

Inteligencia artificial aplicada a la operación y mantenimiento de aerogeneradores

Artificial intelligence applied on the operation and maintenance of wind turbines

Brandon Obregón¹, Otto Arias-Blanco², Ronny Zúñiga-Granados³, Gustavo Richmond–Navarro⁴

Fecha de recepción: 30 de octubre, 2023

Fecha de aprobación: 2 de marzo, 2024

Obregón, B; Arias-Blanco, O; Zúñiga-Granados, R; Richmond–Navarro, G. Inteligencia artificial aplicada a la operación y mantenimiento de aerogeneradores. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 100-109.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6922>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 bobregon@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0008-2311-2132>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 blancoariads@hotmail.com
 <https://orcid.org/0009-0002-8575-9085>
- 3 Instituto Costarricense de Electricidad. Costa Rica.
 rzunigag@ice.go.cr
 <https://orcid.org/0009-0009-7910-0277>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 grichmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>



Palabras clave

Turbina eólica; inteligencia artificial; mantenimiento; energía eólica; prevención de fallas.

Resumen

La inteligencia artificial (IA) ha revolucionado la industria de la energía eólica. Gracias a algoritmos de aprendizaje automático, la IA ha mejorado la predicción de la velocidad del viento, permitiendo una generación de energía más eficiente y la reducción de costos operativos. Así mismo, la IA ha demostrado ser útil en el análisis del rendimiento y mantenimiento de las turbinas eólicas, identificando patrones y anomalías para realizar trabajos predictivos, así como perfeccionar la eficiencia operativa. La aplicación de la IA en la energía eólica anticipa un futuro más prometedor y sostenible. La disponibilidad de datos confiables y la integración de energía eólica en las redes eléctricas son aspectos para considerar, pero los avances en algoritmos y capacidades de procesamiento continúan impulsando el potencial de la IA: con su capacidad para optimizar la generación de energía y mejorar el mantenimiento de las turbinas. La IA se posiciona como una herramienta clave para impulsar el crecimiento y desarrollo de la energía eólica a nivel mundial. En este trabajo se exponen los puntos más importantes de la aplicación de la IA en la operación y mantenimiento de aerogeneradores.

Keywords

Wind turbines; artificial intelligence; fault diagnoser; maintenance; wind energy.

Abstract

Artificial intelligence (AI) has revolutionized the wind energy industry. Thanks to machine learning algorithms, AI has improved wind speed prediction enabling more efficient power generation and reduced operating costs. Likewise, AI has proven to be useful in analyzing the performance and maintenance of wind turbines, identifying patterns and anomalies to perform predictive work, furthermore, improve operational efficiency. The application of AI in wind energy anticipates a more promising and sustainable future. The availability of reliable data and the integration of wind energy into power grids are aspects to consider, but advances in algorithms and processing capabilities continue to drive the potential of AI. With its ability to optimize energy generation and improve turbine maintenance. AI is positioned as a key tool to drive the growth and development of wind energy globally. This work presents the most important points of the application of AI in the operation and maintenance of wind turbines.

Introducción

La economía mundial es altamente dependiente de la energía; específicamente de la electricidad. Por esto es primordial alcanzar la mayor eficiencia en toda la cadena de valor desde la generación, la trasmisión, y la distribución de esta, hasta que se entrega al usuario final. Intrínseco a la dependencia de energía, se encuentra el hecho de que los enfoques convencionales de generación de energía eléctrica poseen efectos masivos en el clima global y en el cambio climático. Dado que este proceso, de generación eléctrica, con medios convencionales genera gases de efecto invernadero, los cuales contribuyen al aumento del calentamiento global [1]. Por tanto, se plantea la necesidad de utilizar fuentes limpias, amigables con el ambiente y con una mínima generación de CO₂ [2].

En los últimos años se ha generado grandes avances en las investigaciones y en el desarrollo de energías renovables, éstas son una alternativa viable para un mundo más seguro y eficiente en términos de matriz energética. Entre esas fuentes de energía renovable se encuentra la energía eólica. Esta es una fuente alternativa para suplir esa demanda de energía que se requiere en la actualidad y en el futuro; sin embargo, su disponibilidad depende de las condiciones climáticas. Debido estos factores, se dificulta la integración de la energía eólica en las redes eléctricas existentes. A partir de este punto, se destaca la necesidad de mejorar el rendimiento de la energía eólica, de modo que permita satisfacer la demanda futura, así como una integración más simple a las grandes redes de transmisión y distribución eléctrica.

