

Aplicación de Sistemas de Control con Inteligencia Artificial para Optimizar la Conversión de Energías Renovables

Hugo Beatriz-Cuellar *, Jesús de la Cruz-Alejo, Isabel de la Luz Membrillo-Venegas

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia: 202322187@tese.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 20 de abril de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 26 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.442>

Resumen: Este artículo presenta una revisión de la literatura de las características de diferentes sistemas de control basados en inteligencia artificial, orientados a mejorar la eficiencia y fomentar el uso de sistemas de energías renovables. Se describen las características fundamentales de las energías renovables, así como sus principales desventajas. Los sistemas de control propuestos incluyen la lógica difusa, las redes neuronales artificiales, el control neurodifuso y algunos algoritmos de optimización inspirados en la naturaleza, cuyas características y requerimientos para su aplicación en sistemas de energías renovables son detalladamente descritos. En este sentido, se expone el proceso de modelado de un sistema, así como los requerimientos para el diseño e implementación en software o hardware de dichos sistemas de control. Además, se presentan las principales ventajas y beneficios del uso de sistemas de control basados en inteligencia artificial. Finalmente, este artículo proporciona información valiosa para incrementar la producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables y para promover la aplicación de estos sistemas con el fin de reducir los niveles de contaminación ambiental.

Palabras clave: energías renovables; inteligencia artificial; sistema de control; eficiencia.

Introducción

Actualmente, existen diversos problemas asociados a los altos niveles de contaminación ambiental, tales como afecciones a la salud, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la degradación de los recursos naturales, entre otros. En este contexto, las principales causas de la contaminación incluyen las emisiones de gases industriales, el uso excesivo de plásticos, la deforestación, el empleo de productos químicos, el vertido de aguas residuales, la generación de energía mediante combustibles fósiles y las actividades agrícolas intensivas (Dechezleprêtre *et al.*, 2025; Parmesan *et al.*, 2022) (Clarke *et al.*, 2022; Malhi *et al.*, 2021). Por lo tanto, es necesario buscar, analizar y proponer alternativas de solución que mitiguen o eliminen al máximo los problemas derivados de la contaminación, así como los procesos que la generan. En este sentido, las energías renovables representan una alternativa viable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica, ya que no producen emisiones contaminantes, son consideradas recursos inagotables, se adaptan a las condiciones locales y no contaminan ni el aire ni el agua. No obstante, una de sus principales desventajas es su dependencia de factores climáticos y de la ubicación geográfica (Ang *et al.*, 2022; Farghali *et al.*, 2023; Maradin, 2021). Por ejemplo, la energía solar solo está disponible durante el día, la energía eólica depende de la velocidad y dirección del viento, y la energía mareomotriz y undimotriz solo pueden aprovecharse en regiones costeras.

Ante este panorama, el presente artículo describe las características de diversos sistemas de control basados en inteligencia artificial que pueden implementarse para regular el funcionamiento de los sistemas de energías renovables. Esto contribuiría a aumentar la producción de energía eléctrica, mitigar los problemas asociados a la variabilidad de estas fuentes y facilitar el análisis y modelado de dichos sistemas. Lo anterior se debe a que los sistemas de inteligencia artificial tienen la capacidad de tomar decisiones, aprender de experiencias previas y resolver problemas de forma eficiente (Ahmed *et al.*, 2023). Entre los principales ejemplos de sistemas de control basados en inteligencia artificial se encuentran el control de lógica difusa, las redes neuronales artificiales y el control neurodifuso. Además, estos sistemas pueden optimizarse mediante la combinación con algoritmos inspirados en la naturaleza o la biología, tales como los algoritmos genéticos, la evolución diferencial, la optimización por enjambre de partículas, el algoritmo de colonia de abejas, el algoritmo de optimización de ballenas, entre otros.

