

Jornadas de Automática

Estrategia híbrida ANFIS-OTC para MPPT y reducción de vibraciones mecánicas en aerogeneradores marinos

Eduardo Muñoz- Palomeque^{a,*}, Matilde Santos^b, J. Enrique Sierra-García^c

^a Departamento de Sistemas de Comunicación y Control, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España

^b Instituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

^c Departamento de Digitalización, Universidad de Burgos, Burgos, España.

To cite this article: Muñoz-Palomeque, E., Santos, M., Sierra-García, J.E. 2026. Hybrid ANFIS-OTC strategy for MPPT operation and mechanical vibration reduction in offshore wind turbines. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13833>

Resumen

Este artículo presenta una estrategia de control híbrida para turbinas eólicas marinas que combina un Sistema de Inferencia Neurodifusa Adaptativa (ANFIS) con el Control Óptimo de Par (OTC) convencional. El objetivo principal es conservar la eficiencia del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y minimizar las vibraciones mecánicas en la estructura de la parte superior de la torre. Si bien el OTC estándar extrae la potencia aerodinámica de manera efectiva, ignora las cargas estructurales. Para abordar esta limitación, se desarrolla un programador de ganancia adaptativa basado en ANFIS, donde el controlador se entrena fuera de línea utilizando un conjunto de datos generado a partir de un marco de control heurístico multipolítica que combina la ley de control OTC con modificaciones sensibles a vibraciones. El ANFIS utiliza la velocidad del generador y la aceleración de la parte superior de la torre como entradas para estimar un factor de ganancia adaptativa que modula la referencia de par OTC. En operación en tiempo real, esta ganancia escala el comando de par OTC convencional, lo que permite un equilibrio entre el rendimiento del MPPT y la mitigación de vibraciones estructurales. Las simulaciones de OpenFAST demuestran que el controlador propuesto reduce con éxito las fluctuaciones de carga mecánica manteniendo un alto rendimiento de MPPT en comparación con el enfoque tradicional.

Palabras clave: Sistemas de Energía y Potencia, Sistemas Adaptativos y de Aprendizaje, Control Óptimo, Inteligencia Computacional en el Control, Modelado e Identificación de Sistemas, Control No Lineal

Hybrid ANFIS-OTC strategy for MPPT operation and mechanical vibration reduction in offshore wind turbines

Abstract

This paper presents a hybrid control strategy for offshore wind turbines that combines an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) with conventional Optimal Torque Control (OTC). The main objective is to maintain maximum power point tracking (MPPT) efficiency while minimizing mechanical vibrations at the tower-top structure. While standard OTC extracts aerodynamic power effectively, it ignores structural loads. To address this limitation, an ANFIS-based adaptive gain scheduler is developed, where the controller is trained offline using a dataset generated from a multi-policy heuristic control framework that combines the OTC law with vibration-sensitive modifications. The ANFIS uses generator speed and tower-top acceleration as inputs to estimate an adaptive gain factor that modulates the OTC torque reference. In real-time operation, this gain scales the conventional OTC torque command, enabling a trade-off between MPPT performance and structural vibration mitigation. OpenFAST simulations demonstrate that the proposed controller successfully reduces mechanical load fluctuations while maintaining high MPPT performance compared to the traditional approach.

Keywords: Power and Energy Systems, Adaptive and Learning Systems, Optimal Control, Computational Intelligence in Control, Modelling, Identification and Signal Processing, Non-Linear Control.

1. Introducción

A medida que la población avanza tecnológicamente para alcanzar objetivos de preservación medioambiental, la rápida expansión de la energía eólica resulta fundamental en este proceso. Como fuente renovable, estas tecnologías son esenciales para la generación de energía descarbonizada.

El desarrollo y aplicación de la energía eólica ha experimentado un crecimiento constante en las últimas décadas, alcanzando una capacidad instalada global superior a 1000 GW en 2024 (Didier et al., 2024), con proyecciones que estiman que las fuentes eólica y solar cubrirán aproximadamente el 25% de la demanda eléctrica mundial para 2028 (Bošnjaković et al., 2025), (IEA, 2023). En este contexto, la energía eólica se ha consolidado como una de las fuentes de energía limpia más atractivas, convirtiendo el seguimiento eficiente del punto de máxima potencia (MPPT) en una tarea esencial para maximizar la captura de energía y el aprovechamiento del recurso eólico (Bošnjaković et al., 2025), (Pande et al., 2021).