Según IRENA (International Renewable Energy Agency), entre los años 2018 y 2022 se dio un aumento en la capacidad instalada de aproximadamente un 37% para la energía eólica [3]. La Figura 1 muestra la tendencia desde el año 2012 hasta el año 2022.

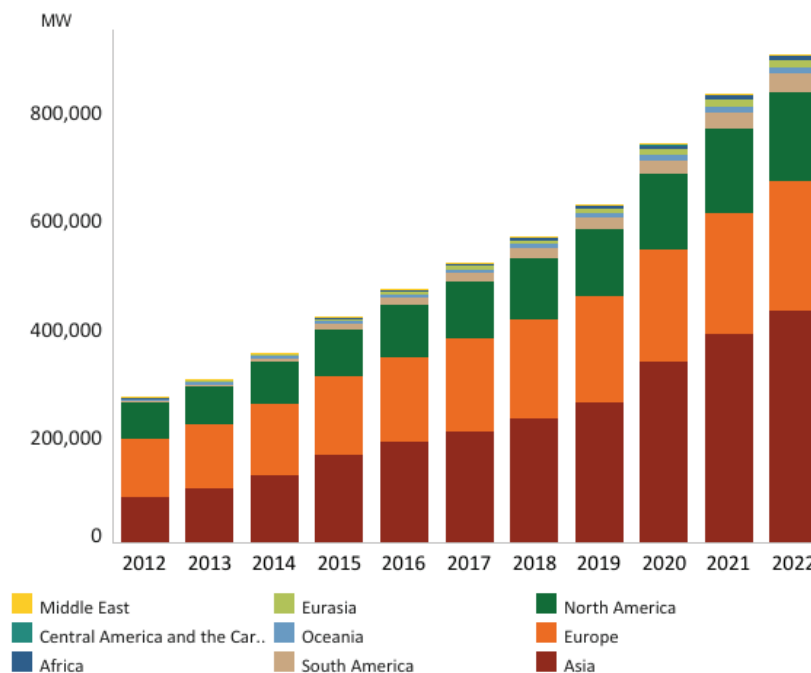


Figura 1. Tendencia de capacidad instalada de energía eólica por región. Fuente: [3].

Con esto en mente, es imperativo abordar los temas de limitaciones de diseño, eficiencia, predicción de rendimiento de los parques eólicos existentes y la estimación de los parámetros de viento de la región donde se instalan las nuevas centrales.

De acuerdo con [2], se resalta la importancia de la IA (Inteligencia Artificial) en el avance de las energías renovables, destacando principalmente aplicaciones en predicción de la velocidad del viento y pronóstico de energía eólica. En años previos, se han realizado investigaciones significativas en el uso de la IA en la energía eólica, en estas se han propuesto y probado, diversas técnicas y enfoques, dentro de estos enfoques se proponen tres categorías principales: aprendizaje neuronal, aprendizaje estadístico y aprendizaje evolutivo [2], [4], [5]. Estos estudios demostraron el potencial de la inteligencia artificial para mejorar la exactitud y eficiencia de la estimación de la velocidad del viento, así como la generación de energía eólica.

Adicionalmente, desde 2016 se ha dado un auge en la incorporación de IA en la industria eólica, específicamente en la atención a la evaluación y análisis del rendimiento para OM (Operation and Maintenance) de aerogeneradores [6]. La inteligencia artificial, por lo tanto, ha tomado un papel fundamental en la actualidad, y su aplicación a la energía eólica no es la excepción.

Existen muchos campos de aplicación, entre los que se destaca la predicción del viento. En la actualidad existen diversos modelos que permiten la recopilación de datos históricos, analizar patrones del clima con el fin de predeterminar los patrones del viento y aprovechar la mayor cantidad de este recurso en la generación de energía.

Por otro lado, se debe destacar el desarrollo de controles óptimos para la predicción y aprendizaje automático de las turbinas, estos métodos permiten a los equipos ajustar de forma autónoma elementos mecánicos operativos como el ángulo de las aspas, la velocidad de rotación con el fin de maximizar la producción de energía y generar una reducción en el estrés de los equipos [7], [8], [9].

