumbre y el procesamiento de datos cualitativos.

Agradecemos profundamente a los autores por su confianza y a nuestro comité por su rigor científico. Confiamos en que esta lectura servirá como detonante para nuevas ideas y colaboraciones a favor del desarrollo energético y la sostenibilidad global.

Dr. Néstor Daniel Galán Hernández

Editor en jefe

Geovoltaica

Revista de Energía y Sostenibilidad

Comité Editorial

- **Dr. Néstor Daniel Galán Hernández**
  Universidad Politécnica de Sinaloa, México.
- **Dr. Eber Enrique Orozco Guillén**
  Universidad Politécnica de Sinaloa, México.
- **Dr. Guillermo Rubio Astorga**
  Tecnológico Nacional de México, México
- **Dr. Erik Eduardo Vázquez Fernández**
  Universidad De Colima, México

Comité Científico

- **Dr. Javier Bernardo Cabrera Mejia**
  Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.
- **Dr. Mario Luna Risco**
  Universidad de Medellín. Colombia
- **Dr. Arturo Alfonso Fernández Jaramillo**
  Universidad Politécnica de Sinaloa, México.
- **Dra. Dulce Ambriz Pérez**
  Universidad Nacional Autónoma de México.
- **Dr. David Ulises Santos Ballardo**
  Centro de Investigaciones en Alimentación y Desarrollo, México.
- **Dr. José Adán Hernández Nolasco**
  Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.
- **Dr. Jorge Alberto Pérez Mendoza**
  Instituto Politécnico Nacional, México.
- **Dr. Denis Javier Aranguri Cayetano**
  Universidad del Santa, Perú
- **Dr. José Gregorio Marcano**
  Universidad de Carabobo, Venezuela.

- **Gestión de Medios**
  M. A. Norma Azalia Galán Rueda
  Tecnológico Nacional de México, México

CONTENIDO

7	Diseño e Implementación de un Sistema Electrónico de Potencia en la Rehabilitación de un Robot Educativo
18	Obtención de Hidrógeno Verde Electrolítico y Fotocatalítico Mediante la Actividad del Grafeno
24	Análisis del Uso de Redes Neuronales en Procesos de Energía Nuclear y Altas Energías
33	Marco metodológico para evaluar la pertinencia de la lógica difusa en la planificación de la demanda de litio asociada a la electromovilidad en México

DOI: 10.5281/zenodo.21435408

Diseño e Implementación de un Sistema Electrónico de Potencia en la Rehabilitación de un Robot Educativo

Design and Implementation of a Power Electronics System in the Rehabilitation of an Educational Robot

Aldo N. Higuera J.[1], **Alejandro Lizárraga L.**[1], **Ramiro Gutiérrez A.**[2], **Sonia M. López L.**[2], **Samuel Angulo M.**[2]

[1]Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, México.

Autor de correspondencia email: ahiguera@upsin.edu.mx

[2]Depto. de Electrónica, TecNM, Instituto Tecnológico de Mazatlán, Sinaloa, México.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en el proceso de rehabilitación de un eslabón de un robot educativo de seis grados de libertad, utilizado con fines académicos en el programa de Ingeniería Mecánica del Tecnológico Nacional de México, en el Instituto Tecnológico de Mazatlán. La recuperación de este tipo de plataformas abiertas es de especial relevancia, ya que constituyen herramientas fundamentales para la formación práctica de ingenieros en áreas como mecánica, mecatrónica, electrónica y robótica. El desarrollo se centra en el diseño de una etapa de potencia basada en una topología de puente H, cuyo circuito impreso (PCB) fue diseñado, implementado y evaluado funcionalmente. El dimensionamiento del circuito se realizó considerando las especificaciones del servomotor Cleveland Motion Controls MH3515-228D. Asimismo, se presentan los resultados iniciales correspondientes al diseño del PCB y a las pruebas experimentales del sistema de potencia propuesto, los cuales permiten avanzar en la rehabilitación integral del robot. Esta rehabilitación contempla, en etapas posteriores, el desarrollo del sistema de control de velocidad y posición del servomotor; sin embargo, dichos avances no se abordan en el presente trabajo.

Palabras clave: *Robot educativo, Seis grados de libertad, Puente H, Servomotor.*

Abstract

This paper presents the results obtained in the rehabilitation process of one link of a six-degree-of-freedom educational robot, used for academic purposes in the Mechanical Engineering program at Tecnológico Nacional de México, specifically at the Instituto Tecnológico de Mazatlán. The recovery of this type of open-platform system is particularly relevant, as it constitutes a fundamental tool for the practical training of engineers in areas such as mechanics, mechatronics, electronics, and robotics. The work focuses on the design of a power stage based on an H-bridge topology, whose printed circuit board (PCB) was designed, implemented, and functionally evaluated. The circuit was dimensioned considering the specifications of the Cleveland Motion Controls MH3515-228D servomotor. Additionally, initial results related to the PCB design and experimental testing of the proposed power system are presented, which contribute to the overall rehabilitation of the robot. This rehabilitation process includes, in subsequent stages, the development of a speed and position control system for the servomotor; however, these aspects are beyond the scope of the present work.

Keywords: *Educational robot, Six degrees of freedom, H-bridge, Servomotor.*

Recibido: 28/05/2026; Aceptado: 27/06/2026; Publicado 17/07/2026

CC BY-NC-SA 4.0

Introducción

La robótica constituye una de las disciplinas tecnológicas más representativas de la automatización moderna y es el resultado de la convergencia entre la ingeniería mecánica, la electrónica, la informática y la teoría de control. Sus antecedentes se remontan a los primeros autómatas desarrollados en la antigüedad, los cuales empleaban mecanismos hidráulicos y de relojería para reproducir movimientos automáticos. Posteriormente, durante el Renacimiento, Leonardo da Vinci propuso diversos diseños mecánicos que incorporaban principios de transmisión de movimiento y cinemática. Más adelante, Jacques de Vaucanson perfeccionó los autómatas mecánicos del siglo XVIII, mientras que la introducción de las tarjetas perforadas en el telar de Jacquard, en 1801, representó uno de los primeros antecedentes de la programación aplicada a sistemas mecánicos. Sin embargo, el verdadero impulso tecnológico de la robótica ocurrió con el desarrollo de la electrónica, la aparición de los circuitos digitales y, principalmente, de los microprocesadores, que permitieron incorporar capacidades de procesamiento, control y toma de decisiones en los sistemas electromecánicos modernos [1].

El concepto de robot fue introducido por primera vez en la obra Rossum's Universal Robots (R.U.R.) de Karel Čapek en 1920, dando origen a una nueva visión sobre las máquinas capaces de ejecutar tareas de manera autónoma. No obstante, fue hasta 1961 cuando esta idea se materializó con la instalación del primer robot industrial comercial, el Unimate, diseñado por George Devol y promovido por Joseph Engelberger. Este manipulador fue implementado en una línea de producción de General Motors para realizar operaciones repetitivas y peligrosas, convirtiéndose en el punto de partida de la automatización industrial basada en robots [1].

Durante las décadas de 1960 y 1970 la robótica experimentó un crecimiento acelerado impulsado por el desarrollo de la electrónica analógica, los sistemas digitales y las computadoras industriales. Los

controladores electromecánicos evolucionaron hacia arquitecturas electrónicas cada vez más sofisticadas, incrementando la precisión, velocidad y confiabilidad de los manipuladores industriales. En este periodo surgieron diversos fabricantes especializados, destacando KUKA, que en 1973 desarrolló uno de los primeros robots industriales de seis grados de libertad controlados electrónicamente, ampliando significativamente las capacidades de automatización en procesos de manufactura, soldadura y ensamblaje [2].

La incorporación de microprocesadores, sensores inteligentes y sistemas embebidos durante las décadas posteriores permitió implementar estrategias avanzadas de control, percepción y planificación de trayectorias. En consecuencia, la robótica evolucionó desde manipuladores programables hacia sistemas autónomos capaces de interactuar con entornos dinámicos. Actualmente, los avances en inteligencia artificial, visión artificial, aprendizaje automático y fusión de sensores han permitido el desarrollo de robots colaborativos, vehículos autónomos, robots de servicio, plataformas humanoides y sistemas de exploración espacial como los rovers, consolidando una nueva generación de robots inteligentes orientados a la interacción humano-máquina y la toma autónoma de decisiones [3], [4].

Paralelamente al desarrollo tecnológico, la robótica dejó de ser una disciplina exclusivamente industrial para convertirse en un área estratégica dentro de la formación de ingenieros. En la actualidad, los programas de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica, Electrónica, Automatización, Computación e Inteligencia Artificial incorporan contenidos relacionados con modelado matemático, sensores, actuadores, programación, visión artificial, control automático y robótica inteligente. Esta integración multidisciplinaria responde a las necesidades de la Industria 4.0 y favorece la formación de profesionistas capaces de diseñar sistemas autónomos cada vez más complejos [3], [5], [6].

En este contexto surge la robótica educativa como una herramienta que facilita la integración entre la teoría y la práctica mediante plataformas experimentales donde los estudiantes implementan algoritmos de control, programación, electrónica y diseño mecánico sobre sistemas físicos reales. Diversas investigaciones reportan que el empleo de robots educativos fortalece competencias técnicas y transversales, tales como el pensamiento crítico, la creatividad, el trabajo colaborativo y la resolución de problemas, además de incrementar la motivación de los estudiantes mediante el aprendizaje basado en proyectos. Asimismo, estas plataformas permiten introducir tecnologías emergentes como visión artificial, inteligencia artificial, sistemas autónomos y comunicación entre dispositivos, preparando a los futuros ingenieros para enfrentar los retos de la automatización y la transformación digital [3], [5]–[7].

En consecuencia, la evolución de la robótica ha estado estrechamente ligada al desarrollo de la electrónica, la computación y las técnicas modernas de control. La transición desde mecanismos puramente mecánicos hasta robots inteligentes ha permitido ampliar sus aplicaciones hacia la industria, la medicina, la exploración espacial, la investigación científica y la educación. Actualmente, la robótica educativa constituye una plataforma fundamental para la formación de ingenieros al integrar conocimientos de mecánica, electrónica, programación y control en un mismo sistema, fortaleciendo el desarrollo de competencias requeridas por la industria moderna.

Durante los últimos años, la rehabilitación y modernización de robots educativos ha adquirido una importancia creciente debido a la necesidad de extender la vida útil de plataformas robóticas existentes, reducir costos de adquisición y fortalecer la enseñanza experimental en ingeniería. En lugar de sustituir equipos obsoletos, numerosas investigaciones proponen la actualización de su arquitectura electrónica, sistemas de adquisición de datos y algoritmos de control, permitiendo incorporar tecnologías modernas de hardware y software sin modificar significativamente la estructura mecánica original. Este enfoque no sólo representa una alternativa económicamente viable para instituciones educativas, sino que además facilita la implementación de nuevas estrategias de control y automatización sobre plataformas reales [8].

Uno de los principales avances en esta línea de investigación corresponde a la modernización de manipuladores robóticos mediante arquitecturas abiertas. Concha Sánchez et al. desarrollaron la rehabilitación de un robot manipulador educativo incorporando nuevos sistemas electrónicos, motores de corriente continua con realimentación mediante encoders y una arquitectura de hardware abierta, demostrando mejoras significativas en precisión, mantenibilidad y flexibilidad para actividades de investigación y docencia [8]. De manera similar, Zhao et al. integraron sistemas de visión artificial y procesamiento de imágenes en plataformas robóticas educativas, ampliando sus capacidades para aplicaciones relacionadas con percepción, navegación y control inteligente [9].

El desempeño de estos sistemas depende en gran medida del modelado matemático del motor de corriente continua, ya que constituye la base para el diseño de controladores capaces de garantizar estabilidad, rapidez y precisión. Diversos trabajos han desarrollado modelos dinámicos que describen el comportamiento eléctrico y mecánico de motores PMDC empleados en plataformas académicas y robots educativos. Kelly-Martínez et al. presentaron un modelo dinámico

para servoaccionamientos analógicos basado en motores PMDC, permitiendo analizar el comportamiento transitorio y permanente del sistema como fundamento para el diseño de estrategias de control [10]. De forma complementaria, Kassem et al. analizaron el modelado dinámico y el diseño de controladores para regulación de velocidad y posición, destacando la importancia de disponer de modelos precisos para mejorar el desempeño de los sistemas electromecánicos [11].

Con base en estos modelos matemáticos, la mayor parte de las investigaciones continúa utilizando controladores lineales tipo PI y PID debido a su simplicidad de implementación, robustez y aceptable desempeño en aplicaciones industriales y educativas. Ovalle Martínez et al. desarrollaron una plataforma para el control de velocidad y posición de motores de corriente continua que facilita la implementación experimental de controladores PID, mientras que Pallejà Cabré et al. propusieron una plataforma didáctica para la enseñanza del control de motores DC, validando el desempeño del controlador mediante experimentación en tiempo real [12], [13]. Asimismo, Hernández Millán et al. demostraron la aplicación de controladores PID para mejorar el seguimiento de trayectoria en robots móviles diferenciales, obteniendo respuestas estables y una reducción significativa del error de seguimiento [14]. De forma similar, diversos desarrollos implementados mediante plataformas Arduino y MATLAB han permitido fortalecer el aprendizaje práctico del control automático, facilitando la validación experimental de algoritmos ampliamente utilizados en la industria [15].

A pesar de la amplia aceptación de los controladores clásicos, investigaciones recientes han incorporado estrategias de control más avanzadas para incrementar la precisión y robustez frente a incertidumbres y perturbaciones. Entre ellas destacan los controladores difusos tipo Fuzzy-PID, los cuales presentan mejoras en el tiempo de establecimiento, sobreimpulso y rechazo de perturbaciones respecto a los controladores PID convencionales [16]. De manera complementaria, Crisóstomo Reyna propuso un esquema de control descentralizado para robots manipuladores de múltiples grados de libertad, demostrando que este enfoque mejora la precisión del posicionamiento y reduce el acoplamiento dinámico entre articulaciones [17].

La evolución de las técnicas de control también ha favorecido el desarrollo de robots destinados a aplicaciones de rehabilitación y asistencia médica. En este ámbito, los sistemas de control deben garantizar alta precisión en velocidad y posición, además de un comportamiento seguro durante la interacción con el usuario. En este sentido, Mobayen et al. presentan una revisión de técnicas modernas de control aplicadas a exoesqueletos robóticos, destacando el uso de control adaptativo, predictivo y robusto para incrementar el desempeño dinámico de estos sistemas [18].

Finalmente, además del desarrollo tecnológico, la robótica educativa ha demostrado ser una herramienta eficaz para fortalecer la formación de estudiantes de ingeniería. Diversos estudios concluyen que la utilización de plataformas robóticas reales favorece la integración de conocimientos de electrónica, programación, mecánica y control automático, promoviendo el aprendizaje basado en proyectos y el desarrollo de competencias relacionadas con la Industria 4.0 y las áreas STEM [19], [20]. En conjunto, estos trabajos evidencian que la rehabilitación de robots educativos mediante la actualización de su electrónica de potencia, sistemas de adquisición de datos y estrategias de control constituye una alternativa viable para incrementar tanto el desempeño técnico de las plataformas como su valor académico, estableciendo las bases para el desarrollo de nuevas propuestas de control aplicadas a manipuladores robóticos educativos.

El presente trabajo aborda la rehabilitación de un brazo robótico A465 de uso educativo, empleado en la formación de estudiantes de Ingeniería Mecánica en el Tecnológico Nacional de México. En particular, se trabaja sobre uno de sus grados de libertad, con el objetivo de recuperar su funcionalidad y sentar las bases para futuras estrategias de control.

El documento se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se describen las especificaciones técnicas del servomotor asociado al grado de libertad en proceso de rehabilitación. En la Sección 3 se presenta el diseño del circuito de la etapa de potencia basado en una topología de puente H, así como el desarrollo del circuito impreso (PCB) utilizando la herramienta KiCad. Finalmente, se exponen las pruebas experimentales realizadas, los resultados obtenidos y las conclusiones del estudio

Metodología

El servomotor de Cleveland Motion Controls (CMC) modelo MH3515-228D pertenece a la serie 3500 de servomotores de imanes permanentes (PM) y se emplea en este trabajo para la rehabilitación de un grado de libertad del Brazo Robótico Articulado Modelo A465, figura 1. Este dispositivo ha sido diseñado para ofrecer soluciones de control de movimiento precisas y confiables en una amplia gama de aplicaciones, tales como automatización industrial, robótica, instrumentación médica y maquinaria especializada.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros eléctricos y mecánicos del modelo MH3515-228D. A partir de las especificaciones proporcionadas por el fabricante, se han definido los requerimientos de potencia de la etapa de potencia propuesta en este trabajo.

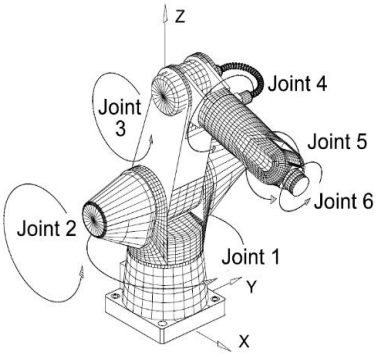

Figura 1. *Estructura de Brazo Robótico Articulado Modelo A465.*

Tabla 1. *Parámetros del servomotor MH3515-228D.*

Símbolo	Significado
Va = 48 V	Voltaje nominal (V)
Ia = 3.2 A	Corriente nominal (A)
Ra = 1.85 Ω	Resistencia de armadura (Ω)
La = 0.0012 H	Inductancia de armadura (H)
J = 1.55e-4	Inercia del rotor (kg·m^2)
B = 1.355 e-4	Coeficiente de fricción viscosa (N·m·s/rad)
Kt = 0.115 N·m/A	Constante de torque (N·m/A)
Kb = 0.115 V·s/rad	Constante de fuerza contraelectromotriz (V·s/rad)
ω = 300 rpm	Velocidad (rpm)

El servomotor MH3515-228D es el elemento actuador principal, por lo que la etapa de potencia debe garantizar un desempeño dinámico preciso, confiable y eficiente. En este sentido, el puente H propuesto permite el control bidireccional del motor, posibilitando la regulación de velocidad, el posicionamiento y la inversión del sentido de giro, aspectos fundamentales para reproducir trayectorias controladas. La implementación de la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) facilita el ajuste del voltaje promedio aplicado al motor, permitiendo un control fino del par y la velocidad, lo cual es esencial en aplicaciones de rehabilitación donde se requiere suavidad y precisión en el movimiento.

Para el diseño de la etapa de potencia se llevó a cabo mediante un enfoque tradicional basado en las especificaciones eléctricas del servomotor, tales como voltaje nominal, corriente, constante de arranque. A partir de esta información, se establecieron los requerimientos de operación y se dimensionaron los dispositivos de conmutación adecuados. En particular, se seleccionaron transistores MOSFET de potencia modelo IPP027N15 debido a su baja resistencia en conducción y alta capacidad de manejo de corriente, así como el driver de compuerta UCC27301, el cual garantiza tiempos de conmutación adecuados y una correcta adaptación entre la etapa de control y la de potencia.

En el diseño original del fabricante del robot emplea un puente H basado en MOSFETs complementarios IRF540 e IRF9540 cuya distribución es la siguiente: Q_1 = superior izquierdo (IRF9540), Q_2 = superior derecho (IRF9540), Q_3 = inferior izquierdo (IRF540), Q_4 = inferior derecho (IRF540) como se muestra en la figura 2.

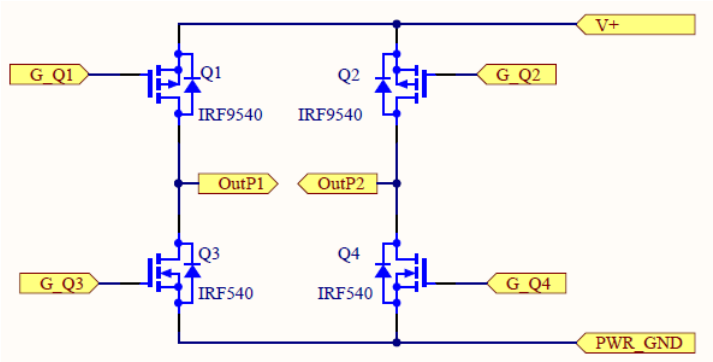

Figura 2. *Puente H del diseño original del fabricante del robot.*

Por lo tanto, se propuso la etapa de potencia mostrada en la Figura 3, correspondiente a una topología de puente H diseñada para su implementación física mediante una tarjeta de circuito impreso (Printed Circuit Board, PCB). El diseño esquemático y el ruteo de la tarjeta se realizaron utilizando KiCad, una herramienta de código abierto ampliamente empleada en el desarrollo de sistemas electrónicos debido a su flexibilidad y a la posibilidad de integrar, en un mismo entorno, el diseño del circuito esquemático, la asignación de encapsulados, la gestión de bibliotecas de componentes, el diseño de tarjetas multicapa y la visualización tridimensional del prototipo. Estas características facilitan la validación previa a la fabricación, permiten identificar posibles errores de distribución o interferencias mecánicas y contribuyen a reducir riesgos durante la implementación física del sistema. La etapa de potencia propuesta consiste en un puente H basado en MOSFET de canal N, dimensionado de acuerdo con las condiciones máximas de operación de la carga, correspondiente a un servomotor de corriente directa con escobillas de 240 W y una tensión nominal de 48 V. Para los interruptores de potencia se seleccionaron MOSFET IPP057N15NM6 de la familia OptiMOS™ 6 de Infineon, los cuales presentan una tensión máxima drenaje-fuente (V_{DS}) de 150 V y una resistencia de conducción típica $R_{DS(on)}$ de 5.7 mΩ. Estas características permiten reducir las pérdidas por conducción, mejorar la eficiencia energética del convertidor y proporcionar un margen adecuado de tensión ante los transitorios generados durante la conmutación y el frenado del sistema electromecánico.

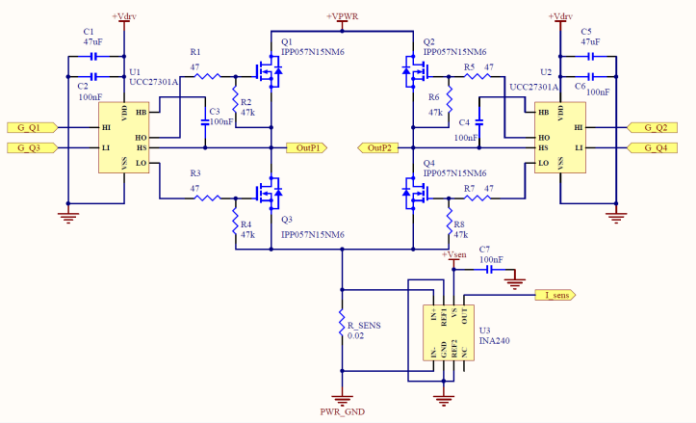

Figura 3. *Diagrama eléctrico del puente H propuesto para un grado de libertad del robot.*

En cuanto a las consideraciones de protección, los semiconductores de potencia fueron seleccionados con un margen amplio respecto a la tensión nominal de alimentación del servomotor. En particular, los MOSFET IPP057N15NM6 presentan una tensión máxima drenaje-fuente de (V_{DS}=150 V), valor aproximadamente tres veces superior a la tensión nominal de operación del motor, correspondiente a 48V. Este sobredimensionamiento permite mantener los dispositivos dentro de una región segura de operación ante picos de tensión generados por la naturaleza inductiva del motor, las transiciones de conmutación y los procesos de frenado. De manera complementaria, el ruteo de la PCB fue diseñado para reducir la inductancia parásita en las trayectorias de alta corriente, mediante la minimización de los lazos de conmutación y la ubicación cercana de los elementos críticos de potencia (figura 4). Estas consideraciones disminuyen los sobrevoltajes transitorios en los interruptores y permitieron prescindir de redes snubber y de elementos adicionales de protección que se encontraban presentes en la etapa de potencia original del robot.