Los avances en técnicas basadas en datos han expandido su uso en tareas relacionadas con la gestión de los sistemas eólicos, incluyendo predicción y mantenimiento (Moshtaghi et al., 2025). Sin embargo, aún persisten necesidades críticas en el diseño de estrategias de control capaces de lograr un equilibrio entre potencia generada y fiabilidad estructural.

La energía eólica marina presenta una creciente tendencia en cuanto a su estudio y explotación, debido a la abundancia del recurso eólico mar adentro y a la disponibilidad de espacio. Estas ventajas han permitido el desarrollo de aerogeneradores de mayor escala, siendo las turbinas eólicas marinas más grandes y con más alta capacidad de generación que los modelos instalados en tierra (Jahani et al., 2022).

Aunque este incremento de escala contribuye a reducir el costo de la energía generada, también introduce desafíos físicos por tratarse de grandes sistemas con generadores de velocidad variable, con torres y palas flexibles, que están sometidos a fuertes cargas producidas por viento, olas y corrientes marinas (Jahani et al., 2022), (Li and Hou, 2025).

En la región de carga parcial (Region II), la turbina eólica opera con el objetivo de maximizar la captura de potencia mediante estrategias MPPT. Una solución clásica en esta tarea es el control óptimo de par (OTC), donde la referencia de par del generador sigue una ley no lineal basada en parámetros óptimos de operación de la turbina. Otras técnicas ampliamente utilizadas incluyen tip speed ratio (TSR), el método perturb and observe (P&O) y diferentes esquemas derivados de estas arquitecturas (Li and Hou, 2025), (Pao and Johnson, 2011).

Las principales limitaciones de los métodos convencionales de control MPPT se relacionan con su reducida capacidad de adaptación frente a condiciones dinámicas y con la omisión de sus efectos sobre la estructura de la turbina. En el caso de los aerogeneradores offshore de gran escala, las cargas dinámicas sobre componentes mecánicos y estructurales adquieren especial relevancia (Awada et al., 2021). Estudios recientes han demostrado que las vibraciones en la torre y en el eje de transmisión continúan siendo desafíos importantes en sistemas eólicos de potencia (Awada et al., 2021), (Machado and Dutkiewicz, 2024).

Estas complejidades motivan el desarrollo de estrategias de control avanzadas e híbridas, donde alternativas basadas en soft computing, redes neuronales, lógica difusa, sistemas neuro-difusos y aprendizaje por refuerzo han sido ampliamente estudiadas para resolver diferentes objetivos en turbinas eólicas, incluyendo tareas MPPT (Biyazne et al., 2026), (Li and Hou, 2025).

En este contexto, diversos trabajos recientes ejemplifican la aplicación de técnicas inteligentes en sistemas eólicos. En (Muñoz-Palomeque et al., 2023), (Muñoz-Palomeque et al., 2024), los autores proponen controladores basados en redes neuronales RBF para turbinas eólicas que ajustan de forma adaptativa el par y la velocidad del generador para maximizar la extracción de potencia y mejorar la estabilidad del sistema. En (Biyazne et al., 2026) se implementa un controlador híbrido ANFIS-PI para MPPT en un sistema eólico DFIG, donde el controlador ajusta dinámicamente las referencias para maximizar la potencia extraída del viento y mejorar la estabilidad frente a cambios de velocidad.

Por otra parte, en (Rajanala et al., 2025) los autores proponen un esquema MPPT basado en ANFIS optimizado mediante Chaotic Salp Swarm Optimization (CSSO), orientado a mejorar la extracción de potencia y la estabilidad de voltaje. Asimismo, (Chhipa et al., 2021) desarrolla un controlador MPPT basado en ANFIS con backpropagation, utilizando la velocidad del rotor como entrada para generar la referencia de par del convertidor, mejorando el seguimiento del punto de máxima potencia frente a un PI convencional.

Sin embargo, a pesar de los avances recientes, la mayoría de los estudios se enfocan principalmente en la maximización de potencia, sin considerar de manera integrada la mitigación de esfuerzos estructurales y vibraciones mecánicas.