Otro aspecto innovador, es la incorporación de sensores en las turbinas eólicas que emplean la tecnología IOT (Internet of Things), la cual permite la comunicación entre los elementos físicos y software con el fin de recabar los datos tomados por los sensores, procesarlos y generar decisiones con base en los análisis recopilados.

Este artículo tiene como objetivo exponer las aplicaciones de la inteligencia artificial en la energía eólica, con énfasis en procesos de optimización y mantenimiento de aerogeneradores.

Para el proceso de revisión bibliográfica se seleccionan bases de datos especializadas en energía eólica y aplicaciones de la inteligencia artificial, dando primordial importancia a las publicaciones comprendidas en el periodo de 2015 a 2023. Se procede a brindar una contextualización de las aplicaciones de IA previo al año 2015 y la evolución hasta la actualidad, además, se profundiza en procesos de optimización en plantas de energía eólica modernas mediante diversos algoritmos de aprendizaje computacional.

Técnicas comunes de análisis de datos, vibraciones y técnicas de IA aplicadas al Mantenimiento Basado en Condición.

Para el periodo abarcado entre el año 2010 y 2015, la tendencia del mantenimiento de turbinas eólicas se basaba en el monitoreo de la condición de los equipos que las componen, enfocándose en los modos de falla del equipo, mínimamente en la evaluación y el análisis del rendimiento [6]. El análisis de vibraciones ha sido una técnica popular para el diagnóstico de fallas en estructuras y subcomponentes de turbinas. Existen varios estudios que utilizan señales de vibración y aplican técnicas como EMD (Empirical Mode Decomposition) para detectar fallas incipientes en los subcomponentes mecánicos y eléctricos de las turbinas. Además, hay estudios que aplican la técnica de SK (Spectral Kurtosis) para el monitoreo basado en condición [10]. Esta técnica ayuda a determinar no estacionariedades en las señales y puede contribuir a la detección de defectos en los subcomponentes de las turbinas.

En cuanto a la aplicación de técnicas de IA, [6] destaca la aplicación de técnicas de inteligencia artificial convencionales para el análisis del rendimiento de las turbinas, como árboles de regresión y técnicas de aprendizaje automático. Sin embargo, las técnicas de inteligencia artificial han sido poco empleadas en la predicción de fallas en turbinas y sus subcomponentes, para el periodo 2010 – 2015.

Es importante utilizar estas tendencias de mantenimiento y monitoreo de la operación, para realizar una identificación de los puntos fuertes y aspectos de mejora; distinguir factores potenciales para futuras aplicaciones de IA en el mejoramiento de la eficiencia de los aerogeneradores bajo el contexto de OM.

El uso de datos SCADA y técnicas de inteligencia artificial en la industria eólica

Hasta 2015, se utilizaron principalmente técnicas basadas en modelos numéricos y procesamiento de señales, especialmente para el monitoreo de la salud de los aerogeneradores utilizando señales de vibración, según lo menciona [6], [9]. La tendencia actual es la utilización de datos SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), se refiere a los datos del sistema de control utilizado en diversos sectores industriales para supervisión, control de procesos y operaciones en tiempo real.

Las técnicas basadas en datos, que utilizan datos históricos de SCADA para entrenar algoritmos de IA, son más económicas y fáciles de usar. Puesto que los aerogeneradores actuales están equipados con sensores capaces de tomar mediciones periódicas, no es necesario instalar dispositivos adicionales de medición.

Desde 2015, se ha experimentado un rápido crecimiento en la aplicación de modelos de ML (Machine Learning) en la toma de decisiones basadas en datos, especialmente utilizando datos SCADA [6]. Con el aumento de la aplicación de IA, se observa un cambio en el enfoque hacia la evaluación y el análisis del desempeño para operación y mantenimiento, algo que no se consideraba anteriormente.

En general, las técnicas de IA, incluyendo el análisis PCA (Principal Component Analysis) y los modelos de aprendizaje profundo, han dominado el desarrollo temprano de la IA en la industria eólica. Se han utilizado técnicas de transformación lineal no supervisadas y el descubrimiento de novedades. Así mismo, se observa un creciente interés en el uso de modelos de aprendizaje profundo como redes neuronales, para tareas como diagnóstico de fallas, pronóstico de energía y optimización de operaciones de los aerogeneradores [6].