Asimismo, la protección frente a conducción cruzada en cada rama del puente H se implementó mediante el controlador de compuerta UCC27301. Este dispositivo incorpora una función de enclavamiento de entradas (interlock) o protección contra conducción cruzada (cross-conduction protection), cuya finalidad es evitar el encendido simultáneo de los MOSFET superior e inferior de una misma rama. Cuando ambas entradas del controlador se encuentran en nivel lógico alto, la lógica interna desactiva ambas salidas, evitando un posible cortocircuito directo entre la fuente de alimentación y tierra. Cuando una de las entradas regresa a nivel lógico bajo, las salidas recuperan su funcionamiento normal de acuerdo con la lógica de control aplicada. Esta función constituye una capa adicional de seguridad ante errores de programación, transitorios en las señales PWM o condiciones no deseadas durante las transiciones de conmutación. Finalmente, la etapa de potencia incorpora un sistema de medición y acondicionamiento de corriente basado en una resistencia shunt de (20 Ω) y el amplificador de sensado INA240. La señal acondicionada, denominada ($I_{max}(sen)$), es enviada al microcontrolador para supervisar la corriente suministrada al motor. Esta medición permite implementar una estrategia de arranque suave mediante modulación por ancho de pulso (PWM), limitando la corriente de irrupción durante el inicio del movimiento. Además, la señal puede emplearse para detectar condiciones de sobrecorriente y deshabilitar oportunamente la etapa de potencia, protegiendo tanto al puente H como al motor y a la fuente de alimentación ante fallas eléctricas o mecánicas.

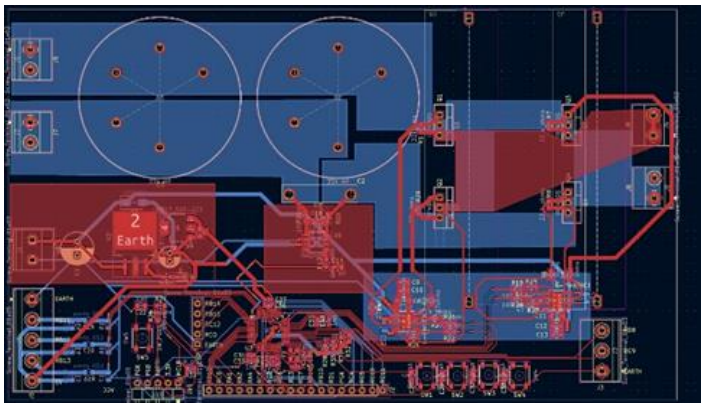

Figura 4. *Diagrama PCB, ruteado para reducir inductancias parasitas en la trayectoria de corriente, como medio de protección.*

Por último, la tarjeta de control integra un microcontrolador de la familia dsPIC33CK64MC105, el cual constituye el núcleo de procesamiento del sistema y una pieza fundamental en la arquitectura de control propuesta. Este dispositivo, basado en una arquitectura de controlador digital de señales (DSC), combina capacidades de procesamiento en tiempo real con periféricos especializados para aplicaciones de control de motores, tales como módulos PWM de alta resolución, temporizadores avanzados y módulos de captura/compare orientados a la lectura de señales de encoders. Estas características lo convierten en una plataforma idónea para implementar estrategias de control embebido en sistemas electromecánicos de precisión. Asimismo, mediante la adecuada conmutación de las señales de disparo, el microcontrolador posibilita la inversión del sentido de giro del servomotor. Por otro lado, el sistema integra la adquisición y el procesamiento de las señales provenientes del encoder óptico incorporado en el servomotor, lo que permite estimar en tiempo real tanto la velocidad como la posición angular del eje. Para ello, el microcontrolador dsPIC33CK64MC105 hace uso del módulo Quadrature Encoder Interface (QEI), el cual está diseñado para procesar señales de encoders incrementales. La incorporación del módulo QEI posibilita una adquisición precisa y eficiente de las

variables cinemáticas, al delegar estas tareas a hardware especializado y reducir la carga de procesamiento del microcontrolador. Esto se traduce en una mayor confiabilidad en la medición, lo cual resulta fundamental tanto para la caracterización del sistema en lazo abierto como para el desarrollo futuro de estrategias de control en lazo cerrado.

El microcontrolador desempeña múltiples funciones críticas. Por un lado, se encarga de la generación de señales de modulación por ancho de pulso (PWM), las cuales regulan el voltaje promedio suministrado al servomotor MH3515-228D a través del puente H diseñado, permitiendo así el control de la velocidad, esto a través de un encoder rotatorio incremental de la serie LDA-051-1000 de SUMTAK, con una resolución nominal de 1000 pulsos por revolución. Considerando la decodificación en cuadratura de las señales A y B, mediante la detección de sus cuatro flancos, se obtiene una resolución teórica de 4000 cuentas por revolución, equivalente a una resolución angular de 0.09° mecánicos por cuenta. Debido a que la hoja de datos disponible no especifica parámetros metrológicos tales como exactitud angular, error de división, repetibilidad o error de fase entre canales.

Durante el proceso de sensado de posición y velocidad pueden presentarse errores asociados tanto al encoder como a su integración mecánica y electrónica. Desde el punto de vista funcional, el encoder genera señales digitales en forma de trenes de pulsos, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de rotación del eje, mientras que el número acumulado de pulsos permite determinar la posición angular relativa. Este tipo de dispositivos puede configurarse con resoluciones típicas de hasta 2500 pulsos por revolución (PPR) y presenta respuestas en frecuencia de hasta 200 kHz, características que los hacen adecuados para sistemas dinámicos de respuesta rápida. No obstante, la medición puede verse afectada por la cuantización inherente a la resolución del encoder, la excentricidad o el desalineamiento entre el eje del motor y el encoder, las vibraciones mecánicas, el juego presente en el sistema de transmisión y las perturbaciones electromagnéticas generadas por la conmutación PWM de la etapa de potencia.

Asimismo, la estimación de velocidad obtenida a partir de la variación de posición puede presentar rizado debido al conteo discreto de pulsos, particularmente durante la operación a bajas velocidades, donde el número de cuentas registradas dentro de cada intervalo de muestreo es reducido. Para mitigar estos efectos, normalmente es conveniente implementar filtros digitales, sincronizar adecuadamente la lectura de las señales del encoder y aplicar técnicas de rechazo de ruido en las entradas del microcontrolador, con el propósito de reducir la pérdida de pulsos, conteos en falso y las variaciones no deseadas en la velocidad estimada. Sin embargo, para las pruebas presentadas en la siguiente sección no se incorporó un filtro digital adicional.

Tabla 2. *Especificaciones del enconder LDA-051-1000 de SUMTAK.*

Pin	Nombre	Tipo de señal	Descripción funcional
1	Vcc	Alimentación	Entrada de voltaje de alimentación.
2	GND	Referencia	Referencia común del sistema.
3	Canal A	Salida digital (TTL o diferencial)	Señal cuadrada principal utilizada para el conteo de pulsos.
4	Canal B	Salida digital (TTL o diferencial)	Señal cuadrada desfasada 90° respecto al canal A.
5	Canal Z (Index)	Salida digital	Pulso de referencia generado una vez por revolución.
6	$\overline{A}$ (A complementaria)	Salida diferencial	Señal inversa del canal A, utilizada en transmisión diferencial.
7	$\overline{B}$ (B complementaria)	Salida diferencial	Señal inversa del canal B. Mejora la integridad de la señal.
8	$\overline{Z}$ (Index complementario)	Salida diferencial	Señal inversa del canal Z.
9	Shield (malla)	Protección	Blindaje del cable para reducir interferencias electromagnéticas.

Esta decisión se fundamentó en que el periodo de muestreo seleccionado para el cálculo de la velocidad permitió realizar un promedio temporal implícito sobre las cuentas registradas, atenuando de forma natural las variaciones rápidas asociadas al ruido de conmutación y a la cuantización. Bajo las condiciones de operación evaluadas, la señal de velocidad obtenida presentó un nivel de rizado compatible con los requerimientos de la prueba, por lo que no fue necesario incorporar una etapa adicional de filtrado digital. Además, evitar un filtrado adicional permitió conservar una respuesta más rápida de la medición de velocidad y reducir el retardo de fase que podría afectar el desempeño del sistema de control.

La tarjeta de control integra un microcontrolador dsPIC33CK64MC105, perteneciente a la familia dsPIC33CK de Microchip Technology. Este dispositivo dispone de capacidad de procesamiento en tiempo real y periféricos especializados para aplicaciones de control de motores, entre los que se incluyen módulos de modulación por ancho de pulso (PWM), temporizadores internos y una interfaz para encoder en cuadratura (Quadrature Encoder Interface, QEI). Estas características permiten implementar estrategias de control embebido en sistemas electromecánicos que requieren sincronización, medición de posición y respuesta dinámica.

En este trabajo, el microcontrolador genera las señales PWM requeridas por la etapa de potencia y ejecuta la rutina de adquisición del encoder incremental. La medición de posición se realiza mediante los canales A y B, cuyas señales en cuadratura permiten al módulo QEI efectuar el conteo incremental o decremental de pulsos de acuerdo con el desfase entre ambas, obteniendo así la posición angular relativa y el

sentido de giro del eje. Adicionalmente, el canal Z o señal de índice se emplea como referencia para sincronizar o reinicializar el contador de posición en una ubicación angular conocida, estableciendo una condición inicial confiable para las tareas de posicionamiento.

La velocidad angular se estima a partir del procesamiento temporal de los pulsos generados por los canales A y B. Para ello, puede emplearse el conteo de pulsos dentro de una ventana de tiempo definida o la medición del periodo entre flancos consecutivos mediante los temporizadores internos del microcontrolador. De este modo, mientras la posición se determina mediante la acumulación de pulsos, la velocidad se obtiene a partir de la variación del conteo respecto al tiempo. La integración de estas rutinas en el dsPIC33CK64MC105 permite adquirir en tiempo real las variables cinemáticas del servomotor y consolidar al microcontrolador como el elemento central para la implementación de estrategias de control de velocidad y posición.

Resultados

En este trabajo se llevó a cabo de manera integral la rehabilitación de un grado de libertad del Brazo Robótico Articulado Modelo A465, abarcando desde el análisis de las especificaciones técnicas del servomotor MH3515-228D hasta la implementación física y la validación experimental del sistema de accionamiento. A partir de los parámetros eléctricos del servomotor, se establecieron los requerimientos de diseño de la etapa de potencia y se propuso una topología de puente H para permitir el control bidireccional y la regulación de velocidad mediante técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM). El diseño de la tarjeta de circuito impreso correspondiente a esta etapa se desarrolló mediante KiCad, una plataforma de código abierto que integra el diseño esquemático, la asignación de encapsulados, el ruteo de pistas, la administración de bibliotecas de componentes y la visualización tridimensional del prototipo. Estas características permitieron validar la distribución física de los dispositivos, identificar posibles interferencias mecánicas y verificar el diseño antes de su fabricación. La figura 5 presenta la representación virtual tridimensional del PCB final del puente H, en la cual se observa la disposición de los MOSFET de potencia, el controlador de compuerta y los conectores.

El sistema fue desarrollado mediante el diseño esquemático y de la tarjeta de circuito impreso en KiCad, lo que permitió integrar adecuadamente los componentes electrónicos y optimizar su distribución física para reducir pérdidas e interferencias. Posteriormente, se fabricó la PCB y se realizó el ensamblaje y la soldadura de los componentes.

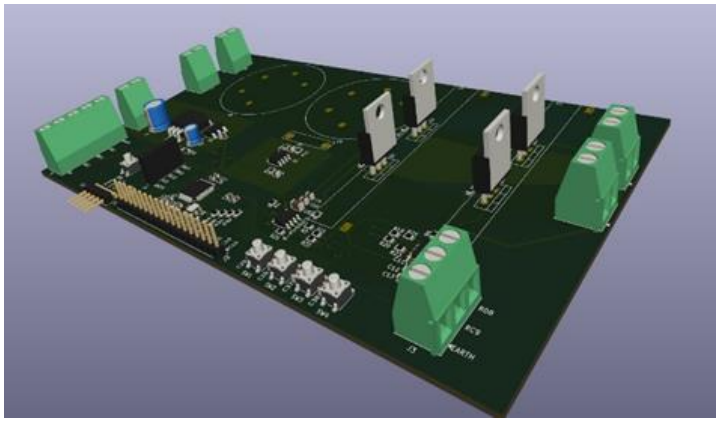

Figura 5. *Imagen virtual del diseño PCB (puente H).*

La Figura 6 muestra la tarjeta fabricada y ensamblada, correspondiente a la plataforma de control basada en el microcontrolador dsPIC33CK64MC105, el cual genera las señales PWM, adquiere las señales del encoder óptico y ejecuta las tareas de control del servomotor.

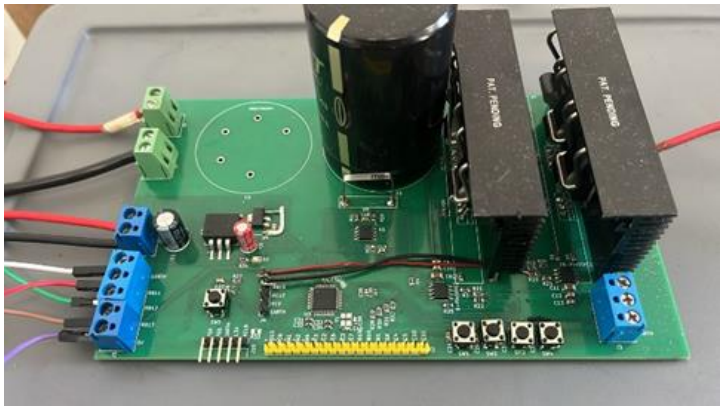

Figura 6. *Puente H fabricado para el accionamiento de un grado de libertad del brazo robótico académico A465.*

Con el propósito de evaluar el desempeño energético de la etapa de potencia, se realizó un análisis térmico y pérdidas para la topología de puente H propuesta y se estableció una comparación con la etapa de potencia original del robot. El esquema tradicional de control de velocidad por PWM consiste en fijar la dirección con un MOSFET encendido fijo y modular el MOSFET diagonal opuesto de manera que, en un sentido, $Q_1 = ON$ (continuo), $Q_2 = Q_3 = OFF$ y $Q_4 = PWM$ y en el opuesto $Q_2 = ON$ (continuo), $Q_1 = Q_4 = OFF$ y $Q_3 = PWM$. El voltaje promedio aplicado al motor es: $V_{motor} = D \cdot V_{dc}$.

Bajo este esquema, se hace un análisis comparativo de las pérdidas y eficiencia entre la nueva etapa y la anterior, para ello se determinarán las pérdidas por conducción, pérdidas por conmutación y pérdidas en el diodo en antiparalelo del MOSFET considerando la carga máxima,

una f_{pwm} = 10kHz y un ciclo de trabajo D = 50%. Además, en cada caso se emplearán los parámetros de los MOSFETs vistos en la hoja de datos.

a) Las pérdidas por conducción (P_{cond}) están dadas por las ecs. (1) y (2):

- Para el MOSFET que modula por PWM (*ej.* Q_1):

$$P_{cond_PWM} = I_{out}^2 \times R_{DS(on)} \times D \quad (1)$$

- Para el MOSFET que se queda fijo en ON (*ej.* Q_4):

$$P_{cond_ON} = I_{out}^2 \times R_{DS(on)} \quad (2)$$

b) Las pérdidas por Conmutación (P_{sw}), las cuales están dadas por la ecs. (3):

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{out} \times (t_{on} + t_{off}) \times f_{sw} \quad (3)$$

donde:
$ton \rightarrow$ *tiempo de encendido.*
$toff \rightarrow$ *tiempo de apagado.*

c) Las pérdidas del diodo se estiman por la ecs. (4).

$$P_{diodo} = 2 \times V_{DS} \times I_{out} \times t_d \times f_{sw} \quad (4)$$

donde:
$td \rightarrow$ *tiempo muerto.*

Los resultados comparativos muestran una mejora significativa en el desempeño energético de la etapa de potencia propuesta respecto al diseño clásico basado en los MOSFET IRF9540 e IRF540.

Tabla 3. *Comparativa Corregida (Parámetros y Pérdidas).*

Parámetro / Pérdida	Diseño Moderno (IPP057N15NM6)	Diseño Clásico (IRF9540 / IRF540)	Impacto Técnico
Resistencia $R_{DS(on)}$ lado alto	5.7 mΩ	200 mΩ	35 veces mayor en el puente viejo
Resistencia $R_{DS(on)}$ Lado bajo	5.7 mΩ	77 mΩ	13 veces mayor en la versión antigua.
Pérdidas por Conducción P_{cond}	213 mW	4.425 W	El calor fijo se duplica respecto al cálculo anterior.
Pérdidas por Conmutación P_{sw}	84 mW	420 mW	Transiciones lentas en chips antiguos elevan las pérdidas.
Pérdidas por Diodo P_{diodo}	90 mW	130 mW	El diodo clásico posee mayor caída de voltaje.
Pérdidas Totales del Puente	387 mW	4.975 W	El circuito antiguo desperdicia 13 veces más energía.
Eficiencia de la Etapa	99.83 %	97.96 %	Pierdes casi un 2% de potencia neta solo en calor.

La principal diferencia se encuentra en la resistencia de conducción de los dispositivos empleados. En el diseño moderno, los MOSFET IPP057N15NM6 presentan una resistencia $R_{DS(on)}$ de 5.7mΩ tanto en el lado alto como en el lado bajo del puente H, mientras que la configuración anterior presenta valores de 200mΩ y 77mΩ, respectivamente.

Esta reducción de resistencia permite disminuir de manera importante las pérdidas por conducción, las cuales pasan de 4.42 W en el diseño clásico a únicamente 213 mW en la etapa propuesta. Asimismo, las pérdidas por conmutación disminuyen de 423 mW a 84 mW, debido a las menores pérdidas dinámicas asociadas con los dispositivos de potencia modernos. Las pérdidas correspondientes a la conducción del diodo intrínseco también se reducen de 130 mW a 90 mW, lo que se atribuye a una menor caída de tensión directa durante los intervalos de tiempo muerto. Como resultado, las pérdidas totales estimadas del puente H se reducen de 4.975 W en el diseño clásico a 387 mW en la nueva etapa, lo que representa una reducción aproximada del 92.2% en la potencia disipada.

La eficiencia estimada de la etapa de potencia aumenta de (97.96%) a (99.83%). Aunque la diferencia porcentual puede parecer moderada, su efecto es relevante desde el punto de vista térmico, ya que el diseño clásico disipa aproximadamente 4.588 W adicionales en forma de calor. Esta reducción favorece la confiabilidad de los semiconductores, disminuye la necesidad de disipadores de mayor tamaño y contribuye a una implementación más compacta y eficiente para la rehabilitación del grado de libertad del brazo robótico.

En el análisis térmico la temperatura de unión T_j de los semiconductores está dada por la ecs. (5):

$$T_j = T_a + (P_{MOSFET} \times R_{\theta JA}) \quad (5)$$

donde:
$T_a \rightarrow$ *Temperatura ambiente.*
$P_{MOSFET} \rightarrow$ *Pérdidas en el MOSFET*
$R_{\theta JA} \rightarrow$ *Resistencia térmica unión – ambiente*

Para las condiciones de cálculo de T_a se asume 25°C, $R_{\theta JA}$ para encapsulados TO-220 de 62°C/W y se evalúa el transistor de mayor estrés en cada puente durante la modulación por PWM sin disipador. El resultado se muestra en la gráfica de la Figura 7 donde claramente se muestra que el IPP057N15NM6 se desempeña con un estrés térmico muy bajo en comparación con el IRF9540 incluso logrando eliminar la necesidad de disipador de calor en la práctica, a diferencia de la anterior el cual es requerido.

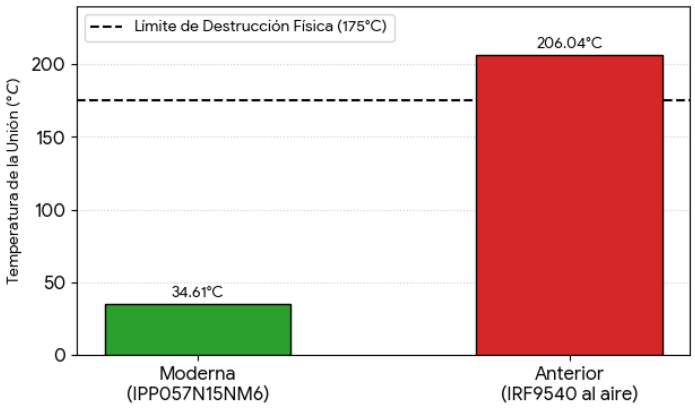

Figura 7. *Análisis térmico entre las dos etapas de potencia.*

Para validar el funcionamiento de la etapa de potencia se realizaron pruebas experimentales en lazo abierto con el servomotor operando sin carga mecánica. El propósito de estas pruebas fue verificar la capacidad del puente H para accionar el motor en diferentes niveles de tensión, así como comprobar la adquisición funcional de las señales del encoder incremental y la estimación de la velocidad por parte del microcontrolador dsPIC33CK64MC105. Debido a que el sistema se evaluó en lazo abierto, no se implementó una estrategia de control basada en retroalimentación; por tanto, la señal de velocidad se utilizó únicamente como variable de instrumentación y visualización durante la evaluación del accionamiento.

La velocidad se obtuvo a partir del conteo de pulsos generados por el encoder durante un intervalo de muestreo definido. Este procedimiento introduce un promedio temporal inherente, ya que la velocidad calculada corresponde a la variación acumulada de posición dentro de cada periodo de muestreo. Bajo las condiciones de operación consideradas, dicho promedio permitió atenuar las variaciones de alta frecuencia asociadas con la cuantización del conteo y con posibles perturbaciones eléctricas derivadas de la conmutación PWM. Por esta razón, no se incorporó un filtro digital adicional en la señal de velocidad. Esta decisión también evitó introducir retardo adicional en la medición, el cual podría afectar la observación de los transitorios del sistema durante las pruebas.

Es importante señalar que el objetivo de esta etapa no fue realizar una caracterización metrológica del encoder ni determinar su error absoluto de velocidad mediante la comparación con un tacómetro externo. La evaluación se orientó a comprobar que el encoder, el módulo QEI y la rutina de procesamiento implementada en el microcontrolador proporcionaran una señal de velocidad estable, coherente y suficientemente representativa para observar la respuesta del servomotor y validar la operación del driver. En consecuencia, no se incluyeron tablas de error respecto a un instrumento externo, ya que dichas mediciones requerirían un procedimiento específico de calibración, condiciones de carga controladas, trazabilidad del instrumento de referencia y un análisis de incertidumbre fuera del alcance de este trabajo. Para facilitar la visualización experimental, la velocidad estimada fue escalada y representada mediante el convertidor digital-analógico (DAC) integrado del dsPIC33CK64MC105. El criterio de escalamiento se definió considerando la velocidad nominal del servomotor, de 3000 rpm, asociada a su tensión nominal de alimentación de 48 V. De esta forma, se estableció una correspondencia lineal en la que 3000 rpm equivalen a 3.3 V, valor máximo de salida del DAC. Así, la velocidad medida por el encoder puede observarse directamente en el osciloscopio como una señal analógica proporcional a la velocidad angular del eje.