Desarrollo

Las energías renovables más utilizadas son la energía solar, eólica, hidroeléctrica, la biomasa, la geotérmica, la mareomotriz y la undimotriz (Yolcan, 2023). No obstante, las energías solar, eólica y undimotriz se consideran más versátiles, ya que permiten la implementación de sistemas a pequeña, mediana y gran escala. La Tabla 1 presenta las principales características de estos tipos de energía. Al momento de utilizar alguna fuente de energía renovable, es fundamental considerar diversos factores, como la disponibilidad de los recursos, los costos iniciales y de instalación, el almacenamiento de energía, el impacto ambiental y ecológico, la eficiencia y el rendimiento, las regulaciones y políticas gubernamentales, la aceptación social, entre otros (Deshmukh *et al.*, 2023; Sayed *et al.*, 2023). En este sentido, mejorar la eficiencia y el rendimiento permite maximizar el aprovechamiento de los recursos, reducir los costos y la necesidad de equipos adicionales para generar la misma cantidad de energía, obtener un suministro constante y estable, generar más energía con menos recursos naturales, e incrementar la competitividad frente a las fuentes no renovables (Strielkowski *et al.*, 2021). Por esta razón, el diseño e implementación de sistemas que aumenten la eficiencia y mejoren el rendimiento de las energías renovables resulta esencial. Esto puede lograrse mediante la utilización de sistemas de control, como los que se describen en las siguientes secciones.

Tabla 1. Características de los tipos de energías renovables.

Tipo de energía renovable	Recurso utilizado	Tecnología principal
Energía solar	Sol	Paneles solares
Energía eólica	Aire	Aerogeneradores
Energía undimotriz	Olas del mar	Convertidores de energía de las olas

Control de lógica difusa

El control de lógica difusa es un sistema que transforma variables numéricas reales en variables difusas, cuyos valores son lingüísticos y describen el estado de dichas variables. Por ejemplo, la temperatura puede definirse como una variable difusa y representarse mediante valores lingüísticos como *baja*, *media* o *alta*. Posteriormente, se utiliza un conjunto de reglas que determina la toma de decisiones o la acción de control en función de las variables de entrada. Estas reglas pueden establecerse a partir de la experiencia o conocimiento del proceso, los resultados de pruebas experimentales, o mediante simulaciones por software. Los controladores de lógica difusa tipo de Mamdani y de Takagi-Sugeno se encuentran entre los más utilizados en la industria para diversas aplicaciones. La Figura 1, por ejemplo, muestra la estructura general de un controlador de lógica difusa tipo de Mamdani. Entre las principales ventajas del control de lógica difusa se destacan que no requiere un modelo matemático preciso, puede aplicarse tanto en sistemas lineales como no lineales, y no necesita ecuaciones matemáticas complejas ni estructuras de programación complicadas para su implementación en software o hardware (Buckley & Eslami, 2002; Trillas & Eciolaza, 2015). Para su aplicación en sistemas de energía renovable, es necesario definir las variables de entrada (variables independientes) y las variables de salida (variables dependientes) del proceso. Por ejemplo, el voltaje y la corriente de un panel fotovoltaico pueden considerarse como variables de entrada, mientras que la señal de control (por ejemplo, el ciclo de trabajo de una señal cuadrada) de un convertidor DC-DC podría definirse como la variable de salida. Para el análisis y diseño del controlador, se puede emplear el software MATLAB (utilizando un script o toolbox), mientras que para su implementación física se pueden utilizar plataformas como Arduino, FPGA, Raspberry Pi, procesadores digitales de señales, entre otras.

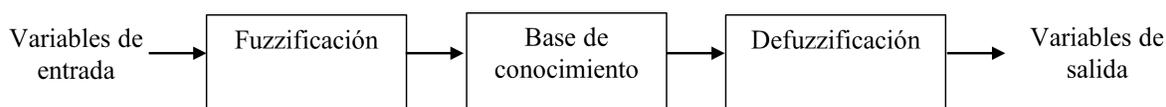


Figura 1. Diagrama de bloques de un control de lógica difusa.

Redes neuronales artificiales

Una red neuronal artificial es un sistema inspirado en el funcionamiento del cerebro humano; es decir, está compuesta por neuronas artificiales interconectadas que forman capas para procesar información, como se muestra en la Figura 2. Para modelar o controlar un sistema, se requiere un conjunto de muestras de las variables de entrada (variables independientes) y sus respectivas respuestas deseadas (variables dependientes) del proceso (Montesinos López *et al.*, 2022). Por ejemplo, se podrían utilizar datos de velocidad y dirección del viento como variables de entrada, mientras que el