Las técnicas de regresión en el monitoreo de la condición y la evaluación del rendimiento de los aerogeneradores; se utilizan para predecir valores continuos de parámetros vitales a lo largo del tiempo, como la potencia generada, velocidad del viento, dirección del viento, etc., utilizando datos SCADA, mismos que varían con el tiempo y son adecuados para el aprendizaje supervisado. En años recientes, se ha observado un aumento significativo en el uso de técnicas de ML, especialmente técnicas de aprendizaje profundo, por ejemplo, redes neuronales recurrentes y redes neuronales de memoria a corto y largo plazo, para predecir parámetros operativos vitales de los aerogeneradores. Estas técnicas han demostrado ser superiores a las opciones convencionales de regresión; además, pueden tener en cuenta la información temporal pasada, lo que las hace adecuadas para el procesamiento de datos secuenciales en la industria eólica [6].

IA en la prevención de fallas

En cuanto a la aplicación de la inteligencia artificial en el proceso de detección temprana de fallas, [6] detalla estudios en el uso de SVM (Support Vector Machine) en la predicción de fallas incipientes en múltiples subcomponentes del aerogenerador. Adicionalmente, se han utilizado árboles de decisión, así como bosques aleatorios para la detección y aislamiento de fallas; identificando señales SCADA importantes y analizando las fallas previstas.

Además, se menciona el uso de frameworks de big data para desarrollar sistemas de mantenimiento predictivo en tiempo real utilizando algoritmos como el bosque aleatorio. Destacan también, el análisis CART (Classification and Regression Tree) como una herramienta prometedora para identificar causas fundamentales de las fallas en los aerogeneradores [6].

Plantas de energía eólica modernas

Es importante describir cómo se realiza el control de las WPP (Wind Power Plant), este está conformado por diversas etapas, dentro de las cuales se pueden destacar: La operación de una sola turbina eólica, como el control de paso y par, así como la alineación de la dirección (yaw), dichas variables se manejan localmente en la unidad de control de la turbina, que actúa como la primera capa.

Con respecto al yaw o también conocido como ángulo de guiñada, consiste en el ángulo de rotación presente con respecto al eje vertical, como se muestra en Figura 2.a) la turbina presenta un desalineamiento de γ grados, con respecto al eje vertical, mientras que en el caso de la Figura 2.b) no está presente el desalineamiento, de decir, [11].

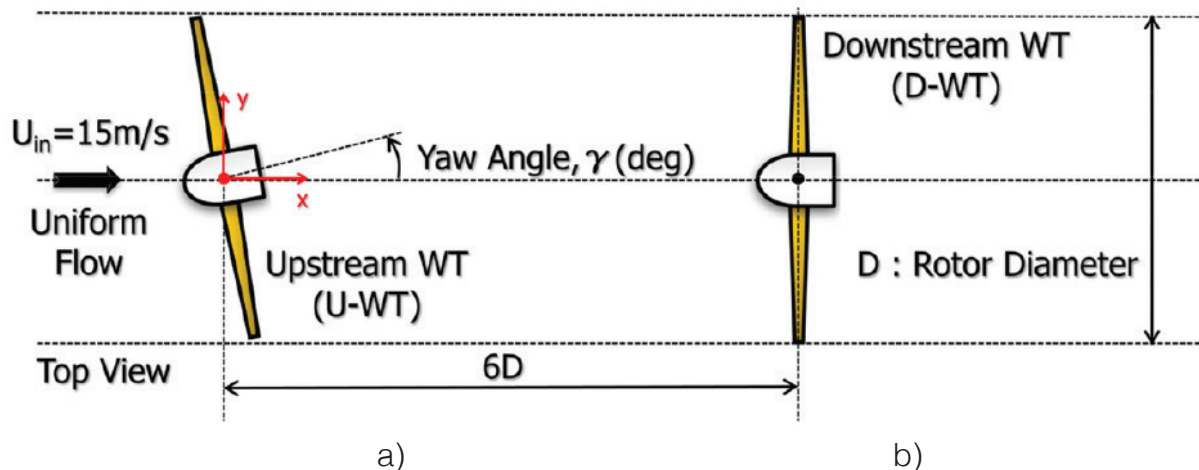


Figura 2. Representación de yaw (ángulo de guiñado) en turbina: a) turbina con desalineamiento b) turbina sin desalineamiento. Fuente: [11].