En las figuras 8, 9 y 10 muestran las condiciones de operación evaluadas: alimentación nominal de 48 V, alimentación de 24 V y alimentación de 12 V, correspondientes al 100 %, 50 % y 25 % de la tensión nominal, respectivamente. En cada prueba, la señal azul representa la tensión aplicada al motor, mientras que la señal amarilla corresponde a la salida del DAC, previamente escalada para representar la velocidad estimada. En la condición de 48 V, el motor sin carga alcanzó una velocidad cercana a 3000 rpm, reflejada mediante una salida próxima a 3.3 V. Para 24 V, la velocidad observada fue aproximadamente de 1500 rpm, con una salida cercana a 1.65 V; mientras que, para 12 V, se obtuvo una velocidad aproximada de 750 rpm representada por un nivel de alrededor de 0.8 V. En conjunto, los resultados muestran un comportamiento consistente entre la tensión aplicada, la respuesta de velocidad del servomotor sin carga y la señal analógica generada por el DAC. Esto permite validar la operación del puente H, la generación de PWM y la lectura funcional del encoder para fines de supervisión del sistema.

Los resultados no deben interpretarse como una validación de exactitud absoluta de la velocidad, sino como evidencia experimental de que la plataforma desarrollada adquiere y procesa adecuadamente las variables cinemáticas requeridas para la evaluación inicial del driver y para futuras estrategias de control de velocidad y posición.

Figura 8. *Prueba de control en lazo abierto del servomotor a velocidad nominal.*

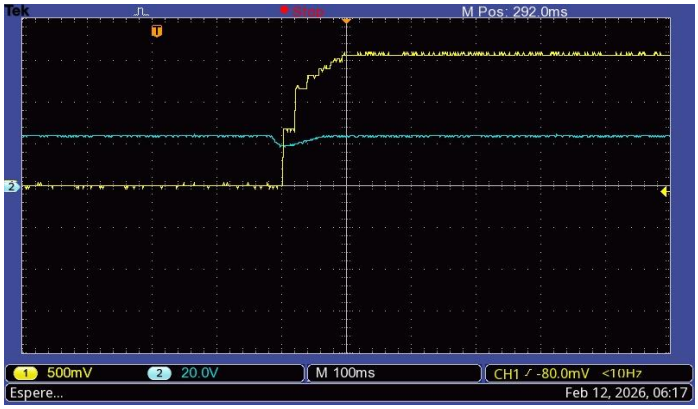

Figura 9. *Prueba de control en lazo abierto del servomotor a 0.5 de la velocidad nominal.*

Adicionalmente, se validó la adquisición de la posición angular relativa del eje mediante la representación de la señal del encoder a través del DAC del microcontrolador. En esta prueba, la salida analógica se escaló de manera que una revolución completa del eje, equivalente a 360°, correspondiera a 3.3 V, mientras que la posición de referencia de 0° se asociara con 0 V. La señal amarilla mostrada en la Figura 10 representa, por tanto, la posición angular instantánea del rotor.

Durante el giro en sentido negativo, el conteo del encoder disminuye y la salida del DAC presenta una reducción progresiva desde valores cercanos a 3.3 V hasta aproximarse a 0 V, representando el desplazamiento angular desde 360° hasta 0°. Al alcanzar la posición de referencia, la señal de índice Z del encoder permite sincronizar o reinicializar el contador de posición, con lo cual la salida analógica retorna al valor máximo e inicia un nuevo ciclo de representación angular. Este comportamiento confirma la detección adecuada de los canales A, B y Z del encoder, así como el funcionamiento del módulo QEI para determinar el sentido de giro y la posición angular relativa del eje.

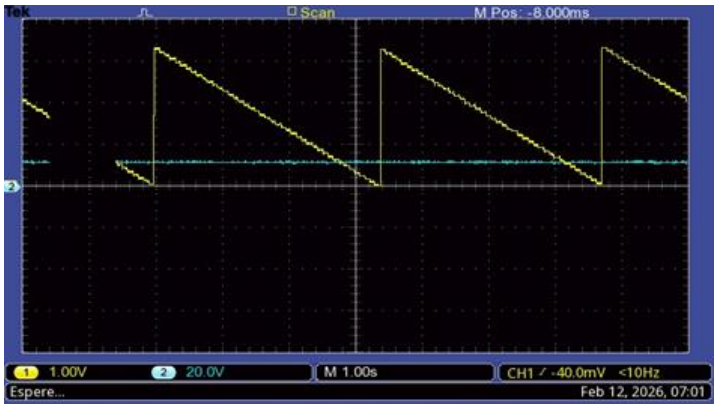

Figura 10. *Señal de posición durante giro del motor.*

Los resultados obtenidos validan el funcionamiento de la tarjeta electrónica desarrollada para la rehabilitación de un grado de libertad del brazo robótico, particularmente de la etapa de potencia basada en un puente H y de la integración del microcontrolador dsPIC33CK64MC105 en la PCB. Las pruebas en lazo abierto, realizadas con el servomotor sin carga, permitieron comprobar la operación del driver ante diferentes niveles de tensión de alimentación, correspondientes a 48 V, 24 V y 12 V, así como verificar una respuesta de velocidad coherente con dichas condiciones de operación. Asimismo, las pruebas de adquisición del encoder confirmaron que la plataforma desarrollada permite obtener y procesar las señales requeridas para la estimación de velocidad, posición angular relativa, sentido de giro y sincronización mediante la señal de índice Z.

El propósito de estas pruebas no fue realizar una caracterización metrológica del encoder ni cuantificar el error absoluto de las mediciones de velocidad y posición mediante instrumentos externos, sino verificar la funcionalidad de la instrumentación integrada en la PCB durante la operación del accionamiento. Bajo las condiciones evaluadas, el periodo de muestreo seleccionado proporcionó señales suficientemente estables para la visualización y supervisión experimental, sin requerir una etapa adicional de filtrado digital. Por otra parte, el análisis de pérdidas mostró que la selección de MOSFET IPP057N15NM6 reduce las pérdidas totales estimadas del puente H de 4.975 W a 387 mW, incrementando la eficiencia estimada de (97.96%) a (99.83%) respecto al diseño clásico. En conjunto, los resultados demuestran que la PCB propuesta integra adecuadamente la etapa de potencia, el procesamiento de señales y la instrumentación necesaria para operar el servomotor, constituyendo una plataforma viable para la posterior implementación y evaluación de estrategias de control de velocidad y posición.

Referencias

[1] A. Marsh, "In 1961, the First Robot Arm Punched In," IEEE Spectrum, Aug. 30, 2022. [Online]. Available: https://spectrum.ieee.org/unimation-robot

[2] A. Gasparetto and L. Scalera, "A Brief History of Industrial Robotics in the 20th Century," Advances in Historical Studies, vol. 8, no. 1, pp. 24–35, Feb. 2019.

[3] M. Ryalat, N. Almtireen, G. Al-Refai, H. Elmoaqet, and N. Rawashdeh, "Research and Education in Robotics: A Comprehensive Review, Trends, Challenges, and Future Directions," Journal of Sensor and Actuator Networks, vol. 14, no. 4, Art. no. 76, 2025, doi: 10.3390/jsan14040076.

[4] W. Chen, W. Chi, S. Ji, H. Ye, J. Liu, Y. Jia, J. Yu, and J. Cheng, "A Survey of Autonomous Robots and Multi-Robot Navigation: Perception, Planning and Collaboration," Biomimetic Intelligence and Robotics, vol. 5, no. 2, Art. no. 100203, 2025.

[5] K. McFall, K. Huang, H. Gilbert, M. Jouaneh, H. Bai, and D. Auslander, "Mechatronics and Robotics Education: Standardizing Foundational Key Concepts," Journal of Higher Education Theory and Practice, vol. 20, no. 10, Art. no. 3653, Dec. 2020, doi: 10.33423/jhetp.v20i10.3653.

[6] J. Weinberg, "A Multidisciplinary Model for Using Robotics in Engineering Education," in Proceedings of the ASEE Annual Conference and Exposition, 2001. [Online]. Available: https://peer.asee.org/a-multidisciplinary-model-for-using-robotics-in-engineering-education.pdf

[7] A. Concha Sánchez, J. F. Figueroa-Rodríguez, A. G. Fuentes-Covarrubias, R. Fuentes-Covarrubias, and S. K. Gadi, "Recycling and Updating an Educational Robot Manipulator with Open-Hardware Architecture," Sensors, vol. 20, no. 6, Art. no. 1694, 2020, doi: 10.3390/s20061694.

[8] A. Concha Sánchez, J. F. Figueroa-Rodríguez, A. G. Fuentes-Covarrubias, R. Fuentes-Covarrubias, and S. K. Gadi, "Recycling and updating an educational robot manipulator with open-hardware architecture," Sensors, vol. 20, no. 6, Art. no. 1694, 2020, doi: 10.3390/s20061694.

[9] J. Zhao, Y. Gu, Q. Hou, and Z. Zhang, "Research on educational robot system based on vision processing," Sensors, vol. 23, no. 2, Art. no. 1038, 2023, doi: 10.3390/s23021038.

[10] R. de J. Kelly-Martínez, I. G. Zepeda-Valencia, and M. del C. Monroy-Lara, "Modelado de servo accionamientos analógicos de velocidad con un motor PMDC embebido," Revista ICBI, 2023.

[11] A. M. Kassem, H. M. Hasanien, and S. A. Zaid, "Modelling and control of DC motor speed and position," in Proceedings of Atlantis Press, 2020.

[12] D. M. Ovalle Martínez, J. M. Moreno Quintero, and L. F. Combita, "Diseño e implementación de un sistema de control de velocidad y posición de un motor DC," Revista Tecnologías de la Información Aplicadas, vol. 8, no. 1, 2021. [Online]. Available: https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tia/article/view/21951

[13] T. Pallejà Cabré, A. Saiz Vela, M. Tresanchez Ribes, J. Moreno Blanc, J. Ribó Pablo, and F. Clariá Sancho, "Didactic platform for DC motor speed and position control in Z-plane," ISA Transactions, vol. 118, pp. 116–132, 2021.

[14] G. Hernández Millán, L. H. Ríos Gonzales, and M. Bueno López, "Implementación de un controlador de posición y movimiento de un robot móvil diferencial," Tecnura, 2019.

[15] M. Ali, S. T. Hussain, and M. Usman, "DC motor speed control using PID on Arduino and MATLAB," 2023. [Online]. Available: ResearchGate.

[16] M. Nassim and A. Abdelkader, "Speed control of DC motor using fuzzy PID controller," arXiv preprint arXiv:2108.05450, 2021.

[17] J. C. Crisóstomo Reyna, "Diseño de un controlador descentralizado por retroalimentación de posición y velocidad para mejorar el control de posición de un robot de tres grados de libertad," Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2024.

[18] S. Mobayen, F. Piltan, and S. Mobayen, "Advances in control techniques for rehabilitation exoskeleton robots," Preprints.org, 2024. [Online]. Available: https://www.preprints.org/

[19] P. Román Graván and P. Tadeu, "Robotics in university teacher training: A comparative analysis of perceptions between Spain and Portugal," IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation, no. 23, 2025.

[20] D. Figueiredo and A. J. M. Osório, "Estado da arte da robótica educativa na escolaridade inicial," in Proc. XV Congreso Internacional Gallegoportugués de Psicopedagogía / II Congreso de la Asociación Científica Internacional de Psicopedagogía, A Coruña, Spain, Sep. 2019, pp. 3997–4008.

DOI: 10.5281/zenodo.21780987

Obtención de Hidrógeno Verde Electrolítico y Fotocatalítico Mediante la Actividad del Grafeno

Obtaining of Electrolytic and Photocatalytic Green Hydrogen Through the Activity of Graphene

Margoth M. Gamboa L.[1], **Pedro López O.**[2, 3], **Jorge A. Mendoza P.**[3].

[1]Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias Químico Biológicas.

Autor de correspondencia: jmendozap@ipn.mx

[2]Unidad Profesional Interdisciplinaria de biotecnología, Departamento de Bioingeniería del Instituto Politécnico Nacional.

[3]Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, Maestría en Sostenibilidad e Innovación en Tecnología Ambiental.

Resumen

El cambio climático universal ha fomentado la demanda de recursos energéticos sostenibles, debido a que los hidrocarburos derivados de los combustibles fósiles contribuyen en acelerar el deterioro del medio ambiente. En este contexto, la eficiencia energética representa una de las soluciones energéticas sostenibles lo cual genera diferentes perspectivas con base en las energías renovables. Por lo que, la energía de hidrógeno (H_2) verde es una de las tecnologías emergentes optimizada hacia la sostenibilidad, debido a la densidad gravimétrica y a la eficiencia del combustible H_2. Este artículo presenta un estudio sobre la generación de H_2 verde a través de la división global del agua utilizando grafeno y sus derivados. Asimismo, se discuten los desafíos y beneficios del H_2 verde como fuente de energía renovable y se exploran los procesos de electrólisis y fotocatálisis para su producción resaltando el papel crucial que desempeña el grafeno y el óxido de grafeno en la mejora de la eficiencia de generación de H_2 a partir de energías renovables.

Palabras clave: *Hidrógeno verde, grafeno, electrólisis, fotocatálisis, energía renovable.*

Abstract

The global climate change crisis has fueled demand for sustainable energy resources, as fossil fuels contribute to accelerating environmental degradation. In this context, energy efficiency represents one of the sustainable energy solutions, offering various possibilities based on renewable energy sources. Therefore, green hydrogen (H_2) energy is an emerging technology optimized for sustainability, due to the gravimetric density and the efficiency of H_2 fuel. This article presents a study on green H_2 production through water splitting using graphene and its derivatives. It also discusses the challenges and benefits of green H_2 as a renewable energy source and explores the electrolysis and photocatalysis processes for its production, highlighting the crucial role that graphene and graphene oxide play in improving the efficiency of H_2 generation from renewable energy sources.

Keywords: *Green hydrogen, graphene, electrolysis, photocatalysis, renewable energy.*

Recibido: 20/05/2026; Aceptado: 12/06/2026; Publicado 03/08/2026

CC BY-NC-SA 4.0

Introducción

La conversión de la luz solar en hidrógeno (H2) mediante la división fotocatalítica del agua es una tecnología atractiva para producir energía limpia sin contaminación ni subproductos. Esta tecnología es una de las soluciones prometedoras para hacer frente a la creciente demanda de energía reduciendo los problemas medioambientales asociados.

En años recientes, se ha prestado gran atención al H2 como vector energético potencial y al uso de la tecnología en la división del agua como medio limpio y renovable para generar H2 verde utilizando la energía solar. El H2 verde ha sido reconocido como una alternativa prometedora de energía almacenable y limpia para el futuro. Esta tecnología puede potenciar nuevos métodos para generar H2 a partir de recursos renovables y sostenibles, con el fin de evitar la producción de gases de efecto invernadero derivados del consumo de combustibles fósiles y eludir los gravámenes impositivos a las emisiones de carbono que residen en una transición global desde las fuentes convencionales de energía hacia energías renovables (ER). Estas ER desempeñan un papel esencial para lograr un sistema de energía limpia y sostenible [1]. No obstante, un obstáculo inherente radica en la variabilidad e intermitencia de estas fuentes, lo cual exige el desarrollo de sistemas de almacenamiento a gran escala para gestionar estas fluctuaciones [2]. Uno de los sistemas de almacenamiento para el H2 más utilizados son los tanques presurizados, estos depósitos ayudan a mantener al H2 en forma gaseosa o líquida, así como, en forma sólida a través de hidruros metálicos [3]. Por otra parte, el H2 verde, gracias a su alto valor calorífico, se erige como un energético eficiente de almacenamiento. Además, presenta un rendimiento y capacidad calorífica similares a los combustibles fósiles tradicionales en términos de suministro y potencia [4]. Sin embargo, el H2 verde enfrenta desafíos que limitan su viabilidad comercial en el mercado energético mundial, debido a que almacenar H2 se convierte en un reto por su baja densidad [5]. Además, su producción a partir de una fuente primaria conlleva pérdidas y aumento en los costos de producción [6].

Nnabuife et al. [5] reportan que, resolver los desafíos técnicos y científicos en torno a la economía del H2 implica desarrollar infraestructura de distribución eficiente y limpia. Además, educar a las personas acerca de la producción de H2 verde, sus ventajas ambientales y sus aplicaciones en diversas industrias es esencial para maximizar su potencial [7]. A su vez, los países que cuentan con mayor proporción de ER (energía solar y eólica) y una infraestructura de gasoductos avanzada, tienen una ventaja en cuanto a costos de producción de H2 verde [3]. No obstante, McKenzie, [8] reporta que, se debe priorizar el enfoque en las ER y considerar el subsidio al H2 en etapas más avanzadas.

Sin embargo, los fotocatalizadores como el grafeno ofrecen una oportunidad interesante para generar H2 verde de una manera más eficiente desde el punto de vista energético mediante los procesos de la electrólisis y fotocatálisis [9]. Estas tecnologías son opciones prometedoras para producir H2. Por lo que, la conversión de la energía solar en energía química en forma de H2 se ha convertido área de investigación crítica, desafiante y atractiva. En la actualidad, la producción de H2 verde se erige como la opción sostenible óptima, ya que utilizando energías renovables procedentes de la energía solar, eólica o hidroeléctrica se puede dividir la molécula de agua en H2 y oxígeno (O2) mediante electrólisis [10].

Por otro lado, la división fotocatalítica del agua en H2 y O2 mediante catalizadores es un método eficaz para convertir la energía solar en H2 limpio y renovable. Este proceso es la opción más prometedora y renovable para la generación de H2. Recientemente, la división fotocatalítica del agua se ha empleado en el tratamiento de efluentes industriales y ha atraído una atención considerable. Por lo tanto, el objetivo de artículo fue evaluar la importancia de usar compuestos específicos basados en grafeno que puedan producir H2 verde mediante la electrólisis y fotocatálisis del agua.

Desarrollo

A. Los colores en el arcoíris del hidrógeno

En la Figura 1, se muestra la clasificación del H2 en ocho categorías denominadas colores de acuerdo al método de producción.

B. Hidrógeno de energías renovables

El H2 está catalogada como una energía secundaria cuya obtención depende de una fuente de energía primaria [6]. Actualmente, diversas tecnologías, como el reformado y descomposición de combustibles fósiles, generan cuatro mil millones de toneladas de H2 anualmente. El 95 % de esta producción es proveniente de combustibles fósiles que emiten CO2 [11]. Sin embargo, para mitigar este impacto se ha comenzado a explorar el uso de energías renovables para producir H2 sin emisiones. Por lo que, el H2 verde, obtenido mediante electrólisis utilizando energía solar o eólica podría proporcionar electricidad con emisiones nulas de CO2 y mitigación al cambio climático [9].

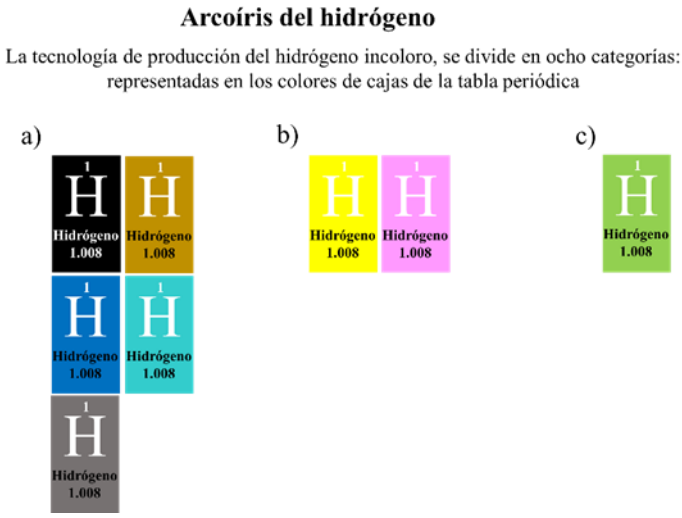

Figura 1. *Categoría del hidrógeno a) Colores negro, marrón, azul, turquesa y gris, se obtienen de combustibles fósiles, b) amarillo y rosa, se producen mediante electrolisis, c) verde, se genera mediante electrólisis y fotocálisis [8].*

C. Procesos de hidrógeno verde, separación de agua electrolítica y fotocatalítica y fotorreformado de compuestos orgánicos en fase líquida o gaseosa

La electrólisis es un procedimiento químico que emplea la electricidad para descomponer una sustancia por medio de reacciones de óxido-reducción (REDOX). Esta operación se realiza sumergiendo electrodos en un electrolito, que es una solución conductora, y aplicando una corriente eléctrica. Los iones presentes en el electrolito se desplazan hacia los electrodos y experimentan reacciones químicas en el ánodo y el cátodo, lo cual produce la descomposición o formación de nuevos compuestos [12].

La división fotocatalítica es un proceso que aprovecha la energía lumínica para catalizar rupturas de enlaces químicos en moléculas, lo que conduce a la descomposición de la sustancia en productos más simples [13]. Durante este proceso, se emplea un material fotocatalizador que, al absorber la luz, produce pares electrón-hueco (un electrón excitado y un hueco de carga positiva). Estos portadores de carga provocan las rupturas de los enlaces químicos, originando la formación de productos más simples como óxidos de carbono, de nitrógeno y de azufre. Este proceso es utilizado principalmente para

degradar contaminantes en el agua y aire, así también, es aplicado para la generación de H2 mediante la fotólisis del agua [14, 15, 16].

Por otro lado, la fotoformación de compuestos orgánicos es un procedimiento que implica la síntesis de compuestos orgánicos de bajo peso molecular y ricos en CHON, a través del aprovechamiento de la luz, que estimula las reacciones químicas. Esta técnica utiliza fotocatalizadores para liberar energía que activa la reacción de los sustratos orgánicos [10, 13]. Esta reacción favorece la síntesis de compuestos orgánicos que pasan de simples a complejas, lo que permite la producción de moléculas útiles en las industrias farmacéutica, agroquímica y de materiales. Además, la fotoformación de compuestos orgánicos presenta ventajas sobre los métodos de síntesis tradicionales. Estas ventajas inducen a ser más selectiva, sostenible y permite condiciones de reacción menos contaminantes [17].

D. Métodos de separación del agua

Fotólisis del agua utilizando fotocatalizadores

La fotólisis del agua, causa la división de la molécula de agua en H2 y O2 [18]. Para llevar a cabo este proceso se utilizan fotocatalizadores como óxido de titanio (TiO2) y óxido de grafeno (OG). Estos fotocatalizadores tienen la capacidad de absorber radiación solar y crear pares electrón-hueco [19, 20]. Esta reacción se representa mediante (1).

$$2H_2O + \text{luz solar} \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (1)$$

Fotoelectrocatálisis de materiales semiconductores

La Fotoelectrocatálisis es un proceso donde un fotocatalizador libera un flujo de electrones que son aprovechados en reacciones REDOX para la síntesis de moléculas orgánicas [21, 22]. En este proceso los materiales semiconductores como el TiO2, óxido de zinc (ZnO) y óxido de cerio (CeO2), actúan como fotocatalizadores al absorber luz solar, que generan pares de electrón-hueco. En este método no usa agua, si no, se emplean sustancias ricas en H2 como etanol o glicerol [14]. Los fotocatalizadores al ser excitados por la radiación solar, generan pares electrón-hueco que interactúan con moléculas de metanol en solución acuosa, lo cual se oxida en presencia de los electrones generados por el fotocatalizador, produciendo productos intermedios como formaldehído y ácido fórmico, y liberando finalmente H2 como producto principal [18, 23].