Bajo estas circunstancias, este trabajo propone una estrategia de control híbrida ANFIS-OTC aplicada a una turbina eólica marina. Se desarrolla un controlador ANFIS entrenado offline que actúa como un programador adaptativo de ganancia para ajustar el comando de par OTC en términos de la velocidad del generador y la aceleración medida en la parte superior de la torre. El ANFIS aprende un factor adaptativo de ganancia que modifica una referencia de par basada en OTC e influenciada por métricas vibracionales, equilibrando la extracción de potencia y la mitigación de vibraciones mecánicas.

Considerando enfoques híbridos, a diferencia de otros estudios donde el seguimiento de potencia y la reducción de vibraciones son abordados por módulos de control independientes, la estrategia propuesta integra ambos objetivos en un único módulo ANFIS, entrenado mediante una metodología multipolítica de generación de datos sintéticos sensible a las vibraciones sobre la ley OTC.

El artículo está estructurado de la siguiente manera. La Sección 2 presenta las generalidades del aerogenerador y del control OTC convencional. La Sección 3 describe el diseño de la estrategia híbrida propuesta. La Sección 4 resume los resultados obtenidos mediante simulación de la aplicación del controlador, mientras que la Sección 5 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2. Turbina Eólica y Estrategia OTC Convencional

La turbina eólica marina considerada en este trabajo opera como un sistema de conversión de energía de velocidad variable diseñado para maximizar la extracción de potencia aerodinámica bajo condiciones de viento cambiantes. En las turbinas marinas modernas de gran escala, la interacción dinámica entre los subsistemas aerodinámicos, mecánicos y eléctricos introduce un comportamiento altamente no lineal que complica el diseño del controlador. Además, las condiciones de operación en alta mar someten a la estructura a perturbaciones continuas causadas por entradas de viento turbulentas, el movimiento de la plataforma inducido por las olas y la flexibilidad estructural, particularmente en la torre y los componentes del sistema de transmisión.

La potencia aerodinámica capturada del viento se puede expresar como:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire [kg/m^3], A es el área barrida por el rotor [m^2], V_w es la velocidad del viento [m/s], y C_p es el coeficiente de potencia, que depende principalmente del tip speed ratio λ (TSR) y del ángulo de las palas β . El tip speed ratio se define como:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_w} \quad (2)$$

donde ω_r representa la velocidad angular del rotor [rad/s] y R es el radio de las palas [m]. Para cada turbina existe un valor óptimo λ_{opt} en el cual el coeficiente de potencia alcanza también su máximo valor $C_{p,opt}$, favoreciendo la máxima extracción de potencia.

En la Región II de operación, donde la velocidad del viento no supera el valor nominal, la turbina opera típicamente bajo condiciones MPPT. Uno de los enfoques MPPT más utilizados es la estrategia de Control Óptimo de Par (OTC) debido a su simplicidad y menor dependencia de las mediciones directas de la velocidad del viento. En este método, la referencia de par electromagnético se genera según una relación cuadrática con la velocidad del generador:

$$T_{OTC} = K_{opt} \omega_g^2 \quad (3)$$

donde T_{OTC} es la referencia de par del generador, ω_g es la velocidad angular del generador, y K_{opt} es la constante óptima asociada con los parámetros de la turbina y el punto de operación óptima.

La constante óptima K_{opt} puede ser expresada como:

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^5 C_{p,max}}{\lambda_{opt}^3 G^3} \quad (4)$$

donde G es la relación de la caja de engranes.

Al mantener esta relación no lineal par-velocidad, la turbina opera cerca del TSR óptimo, maximizando la eficiencia de extracción de energía bajo diversas condiciones

de viento. Debido a su sencilla implementación, el control OTC sigue siendo una de las técnicas de control más comunes en aplicaciones industriales de energía eólica.

3. Estrategia de Control Híbrida ANFIS-OTC

Aunque el control OTC convencional proporciona un buen seguimiento del punto de máxima potencia, no incorpora explícitamente la mitigación de cargas estructurales. En este trabajo, se propone una estrategia de control híbrida donde la orden de par del OTC se modula mediante un factor de ganancia basado en datos, estimado a través de un Sistema de Inferencia Neurodifusa Adaptativa (ANFIS).