Asimismo, en la segunda capa, el operador de WPP puede definir un límite de potencia externo para cada turbina eólica, esto permite garantizar que la producción de energía global de WPP pueda limitarse a un valor deseado.

La operación de cada turbina está, por lo tanto, sujeta al límite externo del operador de WPP, mientras que el ángulo de yaw generalmente permanece sin cambios. Por otro lado, la tercera capa está conformada por el operador de la red eléctrica, quien indica la potencia activa y reactiva máxima tolerable para ingresar a la red, el WPP debe cerciorarse cumplir con los requisitos previo a suministrar la energía eléctrica.

Si bien la estructura descrita garantiza la capacidad de limitar la producción de energía proveniente de WPP, existe una carencia en la implementación bajo condiciones normales de funcionamiento, es decir, no se aplica este procedimiento a menos que se requiera restringir la potencia. Una correcta coordinación de las operaciones de las turbinas eólicas permitiría maximizar la generación de energía y disminuir el estrés mecánico en el sistema [7], [8].

Es de suma importancia destacar la existencia de factores con capacidad de afectar la producción de energía eólica; entre ellos se destacan las interacciones de estela, las cuales se originan cuando el viento se relaciona con las turbinas y genera perturbaciones. Estas perturbaciones, pueden afectar negativamente el rendimiento de las turbinas, al disminuir la potencia generada, así como el desencadenamiento de estrés mecánico en los componentes de los aerogeneradores.

Existen herramientas creadas para mitigar estos aspectos negativos como: ajustar el ángulo de desviación para desviar las estelas lejos de las turbinas ubicadas aguas abajo (WRC, Wake Redirection Control) y aumentar el ángulo de inclinación para lograr una limitación de potencia que reduzca la extracción de energía del flujo de viento (AIC, Axial Induction Control) [7]. Es importante destacar que, el WRC cambia el ángulo de yaw de la turbina eólica para desviar las formaciones de estelas resultantes, como se muestra en la Figura 3:

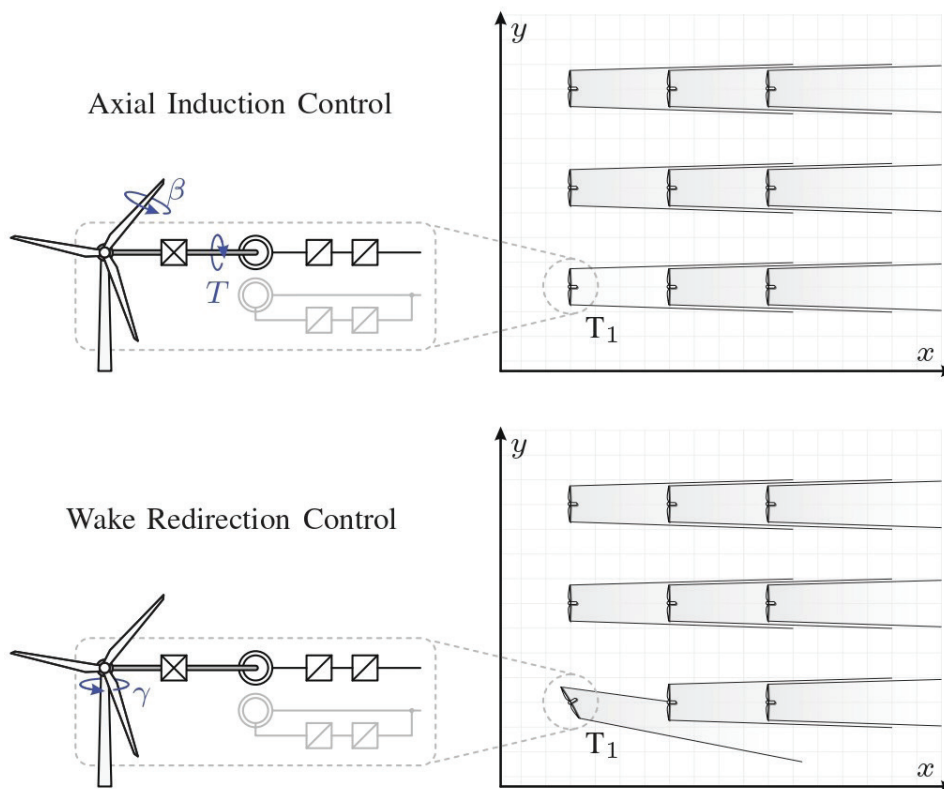


Figura 3. Control de inducción axial. Fuente: [7].