Fotoelectrocatálisis en celdas solares

La fotoelectrocatálisis es una tecnología que divide la molécula de agua en O2 y H2 a través de celdas solares como fotocatalizador utilizando la radiación solar como fuente de energía [24]. Además, esta tecnología puede degradar contaminantes logrando una alta eficiencia en la conversión de energía solar a energía química, generando H2 verde [25, 26]. La reacción que representa mejor la fotoelectrocatálisis en celdas solares es:

$$2H_2O + \text{luz solar} + \text{electricidad} \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (2)$$

En este proceso, se produce H2 y O2 como derivados de la desunión de la molécula de agua, a través de la electricidad lo cual es generada en una celda solar. Esta combinación de tecnologías permite mayor eficiencia en la generación de H2 a partir de la energía solar, ya que se aprovechan tanto la luz como la electricidad generada. Esta es una alternativa prometedora y viable para producir H2 debido a que reduce costos y complejidad [27].

E. Obtención de hidrógeno mediante actividad fotocatalítica de materiales a base de carbono (grafeno)

La producción de H2 generada por la división fotocatalítica de agua, basada en semiconductores como el grafeno y sus derivados implica dos opciones conceptuales: primero: el sistema está formado por dos dispositivos separados, uno para la recolección de luz y otro para la electrolización del agua (electrólisis acoplada a un panel fotovoltaico: PV). Segundo: el sistema integrado combina el componente de recolección de luz y la interfaz de división catalítica del agua en el mismo material llevando a cabo una reacción fotoelectroquímica [28].

F. Contribución de la fotocatálisis en la era del grafeno

La generación de H2 a través de la fotocatálisis utilizando el grafeno como fotocatalizador puede dividir la molécula de agua en O2 y H2 mediante la luz solar [13]. En este sentido, tanto el grafeno como su derivado (óxido de grafeno), se destacan por sus propiedades fotocatalíticas [19]. De acuerdo a lo descrito por An y Jimmy en 2011 [20], el óxido de grafeno mejora la sensibilidad a la luz, generando pares electrón-hueco con mayor eficiencia. Por lo cual, su actividad fotocatalítica se incrementa debido a sus propiedades modificadas, haciendo eficaz la desunión del H2 y O2 en la molécula del agua, bajo radiación solar. Además, la versatilidad del grafeno hace prometedora la generación de H2 a partir de diversas fuentes de ER, contribuyendo a la creación de una energía sostenible [18].

G. El desbordante entusiasmo de la novedad: buscando la cuadratura del círculo.

El mejor método para producir H2, en términos de impacto ambiental, es por medio de la electrólisis del agua, ya que el único subproducto es el O2 puro y la electricidad puede obtenerse a través de energía solar y

eólica [29]. Por otro lado, se han implementado cuatro tecnologías de electrólisis de agua para generar H2 verde. Por lo cual, cada una de estas tecnologías tiene ventajas y desventajas en su aplicación. Kumar & Lim [30] reportan que, la Primera tecnología: Electrólisis de agua alcalina (EAA) tiene ciertas ventajas por ser una tecnología bien establecida, consta de electrocatalizadores libres de metales solubles, bajo costo, tiene una estabilidad a largo plazo y es comercializada para aplicaciones industriales. Sin embargo, sus desventajas constan de densidades de corriente limitadas, cruce de gases y electrolito líquido de alta concentración (KOH a 5M). Segunda tecnología: Electrólisis del agua por intercambio de aniones a través de membrana (IAM) posee ventajas por ser electrocatalizadores libres de metales nobles y electrolito líquido de baja concentración (KOH a 1M). No obstante, sus desventajas son que, cuentan con una estabilidad limitada y su desarrollo terminal. Tercera tecnología: Electrólisis de agua por Intercambio de Protones a través de Membrana (IPM) dispone de ventajas por ser una tecnología comercializada, opera a densidades de corriente más altas, alta pureza de los gases, su diseño de sistema es compacto y brinda una respuesta rápida, pero, su costo de los componentes de la celda, electrocatalizadores de metales nobles y electrolito ácido son altos. Finalmente, la cuarta tecnología: la electrólisis de agua de óxido-sólido (EAOS): puede llevarse a cabo a altas temperaturas de trabajo y alta eficiencia, sin embargo, su estabilidad es limitada y su desarrollo es terminal.

Por otra parte, la división fotoelectroquímica del agua tiene gran potencial para la producción del H2 verde, sostenible a bajo costo. Sin embargo, requiere fotocatalizadores capaces de colectar espectros luminosos en la región visible [31, 32, 33].

H. Grafeno: el punto de conexión.

El grafeno, tiene una capa plana única de grafito, posee propiedades muy importantes como una alta movilidad del portador de carga, gran área de superficie, alta rigidez mecánica, además de ser de naturaleza biocompatible [34]. Por su alta movilidad de electrones y su gran área superficial el grafeno es un receptor de electrones eficaz para mejorar la transferencia de carga fotoinducida. Así mismo restringe la reacción inversa mediante la separación de los sitios de evolución del H2 y O2 en la desunión de la molécula del agua, mejorando así la obtención de H2 verde [28]. Por lo tanto, el grafeno y sus derivados se pueden combinar con óxidos metálicos (TiO2, VO2) con la finalidad de mejorar la obtención de H2 verde [28, 35].

I. Comparación del electrólisis frente a la fotocatálisis en términos técnicos y científicos para mejorar y lograr el desarrollo tecnológico del hidrógeno verde.

Dingenen & Verbruggen en 2021 [36], reportaron que la generación de H2 tomando como base al agua de mar, requiere cambios de pH mínimos en comparación con la electrólisis en agua de fuente natural, donde se podría aplicar cambios hasta de 9 unidades de pH. Estos cambios de pH en la fotocatálisis pueden causar reacciones secundarias adversas, como la formación de Cl2 y ClO−, corrosión e incrustaciones inducidas por ácidos o bases. Por otro lado, los requisitos adicionales para las celdas electrolíticas, como las membranas y el aporte eléctrico, no se requieren en los sistemas fotocatalítico [36].

Anantha et al., 2020 [37], compararon las eficiencias de eliminación de tres técnicas diferentes de tratamientos de fotocatálisis, adsorción y electrólisis para la eliminación de azul de metileno utilizando nanopartículas modificadas en la superficie. El menos eficiente fue fotocatalítico, pues los resultados indicaron que tuvo ~1, la adsorción 60 % a 70 % de eliminación de tinte a concentraciones de tinte iniciales más altas elegidas de 25 mg/L y 50 mg/L, mientras que los métodos de electrólisis mostraron una eliminación de tinte de 94 % a 95 % incluso a concentraciones iniciales más altas de tinte (50 mg/L). Estos autores, consideran que los resultados obtenidos pueden ser debidos al flujo continuo de corriente eléctrica, que genera cargas negativas capaces de degradar el tinte con mayor eficacia [34].

J. Hidrógeno como negocio sostenible, perspectivas globales y producción potencial en América Latina y México.

De Oliveira en 2019 [38], reportó que las emisiones de carbono generada por la electricidad (ACI) para América Latina y el Caribe se derivó por la combinación de combustibles fósiles y los efectos geográficos desde 1990 a 2015. En este periodo el ACI global disminuyó alrededor del 5 % en América Latina. Sin embargo, en el Caribe aumentó el 10 %. Por otro lado, en México la eficiencia térmica y la mezcla de combustibles mejoraron apreciablemente. Sin embargo, no fue suficiente para contrarrestar el aumento del ACI regional [38]. Bersalli et al., en 2020 [39], reportaron a través de un análisis econométrico de la efectividad de las políticas de energías renovables, mediante este estudio se analizó una base de datos durante 20 años en 20 países latinoamericanos y 30 europeos. Además, estos autores, reportan que estas políticas de desarrollo tienen un impacto positivo sobre la inversión en este tipo de energías. Por lo que, los incentivos fiscales otorgados a los posibles inversores, son deficientes para asegurar el despliegue de las ER en ambas regiones [39].

Conclusiones

La obtención de H2 verde a través de la actividad catalítica del grafeno en la electrólisis y fotocatálisis presenta beneficios en términos de eficiencia y sostenibilidad. Este alótropo del carbono puede mejorar la eficiencia en la obtención de H2 verde a partir de ER. En el tratamiento de electrólisis del agua utilizando grafeno como electrodo, es un proceso eficaz y estable, genera exclusivamente O2 puro como subproducto. Por otro lado, la fotocatálisis con grafeno como co-catalizador en presencia de la luz solar permite mayor eficiencia en la desunión del H2 y O2 de la molécula del agua. Esto se debe a sus propiedades conductoras y fotocatalíticas del grafeno, lo cual provoca mayor sensibilidad a la luz, mejora la obtención de pares electrón-hueco, lo que optimiza la descomposición del agua en H2 y O2 generando H2 verde como una energía alternativa sostenible.

Referencias

[1] Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. Energy Strategy Reviews, 24, 38-50.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006.

[2] Jin, C., Xiao, J., Hou, J., Wu, X., Zhang, J., & Du, E. (2021). Flexibility improvement evaluation of hydrogen storage based on electricity–hydrogen coupled energy model. Global Energy Interconnection, 4(4), 371-383.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloei.2021.09.004.

[3] Ye, Y., Lu, J., Ding, J., Wang, W., & Yan, J. (2022). Performance improvement of metal hydride hydrogen storage tanks by using phase change materials. Applied Energy, 320, 119290.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119290.

[4] Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. A. H., & Rooney, D. W. (2022). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. Environmental Chemistry Letters, 20(1), 153-188.
DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8

[5] Nnabuife, S. G., Ugbeh-Johnson, J., Okeke, N. E., & Ogbonnaya, C. (2022). Present and projected developments in hydrogen production: a technological review⋆. Carbon Capture Science & Technology, 3, 100042.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100042.

[6] Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146, 111180.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180

[7] Blohm, M., & Dettner, F. (2023). Green hydrogen production: Integrating environmental and social criteria to ensure sustainability. Smart Energy, 11, 100112.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100112

[8] McKenzie, B. (2020). Shaping Tomorrow's Global Hydrogen Market. Vie De-Risked Investments.

[9] Dasari, A. (2025). Recent progress in graphene based metal oxide and metal sulfide hybrid composites for hydrogen production via photocatalytic water splitting: A review. Review of Materials Research, 100111.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.revmat.2025.100111

[10] Zamfirescu, C., Naterer, G. F., & Dincer, I. (2012). Photo-electrochemical chlorination of cuprous chloride with hydrochloric acid for hydrogen production. International journal of hydrogen energy, 37(12), 9529-9536.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.183

[11] Megía, P. J., Vizcaíno, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021). Hydrogen production technologies: from fossil fuels toward renewable sources. A mini review. Energy & Fuels, 35(20), 16403-16415. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501

[12] Bard, A. J., Faulkner, L. R., & White, H. S. (2022). Electrochemical methods: fundamentals and applications. John Wiley & Sons.

[13] Hou, H., Zeng, X., & Zhang, X. (2020). Production of hydrogen peroxide by photocatalytic processes. Angewandte Chemie International Edition, 59(40), 17356-17376.
DOI: https://doi.org/10.1002/anie.201911609

[14] Ran, J., Zhang, J., Yu, J., Jaroniec, M., & Qiao, S. Z. (2014). Earth-abundant cocatalysts for semiconductor-based photocatalytic water splitting. Chemical Society Reviews, 43(22), 7787-7812.
DOI:10.1039/C3CS60425J

[15] Osterloh, F. E. (2008). Inorganic materials as catalysts for photochemical splitting of water. Chemistry of Materials, 20(1), 35-54. DOI: https://doi.org/10.1021/cm7024203

[16] Cheng, P., Yang, Z., Wang, H., Cheng, W., Chen, M., Shangguan, W., & Ding, G. (2012). TiO2–graphene nanocomposites for photocatalytic hydrogen production from splitting water. International Journal of Hydrogen Energy, 37(3), 2224-2230. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.004

[17] Sugioka, K., Matsuda, T., & Ito, Y. (2018). Photofabrication. In Photochemistry for Biomedical Applications: From Device Fabrication to Diagnosis and Therapy (pp. 51-82). Singapore: Springer Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-0152-0

[18] Yeh, T. F., Cihlář, J., Chang, C. Y., Cheng, C., & Teng, H. (2013). Roles of graphene oxide in photocatalytic water splitting. Materials Today, 16(3), 78-84.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2013.03.006

[19] Yutomo, E. B., Noor, F. A., & Winata, T. (2021). Effect of the number of nitrogen dopants on the electronic and magnetic properties of graphitic and pyridinic N-doped graphene–a density-functional study. RSC advances, 11(30), 18371-18380.
DOI: https://doi.org/10.1039/D1RA01095F

[20] An, X., & Jimmy, C. Y. (2011). Graphene-based photocatalytic composites. Rsc Advances, 1(8), 1426-1434.
DOI: 10.1039/C1RA00382H

[21] Rajput, H., Kwon, E. E., Younis, S. A., Weon, S., Jeon, T. H., Choi, W., & Kim, K. H. (2021). Photoelectrocatalysis as a high-efficiency platform for pulping wastewater treatment and energy production. Chemical Engineering Journal, 412, 128612.
DOI: https://doi.org/10.1016/j. cej.2021.128612.

[22] Brillas, E., & Garcia-Segura, S. (2023). Recent progress of applied TiO2 photoelectrocatalysis for the degradation of organic pollutants in wastewaters. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(3), 109635.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109635.

[23] Nomikos, G. N., Panagiotopoulou, P., Kondarides, D. I., & Verykios, X. E. (2014). Kinetic and mechanistic study of the photocatalytic reforming of methanol over Pt/TiO2 catalyst. Applied Catalysis B: Environmental, 146, 249-257.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.03.018

[24] Durante, C., Mazzucato, M., Bellardita, M., & Parrino, F. (2023). Fundamentals of photoelectrocatalysis. In Photoelectrocatalysis (pp. 7-81). Elsevier.
DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823989-6.00003-5.

[25] Balaić, D., Antonije Oreški, G., Radić, G., Kušić, H., Perović, K., & Kraljić Roković, M. (2023). Photoelectrocatalytic hydrogen production supported by ascorbic acid. Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske, 72(3-4), 179-186.
DOI: https://doi.org/10.15255/KUI.2022.050

[26] Ni, J., Wen, Y., Pan, D., Bai, J., Zhou, B., Zhao, S., ... & Zeng, Q. (2023). Light-driven simultaneous water purification and green energy production by photocatalytic fuel cell: A comprehensive review on current status, challenges, and perspectives. Chemical Engineering Journal, 473, 145162.
DOI: https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.145162.

[27] Ahmad, H., Kamarudin, S. K., Minggu, L. J., & Kassim, M. (2015). Hydrogen from photo-catalytic water splitting process: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 599-610.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.101

[28] Khan, M., Assal, M. E., Tahir, M. N., Khan, M., Ashraf, M., Hatshan, M. R., ... & Adil, S. F. (2022). Graphene/inorganic nanocomposites: Evolving photocatalysts for solar energy conversion for environmental remediation. Journal of Saudi Chemical Society, 26(6), 101544.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101544

[29] Khan, M. A., Zhao, H., Zou, W., Chen, Z., Cao, W., Fang, J., ... & Zhang, J. (2018). Recent progresses in electrocatalysts for water electrolysis. Electrochemical Energy Reviews, 1, 483-530.
DOI: https://doi.org/10.1007/s41918-018-0014-z

[30] Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. Energy reports, 8, 13793-13813.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127

[31] Xiao, N., Li, S., Li, X., Ge, L., Gao, Y., & Li, N. (2020). The roles and mechanism of cocatalysts in photocatalytic water splitting to produce hydrogen. Chinese Journal of Catalysis, 41(4), 642-671.
DOI: https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63469-8

[32] Huang, K., Li, C., Zheng, Y., Wang, L., Wang, W., & Meng, X. (2022). Recent advances on silver-based photocatalysis: Photocorrosion inhibition, visible-light responsivity enhancement, and charges separation acceleration. Separation and Purification Technology, 283, 120194.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120194.

[33] Xu, W., Liu, M., Xu, K., & Li, B. (2025). Recent advances in improving utilization efficiency of precious metal catalysts for hydrogen generation from hydrolysis of ammonia borane. Coordination Chemistry Reviews, 529, 216445.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216445

[34] Singh, P., Shandilya, P., Raizada, P., Sudhaik, A., Rahmani-Sani, A., & Hosseini-Bandegharaei, A. (2020). Review on various strategies for enhancing photocatalytic activity of graphene based nanocomposites for water purification. Arabian Journal of Chemistry, 13(1), 3498-3520.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.12.001.

[35] Hafeez, H. Y., Lakhera, S. K., Bellamkonda, S., Rao, G. R., Shankar, M. V., Bahnemann, D. W., & Neppolian, B. (2018). Construction of ternary hybrid layered reduced graphene oxide supported g-C3N4-TiO2 nanocomposite and its photocatalytic hydrogen production activity. international journal of hydrogen energy, 43(8), 3892-3904.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.048

[36] Dingenen, F., & Verbruggen, S. W. (2021). Tapping hydrogen fuel from the ocean: A review on photocatalytic, photoelectrochemical and electrolytic splitting of seawater. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 142, 110866.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110866

[37] Anantha, M. S., Olivera, S., Hu, C., Jayanna, B. K., Reddy, N., Venkatesh, K., ... & Naidu, R. (2020). Comparison of the photocatalytic, adsorption and electrochemical methods for the removal of cationic dyes from aqueous solutions. Environmental Technology & Innovation, 17, 100612.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100612

[38] De Oliveira-De Jesus, P. M. (2019). Effect of generation capacity factors on carbon emission intensity of electricity of Latin America & the Caribbean, a temporal IDA-LMDI analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101, 516-526.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.030

[39] Bersalli, G., Menanteau, P., & El-Methni, J. (2020). Renewable energy policy effectiveness: A panel data analysis across Europe and Latin America. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133, 110351. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110351

DOI: 10.5281/zenodo.22257329

Análisis del Uso de Redes Neuronales en Procesos de Energía Nuclear y Altas Energías

Analysis of the Use of Neural Networks in Nuclear and High Energy Processes

Néstor A. Sánchez V.[1], **Juan C. Cabanillas N.**[1], **Jaredt G. Torres L.**[1], **Julio C. Picos P.**[1], **Jesús N. Leal L.**[1]

[1]Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, Académica de Ingeniería Electrónica

Autor de correspondencia: juan.cn@culiacan.tecnm.mx

Resumen

En las plantas de energía nuclear y experimentos para estudios de física de altas energías se llevan a cabo procesos que son de gran trascendencia y complejidad por sus requisitos de alta precisión y fiabilidad, como son el control y monitoreo de sus parámetros operativos relevantes. Este trabajo aborda una revisión literaria que ha tenido el uso de herramientas computacionales relacionadas con la inteligencia artificial (IA), y en particular de las redes neuronales artificiales (ANN), para este tipo aplicaciones; y de esta manera definir los alcances y limitaciones actuales, así como las perspectivas de mejoras contempladas en un futuro. El uso de las ANN en diversos ámbitos de aplicación se debe a la capacidad que tienen para manejar datos complejos y no lineales. Primeramente, se realiza una contextualización del uso de ANN en procesos de control relacionados con áreas de la energías, medicina e industria. Después, se describen brevemente los fundamentos de los procesos de la energía nuclear y de las redes neuronales artificiales. En seguida, se explican los criterios y el procedimiento de selección de la literatura para su posterior clasificación, análisis y descripción. Finalmente, de acuerdo con los estudios realizados en este trabajo se puede afirmar que, en particular para las aplicaciones de procesos nucleares, las herramientas computaciones de las ANN continúan siendo una asignatura pendiente en muchos ámbitos de desarrollo y operativos; sin embargo, ya se están dando pasos importantes para una mayor apertura y aceptación sobre todo las relacionadas con aplicaciones de aprendizaje automático. Por otro lado, el uso de ANN en experimentos de estudios de física de altas energías se distingue por tener un desarrollo más consolidado en lo que concierne a la optimización, simulación y análisis de datos físicos, como resultados de las colisiones de partículas en los experimentos de estos aceleradores; y en gran medida se ha tenido un desarrollo avanzado en el uso de herramientas de inteligencia artificial en lo que respecta a las tecnologías de sistemas de control de detectores y experimentos, así como en la definición de los valores de parámetros operativos con base en los comportamientos previos bajo determinadas condiciones.

Palabras clave: Redes neuronales artificiales, control de energía nuclear, monitoreo, inteligencia artificial.

Abstract

In nuclear power plants and experiments for high-energy physics studies, processes of great significance and complexity are carried out due to their strict requirements for high precision and reliability, such as the control and monitoring of their relevant operational parameters. This work presents a literature review of the use of computational tools related to artificial intelligence (AI), and particularly artificial neural networks (ANNs), for these types of applications, thereby defining their current scope and limitations, as well as prospects for future improvements. The adoption of ANNs across various application domains stems from their ability to handle complex and non-linear data.

First, a contextualization of the use of ANNs in control processes related to energy, medicine, and industry is presented. Next, the fundamentals of nuclear energy processes and artificial neural networks are briefly described. Subsequently, the literature selection criteria and procedures for subsequent classification, analysis, and description are detailed. Finally, based on the studies conducted in this work, it can be stated that, specifically for nuclear process applications, ANN computational tools remain a work in progress across many operational and development areas; nevertheless, significant strides are being made toward broader adoption and acceptance, particularly regarding machine learning applications. On the other hand, the deployment of ANNs in high-energy physics experiments is characterized by a more consolidated state of development concerning the optimization, simulation, and analysis of physical data resulting from particle collisions in accelerator experiments. Furthermore, advanced progress has been made in leveraging artificial intelligence tools for detector and experiment control system technologies, as well as in defining operational parameter values based on historical behavior under specific operating conditions.

Keywords: Artificial neural networks, nuclear power control, monitoring, artificial intelligence.

Recibido: 26/07/2026; Aceptado: 21/08/2026; Publicado 31/08/2026

CC BY-NC-SA 4.0

Introducción

El control y monitoreo de los procesos en plantas de energía nuclear son una tarea compleja, que requiere alta precisión, fiabilidad y robustez debido a que involucra conocer en todo momento el comportamiento de una serie de variables críticas que deben ser evaluadas y/o ajustadas continuamente para asegurar la operación segura y eficiente de estas plantas [1][2]. Tradicionalmente, los sistemas de control han utilizado métodos basados en modelos matemáticos, sin embargo estos enfoques a menudo presentan limitaciones cuando se enfrentan a condiciones de tipo dinámicas y no lineales, que son inherentes a los sistemas nucleares. Por su parte, el significativo avance que ha tenido la inteligencia artificial en año recientes, y en particular las redes neuronales artificiales (ANN, Artificial Neural Networks), han surgido como una herramienta potencialmente disruptiva para mejorar estos procesos. Las ANN tienen la capacidad de aprender y adaptarse a partir del conocimiento de grandes volúmenes de datos, lo que las hace particularmente pertinentes para gestionar la complejidad e incertidumbre en el control de procesos nucleares. No obstante, la adopción generalizada de las ANN en los diversos procesos nucleares todavía está en etapas tempranas, y aún no se cuenta con una regulación ni entendimiento claro de las potencialidades de esta tecnología subyacente, necesaria

para su implementación de una manera efectiva, eficiente y confiable en la actualidad. Este escenario inicial, enfatiza la necesidad de un análisis exhaustivo y sistemático del estado actual de las ANN en el control de procesos nucleares, así como de experimentos de altas energías para estudios de física.