A diferencia de los enfoques que calculan directamente las acciones de control óptimas, el ANFIS propuesto no aprende una ley de par óptima. En su lugar, aprende una política heurística de programación de ganancia derivada de un conjunto de datos sintéticos multiobjetivo generado *offline* mediante perturbaciones sensibles a las vibraciones de la ley del OTC.

La Figura 1 ilustra la estructura general del controlador propuesto. En este esquema se observa cómo la referencia MPPT de referencia se genera utilizando la expresión OTC convencional, al tiempo que el bloque ANFIS calcula un factor de ganancia adaptativo K_g utilizando la velocidad del generador ω_g y la aceleración en la parte superior de la torre a_{TT} como variables de entrada. Finalmente, la referencia de par adaptativa aplicada al generador se obtiene como:

$$T_{ref} = K_g T_{OTC} \quad (5)$$

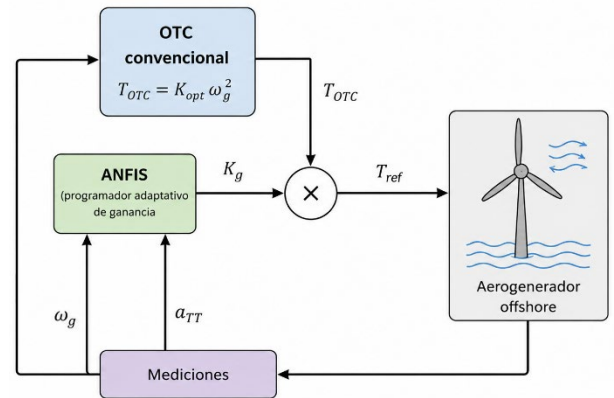


Figura 1: Estructura general del controlador híbrido ANFIS-OTC.

3.1. Entrenamiento offline

El modelo ANFIS se entrena usando un conjunto de datos sintéticos generados a partir de datos simulados obtenidos durante el funcionamiento del control OTC convencional. El proceso de entrenamiento con esta información sigue una estrategia de aumento de datos multipolítica diseñada para introducir distintos niveles de sensibilidad a la vibración en la referencia de par.

En primer lugar, para generar el comportamiento adaptativo deseado, se define una señal heurística de enseñanza base introduciendo una corrección relacionada con la vibración en la referencia de par OTC. El par base

modificado y utilizado durante la construcción del *dataset* se expresa como:

$$T_{base} = T_{OTC}(1 - \alpha_{base}a_{TT,norm}) \quad (6)$$

donde $a_{TT,norm}$ es la aceleración normalizada del punto más alto de la torre en el rango $[-1 \ 1]$, con una magnitud máxima de 2 m/s^2 , y α_{base} es un coeficiente de peso asociado con la sensibilidad de las vibraciones. En este trabajo se ha considerado un valor α_{base} de 0.2 como un peso moderado que permite al sistema de control reducir ligeramente la demanda de par durante la aparición de vibraciones estructurales sin afectar severamente el rendimiento MPPT.

Para enriquecer el conjunto de datos y mejorar la generalización, se generan múltiples políticas de control sintéticas variando el coeficiente de sensibilidad a la vibración $\alpha \in \{0, 0.5, 1\}$, produciendo, para cada caso:

$$T_{ref_heu} = T_{OTC}(1 - \alpha a_{TT,norm}) \quad (7)$$

El objetivo del ANFIS se define como una ganancia relativa entre dos políticas de par generadas bajo diferentes niveles de sensibilidad a la vibración. Esta formulación evita el cálculo directo del control óptimo y, en su lugar, construye una interpolación de los comportamientos de control basada en datos.

$$K_g = \frac{T_{ref_heu}}{T_{base}} \quad (8)$$

De este modo, el ANFIS puede aprender una relación no lineal entre las condiciones de operación de la turbina y la ganancia adaptativa para actuar sobre la extracción de energía y la mitigación de vibraciones.

Previo al entrenamiento, se eliminaron muestras inválidas y posteriormente las señales de velocidad del generador, aceleración de la torre y par del generador fueron filtradas mediante un filtro pasa-bajo Butterworth de segundo orden con frecuencia de corte de 1 Hz.