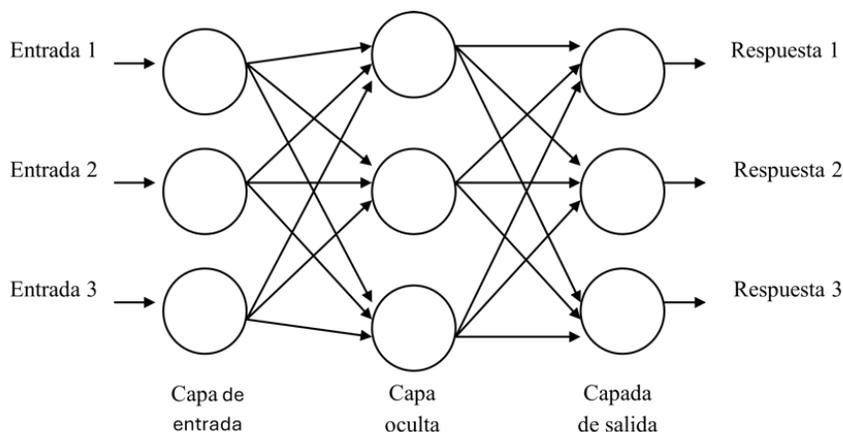


Figura 2. Estructura de una red neuronal artificial.

ángulo de las paletas o la posición del rotor podrían emplearse como variables de salida para modelar o controlar el funcionamiento de un aerogenerador. Adicionalmente, se necesita un algoritmo de entrenamiento que, mediante la aplicación del conjunto de muestras, ajuste los parámetros de la red (pesos sinápticos). Entre las principales ventajas de las redes neuronales artificiales se encuentran: no requieren un modelo matemático del sistema, pueden aplicarse a sistemas con múltiples entradas y salidas, no necesitan ecuaciones complejas para su implementación en software o hardware, y pueden utilizarse tanto en sistemas lineales como no lineales, entre otras (da Silva *et al.*, 2017; Rosa *et al.*, 2020). En el contexto de las energías renovables, una red neuronal artificial puede emplearse para estimar la producción o demanda de energía eléctrica en una ubicación o periodo determinado, así como para modelar, controlar y optimizar el funcionamiento del sistema. Existen diversos tipos de redes neuronales artificiales y estrategias de control que pueden utilizarse en sistemas de energía renovable. Por ejemplo, se pueden implementar redes del tipo perceptrón multicapa, redes de base radial, redes recurrentes, entre otras. Asimismo, se pueden aplicar diferentes estrategias de control, como el control adaptativo directo, el control adaptativo indirecto, media móvil autorregresivo no lineal, entre otras. Para el análisis y diseño de una red neuronal artificial, se puede emplear el software MATLAB, mientras que para su implementación física se pueden utilizar plataformas como Arduino, FPGA, Raspberry Pi, procesadores digitales de señales, entre otras.

Control neurodifuso

El control neurodifuso es la combinación de un sistema de lógica difusa con redes neuronales artificiales. Esta integración permite obtener un control más robusto, aprovechando las fortalezas de ambos enfoques y compensando sus respectivas limitaciones. En otras palabras, se reducen o eliminan las desventajas de la lógica difusa mediante las propiedades de las redes neuronales artificiales, y viceversa. Existen dos formas principales de combinar estos sistemas. La primera consiste en ajustar los parámetros de un controlador de lógica difusa utilizando algoritmos de entrenamiento propios de las redes neuronales artificiales. La segunda forma implica definir ciertas características de una red neuronal artificial empleando estructuras basadas en lógica difusa (Boutalis *et al.*, 2014). Al tratarse de la fusión de dos enfoques, el control neurodifuso hereda las principales ventajas tanto del control de lógica difusa como de las redes neuronales artificiales. Para el análisis y diseño de este tipo de controlador, se puede utilizar el software MATLAB, mientras que su implementación física puede realizarse en plataformas como Arduino, FPGA, Raspberry Pi, procesadores digitales de señales, entre otras.