El uso de ANN para el control de procesos en diversas áreas de la energía ha sido un tema de interés desde hace últimos años. Por ejemplo, en [3] exploraron la aplicación de ANN para la inspección de gránulos (pellets, en inglés) de combustible nuclear fabricados a través de la extracción de características. Adicionalmente, estudios han demostrado el potencial de las ANN en aplicaciones de control y monitoreo de alta precisión, como es [4] que propuso un proceso de optimización basado en modelos para sistemas de Calentamiento, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) utilizando ANN para la modelización y algoritmos evolutivos para la optimización, resaltando la capacidad de las ANN para mejorar la eficiencia en sistemas complejos. Así como en [5], en donde investigaron la viabilidad de usar ANN para la garantía de calidad en las interpretaciones de imágenes de perfusión miocárdica. En [6] se enfocaron en el desarrollo de ANN semifísicas para el control de la fase de combustión en motores de encendido por chispa de múltiples combustibles, enfatizando la reducción del tamaño de la red y el esfuerzo de calibración. En [7] estudiaron el uso de ANN para el control de digestores anaeróbicos con el fin de mejorar la eficiencia de producción de biogás, y en [8] discutieron las aplicaciones de ANN en la tecnología de invernaderos, destacando el potencial para adaptar estos modelos a nuevas tecnologías como el internet de las cosas y el aprendizaje automático. Estos ejemplos muestran la diversidad de aplicaciones de ANN en el control de procesos energéticos y la necesidad de integrar esta tecnología en la industria nuclear.

Por otra parte, la mayor parte de la literatura encontrada incluye múltiples estudios que exploran diferentes aspectos de las ANN, pero existen pocos relacionados con la aplicación directa en procesos nucleares. La falta de estudios integradores en ese sentido dificulta la identificación de las áreas de desarrollo y las tendencias actuales en el uso de ANN para el control de estos procesos. Asimismo, esta fragmentación de información impide determinar áreas potenciales que requieren mayor investigación y desarrollo. Por lo tanto, la ausencia de una visión consolidada y crítica sobre los avances en la implementación de las ANN en la industria nuclear también puede llevar a una subutilización de estas tecnologías avanzadas, lo que limitaría su potencial para optimizar sus operaciones y recursos. Asimismo, es de gran relevancia realizar un análisis más detallado que no solo compare e integre los diferentes enfoques y resultados obtenidos hasta la fecha, sino que además identifique las áreas de oportunidad a nivel tecnológico, científico e incluso legislativo de este campo emergente. Bajo la premisa de que los sistemas de control y seguridad son esenciales para garantizar que el reactor opere dentro de los parámetros seguros y para responder rápidamente a cualquier desviación de las condiciones normales de operación.

La literatura sobre los procesos de energía nuclear abarca una amplia gama de temas, desde la explotación eficiente de los recursos de combustibles fósiles hasta la producción de hidrógeno para la economía del hidrógeno. [9] discute el papel de la energía nuclear en extender y sustituir los recursos limitados de combustibles fósiles, destacando la eficiencia de la ruta nuclear. Mientras que [10][11] profundizan en la producción a gran escala de hidrógeno utilizando energía nuclear, con un enfoque en reactores nucleares avanzados de alta temperatura. [12] explora procesos de conversión de energía sinérgicos que combinan energía nuclear y combustibles fósiles para producir portadores de energía como electricidad, hidrocarburos e hidrógeno.

Además, [13] examinan la energía de simetría nuclear y su impacto en las estrellas de neutrones, en tanto que en [14] conectan la ecuación de estado nuclear con procesos de fusión y quasifisión en reacciones nucleares de baja energía. En [15] aplican el análisis de exergía y anergía a un ciclo nuclear termoquímico para la producción de hidrógeno, destacando la eficiencia del ciclo e identificando los procesos que generan más anergía. Szargut *et al*., en [16] definen a la exergía como la cantidad máxima de trabajo útil que se puede extraer de un sistema cuando este se encuentra en equilibrio con su entorno. En otras palabras, es la parte de la energía disponible para realizar trabajo mecánico o térmico antes de alcanzar el equilibrio con el ambiente. A diferencia de la energía total, la exergía toma en cuenta la capacidad de transformación de la energía y no solo su cantidad. Asimismo, Berjan en [17] comprende a la anergía como la parte de la energía de un sistema que no puede convertirse en trabajo útil debido a limitaciones termodinámicas. Es la fracción de la energía total que se degrada y no puede aprovecharse para la producción de trabajo mecánico o eléctrico. Chirwa en [18] discute el desarrollo de procesos de tratamiento biológico para la separación y recuperación de desechos radiactivos, con el objetivo de mejorar la viabilidad de la energía nuclear al abordar las preocupaciones sobre la acumulación de desechos radiactivos. Por último, [19] evalúa el proceso de selección de emplazamientos de instalaciones de desechos nucleares en Ontario, Canadá, desde la perspectiva de la justicia energética, enfatizando la importancia del contexto local y la geografía en la equidad del proceso.

La Figura 1 presenta la energía simétrica e_{sym} y el parámetro de presión relacionado con la densidad nuclear ρ para diferentes valores de Λ_b que representa un parámetro de interacción en el modelo utilizado [13]. El gráfico superior (a) muestra cómo la energía simétrica varía en función de la densidad nuclear, mientras que el gráfico inferior (b) detalla el comportamiento del término relacionado con la presión (L/AL/AL/A). Las curvas de colores corresponden a distintos valores de que refleja la influencia de este parámetro en las propiedades de la materia nuclear a diferentes densidades. La relación entre la energía simétrica y la densidad nuclear se expresa como:

$$e_{sym}(\rho) = e_0 + \int_{\rho_0}^{\rho} f(\rho', \Lambda_b) d\rho' \qquad (1)$$

Donde:

$e_{sym}(\rho)$ representa la energía simétrica en función de la densidad nuclear.

e_0 es un valor de referencia de la energía simétrica en una densidad normal.

$f(\rho', \Lambda_b)$ es una función de ajuste que depende de la densidad y del parámetro de interacción Λ_b.

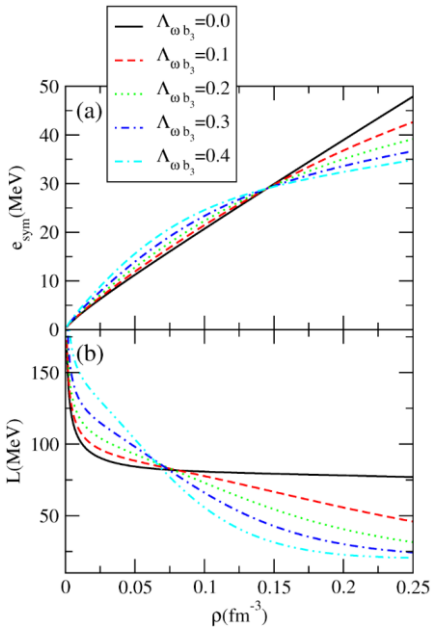

Figura 1. *Energía simétrica como función de densidad [13].*

De acuerdo con [13] estos resultados son cruciales para comprender la ecuación de estado de la materia nuclear, particularmente en condiciones extremas como las presentes en estrellas de neutrones o colisiones nucleares. La dependencia de la energía simétrica y la presión respecto a la densidad ofrece información sobre la estabilidad y estructura de sistemas nucleares densos. Además, la sensibilidad al parámetro Λ_b sugiere que variaciones en las interacciones nucleares pueden alterar significativamente las predicciones del comportamiento de la materia nuclear, impactando modelos astrofísicos y experimentos en física nuclear.

El control de procesos en las plantas de energía nuclear es complejo debido a la necesidad de mantener la estabilidad del reactor, gestionar la transferencia de calor, y asegurar la integridad de los sistemas de contención. Esto implica la monitorización y control de múltiples variables como: temperatura, presión, flujo y niveles de radiación, utilizando una combinación de sensores, actuadores y sistemas de control automatizados [4][6].

A. Redes neuronales artificiales

Por otro lado, las redes neuronales artificiales (ANN) son un modelo computacional inspirado en la estructura y funcionamiento del cerebro humano. Estas redes consisten en un conjunto de unidades de procesamiento llamadas *neuronas*, organizadas en capas. Generalmente, una ANN consta de una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Cada neurona está conectada a otras mediante pesos sinápticos que se ajustan durante el proceso de entrenamiento.

La Figura 2, muestra la estructura de una red neuronal artificial (ANN) de tipo multicapa. De acuerdo con [20], este modelo consiste en tres capas principales:

1) La capa de entrada representada por los nodos $x_1, x_2, \dots, x_n$ que corresponden a las entradas de datos o características del sistema que se está analizando. Estas entradas alimentan la red neuronal con información del entorno o del sistema a modelar.

2) La capa oculta, representada por los nodos $y_1, y_2, \dots, y_m$ que procesan la información proveniente de la capa de entrada. Cada nodo está conectado a los nodos de entrada a través de pesos sinápticos $v_{11}, v_{1i}, v_{ji}, \dots, v_{mn}$ los cuales determinan la contribución de cada entrada al nodo oculto correspondiente. La capa oculta aplica funciones de activación para modelar relaciones no lineales entre las entradas y las salidas.

3) La capa de salida representada por los nodos $z_1, \dots, z_k, \dots, z_p$ que generan los resultados finales de la red. Estas salidas corresponden a las predicciones o decisiones realizadas por la ANN. Cada nodo en la capa oculta está conectado a los nodos de salida mediante pesos $w_{1j}, \dots, w_{pm}$

En el contexto del control de procesos nucleares, las ANN multicapa pueden utilizarse para modelar dinámicas complejas en reactores, predecir condiciones críticas o detectar anomalías en tiempo real, mejorando la seguridad y eficiencia de las operaciones [20].

A medida que se desarrollaron las ANN, se introdujeron nuevas estructuras y métodos de aprendizaje.

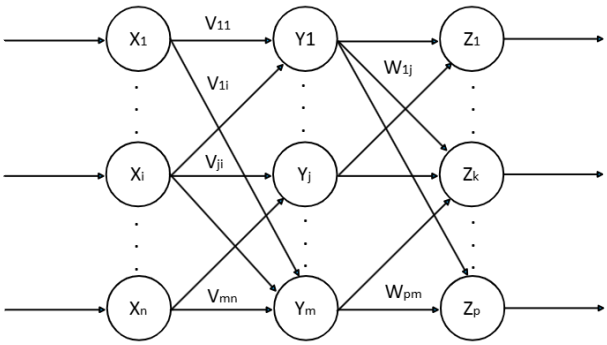

Figura 2. *ANN multicapa [20].*

En principio, Hebb en [21] propuso una regla fundamental conocida como aprendizaje Hebbiano, que establece que las conexiones entre dos neuronas se fortalecen cuando ambas son activadas simultáneamente. Esta idea influyó significativamente en los enfoques iniciales de entrenamiento de las redes neuronales artificiales, y permitió sentar las bases para el aprendizaje basado en la variación de pesos sinápticos. Estos pesos son valores numéricos que determinan el grado de importancia o fuerza de la conexión entre estas dos neuronas. El proceso de entrenamiento de una ANN implica la alimentación de datos de entrada a la red y la adaptación de los pesos sinápticos para minimizar el error en las predicciones de la red. Este ajuste de pesos se realiza mediante algoritmos de aprendizaje, siendo el más común el algoritmo de retropropagación del error (backpropagation). A través del entrenamiento, las ANN pueden aprender patrones y relaciones complejas en los datos, lo que les permite realizar tareas como: clasificación, regresión y reconocimiento de patrones.

Las ANN han demostrado ser herramientas poderosas en una variedad de aplicaciones, incluyendo el reconocimiento de imágenes, procesamiento de lenguaje natural y control de procesos industriales [3][5]. Su capacidad para manejar datos no lineales y aprender de grandes volúmenes de datos las hace especialmente adecuadas para entornos complejos y dinámicos como los sistemas de energía nuclear.

Metodología

En este apartado se describe la metodología utilizada para realizar la investigación sobre el estado del arte en el uso de ANN para el monitoreo y control de procesos en energía nuclear. Cabe mencionar que este análisis también abarca literatura de aplicación de ANN en estudios de física de altas energías (HEP, High Energy Physics), en particular experimentos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC, Large Hadron Collider) perteneciente a la Organización Europea de la Investigación Nuclear (CERN), el experimento Bell II de SuperKEKB y el Colisionador Electrón-Ion (EIC).

A continuación se detallan los criterios para la selección de fuentes de información, así como el procedimiento metodológico seguido en esta investigación:

A. Criterios para la selección de fuentes de información

Para asegurar la relevancia y calidad de los estudios incluidos en esta investigación, se establecieron los siguientes criterios de selección:

1. Relevancia temática: Se seleccionaron estudios que abordaran directamente el uso de ANN en el control de procesos nucleares y experimentos HEP.
2. Calidad del estudio: Se eligieron principalmente artículos publicados en revistas académicas de alto impacto en donde la revisión por pares fue un requisito fundamental para su publicación; así como conferencias reconocidas y tesis posgrado.
3. Fecha de publicación: Se escogieron estudios publicados en los últimos 10 años para asegurar la actualidad y pertinencia temática de la información, aunque también se consideraron investigaciones históricamente significativas que han sentado las bases en estas áreas del conocimiento.
4. Accesibilidad de los datos: Solo se incluyeron estudios cuyos datos y resultados eran claramente presentados y accesibles para su análisis.
5. Diversidad geográfica: Se seleccionaron estudios de diferentes regiones y países para tener una visión global y evitar sesgos regionales en el análisis.

B. Procedimiento para la elaboración del estado del arte

El procedimiento seguido para la elaboración del estado del arte se desarrolló en varias etapas, descritas a continuación:

A. Búsqueda bibliográfica: Se realizó una búsqueda exhaustiva de la literatura utilizando bases de datos académicas como IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, y Google Scholar. Se utilizaron palabras clave como "artificial neural networks", "nuclear energy", "process control", "machine learning", y "energy systems".

B. Selección de estudios: Aplicando los criterios previamente establecidos en la sección anterior, se seleccionaron los estudios más relevantes y pertinentes.

C. Clasificación y organización: Los estudios seleccionados se clasificaron según su enfoque y aplicación. Las categorías definidas fueron: 1) aplicaciones de ANN en el control de

procesos nucleares y de estudios de física de altas energías (HEP), 2) optimización, simulación y predicción en experimentos de HEP, y 3) estudios comparativos en sistemas de control distribuidos para estos procesos.

D. Síntesis de lectura: La información obtenida de cada fuente fue sintetizada para identificar las principales características, y su tipo de red neuronal artificial u algoritmo utilizado.

E. Análisis comparativo: Se contrastaron los diferentes enfoques y técnicas de inteligencia artificial utilizadas en los estudios seleccionados.

F. Presentación de resultados: Se elaboraron tablas concentradoras de acuerdo con las categorías definidas, las cuales son indicadas más adelante.

Resultados

Seguidamente, se presenta una breve síntesis de los principales hallazgos encontrados en los artículos y reportes científicos seleccionados clasificados por categoría; así como una tabla concentradora de los tipos de redes ANN y/o algoritmos de IA utilizados en cada fuerte por categoría.

Categoría 1. Aplicación en el Control de Procesos Nucleares y de Altas Energías

En los últimos años, el uso de ANN en el control de procesos nucleares ha cobrado gran relevancia debido a su capacidad para manejar datos complejos y no lineales, y su potencial para mejorar el desempeño de estos sistemas. Las ANN se han utilizado en una variedad de aplicaciones dentro del campo de la física nuclear y la ingeniería de aceleradores de partículas, demostrando su versatilidad y eficacia en diferentes contextos operativos. Uno de los principales desafíos en el control de procesos nucleares es el monitoreo y análisis de grandes volúmenes de datos en tiempo real, lo que requiere sistemas avanzados que puedan aprender y adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes. Las investigaciones recientes han explorado diversas aplicaciones usando diversas técnicas de ANN para abordar estos desafíos, proporcionando soluciones innovadoras y eficaces, véase la Tabla 1.

Primeramente, en Edelen *et al*., en [22] establece que los recientes avances teóricos y computacionales como son: hardware acelerado, algoritmos de aprendizaje profundo y redes recurrentes tipo LSTM (Long Short-Term Memory), han resuelto problemáticas históricas de inestabilidad y tiempo de cálculo. Asimismo, se determina que las redes neuronales son herramientas viables, robustas y altamente flexibles para permitir el modelado, diagnóstico y control de aceleradores.

Tabla 1. *Publicaciones en la categoría 1: Aplicación de ANN en el Control de Procesos Nucleares y de Altas Energías.*

Autores	Título (Año)	Tipo de Red / Algoritmo
Edelen, A. L., Biedron, S. G., Chase, B. E., Edstrom, D., Milton, S. V., & Stabile, P.	Neural networks for modeling and control of particle accelerators (2016)	-Redes Neuronales Alimentadas Hacia Adelante (FFNN, Feed-forward Neural Networks) -Redes Neuronales Recurrentes (RNN, Recurrent Neural Network) / LSTM -Redes Neuronales Convolucionales (CNN, Convolutional Neural Network)
Pol, A. A., Cerminara, G., Germain, C., Pierini, M., & Seth, A.	Detector Monitoring with Artificial Neural Networks at the CMS Experiment at the CERN Large Hadron Collider (2019)	-Red Neuronal Convolucional (CNN) -Red Neuronal Densa / Somera (SNN)
Arpaia, P., Giordano, F., Prevete, R., & Salvant, B.	Machine learning-based heating detection from pressure measurements in the CERN Large Hadron Collider (2021)	-Red Neuronal Convolucional Unidimensional (1D-CNN)
Schwenker, B., Herzberg, L., Buch, Y., Frey, A., Natochii, A., Vahsen, S., & Nakayama, H.	A neural network for beam background decomposition in Belle II at SuperKEKB (2023)	-Red neuronal profunda con arquitectura híbrida/modular compuesta por múltiples Redes Neuronales Alimentadas Hacia Adelante Completamente Conectadas (Fully Connected Feed-Forward Neural Networks o MLPs - Multi-Layer Perceptrons)
Mejía, J.M., Cabanillas, J.C., León-Monzón, I., & Herrera, G.	Neural network-based predicting model of power supply voltage for a scintillator plastic detector in high energy physics (2025)	-Red Neuronal Artificial Prealimentada de Dos Capas (Two-layer Feed-Forward Neural Network)

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Finalmente, concluye que los sistemas de control impulsados por IA y RN permiten procesar múltiples parámetros en tiempo real, manejar sistemas no lineales complejos y mitigar tiempos muertos/retardos. Por otro lado, Pol *et al*., en [23] demostraron en el experimento de física CMS perteneciente al CERN, que la aplicación de aprendizaje profundo para la automatización del Monitoreo de Calidad de Datos (DQM, Data Quality Monitoring) supera con creces el rendimiento de los métodos estadísticos tradicionales. Asimismo, en Arpaia *et al*., en [24] exploraron la detección de calentamiento basada en aprendizaje automático a partir de mediciones de presión en el LHC del CERN. Su trabajo ilustra cómo las técnicas de ANN pueden ser aplicadas para el monitoreo térmico, permitiendo una detección más precisa y rápida de anomalías térmicas.

En [25], Schwenker *et al*., desarrollaron una red neuronal para la descomposición del fondo de haz en el experimento Belle II del acelerador de partículas SuperKEKB en Japón, con el objetivo de garantizar la calidad de los datos experimentales. Su investigación

demuestra cómo las ANN pueden ser utilizadas para separar señales útiles de ruido, mejorando la calidad de los experimentos de física de partículas. Finalmente, Mejía *et al*., en [26] proponen una metodología basada en un modelo de redes neuronales para predecir el posible cambio de los niveles de voltaje de la fuente de alimentación a lo largo del tiempo para los tubos fotomultiplicadores (PMT, Photo Multiplier Tube) utilizados en un detector de plástico centellador ubicado en un experimento de física de altas energías (HEP) del CERN.

Categoría 2. Optimización, Simulación y Predicción de Estudios de Física de Altas Energías

La optimización de sistemas energéticos es una de las áreas donde las ANN han demostrado un gran potencial. La capacidad de las ANN para aprender y adaptarse a partir de grandes volúmenes de datos les permite abordar problemas complejos y no lineales que son comunes en los sistemas energéticos. En esta sección se explora cómo las ANN se han aplicado en la optimización, simulación y predicción de parámetros relevantes en los sistemas HEP. La Tabla 2 muestra el concentrado de las publicaciones analizadas en esta categoría 2.

Primeramente, Teodorescu en [20] aborda el uso de redes neuronales artificiales en experimentos de física de altas energías. Su trabajo proporciona una visión general de cómo las ANN pueden ser utilizadas para mejorar la eficiencia y precisión en la recolección y análisis de datos en estos experimentos. De igual forma, este estudio destaca la importancia de las ANN en la optimización de los sistemas de detección y en la reducción de errores experimentales, que es crucial para la interpretación precisa de los resultados.

Mishra *et al*., en [27] implementaron técnicas de aprendizaje automático para predecir el parámetro de impacto y la esfericidad transversal en colisiones de iones pesados en el LHC. Esta investigación demuestra cómo las ANN pueden ser empleadas para optimizar la interpretación de los datos experimentales, permitiendo una mejor comprensión de los procesos físicos subyacentes. Las capacidades de las ANN para manejar grandes cantidades de datos experimentales y extraer patrones significativos, contribuyen significativamente a la mejora de la precisión en la predicción de parámetros críticos. Dubiński *et al*., en [28] se aborda la necesidad de desarrollar métodos de simulación más eficientes, como lo es Machine Learning (ML), para un detector de física de altas energías del CERN, denominado ZDC (Zero Degree Calorimeter) en el experimento ALICE. Esta alternativa permite incrementar la velocidad de simulación por un orden de magnitud de 2, mientras se mantiene la alta fidelidad de las simulaciones. De igual forma, Muñoz *et al*., en [29] se presentan los resultados de evaluación de diferentes prototipos de detectores mexicanos que participaron en la prueba de haz del futuro detector de rayos cósmicos denominado MID (Muon IDentifier), efectuada en octubre del 2024 en las instalaciones del CERN. Asimismo, se aplicaron diferentes técnicas de ML para correlacionar los resultados experimentales con los resultados de las simulaciones de estos detectores a prueba.

Tabla 2. *Publicaciones en la categoría 2: Optimización, Simulación y Predicción en Estudios de Física de Altas Energías mediante ANN.*

Autores	Título (Año)	Tipo de Red / Algoritmo
Teodorescu, L.	Artificial neural networks in high-energy physics (2008)	-Propagación hacia delante multicapa (MLFF - ANN) -Redes Recurrentes (Recurrent ANN) -Redes con Enlaces Funcionales (Functional Link ANN) -Redes No Supervisadas (Unsupervised ANNs)
Mishra, A. N., Mallick, N., Tripathy, S., Deb, S., & Sahoo, R.	Implementation of machine learning techniques to predict impact parameter and transverse spherocity in heavy-ion collisions at the LHC (2021)	-Árboles de Decisión con Aumento de Gradiente (GBDT)
Dubiński, J., Deja, K., Wenzel, S., Rokita, P., & Trzciński, T	Machine Learning methods for simulating particle response in the Zero-Degree Calorimeter at the ALICE experiment, CERN (2023)	-Perceptrón Multicapa (MLP) -Autoencoders Variacionales Condicionales (CVAE) -Redes Generativas Antagónicas Convolucionales Profundas (DC-GAN Condicional) -Regresor Auxiliar (Red Regularizadora Convolucional)
Allaire, C., Ammendola, R., Aschenauer, E.C., Hernández, R., *et al*.	Artificial Intelligence for the Electron Ion Collider (AI4EIC) (2024)	-Redes Neuronales Convolucionales (CNN) -Redes Neuronales de Grafos (GNN) -Modelos Generativos: Autoencoders Variacionales (VAE) y Autoencoders Condicionales (CAE) -Redes Generativas Adversarias (GAN) -Flujos de Normalización (Normalizing Flows - NF) / Conditional Masked Autoregressive Flow (cMAF) -Modelos de Difusión (Diffusion Models) -Redes Neuronales Recurrentes (RNN) y LSTM (Long Short-Term Memory) -Perceptrón Multicapa (MLP) y Redes Informadas por la Física (PINN)
Muñoz, J.E., Ortiz, A., Paz, A., Vargas, P., Alfaro, R., González, L.H., Grabski, V., Fernández, F., Regules, H.D., Rodríguez, M., Cabanillas, J.C., Rojas, S., *et al*.	ML-based muon identification using a FNAL-NICADD scintillator chamber for the MID subsystem of ALICE 3 (2025)	-Algoritmo de Machine Learning implementado es un Boosted Decision Tree (BDT) (Árboles de Decisión Potenciados)

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Por último, Allaire *et al*., en [30] se explora el desarrollo de equipos experimentales innovadores en el Colisionador Electrón-Ion (EIC), en donde se buscan aprovechar los avances algorítmicos de vanguardia dentro del dinámico panorama de las metodologías inspiradas en la inteligencia artificial (IA).