En este estudio, se emplea una estructura ANFIS de primer orden tipo Sugeno con funciones de pertenencia gaussianas. La arquitectura se configura con dos entradas, correspondientes a las variables normalizadas de velocidad del generador $\omega_{g,norm}$ y la aceleración normalizada de la parte superior de la torre $a_{TT,norm}$, con dos funciones de pertenencia por variable de entrada. Como variable de salida se establece la ganancia objetivo K_g .

Una vez entrenado, y en tiempo real, este módulo ANFIS se posiciona en serie con la ley OTC, lo que produce una referencia de par que considera dinámicamente la vibración a través del factor de ganancia estimado por el ANFIS, como se indica en la ecuación (5).

4. Resultados del Controlador Híbrido ANFIS-OTC

Para ese estudio, el controlador ANFIS-OTC se implementa en simulaciones con una turbina eólica marina flotante de 5MW de OpenFAST, comandado desde

Simulink. El modelo de turbina eólica fue sometido a condiciones de viento variable en la región de carga parcial, alcanzando valores máximos de 11.5 m/s . Asimismo, se consideraron los efectos hidrodinámicos y de oleaje mediante un espectro irregular tipo JONSWAP/Pierson-Moskowitz, con altura de olas de hasta 3.5 metros.

El comportamiento no lineal aprendido por el controlador ANFIS se representa a través de la superficie mostrada en la Figura 2, donde se observa la relación entre la velocidad del generador, la aceleración de la parte superior de la torre, y la ganancia adaptativa K_g .

Durante la operación online, el controlador se compara con la estrategia OTC convencional. El par del generador obtenido con ambos métodos se presenta en la Figura 3. Se observa como el controlador híbrido permite la obtención de una señal de par que introduce correcciones de la señal a lo largo del tiempo. Estas variaciones de amplitud se corresponden con la modificación de la intensidad de la señal para influenciar en la mitigación de vibraciones debido al factor de ganancia incorporado con el ANFIS.

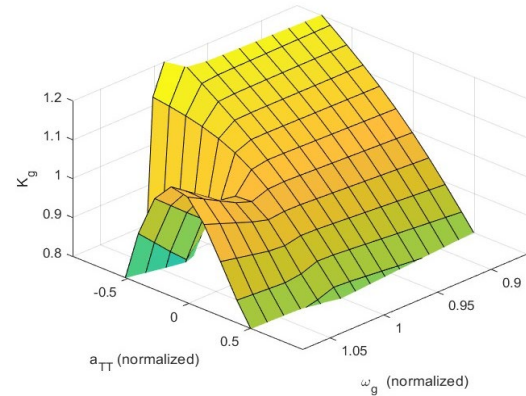


Figura 2: Superficie de control aprendida con el ANFIS.

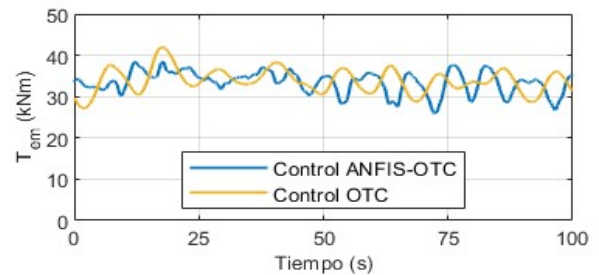


Figura 3: Respuestas de par con los controladores OTC y ANFIS-OTC.

Para analizar la capacidad de operación en MPPT, la potencia eléctrica generada y la velocidad del generador se ilustran en la Figura 4 y Figura 5, respectivamente. Los resultados muestran que la estrategia propuesta preserva el comportamiento general MPPT del controlador OTC. Con la introducción de correcciones moderadas de par, el impacto se ve reflejado en la potencia extraída, la cual se mantiene dentro de los niveles medios originales y responde al mismo tiempo con menores sobreoscilaciones.

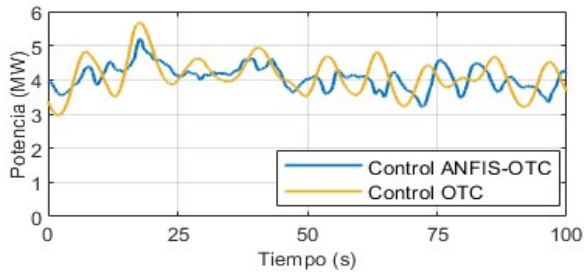


Figura 4: Respuestas de potencia con los controladores OTC y ANFIS-OTC.