En la figura anterior se observa el control de inducción axial el cual usa el ángulo pitch (β), así como también el torque del generador para limitar la potencia que se extrae del flujo de viento. Por otra parte, el control de redirección de estela cambia el ángulo yaw para desviar la estela lejos de las turbinas posteriores.

Actualmente, el reto existente es generar puntos de ajuste adecuados para aumentar el rendimiento de los parques eólicos, sin que medie la intervención humana. Para ello se investigan innovaciones modernas; como lo son la incorporación de redes neuronales artificiales que sirvan para estimar el comportamiento de un parque eólico, así como garantizar la seguridad operativa del WPP.

Es destacable mencionar que actualmente existen técnicas de entrenamiento para ajustar de la mejor forma los parámetros de las redes neuronales artificiales, se destaca la técnica RL (Reinforcement Learning), esta combina estrategias que permiten que un agente tome decisiones en un entorno y visualice las consecuencias de sus actos, esto quiere decir que en base a los resultados obtenidos se asigne una señal de recompensa o castigo, en comparación con logros previamente definidos [7].

De esta forma, surgen modelos como DRL (Deep Reinforcement Learning) de Agente Central basados en datos SCADA como capa de entrada, los cuales son empleados para entrenar redes neuronales artificiales. El objetivo de este proceso es convertir los datos de entrada en una capa de salida que contenga los puntos de ajuste para WRC y AIC, en este proceso se emplea un tipo de red neuronal de retroalimentación la cual aplica una función activa en el procesamiento de datos que mejora en el tiempo a partir de recompensas previamente definidas [7].

Una alternativa en la obtención de la medición de variables es el modelo DRL de Múltiples Agentes, esta técnica emplea herramientas de aprendizaje por refuerzo, donde en vez de que un agente controle todos los aerogeneradores, el modelo involucra múltiples agentes, estos aprenden continuamente e interactúan con su entorno, basados en función de recompensas y sanciones recibidas de acuerdo con las decisiones optimizadas que se tomen. [7] describe que en el RL distribuido para el control de operación de WPP con comunicación entre turbinas eólicas vecinas, se logró observar un aumento simulado en la producción de energía del 2.58 %, esto muestra la necesidad de un proceso de entrenamiento paso a paso cuando se utilizan modelos de RL de múltiples agentes.

Finalmente, un tercer concepto analizado es el modelo de regresión, la idea básica es entrenar una técnica de Inteligencia artificial para estimar la producción de potencia global y las cargas mecánicas en diversos escenarios y posteriormente seleccionar la combinación de puntos de ajuste que conduzca al mejor resultado [7].

El objetivo de esta técnica es obtener un modelo matemático preciso que relacione de las variables de entrada como: la dirección del viento, la velocidad, características ambientales con la producción de energía eólica. Es importante destacar que un modelo de regresión basado en inteligencia artificial puede analizar grandes volúmenes de datos históricos, estudiar las condiciones ambientales donde se ubiquen las turbinas, aprender patrones y generar predicciones más precisas con el fin de garantizar el máximo aprovechamiento del recurso eólico.

Implementación de técnicas IOT en energía eólica

El desafío fundamental para el desarrollo del sistema de conversión de energía eólica es la inestabilidad natural de este recurso, por tanto, el IOT ha surgido como un enfoque inteligente y práctico para la gestión de sistemas de energía renovable [12]. Existen numerosas herramientas en la actualidad, por medio de las cuales pueden desarrollarse propuestas de mejora y autonomía en la producción de energía eólica, se destacan la presencia de placas microelectrónicas, sensores ultrasónicos para medir la velocidad del viento, sensores de vibración los cuales son empleados para monitorear las condiciones de operación de las turbinas y anteceder la ocurrencia de fallos a través del desarrollo de rutinas de mantenimiento preventivo; además, herramientas de desarrollo web, paneles de visualización, entre otros. Por ejemplo, [12] describe un sistema IOT integrado con un controlador FPGA para proporcionar los datos instantáneos de velocidad del viento en un lugar seleccionado y visualizar la salida

del sistema de emulación de viento, además de esto, se complementa con el uso de una placa llamada ESP8266, la cual complementa internamente un microcontrolador y un módulo de conectividad WIFI, esto permite enviar y recibir datos de forma remota.