Estos estudios reflejan el papel esencial de las ANN en la optimización de sistemas energéticos, mostrando cómo pueden mejorar tanto la eficiencia operativa como la precisión en la recolección y análisis de datos. Al abordar problemas complejos y mejorar la interpretación de los resultados experimentales, las ANN se consolidan como una herramienta valiosa en el campo de la física de altas energías y en la optimización de sistemas energéticos en general.

Categoría 3. Estudios Comparativos en Sistemas de Control Distribuido

A pesar de que las redes ANN han emergido como herramientas poderosas y versátiles en campos del control, monitoreo, simulación y predicción de procesos, sin embargo, su implementación extendida en sistemas distribuidos y de control industrial presenta una serie de desafíos y oportunidades que han sido explorados en diversas investigaciones. Esta sección se centra en los estudios comparativos de implementación de redes ANN en sistemas de control distribuido, en donde se analizan los diferentes enfoques y tecnologías utilizadas en el control de sistemas complejos enfocados a sistemas nuclear y HEP. La Tabla 3 muestra el concentrado de las publicaciones de esta categoría 3.

Inicialmente, Huh *et al*., en [31] presentan un análisis detallado sobre el control de acceso de próxima generación para sistemas de control distribuidos. Este estudio examina cómo las redes ANN pueden ser integradas en estos sistemas para mejorar la seguridad y eficiencia del control de acceso. Además, este trabajo destaca la importancia de estas redes en un aspecto relevante como es la protección de infraestructuras críticas, proporcionando un marco comparativo para evaluar diferentes metodologías de implementación.

Balador *et al*., en [32] realizan una revisión exhaustiva de las tecnologías de middleware de comunicación para sistemas de control distribuidos industriales. Este estudio establece que los sistemas de control distribuidos modernos exigen evolucionar de redes aisladas a arquitecturas altamente conectadas, y el integrar estas tecnologías de middleware es el prerrequisito para habilitar análisis predictivo, modelos de Machine Learning (ML) e Internet de las Cosas (IoT) industrial en plataformas Cloud (como Microsoft Azure IoT), manteniendo al mismo tiempo la seguridad (encriptación, auditoría y autenticación) y la tolerancia a fallos.

Tabla 3. *Publicaciones en la categoría 3: Estudios Comparativos de Aplicación de ANN en Sistemas de Control Distribuido.*

Autores	Título (Año)	Tipo de Red / Algoritmo
Huh, J. H., Bobba, R. B., Markham, T., Nicol, D. M., Hull, J., Chernoguzov, A., & Huang, J.	Next-generation access control for distributed control systems (2016)	Control de Acceso Basado en Roles (RBAC, Role-Based Access Control) combinado con Control de Acceso Basado en Atributos (ABAC, Attribute-Based Access Control)
Balador, A., Ericsson, N., & Bakhshi, Z.	Communication middleware technologies for industrial distributed control systems: A literature review (2017)	-Aprendizaje automático (machine learning) como un servicio externo
Tang, W., & Daoutidis, P.	Distributed control and optimization of process system networks: A review and perspective (2019)	-Redes de Creencia Profunda (DBN-ANN) -Redes Neuronales Convolucionales Profundas (CNN-ANN)
Chochula, P., Augustinus, A., Kurepin, A., Lechman, M., Pinazza, O. & Voscek, D.	15 Years of ALICE DCS	Sin información del uso de ANN, no obstante actualmente se encuentre en desarrollo un sistema de agentes con IA para detección y corrección de errores en el ALICE-DCS.

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Tang y Daoutidis en [33] abordan la complejidad, escalabilidad e inflexibilidad de controlar y optimizar redes industriales químicas y de energía a gran escala mediante el uso de esquemas distribuidos. Su trabajo ofrece una perspectiva integral sobre cómo las ANN pueden ser utilizadas para mejorar la eficiencia y efectividad de los sistemas de control distribuido. Al comparar diferentes metodologías, este estudio proporciona valiosas recomendaciones para la implementación de ANN en la optimización de redes de sistemas de procesos. Por otro lado, estas tecnologías avanzadas de control y monitoreo son requeridas también en los sistemas HEP; en particular Chochula *et al*., en [34] se hace una descripción del Sistema de Control del Detector (DCS) del experimento ALICE del CERN. En donde se hace una recopilación de las principales características técnicas del DCS, que han permitido operar de manera segura y estable en la recolección de datos físicos derivados de las colisiones del LHC (de 2008 a 2023). La parte principal del DCS está conformada por el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) denominado WINCC-OA® de la compañía Siemens, así como por los *frameworks* estandarizados desarrollados en CERN: a) JCOP y b) extensiones específicas del experimento. Entre sus principales características del DCS destacan: unidades autónomas para cada detector, interfaces de usuario, máquinas de estado finito (FSM, Finite State Machine) con estados y acciones discretas, control jerárquico, interfaces con otros sistemas, bases de datos ORACLE, entre otras. A pesar de que en [34]

no se hace referencia a un desarrollo directo de ANN u otro relacionado, sin embargo se han iniciado trabajos para el desarrollo de asistentes de soporte basados en IA para lo que los detectores del proyecto FIT en lo que será la corrida 4 (Run 4) del LHC en el experimento ALICE [35].

Estos estudios son fundamentales para avanzar en la comprensión y aplicación de ANN en el control de procesos industriales y sistemas distribuidos. Al evaluar diversas metodologías y tecnologías, estas investigaciones ofrecen una base sólida para futuras implementaciones, destacando las mejores prácticas y señalando las áreas que requieren mayor investigación y desarrollo.

Conclusiones

La inteligencia artificial (IA) en general y las redes neuronales artificiales de manera particular, presentan un potencial significativo para revolucionar el control de procesos en la energía nuclear. Sin embargo, actualmente la IA generativa y explicable son áreas poco exploradas en sistemas de generación nucleoeléctrica, y es el aprendizaje automático quien ha destacado en aplicaciones de monitoreo en tiempo real, filtrado de datos e información relevante para detectar condiciones de error y supervisión de procesos [36].

Por lo que, a medida que las investigaciones y aspectos legislativos avancen, se superarán los desafíos y limitantes actuales, y es probable que estas tecnologías jueguen un papel cada vez más importante en la optimización y seguridad de los sistemas energéticos.

De igual forma, existen numerosas oportunidades para futuras tecnologías emergentes, como el internet de las cosas (IoT) y los sistemas de control ciberfísicos, en el uso de ANN para el control de estos procesos. Algunas áreas clave incluyen el desarrollo de algoritmos avanzados de aprendizaje profundo, automatización tareas mediante robótica, la exploración, optimización y maximización de procesos en nuevos dominios dentro de la energía nuclear, así como la combinación de ANN con tecnologías emergentes para el monitoreo y control en tiempo real. Estas investigaciones pueden abrir nuevas vías de innovación y mejorar la eficiencia y seguridad de los procesos nucleares.

Finalmente, la implementación de ANN en entornos nucleares críticos presenta desafíos significativos en términos de robustez, fiabilidad, integración y seguridad. Por lo que es necesario continuar desarrollando técnicas avanzadas de entrenamiento y validación, así como mecanismos robustos de control de acceso y protección de datos.

Referencias

[1] Urcia, A., Baltuano, O., Chan, R., Tincopa, J. P., Arrieta, R., Urquizo, R., & Salvador, B. (2016). Desarrollo de un sistema de vigilancia remota, por medio del monitoreo de parámetros claves de seguridad, para un reactor nuclear de investigación. Informe Científico Tecnológico., 14(2014), 161–166.

[2] Zanelli, J. (2011). Dilema energético: La energía nuclear. Estudios Públicos, (121). https://biblat.unam.mx/hevila/EstudiospublicosSantiago/2011/no121/6.pdf

[3] Keyvan, S., Kelly, M. L. & Song, X. (1997). Feature extraction for artificial neural network application to fabricated nuclear fuel pellet inspection. Nuclear technology, 119(3), 269-275.

[4] Nassif, N. (2014). Modeling and optimization of HVAC systems using artificial neural network and genetic algorithm. En Building Simulation (Vol. 7, No. 3, pp. 237-245). Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

[5] Tägil, K., Marving, J., Lomsky, M., Hesse, B., & Edenbrandt, L. (2008). Use of neural networks to improve quality control of interpretations in myocardial perfusion imaging. The international journal of cardiovascular imaging, 24, 841-848.

[6] Xiao, B., Wang, S., & Prucka, R. G. (2014). An investigation of semiphysical artificial neural networks for multi-fuel combustion phasing control of spark ignition engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 228(11), 1262-1273.

[7] Mougari, N. E., Largeau, J. F., Himrane, N., Hachemi, M., & Tazerout, M. (2021). Application of artificial neural network and kinetic modeling for the prediction of biogas and methane production in anaerobic digestion of several organic wastes. International Journal of Green Energy, 18(15), 1584-1596.

[8] Escamilla-García, A., Soto-Zarazúa, G. M., Toledano-Ayala, M., Rivas-Araiza, E., & Gastélum-Barrios, A. (2020). Applications of artificial neural networks in greenhouse technology and overview for smart agriculture development. Applied Sciences, 10(11), 3835.

[9] Seifritz, W. (1978). The role of nuclear energy in the more efficient exploitation of fossil fuel resources. International Journal of Hydrogen Energy, 3(1), 11-20.

[10] Schultz, K. R., Brown, L. C., Besenbruch, G. E., & Hamilton, C. J. (2003). Large-scale production of hydrogen by nuclear energy for the hydrogen economy. General Atomics.

[11] Forsberg, C. W. (2003). Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor. International Journal of Hydrogen Energy, 28(10), 1073-1081.

[12] Hori, M. (2009). Synergistic energy conversion processes using nuclear energy and fossil fuels. International Journal of Nuclear Governance, Economy and Ecology, 2(4), 362-374

[13] Boukari, O., & Rabhi, A. (2023). Nuclear Symmetry Energy Effects on Neutron Star Properties within Bogoliubov Quark–Meson Coupling Model. Symmetry, 15(9), 1742.

[14] Zheng, H., Burrello, S., Colonna, M., Lacroix, D., & Scamps, G. (2018). Connecting the nuclear equation of state to the interplay between fusion and quasifission processes in low-energy nuclear reactions. Physical Review C, 98(2), 024622.

[15] Romero-Paredes, H., Rodríguez, A. V., Paredes, G. E., Vidales, H. V., García, J. A., & Nuñez-Carrera, A. (2015). Exergy and separately anergy analysis of a thermochemical nuclear cycle for hydrogen production. Applied Thermal Engineering, 75, 1311-1320.

[16] Szargut, J., Morris, D. R. & Steward, F. R. (1987). Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Hemisphere Publishing Corporation.

[17] Bejan, A. (2013). Entropy generation minimization: the method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes. CRC press.

[18] Chirwa, E. M. N. (2011). Development of biological treatment processes for the separation and recovery of radioactive wastes. En K. L. Nash y G. J. Lumetta, Advanced

Separation Techniques for Nuclear Fuel Reprocessing and Radioactive Waste Treatment (pp. 436-472). Woodhead Publishing.

[19] Bell, M. Z. (2021). Energy Justice, Nuclear Landscapes and Consent: An Examination of Canadian Nuclear Waste Siting (Tesis Doctoral, Universidad del Estado de Nueva York en Buffalo).

[20] Teodorescu, L. (2008). Artificial neural networks in high-energy physics. En Inverted CERN School of Computing: 2005 and 2006 edition. CERN, Geneva, Switzerland.

[21] Hebb, D. O. (1949). The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory. John Wiley & Sons.

[22] Edelen, A. L., Biedron, S. G., Chase, B. E., Edstrom, D., Milton, S. V., & Stabile, P. (2016). Neural networks for modeling and control of particle accelerators. IEEE Transactions on Nuclear Science, 63(2), 878-897.

[23] Pol, A. A., Cerminara, G., Germain, C., Pierini, M., & Seth, A. (2019). Detector monitoring with artificial neural networks at the CMS experiment at the CERN Large Hadron Collider. Computing and Software for Big Science, 3, 1-13.

[24] Arpaia, P., Giordano, F., Prevete, R., & Salvant, B. (2021). Machine learning-based heating detection from pressure measurements in the CERN Large Hadron Collider. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 990, 164995.

[25] Schwenker, B., Herzberg, L., Buch, Y., Frey, A., Natochii, A., Vahsen, S., & Nakayama, H. (2023). A neural network for beam background decomposition in Belle II at SuperKEKB. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1049, 168112.

[26] Mejía-Camacho, J.M., Cabanillas-Noris, J. C., León-Monzón, I. L., & Herrera-Corral, G.H. (2025). Neural network-based predicting model of power supply voltage for a scintillator plastic detector in high energy physics. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 171268.

[27] Mishra, A. N., Mallick, N., Tripathy, S., Deb, S. & Sahoo, R. (2021). Implementation of machine learning techniques to predict impact parameter and transverse spherocity in heavy-ion collisions at the LHC. In The Ninth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (p. 265).

[28] Dubiński, J., Deja, K., Wenzel, S., Rokita, P., & Trzciński, T. (2024, March). Machine learning methods for simulating particle response in the zero-degree calorimeter at the ALICE experiment, CERN. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3061, No. 1, p. 040001). AIP Publishing LLC.

[29] Muñoz, J. E., Ortiz, A., Paz, A., Vargas, P., Alfaro, R., González, L. H., Gravski, V., Fernández, A., Regules, D., Rodríguez, M., Tejeda, G., Vásquez, Y.A., Cabanillas, J.C., Rojas, S., Barnaföldi, G.G., Száraz, D., Varga, D., Vértesi, R. & García-Solis, E. (2025). ML-based muon identification using a FNAL-NICADD scintillator chamber for the MID subsystem of ALICE 3. Journal of Instrumentation, 20(09), P09015.

[30] Allaire, C., Ammendola, R., Aschenauer, EC. *et al*. Artificial Intelligence for the Electron Ion Collider (AI4EIC). Comput Softw Big Sci 8, 5 (2024). https://doi.org/10.1007/s41781-024-00113-4

[31] Huh, J. H., Bobba, R. B., Markham, T., Nicol, D. M., Hull, J., Chernoguzov, A., & Huang, J. (2016). Next-generation access control for distributed control systems. IEEE Internet Computing, 20(5), 28-37.

[32] Balador, A., Ericsson, N., & Bakhshi, Z. (2017, September). Communication middleware technologies for industrial distributed control systems: A literature review. En 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (pp. 1-6). IEEE

[33] Tang, W., & Daoutidis, P. (2019). Distributed control and optimization of process system networks: A review and perspective. Chinese Journal of Chemical Engineering, 27(7), 1461-1473.

[34] Chochula, P., Augustinus, A., Pinazza, O., Lechman, M., Kurepin, A., Bond, P., & Voscek, D. (2023). JACOW: 15 Years of ALICE DCS. JACoW ICALEPCS, 2023, 1002-1007.

[35] Mermer, I., Muszyński, J., Możaryn, J., & Roslon, K. (2025). Proposal of an AI-Based Support Assistant for the ALICE-FIT Detector Setup at CERN. arXiv preprint arXiv:2511.17154.

[36] Picot, W. (2023). Mejora de la producción de energía nucleoeléctrica gracias a la inteligencia artificial. Boletín del OIEA, 19.

DOI: 10.5281/zenodo.22261696

Marco metodológico para evaluar la pertinencia de la lógica difusa en la planificación de la demanda de litio asociada a la electromovilidad en México

A Methodological Framework for Assessing the Suitability of Fuzzy Logic in Lithium Demand Planning Associated with Electromobility in Mexico

Luis A. Bonilla C.[1], **José A. Castellanos S.**[1], **Lizbeth Cobian R.**[1]
[1]Universidad Autónoma Chapingo.
Autor de correspondencia: luisalfonsobonilla1986@hotmail.com

Resumen

La creciente demanda de litio derivada de la expansión de la electromovilidad plantea importantes desafíos para la planificación de este recurso estratégico, especialmente en contextos caracterizados por incertidumbre, disponibilidad limitada de información y coexistencia de variables cuantitativas y cualitativas. El objetivo de este estudio fue proponer un marco metodológico para evaluar la pertinencia del uso de la lógica difusa en la planificación de la demanda de litio asociada a la electromovilidad en México. La investigación adoptó un enfoque no experimental, descriptivo-analítico y de carácter metodológico, estructurado en cinco etapas: delimitación de variables, construcción del inventario de datos, auditoría de calidad de la información, desarrollo del Índice de Aptitud para Modelación Tradicional (IAMT) y comparación metodológica entre enfoques predictivos. Los resultados muestran que diez de las quince variables analizadas (66.7 %) corresponden a indicadores proxy o variables cualitativas, mientras que nueve (60 %) presentan una aptitud baja o muy baja para su incorporación directa en modelos tradicionales. Las principales limitaciones se relacionan con completitud, consistencia temporal, granularidad y comparabilidad de la información. Estos hallazgos sugieren que la lógica difusa presenta características metodológicas compatibles con sistemas que integran incertidumbre, información heterogénea y variables cualitativas. Se concluye que el marco propuesto proporciona un procedimiento sistemático y reproducible para fundamentar la selección del enfoque predictivo antes de su aplicación empírica.

Palabras clave: lógica difusa, electromovilidad, demanda de litio, calidad de datos, modelación predictiva.

Abstract

The growing demand for lithium driven by the expansion of electromobility poses significant challenges for the planning of this strategic resource, particularly in contexts characterized by uncertainty, limited information availability, and the coexistence of quantitative and qualitative variables. This study aimed to propose a methodological framework to assess the suitability of fuzzy logic for planning lithium demand associated with electromobility in Mexico. The research followed a non-experimental, descriptive-analytical, and methodological design structured into five stages: variable delimitation, data inventory construction, data quality audit, development of the Traditional Modeling Suitability Index (IAMT), and methodological comparison of predictive approaches. The results show that ten of the fifteen variables analyzed (66.7%) correspond to proxy indicators or qualitative variables, while nine variables (60%) exhibit low or very low suitability for direct incorporation into traditional models. The main limitations are related to data completeness, temporal consistency, granularity, and comparability. These findings suggest that fuzzy logic presents methodological characteristics compatible with systems that integrate uncertainty, heterogeneous information, and qualitative variables. It is concluded that the proposed framework provides a systematic and reproducible procedure for supporting the selection of a predictive approach prior to its empirical application.

Keywords: fuzzy logic, electromobility, lithium demand, data quality, predictive modeling.

Recibido: 30/07/2026; Aceptado: 21/08/2026; Publicado 31/08/2026

CC BY-NC-SA 4.0

Introducción

La expansión de la electromovilidad a nivel global forma parte de las estrategias usadas en la búsqueda de reducir emisiones, mejorar la eficiencia energética del transporte y disminuir la dependencia de combustibles fósiles [1], [2]. Este proceso ha incrementado la demanda de minerales necesarios para la fabricación de baterías, entre ellos el litio. Su planificación se vuelve más compleja cuando intervienen cambios en el mercado de vehículos eléctricos, variaciones en los precios de minerales críticos, avances en las tecnologías de almacenamiento, cambios en la parte legal y política y modificaciones en las cadenas de suministro [1], [3]. El crecimiento acelerado del mercado mundial de vehículos eléctricos ha incrementado significativamente la demanda de minerales críticos utilizados en la fabricación de baterías, especialmente litio. La Agencia Internacional de Energía estima que este crecimiento continuará durante las próximas décadas como consecuencia de la expansión de la movilidad eléctrica y del almacenamiento energético, lo que incrementa la incertidumbre sobre la disponibilidad de recursos y hace necesario desarrollar modelos predictivos capaces de anticipar cambios en la oferta, la demanda y las cadenas globales de suministro [4], [1]. En este contexto, la planificación de la demanda de litio adquiere una importancia estratégica para anticipar necesidades futuras y reducir riesgos asociados a la transición energética [5].

México tiene una posición estratégica dentro de la industria automotriz de América del Norte y existen iniciativas que impulsan la movilidad eléctrica; sin embargo, se presentan desafíos como el aumento de infraestructura de recarga, la consolidación de marcos regulatorios y la necesidad de fortalecer las políticas que articulen el desarrollo de proveedores, la innovación tecnológica y la integración de cadenas de valor asociadas a la electromovilidad [1], [6]. Lo anterior se visualiza en la falta de métodos de planificación que tomen en cuenta diversas variables determinantes de la demanda de litio. Junto a esto, la naturaleza de los sistemas sociales, económicos y políticos asociados al transporte y a cadenas de valor de minerales críticos añade mayor complejidad que los métodos tradicionales de proyección no siempre pueden abordar de forma efectiva.

La lógica difusa se inspira en la manera en que los seres humanos razonan cuando no conocen los escenarios y carecen de información, se ha consolidado como una herramienta que modela sistemas complejos donde la información es imprecisa o se carece de su totalidad. Este método se ha aplicado con éxito en sistemas de movilidad eléctrica, como la gestión inteligente de la energía y el

control de vehículos eléctricos, donde ha mostrado capacidad para operar bajo condiciones de incertidumbre e incorporar estrategias de decisión adaptativas frente a enfoques convencionales [7].

Aunque ha mostrado ventajas, existe una brecha en la literatura respecto a la comparación sistemática entre enfoques tradicionales y basados en lógica difusa para planificar la demanda de litio en economías emergentes como la mexicana.

El objetivo de este trabajo es proponer y aplicar un marco metodológico que evalúe la pertinencia del uso de la lógica difusa en la planificación de la demanda de litio asociada a la electromovilidad en México, considerando la calidad, disponibilidad y naturaleza de las variables requeridas para su elaboración.

El camino a la electromovilidad ha incrementado la demanda de litio, ya que es un material necesario en la fabricación de baterías para vehículos eléctricos. En México, la planificación de la demanda de este mineral tiene una problemática ya que no se ha desarrollado un modelo predictivo eficiente que logre estimar la demanda nacional de litio tomando en cuenta variables económicas, tecnológicas, sociales y políticas bajo condiciones de incertidumbre.

Los modelos más usados para la proyección (como modelos deterministas, regresiones lineales o series de tiempo) requieren supuestos de estabilidad, linealidad y disponibilidad de datos completos, condiciones que algunas veces son difíciles de cumplir. En el contexto mexicano, algunas de las variables representativas presentan alta variabilidad, como lo son la adopción de vehículos eléctricos, la expansión de infraestructura de carga, los incentivos fiscales y la regulación del sector energético-minero. De esta manera algunos organismos internacionales han documentado que la evolución y comportamiento de la electromovilidad dependen de factores muchas veces volátiles como precios de minerales críticos, dinámica industrial e instrumentos de política pública, lo que incrementa la incertidumbre en la planeación [1], [3].