Uno de los principales objetivos de la estrategia propuesta es la reducción de los efectos vibracionales de la estructura. Por esta razón, el espectro en frecuencias de la aceleración del movimiento en la parte superior de la torre se muestra en la Figura 6. Se distingue como el controlador ANFIS-OTC presenta una disminución de magnitud con respecto al control OTC. Esta respuesta indica que la modulación de par adaptativa contribuye a una dinámica estructural más suave durante el funcionamiento del aerogenerador.

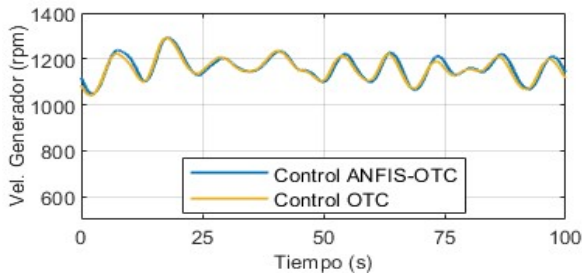


Figura 5: Respuestas de velocidad del generador con los controladores OTC y ANFIS-OTC.

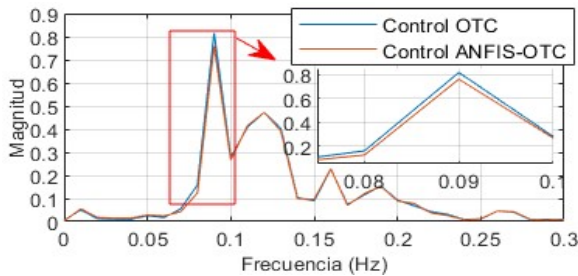


Figura 6: Espectro en frecuencia de la aceleración en la parte superior de la torre con los controladores OTC y ANFIS-OTC.

Tabla 1: Comparación de desempeño entre OTC y ANFIS-OTC

Métrica	OTC	ANFIS-OTC
C_p promedio	0.46748	0.46662
Potencia promedio (MW)	4.1272	4.0753
MSE del desplazamiento de la torre (m^2)	0.21864	0.20533
MSE de la aceleración de la torre (m^2/s^4)	0.89116	0.84286
Tasa de supresión de vibraciones	-----	4.2011%

Para proporcionar una comparación cuantitativa entre ambas estrategias de control, varios indicadores se resumen en la Tabla 1. Los resultados indican que la estrategia de control propuesta logra un compromiso entre energía extraída y mitigación de vibraciones mecánicas. La potencia media, directamente relacionada con el coeficiente de

potencia, se ven ligeramente reducidos en el control propuesto solo un 1.2%, compensando con el logro de una tasa de supresión de vibraciones del 4.20%, así como respaldado con la disminución del error cuadrático medio (MSE) de los movimientos de la torre.

5. Conclusiones

En este artículo se analizó una estrategia de control híbrida ANFIS-OTC para turbinas eólicas marinas en régimen MPPT. La metodología propuesta incorpora un programador de ganancia adaptativa basado en ANFIS a la estructura OTC convencional. Para este fin, se han utilizado las mediciones de velocidad del generador y aceleración de la parte superior de la torre como métricas representativas de cada uno de los puntos objetivos del estudio. Los resultados demostraron que el controlador propuesto conserva la capacidad MPPT de la estrategia OTC clásica, al tiempo que reduce los niveles de vibración estructural y atenúa las fluctuaciones de par durante el funcionamiento de la turbina eólica.

Los resultados confirman que la técnica de control adaptativo puede mejorar el equilibrio entre la generación de potencia y el rendimiento estructural del aerogenerador sin aumentar significativamente la complejidad de su implementación.

Si bien los resultados demuestran la viabilidad de la estrategia propuesta, el enfoque presenta limitaciones inherentes al uso de datos sintéticos, como la dependencia de la calidad del dataset y la necesidad de reentrenamiento ante cambios en el modelo de turbina o las condiciones de operación.