Conclusión

Después de describir las aplicaciones de la IA en el campo de la energía eólica, particularmente en los procesos de optimización y mantenimiento de aerogeneradores, es posible llegar a las siguientes conclusiones

- El análisis de vibraciones ha sido una técnica popular para el diagnóstico de fallas en las turbinas, mientras que las técnicas de IA convencionales se han utilizado para analizar el rendimiento. Sin embargo, se ha encontrado que las técnicas de IA fueron poco utilizadas para predecir fallas en turbinas y sus subcomponentes en el periodo anterior a 2015.
- Actualmente, hay un cambio hacia el uso de datos SCADA y técnicas de IA en la industria eólica, lo que permite un monitoreo más económico y fácil de usar utilizando algoritmos de aprendizaje automático.
- Existe un creciente interés en el uso de técnicas de aprendizaje profundo para tareas como diagnóstico de fallas, pronóstico de energía y optimización de operaciones de los aerogeneradores.
- En cuanto a la prevención de fallas, se ha utilizado diversas técnicas de IA, como máquinas de vectores de soporte y árboles de decisión, para detectar y aislar fallas en los aerogeneradores.

El uso de la IA está transformando el mantenimiento y monitoreo de las turbinas eólicas con un enfoque hacia la mejora del rendimiento y la prevención de fallas. Empleando herramientas como lo son modelos de aprendizaje por refuerzo profundo o de regresión se pueden determinar puntos de ajuste para el ángulo pitch y la limitación de potencia para el control activo de estela, lo que sin duda aumenta la eficiencia del aprovechamiento del recurso eólico, así como la vida de los aerogeneradores.

Referencias

- [1] International Atomic Energy Agency, "Health and Environmental Impacts of Electricity Generation Systems, Technical Reports Series No. 394," IAEA, Vienna, 1999.
- [2] S. Jha, J. Bilalovic, A. Jha, N. Patel and H. Zhang, "Renewable energy: Present research and future scope of Artificial Intelligence," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, no. 1364-0321, pp. 297-317, 2017.
- [3] IRENA, "Trends in Renewable Energy by Region-Dataset.," July 2022. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>. [Accessed 13 August 2023].
- [4] M. Lei, S. Luan, J. Chuanwen, L. Hongling and Z. Yan, "A review on the forecasting of wind speed and generated power," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 4, pp. 915-920, 2009.
- [5] A. Foley, P. Leahy, A. Marvuglia and E. McKeogh, "Current methods and advances in forecasting of wind power generation," *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 1-8, 2012.
- [6] J. Chatterjee and D. Dethlefs, "Scientometric review of artificial intelligence for operations & maintenance of wind turbines: The past, present and future," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, no. 1364-0321, p. 111051, 2021.
- [7] P. Krajinski, K. Günther and C. Sourkounis, "Advanced operation control in wind power plants using active wake control methods and artificial intelligence - state of research and concept for the project "SmartWind",," in *20th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants (WIW 2021)*, Germany, IET, 2021, pp. 423-429.

- [8] P. Krajinski and C. Sourkounis, "Implementation of an Advanced Operation Control for AI-based Wind Farm Power Maximization Using Wake Redirection and Artificial Neural Networks," in *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2022*, pp. 1-6.
- [9] J. Tautz-Weinert and S. Watson, "Using SCADA data for wind turbine condition monitoring – a review," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, pp. 382-394, 2017.
- [10] L. Saidi, E. Bechhoefer, J. Ben Ali and M. Benbouzid, "Wind turbine high-speed shaft bearing degradation analysis for run-to-failure testing using spectral kurtosis," in *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2015, pp. 267-272.
- [11] T. Uchida, K. Shibuya, G. Richmond-Navarro and W. R. Calderón-Muñoz, "A wind tunnel investigation of yawed wind turbine wake impacts on downwind wind turbine performances and wind loads," *Wind Engineering*, vol. 47, no. 3, pp. 655-670, 2023.
- [12] R. R. Singh, S. Banerjee, R. Manikandan, K. Kotecha, V. Indragandhi and S. Vairavasundaram, "Intelligent IoT Wind Emulation System Based on Real-Time Data Fetching Approach," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78253-78267, 2022.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica general de este artículo, empleamos la herramienta de IA *ChatGPT*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.