En México, el litio fue declarado de utilidad pública mediante la reforma a la Ley Minera de 2022, otorgándole al Estado la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento de este mineral. Estos movimientos estratégicos sugieren la necesidad de implementar herramientas que mejoren la planificación energética e industrial y sirvan como herramientas para la toma de decisiones en torno al desarrollo de las cadenas de valor asociadas al litio y la electromovilidad [8]. Bajo este contexto, se hace evidente la necesidad de un modelo de planificación que integre variables cuantitativas y cualitativas, sin depender de datos perfectos ni relaciones claramente establecidas.

El comportamiento en el gusto y consumo de vehículos eléctricos depende de la coordinación entre múltiples actores e instituciones, cuyos procesos de cambio ocurren de manera gradual y bajo diferentes ritmos de desarrollo, generando escenarios caracterizados por elevados niveles de incertidumbre y complejidad [9].

La dificultad para planificar la demanda de litio no se genera únicamente por la disponibilidad de datos, sino a la naturaleza compleja del sistema analizado. La interacción entre variables económicas, tecnológicas, regulatorias y sociales genera comportamientos dinámicos que evolucionan de manera no lineal y cuya respuesta depende de múltiples procesos interrelacionados. En este tipo de sistemas, pequeñas modificaciones en alguno de sus componentes pueden producir efectos significativos sobre el comportamiento global, lo que incrementa la incertidumbre y limita la capacidad explicativa de modelos construidos bajo supuestos de linealidad y estabilidad [10], [11]. Se vuelve relevante y necesario evaluar, antes de pensar en construir el modelo o proyección, si las características de los datos realmente son útiles para la metodología elegida o se necesita buscar algún enfoque alternativo.

Fundamentación Teórica

Elegir un método predictivo es una decisión metodológica que debe tomar en cuenta las características de la información disponible y no únicamente pensar en el desempeño estadístico que pudiera tener. En la literatura sobre ciencia de datos y pronósticos se reconoce que la utilidad de un modelo depende de la compatibilidad entre los supuestos metodológicos del enfoque seleccionado y la estructura de los datos utilizados para su construcción. Por este motivo, la calidad, disponibilidad y naturaleza de la información son criterios que deben tomarse en cuenta al momento de elegir el método de modelación más apropiado [12], [13].

Factores como valores faltantes, la coexistencia de variables cuantitativas y cualitativas, la heterogeneidad temporal y espacial, la comparabilidad entre fuentes y la interpretabilidad de los resultados condicionan la viabilidad y el uso de diferentes enfoques predictivos. Por ello, autores sostienen que la evaluación previa de estas características es una etapa indispensable antes de desarrollar cualquier proceso de modelación, ya que la estructura de los datos puede limitar o favorecer el desempeño de determinados métodos analíticos [12], [14], [15].

Wang y Strong [16] plantean que la calidad de los datos no debe evaluarse únicamente a partir de su exactitud, sino también considerando su adecuación al contexto y a la tarea para la cual serán utilizados. Así, un conjunto de datos puede estar técnicamente disponible y correcto, pero resultar no suficiente para un propósito analítico específico si presenta limitaciones de relevancia, representación o accesibilidad. Estas ideas sustentan la necesidad de evaluar la información en función de su utilidad para la modelación antes de seleccionar un método predictivo, cuyo principio constituye la base conceptual de la aptitud metodológica analizada en esta investigación.

Este principio conduce al concepto de aptitud metodológica, entendido como el grado de compatibilidad entre las propiedades de la información disponible y los supuestos requeridos por un modelo predictivo. Siguiendo esta línea, la selección metodológica no depende exclusivamente de la sofisticación del algoritmo, sino de su capacidad

para representar adecuadamente el fenómeno de estudio a partir de los datos existentes.

La lógica difusa, propuesta por Zadeh [17], constituye un marco matemático diseñado para representar fenómenos donde la información es imprecisa, incompleta o expresada mediante conceptos lingüísticos. A diferencia de la lógica clásica, que trabaja con valores binarios, la lógica difusa permite modelar grados de pertenencia y construir sistemas de inferencia capaces de integrar variables cuantitativas y cualitativas mediante reglas basadas en conocimiento experto [18]. Esta flexibilidad ha favorecido su aplicación en problemas de control inteligente, gestión energética, apoyo a la decisión y modelación de sistemas complejos caracterizados por relaciones no lineales y elevados niveles de incertidumbre [19], [20], [21].

Bajo esta perspectiva, el presente estudio parte del supuesto de que la selección del método de modelación debe fundamentarse en un análisis previo de la calidad, disponibilidad y naturaleza de los datos. Es por ello que la metodología usada no pretende mostrar la superioridad de la lógica difusa, sino establecer un procedimiento que permita evaluar de forma objetiva su pertinencia en contraste a modelos tradicionales cuando la información disponible presenta incertidumbre, heterogeneidad y coexistencia de variables cuantitativas y cualitativas.

Metodología

A. Diseño y enfoque del estudio

La investigación se desarrolló mediante un diseño no experimental, con alcance descriptivo-analítico y orientación metodológica. El interés del estudio no fue estimar en esta etapa la demanda futura de litio, sino revisar si las características de la información disponible permiten considerar a la lógica difusa como una alternativa para su planificación en México.

Para realizar esta evaluación se siguió un procedimiento organizado en cinco etapas: (1) delimitación y selección de las variables relacionadas con la demanda de litio; (2) elaboración del inventario de datos disponibles; (3) revisión de su calidad y características; (4) construcción del Índice de Aptitud para Modelación Tradicional (IAMT); y (5) comparación metodológica de los enfoques predictivos considerados. Se diseño de esta manera para que cada etapa proporcionara información para la siguiente, de manera que la selección del método no se decidiera antes de conocer las condiciones reales de los datos.

B. Fuentes de información y criterios de selección documental

Para formar el inventario se buscaron datos en fuentes públicas y verificables relacionadas con las variables seleccionadas. Se utilizaron principalmente registros e informes de INEGI, AMIA, SENER, PRODESEN, IEA, IRENA, USGS y la Cámara de Diputados, además de información publicada por asociaciones vinculadas con los sectores automotriz y energético. No toda la información encontrada se incorporó directamente; las fuentes se revisaron considerando su relación con el problema, disponibilidad, calidad y utilidad para la modelación, sobre todo la capacidad de los datos, de acuerdo con los criterios establecidos en la Tabla 1.

C. Delimitación y selección de variables

La identificación de las variables se realizó a partir de una revisión documental de literatura científica e informes técnicos relacionados con electromovilidad, minerales críticos, transición energética y modelación predictiva. Posteriormente, las variables se organizaron en seis dimensiones de análisis: económica, tecnológica, social, política, energética e industrial con el propósito de representar la naturaleza multidimensional de la demanda de litio y considerar la coexistencia de variables cuantitativas, variables proxy e indicadores cualitativos.

La selección final de las 15 variables respondió a criterios metodológicos orientados a garantizar su pertinencia analítica, disponibilidad de información y utilidad para la modelación. Dichos criterios se construyeron a partir de los principios de comprensión de datos propuestos por CRISP-DM, las dimensiones clásicas de calidad de datos y los fundamentos de la selección de variables para modelos predictivos [12], [13], [22]. Los criterios utilizados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Criterios de inclusión de variables.*

Criterio	Justificación metodológica
Relevancia teórica	La variable debe estar respaldada por literatura científica y relacionarse directamente con la demanda de litio, la electromovilidad, la infraestructura energética, la política pública o la aceptación tecnológica.
Disponibilidad pública	La información debe encontrarse en fuentes oficiales, organismos internacionales o bases de datos sectoriales con acceso verificable.
Capacidad explicativa	La variable debe aportar evidencia para explicar directa o indirectamente el comportamiento futuro de la demanda de litio.
Calidad de la información	Debe ser posible evaluar su completitud, consistencia, actualidad y trazabilidad antes de la modelación.
Utilidad para modelación	La variable debe aportar información útil para comparar la pertinencia de enfoques tradicionales y lógica difusa considerando su naturaleza cuantitativa o cualitativa.

Fuente: *Elaboración propia con base en [12], [13], [22].*

D. Construcción del inventario de datos (Data Inventory)

Se elaboró un inventario de datos siguiendo la fase de comprensión de los datos del modelo CRISP-DM. Este modelo establece que, antes de cualquier proceso de modelación, es necesario recopilar los datos iniciales, describir sus características, explorar su contenido y verificar su calidad, con el propósito de comprender su estructura, disponibilidad y limitaciones para el análisis [22].

Esta etapa permitió identificar diferencias en la disponibilidad, consistencia y actualización de la información, aspecto particularmente relevante en el estudio de sistemas emergentes como la electromovilidad, donde la información proviene de múltiples instituciones y presenta distintos niveles de desagregación temporal y espacial. El inventario de datos constituyó la base para la etapa

posterior de auditoría de calidad, ya que permitió identificar las características de cada variable antes de evaluar su aptitud para la modelación predictiva.

E. Auditoría y caracterización de la calidad de datos (Data Audit)

La auditoría de datos no tuvo como objetivo estimar todavía la demanda futura de litio, sino evaluar la calidad, disponibilidad y adecuación metodológica de las variables necesarias para construir un modelo de planificación. Este procedimiento permitió identificar si las condiciones reales de información en México favorecen el uso de modelos clásicos basados en series numéricas completas o si, por el contrario, justifican el empleo de metodologías capaces de incorporar incertidumbre, datos incompletos y variables cualitativas.

La auditoría se fundamentó en dimensiones clásicas de calidad de datos, debido a que la literatura señala que la calidad debe evaluarse en función de atributos como completitud, consistencia y actualidad, ya que estos determinan la capacidad de los datos para soportar análisis y toma de decisiones [12], [16].

En consecuencia, la auditoría se aplicó a cada variable considerando cuatro componentes principales.

F. Completitud y patrón de faltantes

Para cada variable se revisó primero qué cantidad de información estaba realmente disponible respecto de la que se esperaba encontrar para el periodo a analizar. Además de identificar la existencia de datos faltantes, se buscó reconocer la razón de esas ausencias. Este trabajo se basó en tres situaciones: faltantes sin un patrón identificable; faltantes relacionados con el periodo analizado o con la disponibilidad de información de la institución responsable y faltantes estructurales, cuando la variable no cuenta con un mecanismo continuo de registro.

Esta revisión permitió diferenciar entre variables que podían formar una serie suficientemente completa y aquellas cuya información requería mayor precaución antes de ser incorporada a un modelo convencional. Los resultados obtenidos en este criterio fueron utilizados posteriormente en el cálculo del IAMT.

La evaluación de la completitud constituye un paso previo indispensable en cualquier proceso de modelación, ya que la cantidad y distribución de los datos disponibles condicionan la selección del método analítico y la confiabilidad de los resultados.

G. Consistencia temporal y cambios estructurales

Este aspecto se trabajó observando el comportamiento de las series disponibles del periodo de análisis. Se utilizaron inspecciones gráficas y comparaciones anuales para identificar interrupciones, cambios bruscos o modificaciones que pudieran relacionarse con nuevas formas de registrar la información, cambios en las fuentes o acontecimientos externos. A partir de esta revisión se determinó si cada variable mantenía una estructura temporal estable para su posible uso en un proceso de modelación.

La literatura sobre pronósticos señala que la estructura temporal de los datos constituye un elemento determinante para la selección del método de predicción, ya que tendencias, cambios abruptos, variaciones en la periodicidad o alteraciones en el comportamiento histórico pueden afectar el desempeño de los modelos basados en series de tiempo [13].

H. Granularidad temporal y espacial

Se evaluó la granularidad temporal y espacial de las variables con el propósito de identificar posibles incompatibilidades derivadas de diferencias en la frecuencia de actualización (mensual, trimestral, anual o irregular) y en el nivel de agregación geográfica (nacional o estatal). Este análisis permitió determinar la factibilidad de integrar información procedente de distintas fuentes dentro de un mismo esquema de modelación.

La literatura sobre pronósticos señala que la frecuencia temporal de las series constituye un elemento determinante para la selección del método de análisis, ya que la combinación de series con diferentes periodicidades puede requerir procesos de agregación, desagregación o interpolación, introduciendo supuestos adicionales que afectan la interpretación de los resultados [13]. De manera similar, las diferencias entre coberturas nacionales y estatales pueden generar problemas en la integración directa de la información procedente de distintas instituciones [12].

I. Comparabilidad y heterogeneidad de escalas

La comparabilidad se revisó identificando las unidades de medida, las escalas y niveles de agregación usados en cada variable. Este paso permitió reconocer qué datos podían integrarse directamente y cuáles requerirían algún tipo de transformación o estandarización antes de utilizarlos en un mismo modelo. La revisión fue importante porque el inventario combina información de distintas instituciones y variables tanto cuantitativas como cualitativas, cuyas diferencias de escala pueden afectar la consistencia del análisis [12], [13]. De acuerdo a cómo se encuentra disponible la información, las quince variables se organizaron en tres tipos:

Tipo A: Variables con registros cuantitativos directos y continuidad suficiente para su uso en modelos convencionales.

Tipo B: Variables cuantitativas utilizadas como aproximación al fenómeno de interés o cuya información presenta restricciones de cobertura, continuidad o periodicidad.

Tipo C: Variables cualitativas u ordinales expresadas mediante categorías, niveles de intensidad o valoraciones que requieren una transformación previa para incorporarse a modelos estadísticos convencionales.

Esta clasificación describe la naturaleza de la información y no determina la puntuación del IAMT. El índice se calcula de manera independiente a partir de la completitud, consistencia temporal, granularidad y comparabilidad observadas en cada variable.

J. Matriz de aptitud metodológica ("method fit")

Con el fin de evaluar la conveniencia de distintos enfoques de modelación y usando los hallazgos de la auditoría y del análisis descriptivo, se elaboró una matriz que incluyó criterios como: tolerancia a faltantes, capacidad de integrar variables cualitativas, interpretabilidad para toma de decisiones, flexibilidad para escenarios y sensibilidad a cambios estructurales.

Este paso es necesario porque la literatura de calidad de datos sostiene que la validez de un modelo depende de la calidad y adecuación del dato para el propósito del análisis [12].

K. Construcción del Índice de Aptitud para Modelación Tradicional (IAMT)

Con el propósito de sintetizar los resultados de la auditoría, se construyó el Índice de Aptitud para Modelación Tradicional (IAMT), expresado en una escala ordinal de 1 a 5. Para hacer reproducible la asignación de las puntuaciones, el índice se calculó a partir de cuatro criterios previamente evaluados: completitud, consistencia temporal, granularidad y comparabilidad. Cada criterio recibió un valor de 1 cuando presentó una condición favorable para la modelación convencional y 0 cuando dicha condición no se cumplió. El IAMT no mide la importancia explicativa de cada variable, sino su compatibilidad con las condiciones requeridas para su incorporación directa en modelos tradicionales de pronóstico. Las reglas operativas de construcción pueden observarse en la Tabla 2.

Tabla 2. *Reglas operativas para la construcción del Índice de Aptitud para Modelación Tradicional (IAMT).*

Criterio	Condición favorable = 1	Condición no favorable = 0
Completitud (C)	Completitud alta	Completitud media o baja
Consistencia temporal (CT)	Consistencia alta	Consistencia media o baja
Granularidad (G)	Periodicidad regular mensual, trimestral o anual y cobertura nacional o directamente agregable al nivel nacional	Periodicidad irregular o discontinua, o cobertura no directamente compatible con el análisis nacional
Comparabilidad (CP)	Comparabilidad alta	Comparabilidad media o baja

Fuente: *Elaboración propia a partir de los criterios de auditoría de calidad de datos definidos en esta investigación.*

El IAMT se calculó mediante la ecs. (1):

$$IAMT=1+C_i+CT_i+G_i+CP_i \qquad (1)$$

Donde C_i, CT_i, G_i y CP_i pueden adoptar valores de 0 o 1 de acuerdo con las reglas establecidas en la Tabla 2. La incorporación de una unidad como valor base permite obtener una escala de 1 a 5. De esta manera, cuatro condiciones favorables corresponden a IAMT = 5; tres a IAMT = 4; dos a IAMT = 3; una a IAMT = 2; y ninguna a IAMT = 1.

Explicado lo anterior, los valores 5 y 4 representan aptitud alta o buena; 3, aptitud media; 2, aptitud baja; y 1, aptitud muy baja para la incorporación directa de la variable en modelos tradicionales.

L. Síntesis del marco metodológico propuesto

Como etapa final del procedimiento, se integraron los resultados obtenidos durante la delimitación de variables, el inventario de datos, la auditoría de calidad y la construcción del IAMT con el propósito de establecer un criterio sistemático para la selección del enfoque predictivo.

La síntesis de estos componentes constituye el marco metodológico propuesto en esta investigación, el cual permite seleccionar con un mayor fundamento el enfoque predictivo más adecuado antes del desarrollo del modelo.

Resultados

A. Caracterización de las variables estratégicas para la planificación de la demanda de litio

Como resultado del inventario de datos elaborado durante la fase de comprensión de la información, se identificaron quince variables estratégicas relacionadas con la planificación de la demanda de litio asociada a la electromovilidad en México. Las variables fueron organizadas en dimensiones de análisis: económica, tecnológica, energética, industrial, política y social, con el propósito de representar la naturaleza del sistema y los distintos factores que inciden en su evolución.

La Tabla 3 permitió concentrar en una misma estructura la información disponible para las quince variables seleccionadas. Para cada una se registraron la fuente, periodicidad, cobertura geográfica, periodo histórico y tipo de medición. Esta organización permitió identificar desde el inicio diferencias importantes entre los datos disponibles y sirvió como punto de partida para la auditoría posterior.

La distribución de las variables confirma que la demanda de litio no puede analizarse únicamente desde el comportamiento del mercado automotriz. De las quince variables seleccionadas, algunas corresponden directamente a ventas, precios o producción, mientras que otras representan infraestructura, capacidad energética, inversión, regulación y aceptación social. Por esta razón, el fenómeno analizado integra factores económicos, tecnológicos, energéticos, industriales, políticos y sociales.

También se encontraron diferencias en la forma en que puede medirse cada variable. Cinco de las quince variables correspondieron a registros cuantitativos directos (tipo A), siete se clasificaron como variables proxy (tipo B) y tres como cualitativas u ordinales (tipo C). En conjunto, diez variables (66.7 %) no cuentan con una medición cuantitativa directa del fenómeno que representan. Este resultado es relevante porque muestra que una parte importante de la información necesaria para la planificación debe obtenerse mediante aproximaciones indirectas, documentos institucionales o información de percepción.

Tabla 3. *Variables Estratégicas de Demanda de Litio.*

ID	Variable	Dimensión	Definición operativa	Fuente primaria de datos	Periodicidad	Cobertura	Tipo
V1	Ventas de vehículos eléctricos e híbridos	Económica	Unidades vendidas por periodo	INEGI – Registro Administrativo de la Industria Automotriz de Vehículos Ligeros (RAIAVL)	Mensual	Nacional	A
V2	Parque vehicular electrificado	Económica	Total de vehículos eléctricos/híbridos en circulación	INEGI – Estadística de Vehículos de Motor Registrados en Circulación (VMRC)	Anual	Nacional	A
V3	Precio internacional del litio	Económica	Precio promedio anual o índice	International Energy Agency (IEA) / U.S. Geological Survey (USGS)	Anual	Global	A
V4	Precio promedio de vehículos eléctricos	Económica	Precio medio por segmento (proxy)	Reportes sectoriales/IEA	Anual	Nacional	B
V5	Número total de estaciones/puntos de carga	Tecnológica	Total de cargadores instalados	Secretaría de Energía(SENER) / IEA	Irregular	Nacional	B
V6	Infraestructura de carga por entidad	Tecnológica	Cargadores por estado	Electromovilidad Asociación (EMA).	Irregular	Estatal	B
V7	Capacidad instalada del sistema eléctrico	Energía	MW instalados por año	SENER / Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN)	Anual	Nacional	B
V8	Participación de energías limpias (%)	Energía	% generación limpia en el mix	SENER/ Sistema de Información Energética (SIE)	Anual	Nacional	A
V9	Producción nacional de vehículos	Industrial	Producción total de vehículos	INEGI – RAIAVL	Mensual	Nacional	A
V10	Producción/ensamble de VE (proxy)	Industrial	Producción de unidades electrificadas	Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA)	Irregular	Nacional	B
V11	Inversión anunciada en electromovilidad	Industrial	USD en anuncios/inversión	Secretaría de Economía (Data México) / Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)	Irregular	Nacional	B
V12	Capacidad instalada para la manufactura de baterías de ion-litio	Industrial	Plantas / capacidad (proxy)	IEA	Irregular	Nacional	B
V13	Intensidad de los incentivos públicos para la adopción de vehículos eléctricos	Política	Bajo/medio/alto por periodo	Diario Oficial de la Federación (DOF) / IEA/CEPAL	Discontinua	Nacional	C
V14	Certidumbre regulatoria electromovilidad	Política	Alta/media/baja (índice cualitativo)	DOF/SENER	Discontinua	Nacional	C
V15	Intención de adopción de vehículos eléctricos	Social	% intención de compra (proxy)	Deloitte	Irregular	Nacional	C

Fuente: *Elaboración propia con base en [1], [6], [12], [13], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [31].*

Las diferencias aparecen en la periodicidad y cobertura de los registros. Las ventas de vehículos eléctricos, la producción nacional de vehículos y el precio internacional del litio cuentan con información periódica relativamente consolidada. En cambio, otras variables dependen de publicaciones irregulares, reportes estatales, documentos normativos o levantamientos esporádicos. Esto genera series con frecuencias y niveles de agregación distintos, lo que dificulta su integración directa dentro de un mismo esquema de modelación.

B. Auditoría de calidad de los datos para la planificación de la demanda de litio.

La auditoría permitió identificar diferencias claras en las condiciones de información de las quince variables. Para su evaluación se consideraron completitud, consistencia temporal, granularidad y comparabilidad, los cuatro criterios definidos previamente en la metodología. Los resultados obtenidos para cada variable se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. *Resultados de la auditoría de calidad de datos de las variables estratégicas para la planificación de la demanda de litio.*

Variable	Completitud esperada	Riesgo de faltantes	Consistencia temporal	Granularidad temporal	Granularidad espacial	Comparabilidad	Riesgo para modelos tradicionales
V1 Ventas VE/híbridos	Alta	Bajo	Alta	Mensual	Nacional	Alta	Bajo
V2 Parque electrificado	Media	Medio	Alta	Anual	Nacional	Media	Medio
V3 Precio litio	Alta	Bajo	Alta	Anual	Global	Alta	Medio
V4 Precio VE	Baja	Alto	Baja	Anual	Nacional	Baja	Alto
V5 Total cargadores	Media	Medio	Media	Irregular	Nacional	Media	Alto
V6 Carga por entidad	Baja	Alto	Baja	Irregular	Estatal	Baja	Muy alto
V7 Capacidad eléctrica	Alta	Bajo	Alta	Anual	Nacional	Alta	Bajo
V8 Energía limpia (%)	Alta	Bajo	Alta	Anual	Nacional	Alta	Bajo
V9 Producción vehicular	Alta	Bajo	Alta	Mensual	Nacional	Alta	Bajo
V10 Producción VE	Baja	Alto	Baja	Irregular	Nacional	Baja	Muy alto
V11 Inversión anunciada	Baja	Alto	Baja	Irregular	Nacional	Baja	Muy alto
V12 Capacidad baterías	Baja	Alto	Baja	Irregular	Nacional	Baja	Muy alto
V13 Incentivos	Baja	Muy alto	Baja	Discontinua	Nacional/Estatal	Baja	Muy alto
V14 Certidumbre regulatoria	Baja	Muy alto	Baja	Discontinua	Nacional	Baja	Muy alto
V15 Intención de adopción de vehículos eléctricos	Baja	Alto	Baja	Irregular	Nacional	Baja	Muy alto

Fuente: *Elaboración propia con base en la auditoría de calidad de datos realizada a partir de información de [1], [6], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], siguiendo los criterios metodológicos [12], [13], [16], [22].*

Los resultados muestran que las condiciones de información no son homogéneas entre las variables. Algunas cuentan con registros e información completa, actualización regular y son comparables, mientras que otras presentan datos incompletos, periodicidad irregular, diferencias de cobertura o mediciones indirectas. Estas diferencias explican los distintos niveles de riesgo observados para su incorporación en modelos tradicionales.