El trabajo futuro se centrará en evaluar el controlador propuesto bajo condiciones operativas marinas más exigentes, donde se pueda también evaluar la capacidad del controlador para diferenciar su respuesta ante perturbaciones de distinto origen. Adicionalmente, se contempla un análisis sistemático de sensibilidad de los parámetros de configuración del controlador para caracterizar su efecto en el compromiso mitigación-rendimiento y su impacto en la estabilidad del sistema, así como la incorporación de un análisis de cargas equivalentes de daño (DEL) que permita relacionar de forma más directa la reducción de vibraciones obtenida con la prolongación de la vida útil de los componentes mecánicos de la torre.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, con el proyecto MCI/AEI/FEDER PID2024-155653OB-C21.

Referencias

- Awada, A., Younes, R. and Ilinca, A. 2021. Review of Vibration Control Methods for Wind Turbines. *Energies*, 14(11), p.3058. DOI: 10.3390/en14113058.
- Biyazne, L.W., Tuka, M.B., Abebe, Y.M. and Wellhöfer, A. 2026. Enhancing MPPT performance of a grid-connected Doubly-Fed induction generator-

- based wind power plant using hybrid ANFIS-PI control strategy. *Scientific Reports*, 16(1). DOI: 10.1038/s41598-026-36021-3.
- Bošnjaković, M., Martinović, M. and Đokić, K. 2025. Application of Artificial Intelligence in Wind Power Systems. *Applied Sciences*, 15(5), p.2443. DOI: 10.3390/app15052443.
- Chhipa, A.A., Kumar, V., Joshi, R.R., Chakrabarti, P., Jasinski, M., Burgio, A., Leonowicz, Z., Jasinska, E., Soni, R. and Chakrabarti, T. 2021. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System-Based Maximum Power Tracking Controller for Variable Speed WECS. *Energies*, 14(19), p.6275. DOI: 10.3390/en14196275.
- Didier, F., Liu, Y.-C., Salah Laghrouche and Depernet, D. 2024. A Comprehensive Review on Advanced Control Methods for Floating Offshore Wind Turbine Systems above the Rated Wind Speed. *Energies*, 17(10), pp.2257–2257. DOI: 10.3390/en17102257.
- International Energy Agency (IEA). 2023. *Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028*. Paris: IEA.
- Jahani, K., Langlois, R.G. and Afagh, F.F. 2022. Structural dynamics of offshore Wind Turbines: A review. *Ocean Engineering*, 251, p.111136. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111136.
- Li, J. and Hou, G. 2025. Data-driven modeling and MPPT control of offshore wind turbines based on machine learning approach. *Ocean Engineering*, 329, pp.121121–121121. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121121.
- Machado, M.R. and Dutkiewicz, M. 2024. Wind turbine vibration management: An integrated analysis of existing solutions, products, and Open-source developments. *Energy reports*, 11, pp.3756–3791. DOI: 10.1016/j.egy.2024.03.014.
- Moshtaghi, P., Hajjaligol, N. and Rafiei, B. 2025. A comprehensive review of artificial intelligence applications in wind energy power generation. *Sustainable Futures*, 9, p.100638. DOI: 10.1016/j.sftr.2025.100638.
- Muñoz-Palomeque, E., Sierra-García, J.E. y Santos, M. 2024. Enhancing offshore wind turbines performance with hybrid control strategies using neural networks and conventional controllers. *Journal of Computational Design and Engineering* 12(3), pp. 80-97. DOI: 10.1093/jcde/qwae103.
- Muñoz-Palomeque, E., Sierra-García, J.E. y Santos, M. 2023. Wind turbine maximum power point tracking control based on unsupervised neural networks. *Journal of Computational Design and Engineering*, 10(1), pp. 108–121. DOI: 10.1093/jcde/qwac132.
- Pande, J., Nasikkar, P., Kotecha, K. and Varadarajan, V. 2021. A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Conversion Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11), p.1187. DOI: 10.3390/jmse9111187.
- Pao, L. and Johnson, K. 2011. Control of Wind Turbines. In *IEEE Control Systems Magazine*, 31(2), pp. 44-62. DOI: 10.1109/MCS.2010.939962.
- Rajanala, P., Kumar, M.K., Giriprasad, A., Choi, J.-H., Rao, K.V.G., Sravan, V.S. and Reddy, Ch.R. 2025. Intelligent MPPT and coordinated control for voltage stability in brushless DFIG wind turbines. *Scientific Reports*, 15(1). DOI: 10.1038/s41598-025-08676-x.