Algoritmos de optimización basados en la naturaleza

Existen diversas técnicas de optimización y búsqueda inspiradas en fenómenos naturales, como el algoritmo genético, basado en los principios de la genética y la selección natural; la optimización por enjambre de partículas, inspirada en el comportamiento social y colectivo de organismos dentro de una colonia; el algoritmo de colonia de abejas, que replica la forma en que las abejas buscan alimento y se comunican entre sí; y el algoritmo de optimización de ballenas,

que simula el comportamiento de caza cooperativa de las ballenas jorobadas, entre otros. Las principales ventajas de estos algoritmos de optimización son que no requieren ecuaciones matemáticas complejas para su implementación en software o hardware, emplean reglas simples y estructuras básicas de datos, pueden aplicarse a sistemas con múltiples objetivos, y son útiles en diversas áreas como la ingeniería, la economía y el aprendizaje automático (Chakraborty *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2023; Gad, 2022; Katoch *et al.*, 2021). Además, estos algoritmos pueden utilizarse para optimizar procesos, diseñar estructuras, resolver funciones matemáticas, planificar recursos, entre otras aplicaciones. También pueden emplearse para determinar la configuración óptima de modelos de aprendizaje automático, como los mencionados en secciones anteriores, lo que permite reducir el tiempo de convergencia, evitar problemas de sobreajuste y disminuir el riesgo de quedar atrapados en mínimos locales. Asimismo, pueden combinarse con redes neuronales artificiales, el control de lógica difusa y el control neurodifuso para desarrollar sistemas capaces de modelar un proceso y determinar sus parámetros óptimos, lo que mejora la eficiencia y reduce los costos operativos (Abdolrasol *et al.*, 2021; Brodzicki *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2021). Para el diseño de estos algoritmos se puede utilizar el software MATLAB, mientras que su implementación puede realizarse en plataformas como Arduino, FPGA, Raspberry Pi, procesadores digitales de señales, entre otras.

Perspectivas futuras

Los sistemas de control basados en inteligencia artificial tienen un gran potencial para mejorar el diseño, control, optimización y pronóstico de los componentes y etapas de los sistemas de energías renovables. Gracias a su capacidad de adaptación y aprendizaje, es importante seguir desarrollando nuevos métodos que permitan una implementación más eficiente de estos sistemas. Además, se debe explorar otras técnicas de control distintas a las abordadas en este trabajo, ampliando así las herramientas disponibles para enfrentar los retos del sector energético. Una mayor incorporación de estos sistemas podría facilitar la integración de las energías renovables en la red eléctrica, así como su aplicación en regiones en desarrollo o en zonas con acceso limitado a la electricidad. No obstante, persisten desafíos importantes, como la intermitencia de las fuentes renovables y la dificultad para almacenar la energía generada. En este sentido, la inteligencia artificial puede desempeñar un papel clave para mitigar estos problemas, mejorando la previsión de la generación y optimizando el uso de los recursos energéticos disponibles. Finalmente, el uso de fuentes de energía limpias contribuye no solo a reducir las emisiones contaminantes, sino también a mitigar el cambio climático. Esto tiene un impacto directo en la salud humana, la conservación del medio ambiente y el bienestar de las futuras generaciones.

Conclusiones

Este artículo presenta una revisión de la literatura sobre la integración y características más relevantes para la implementación de sistemas de control basados en inteligencia artificial, aplicados a sistemas que emplean energías renovables para la generación de electricidad. El uso de este tipo de control permite mejorar el análisis, el modelado, la eficiencia y aumentar la producción de energía eléctrica. Optimizar el rendimiento de cualquier sistema fomenta su adopción y uso a mayor escala. En este contexto, la implementación de sistemas de control basados en inteligencia artificial puede facilitar el aprovechamiento de las energías renovables y, a largo plazo, contribuir a reducir la dependencia de los combustibles fósiles para la generación eléctrica. Esto es especialmente importante, considerando que, si no se toman medidas inmediatas para proteger el medio ambiente, las consecuencias podrían ser irreversibles. En última instancia, la investigación científica debe continuar avanzando en la búsqueda de soluciones efectivas para preservar el entorno natural, ya que las decisiones que se tomen hoy tendrán un impacto significativo en el futuro de la humanidad.

Agradecimientos y financiamiento: Hugo Beatriz Cuellar (CVU: 1007017) agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada.