Las mejores condiciones se observaron principalmente en V1, V3, V7, V8 y V9, que presentan registros periódicos y niveles altos de consistencia y comparabilidad. V2 mantiene una condición intermedia debido a su completitud y comparabilidad medias. En el extremo contrario, V6 y V10–V15 concentran las principales restricciones, asociadas con información irregular o discontinua y baja comparabilidad. V5 también presenta restricciones, aunque con valores intermedios de completitud y consistencia.

C. Índice de Aptitud para Modelación Tradicional.

Los resultados del IAMT muestran diferencias en la capacidad de las variables para su incorporación directa en modelos convencionales de pronóstico. Como se observa en la Tabla 5, cuatro variables alcanzaron la puntuación de 5: ventas de vehículos eléctricos e híbridos, capacidad instalada del sistema eléctrico, participación de energías limpias y producción nacional de vehículos. Estas variables tienen al mismo tiempo condiciones de completitud, consistencia temporal, granularidad y comparabilidad.

El precio internacional del litio obtuvo un IAMT de 4 debido a que presenta condiciones favorables de completitud, consistencia temporal

y comparabilidad, aunque su cobertura global limita su correspondencia directa con la escala nacional del análisis. El parque vehicular electrificado alcanzó un IAMT de 3, al cumplir las condiciones de consistencia temporal y granularidad, mientras que el precio promedio de vehículos eléctricos obtuvo un IAMT de 2. La mayor concentración se observa en el nivel de muy baja aptitud, donde ocho variables obtuvieron un IAMT de 1.

Tabla 5. *Índice de Aptitud para Modelación Tradicional (IAMT) de las variables estratégicas para la planificación de la demanda de litio.*

Variable	Tipo	IAMT	Justificación del IAMT
Ventas de vehículos eléctricos e híbridos	A	5	Cumple las cuatro condiciones favorables evaluadas
Parque vehicular electrificado	A	3	Presenta consistencia temporal y granularidad favorables, con completitud y comparabilidad medias
Precio internacional del litio	A	4	Presenta alta completitud, consistencia y comparabilidad; su cobertura global limita la compatibilidad espacial
Precio promedio de vehículos eléctricos	B	2	Presenta granularidad compatible, pero baja completitud, consistencia y comparabilidad
Número total de estaciones de carga	B	1	Presenta condiciones medias de calidad y periodicidad irregular
Infraestructura de carga por entidad	B	1	Presenta baja calidad, periodicidad irregular y cobertura estatal
Capacidad instalada del sistema eléctrico	B	5	Cumple las cuatro condiciones favorables evaluadas
Participación de energías limpias (%)	A	5	Cumple las cuatro condiciones favorables evaluadas
Producción nacional de vehículos	A	5	Cumple las cuatro condiciones favorables evaluadas
Producción/ensamble de VE	B	1	Presenta baja completitud, consistencia y comparabilidad, además de periodicidad irregular
Inversión anunciada en electromovilidad	B	1	Presenta información irregular y baja comparabilidad
Capacidad nacional de manufactura de baterías	B	1	Presenta información irregular y baja comparabilidad
Intensidad de incentivos para VE	C	1	Presenta información discontinua y baja comparabilidad
Certidumbre regulatoria	C	1	Presenta información discontinua y baja comparabilidad
Intención de adopción de VE	C	1	Presenta información irregular y baja comparabilidad

Fuente: *Elaboración propia con base en los resultados de la auditoría de calidad de datos (Tabla 4) y en las reglas operativas para la construcción del IAMT establecidas en la Tabla 2.*

Nota: *El IAMT se obtuvo mediante* $IAMT=1+C_i+CT_i+G_i+CP_i$*, conforme a las reglas establecidas en la Tabla 2.*

Una observación relevante es que las variables con menor puntuación corresponden a aquellas que representan los principales factores estratégicos para explicar la evolución de la electromovilidad. Mientras las variables económicas tradicionales presentan mejores condiciones estadísticas, los factores asociados con políticas públicas, infraestructura, desarrollo industrial y comportamiento social muestran mayores limitaciones para ser tratados mediante modelos convencionales, a pesar de su reconocida influencia sobre la adopción de vehículos eléctricos y, en consecuencia, sobre la demanda futura de litio [1], [3].

Los resultados anteriores muestran que la principal limitación para la planificación de la demanda de litio no radica en la disponibilidad de información, sino también en la naturaleza heterogénea de las variables que explican el fenómeno. Por lo anterior, el IAMT proporciona una evidencia metodológica de que la selección del modelo predictivo debe considerar no solo la existencia de datos, sino también su estructura, calidad y grado de incertidumbre. Estos resultados constituyen el fundamento para evaluar, en el siguiente apartado, la conveniencia de emplear un enfoque basado en lógica difusa para integrar información cuantitativa y cualitativa dentro de un mismo esquema de planificación.

D. Comparación metodológica entre enfoques tradicionales y lógica difusa para la planificación de la demanda de litio

La comparación metodológica se realizó contrastando las capacidades y los requerimientos de cada enfoque reportados en la literatura con las condiciones identificadas durante el inventario de variables, la auditoría de calidad de datos y el IAMT. La valoración tuvo un carácter cualitativo-documental y no representa una comparación empírica del desempeño predictivo de los modelos. En cuanto a su interpretación, una valoración alta representa una mayor capacidad del enfoque para responder al criterio analizado.

Tabla 6. *Comparación metodológica de enfoques predictivos para la planificación de la demanda de litio bajo condiciones de información heterogénea.*

Criterio Metodológico	Métodos estadísticos convencionales	Series de Tiempo	Aprendizaje Automático	Lógica difusa
Tolerancia a datos incompletos	Baja	Baja	Media	Alta
Capacidad para integrar variables cualitativas	Baja	Baja	Media	Alta
Capacidad para integrar indicadores proxy	Baja	Baja	Media	Alta
Tolerancia a la incertidumbre	Baja	Baja	Media	Alta
Capacidad para modelar relaciones no lineales	Baja	Baja	Alta	Alta
Tolerancia a la inestabilidad temporal	Baja	Muy baja	Media	Alta
Interpretabilidad para política pública	Alta	Media	Media	Alta
Capacidad para construir escenarios	Baja	Baja	Media	Alta
Adaptabilidad a cambios regulatorios	Baja	Baja	Media	Alta
Correspondencia con el sistema de información analizado	Baja	Baja	Media	Alta

Fuente: *Elaboración propia con base en [7], [12], [13], [17], [18], [22], [30], y en los resultados del inventario de variables, la auditoría de calidad de datos y el IAMT.*

Nota: *Las valoraciones representan una comparación cualitativa y documental de las características metodológicas de los enfoques y no representan medidas de desempeño predictivo. Alta indica una mayor capacidad para responder al criterio evaluado; Media representa una capacidad parcial o dependiente de las características de los datos; Baja indica limitaciones importantes; y Muy baja representa una capacidad especialmente limitada frente al criterio considerado.*

Como se observa en la Tabla 6, los enfoques presentan diferentes niveles de correspondencia con las condiciones de información identificadas. Los métodos estadísticos convencionales y las series de tiempo muestran mayores requerimientos respecto a completitud y estabilidad de la información, mientras que el aprendizaje automático y la lógica difusa presentan mayor flexibilidad ante determinadas condiciones de heterogeneidad, no linealidad e incertidumbre.

La auditoría y el IAMT mostraron que nueve de las quince variables analizadas (60 %) presentan aptitud baja o muy baja para su incorporación directa en modelos tradicionales, principalmente por limitaciones de completitud, consistencia temporal, granularidad o comparabilidad. Este resultado constituye el contexto a partir del cual se interpreta la comparación metodológica presentada en la Tabla 6.

Los métodos estadísticos convencionales y las series de tiempo presentan ventajas cuando se dispone de información cuantitativa, completa y temporalmente consistente. Por su parte, los modelos de aprendizaje automático ofrecen mayor capacidad para representar relaciones no lineales y cierta tolerancia a información heterogénea.

La lógica difusa presenta características metodológicas compatibles con varias de las condiciones identificadas en este estudio, particularmente la coexistencia de información cuantitativa y cualitativa, incertidumbre y relaciones no lineales. Esta correspondencia metodológica no implica superioridad predictiva, ya que el presente estudio no desarrolla ni compara empíricamente el desempeño de los modelos, sino que evalúa su pertinencia en función de las características de la información disponible. La Tabla 7 muestra una síntesis del trabajo realizado.

Tabla 7. *Síntesis del marco metodológico propuesto.*

Etapa metodológica	Hallazgo principal	Implicación para la modelación
Inventario de variables	La demanda de litio depende de variables económicas, tecnológicas, industriales, regulatorias y sociales.	El problema posee naturaleza multidimensional.
Auditoría de calidad de datos	Se identificó heterogeneidad en disponibilidad, periodicidad y comparabilidad de la información.	Existen limitaciones para modelos que requieren datos homogéneos.
Clasificación A, B y C	Predominan variables proxy y cualitativas en dimensiones estratégicas.	Se requiere integrar distintos tipos de información.
IAMT	Más de la mitad de las variables presentan baja aptitud para modelación tradicional.	Los modelos clásicos presentan limitaciones ante las condiciones de información identificadas.
Comparación metodológica	La lógica difusa integra variables cuantitativas, cualitativas e incertidumbre.	Presenta características metodológicas compatibles con las condiciones de información identificadas para la planificación de la demanda de litio.

Fuente: *Elaboración propia con información de los resultados.*

La integración de los resultados obtenidos en las diferentes etapas metodológicas permite observar una secuencia lógica de evidencia. El inventario de variables mostró que la demanda de litio depende de factores de naturaleza diversa; la auditoría de calidad confirmó la existencia de información heterogénea e incompleta; el IAMT sintetizó dichas limitaciones en un indicador de aptitud metodológica; y la comparación entre enfoques mostró que la lógica difusa presenta una elevada correspondencia metodológica con las características del sistema de información analizado. En conjunto, estos resultados muestran que la consideración de la lógica difusa no deriva de una preferencia teórica, sino de las propiedades observadas en los datos disponibles para México.

Discusión

A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que uno de los principales problemas para planificar la demanda de litio en México no es solamente identificar las variables que pueden influir en ella, sino contar con información que realmente pueda ser utilizada dentro de un modelo. De las quince variables analizadas, nueve presentaron una aptitud baja o muy baja para su incorporación directa en modelos tradicionales. Este resultado es de importancia porque varias de estas variables representan aspectos importantes para el desarrollo de la electromovilidad, como la infraestructura de carga, la inversión, los incentivos públicos, la regulación y la aceptación de los vehículos eléctricos. Esto coincide con lo analizado en la literatura, ya que se reconoce que la evolución de la electromovilidad depende de factores tecnológicos, industriales, regulatorios y de mercado que están en constante cambio y pueden modificarse rápidamente [1], [3].

Otro aspecto relevante durante el análisis es que disponer de información no significa necesariamente que ésta tenga las condiciones adecuadas para utilizarse en una proyección. Algunas variables cuentan con registros relativamente completos y periódicos, mientras que otras dependen de publicaciones irregulares, documentos normativos o aproximaciones indirectas. En este sentido, los resultados coinciden con Batini y Scannapieco [12] y con Wang y Strong [16], quienes plantean que la calidad de los datos debe analizarse tomando en cuenta el propósito para el cual serán utilizados. De igual manera, lo señalado por Hyndman y Athanasopoulos [13] ayuda a entender por qué las diferencias en periodicidad, estabilidad y estructura temporal pueden convertirse en una limitación cuando se quiere integrar información de distintas fuentes a un mismo trabajo de pronóstico.

El marco metodológico propuesto aporta una contribución, ya que integra etapas secuenciales. Respecto a otros trabajos que comparan algoritmos a partir de métricas de error, este estudio se ubica en una fase previa, ya que evalúa la pertinencia del método antes de su aplicación empírica. Lo anterior es importante porque evita asumir que todos los modelos predictivos son igualmente adecuados para contextos con datos incompletos, variables cualitativas y cambios regulatorios.

La aplicación del IAMT también permitió encontrar un resultado que considero importante para la propuesta metodológica. El hecho de que una variable sea directa, proxy o cualitativa no determina por sí solo si puede o no incorporarse a un modelo tradicional. Por ejemplo, la

capacidad instalada del sistema eléctrico (V7), aunque fue clasificada como variable tipo B, alcanzó un IAMT de 5 porque presentó condiciones favorables de completitud, consistencia temporal, granularidad y comparabilidad. En cambio, otras variables del mismo tipo, como la producción de vehículos eléctricos (V10), la inversión anunciada en electromovilidad (V11) y la capacidad de manufactura de baterías (V12), obtuvieron un IAMT de 1. En estos casos, el problema se relaciona principalmente con la irregularidad y la baja comparabilidad de la información. Por esta razón, la clasificación A, B o C ayuda a conocer la naturaleza de la variable, pero es la evaluación de sus condiciones reales la que permite determinar su aptitud para la modelación tradicional. Esto muestra que algunas de las variables más importantes para explicar la demanda de litio son precisamente las más difíciles de incorporar en modelos tradicionales.

Estos resultados permiten entender por qué se consideró la lógica difusa como una alternativa dentro del marco propuesto. Algunas de las variables que presentan mayores restricciones para los modelos tradicionales son precisamente aquellas que no pueden expresarse fácilmente mediante una serie numérica continua. La certidumbre regulatoria, la intensidad de los incentivos o incluso algunos aspectos relacionados con la intención de adopción pueden presentarse mediante categorías, niveles o valoraciones. La propuesta de Zadeh [17] permite trabajar con este tipo de información mediante grados de pertenencia y conceptos lingüísticos. En este caso, la ventaja no estaría en sustituir automáticamente los modelos tradicionales, sino en contar con una alternativa capaz de incorporar información que de otra manera tendría que eliminarse o transformarse de manera considerable. Por lo anterior, los resultados muestran una correspondencia metodológica favorable entre las condiciones encontradas en los datos y las características de la lógica difusa, aunque todavía no puede hablarse de una superioridad predictiva.

Los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el alcance de esta investigación. El marco fue aplicado únicamente a la información disponible para analizar la electromovilidad y la demanda de litio en México, por lo que todavía sería necesario comprobar su comportamiento en otros problemas relacionados con minerales críticos o transición energética. También queda pendiente contrastar los valores obtenidos mediante el IAMT con el desempeño real de diferentes modelos. Este paso permitiría conocer si una variable con mayor puntuación en el índice efectivamente presenta mejores condiciones cuando se incorpora a un modelo predictivo y, al mismo tiempo, comparar el comportamiento de modelos tradicionales, técnicas de aprendizaje automático y sistemas basados en lógica difusa.

Conclusiones

El desarrollo de esta investigación permitió comprobar que la planificación de la demanda de litio asociada a la electromovilidad no siempre debe iniciar con la elección de un modelo predictivo. Antes de llegar a esa etapa es necesario conocer qué información existe, cómo se encuentra disponible y qué tan compatible resulta con los requerimientos del método que se pretende utilizar. Este punto adquiere especial importancia en el caso de México, donde las variables necesarias que modelan el fenómeno provienen de fuentes, escalas y formas de medición diferentes.

Puede calificarse como principal aporte del trabajo al marco metodológico desarrollado para ordenar la evaluación previa. La combinación del inventario de variables, la auditoría de calidad de datos, la clasificación de la información y el IAMT permite pasar de una apreciación general sobre la existencia de datos a una valoración más explícita de condiciones para la modelación. De esta forma, la decisión de qué metodología se debe usar, deja de depender de qué modelo parece más sofisticado o qué técnica ofrece mejores resultados y comienza a sustentarse en las características reales de la información con la que se cuenta.

Un resultado especialmente importante es que algunas de las variables más necesarias para comprender el desarrollo futuro de la electromovilidad son también las que presentan mayores dificultades para ser incorporadas directamente en esquemas tradicionales. Factores relacionados con infraestructura, inversión, regulación, incentivos y comportamiento social no deberían excluirse únicamente porque su información sea irregular, indirecta o cualitativa. Por el contrario, esta condición obliga a buscar formas de modelación capaces de conservar su significado dentro del análisis. Es precisamente en este punto donde la lógica difusa adquiere interés para una siguiente etapa de la investigación, no como una solución previamente elegida, sino como una alternativa cuya pertinencia surge de las condiciones encontradas en los datos.

El paso siguiente será llevar este marco a la modelación y comprobar empíricamente si la correspondencia metodológica identificada se genera un mejor desempeño al realizar predicciones. Esto permitirá contrastar la lógica difusa con modelos tradicionales y técnicas de aprendizaje automático, así como valorar el comportamiento del IAMT en otros problemas vinculados con minerales críticos y transición energética. Sin embargo, el resultado alcanzado hasta este momento deja una enseñanza para el caso del litio: antes de preguntar qué modelo utilizar, es necesario preguntarse si los datos disponibles realmente permiten utilizarlo.

Referencias

[1] International Energy Agency. (2024). Global EV Outlook 2024: Moving towards increased affordability. IEA. Extraído de: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. IPCC. Extraído de: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

[3] International Renewable Energy Agency. (2024). Critical materials: Batteries for electric vehicles. IRENA. Extraído de: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Critical_materials_Batteries_for_EVs_2024.pdf

[4] International Energy Agency. (2023). Critical Minerals Market Review 2023. IEA. Extraído de: https://iea.blob.core.windows.net/assets/c7716240-ab4f-4f5d-b138-291e76c6a7c7/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf

[5] World Bank. (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. World Bank. Extraído de: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099052423172525564/pdf/P16627806f5aa400508f8c0bdcba0878a3e.pdf
[6] Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2024). Minerales críticos para la transición energética y la electromovilidad: oportunidades para el desarrollo económico con desafíos socioambientales. Extraído de: https://www.cepal.org/es/enfoques/minerales-criticos-la-transicion-energetica-la-electromovilidad-oportunidades-desarrollo
[7] Siddula, S., Yashwanth, V., Kumar, V. C., Raju, P., Bhavani, V., & Veera Sivakumar, C. H. (2024). Electric Vehicle Energy Management System Using Fuzzy Logic Controller. Proceedings of the Fifth International Conference on Computer and Communication Technologies.Springer Nature Singapore. Extraído de: https://www.researchgate.net/publication/378629750_Electric_Vehicle_Energy_Management_System_Using_Fuzzy_Logic_Controller
[8] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022). Ley Minera. Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentarios. Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de abril de 2022. Extraído de: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LMin.pdf
[9] Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., & Sorrell, S. (2017). Sociotechnical transitions for deep decarbonization. *Science, 357*(6357), 1242–1244. https://doi.org/10.1126/science.aao3760
[10] Mitchell, M. (2009). Complexity: A Guided Tour. Oxford University Press. Extraído de: https://home.iscte-iul.pt/~jmal/mcc/Complexity_-_A_Guided_Tour.pdf
[11] Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Irwin/McGraw-Hill. Extraído de: https://www.researchgate.net/publication/44827001_Business_Dynamics_System_Thinking_and_Modeling_for_a_Complex_World
[12] Batini, C., & Scannapieco, M. (2006). Data quality: Concepts, methodologies and techniques. Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-33173-5
[13] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). Forecasting: Principles and Practice (3rd ed.). OTexts. https://otexts.com/fpp3/
[14] Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). Applied Predictive Modeling. Springer. Extraído de: https://mathematics.foi.hr/Rprojekti/knjige/applied-predictive-modeling-max-kuhn-kjell-johnson.pdf
[15] Domingos, P. (2012). A few useful things to know about machine learning. Communications of the ACM, *55*(10), 78–87. Extraído de: https://homes.cs.washington.edu/~pedrod/papers/cacm12.pdf
[16] Wang, R. Y., & Strong, D. M. (1996). Beyond accuracy: What data quality means to data consumers. Journal of Management Information Systems, 12(4), 5–33. https://doi.org/10.1080/07421222.1996.11518099
[17] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, *8*(3), 338–353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X
[18] Ross, T. J. (2010). Fuzzy Logic with Engineering Applications (3rd ed.). John Wiley & Sons. Extraído de: https://pzs.dstu.dp.ua/logic/bibl/engineering.pdf
[19] Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Prentice Hall. Extraído de: https://teachmint.storage.googleapis.com/public/e3219b85-c5f1-4f8b-afac-bd53ea098aee.pdf
[20] Pedrycz, W., & Gomide, F. (2007). Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing. John Wiley & Sons. Extraído de:https://www.cic.ipn.mx/~pescamilla/SistInt/PedryczandGomide2007.pdf
[21] Zimmermann, H.-J. (2010). Fuzzy Set Theory—and Its Applications (4th ed.). Springer. Extraído de: https://kashanu.ac.ir/Files/Content/H_J_%20Zimmermann%20%20(auth_)%20Fuzzy%20Set%20Theory%E2%80%94and%20Its%20Applications%20%202001.pdf
[22] CRISP-DM Consortium. (2000). CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide. CRISP-DM Consortium. Extraído de: https://public.dhe.ibm.com/software/analytics/spss/documentation/modeler/14.2/es/CRISPDM.pdf
[23] U.S. Geological Survey. (2024). Mineral Commodity Summaries 2024: Lithium. U.S. Department of the Interior. Extraído de: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf
[24] Secretaría de Energía. (2024). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024–2038 *(PRODESEN)*. Gobierno de México. Extraído de: https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2024-2038
[25] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). Estadísticas de Vehículos de Motor Registrados en Circulación *(VMRC)*. Extraído de: https://www.inegi.org.mx/programas/vehiculosmotor/
[26] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). Registro Administrativo de la Industria Automotriz de Vehículos Ligeros *(RAIAVL)*. Extraído de: https://www.inegi.org.mx/datosprimarios/iavl/
[27] International Energy Agency. (2022). Global Supply Chains of EV Batteries. IEA. Extraído de: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4eb8c252-76b1-4710-8f5e-867e751c8dda/GlobalSupplyChainsofEVBatteries.pdf
[28] Deloitte. (2024). 2024 Global Automotive Consumer Study. Deloitte Insights. Extraído de: https://www.deloitte.com/ce/en/industries/automotive/perspectives/global-automotive-consumer-study.html
[29] Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). Effective Carbon Rates 2023. Extraído de: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/11/effective-carbon-rates-2023_a0dc16cc/b84d5b36-en.pdf
[30] Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45*(1),* 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324
[31] Asociación Mexicana de la Industria Automotriz. (2026). Reporte de venta de vehículos híbridos y eléctricos a mayo de 2026. Extraído de: https://amia.com.mx/publicaciones/

GEOVOLTAICA
Revista de Energía y Sostenibilidad