Bibliografía

- Abdolrasol, M. G. M., Hussain, S. M. S., Ustun, T. S., Sarker, M. R., Hannan, M. A., Mohamed, R., Ali, J. A., Mekhilef, S., & Milad, A. (2021). Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review. *Electronics*, 10(21), 2689. <https://doi.org/10.3390/electronics10212689>
- Ahmed, S. F., Alam, Md. S. Bin, Hassan, M., Rozbu, M. R., Ishtiak, T., Rafa, N., Mofijur, M., Shawkat Ali, A. B. M., & Gandomi, A. H. (2023). Deep learning modelling techniques: current progress, applications, advantages, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, 56(11), 13521–13617. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10466-8>

- Ang, T.-Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
- Boutalis, Y., Theodoridis, D., Kottas, T., & Christodoulou, M. A. (2014). *System Identification and Adaptive Control*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06364-5>
- Brodzicki, A., Piekarski, M., & Jaworek-Korjakowska, J. (2021). The Whale Optimization Algorithm Approach for Deep Neural Networks. *Sensors*, 21(23), 8003. <https://doi.org/10.3390/s21238003>
- Buckley, J. J., & Eslami, E. (2002). An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets. In *An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets*. Physica-Verlag HD. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1799-7>
- Chakraborty, S., Kumar Saha, A., Sharma, S., Mirjalili, S., & Chakraborty, R. (2021). A novel enhanced whale optimization algorithm for global optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 153, 107086. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107086>
- Clarke, B., Otto, F., Stuart-Smith, R., & Harrington, L. (2022). Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. *Environmental Research: Climate*, 1(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6e7d>
- da Silva, I. N., Hernane Spatti, D., Andrade Flauzino, R., Liboni, L. H. B., & dos Reis Alves, S. F. (2017). Artificial Neural Networks. In *Artificial Neural Networks: A Practical Course*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43162-8>
- Dechezleprêtre, A., Fabre, A., Kruse, T., Planterose, B., Sanchez Chico, A., & Stantcheva, S. (2025). Fighting Climate Change: International Attitudes toward Climate Policies. *American Economic Review*, 115(4), 1258–1300. <https://doi.org/10.1257/aer.20230501>
- Deshmukh, M. K. G., Sameeroddin, M., Abdul, D., & Abdul Sattar, M. (2023). Renewable energy in the 21st century: A review. *Materials Today: Proceedings*, 80, 1756–1759. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.501>
- Fang, J., Liu, W., Chen, L., Lauria, S., Miron, A., & Liu, X. (2023). A Survey of Algorithms, Applications and Trends for Particle Swarm Optimization. *International Journal of Network Dynamics and Intelligence*, 24–50. <https://doi.org/10.53941/ijndi0201002>
- Farghali, M., Osman, A. I., Chen, Z., Abdelhaleem, A., Ihara, I., Mohamed, I. M. A., Yap, P.-S., & Rooney, D. W. (2023). Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1381–1418. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01587-1>
- Gad, A. G. (2022). Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(5), 2531–2561. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4>
- Han, J.-X., Ma, M.-Y., & Wang, K. (2021). RETRACTED ARTICLE: Product modeling design based on genetic algorithm and BP neural network. *Neural Computing and Applications*, 33(9), 4111–4117. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05604-0>
- Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 80(5), 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability*, 13(3), 1318. <https://doi.org/10.3390/su13031318>
- Maradin, D. (2021). Advantages And Disadvantages Of Renewable Energy Sources Utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 176–183. <https://doi.org/10.32479/ijee.11027>
- Montesinos López, O. A., Montesinos López, A., & Crossa, J. (2022). Fundamentals of Artificial Neural Networks and Deep Learning. In *Multivariate Statistical Machine Learning Methods for Genomic Prediction* (pp. 379–425). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89010-0_10
- Parmesan, C., Morecroft, M. D., Trisurat, Y., & Mezzi, D. (2022). *Climate Change 2022:Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://doi.org/https://doi.org/10.34894/VQ1DJA>
- Rosa, J. P. S., Guerra, D. J. D., Horta, N. C. G., Martins, R. M. F., & Lourenço, N. C. C. (2020). *Using Artificial Neural Networks for Analog Integrated Circuit Design Automation*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35743-6>
- Sayed, E., Olabi, A., Alami, A., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Abdelkareem, M. (2023). Renewable Energy and Energy Storage Systems. *Energies*, 16(3), 1415. <https://doi.org/10.3390/en16031415>
- Strielkowski, W., Civiń, L., Tarkhanova, E., Tvaronavičienė, M., & Petrenko, Y. (2021). Renewable Energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: A Review. *Energies*, 14(24), 8240. <https://doi.org/10.3390/en14248240>
- Trillas, E., & Eciolaza, L. (2015). *Fuzzy Logic* (Vol. 320). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14203-6>
- Yolcan, O. O. (2023). World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation. *Innovation and Green Development*, 2(4), 100070. <https://doi.org/10.1016/j.ig.2023.100070>