

Técnicas Metaheurísticas para el Control de Aerogeneradores Offshore: Estado del Arte y Perspectivas

Bayona, E.^{a,*}, Sierra-García, J.E.^a, Santos, M.^b

^aDepartamento de Digitalización, Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Burgos, España.

^bInstituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

To cite this article: Bayona, E., Sierra-García, J.E., Santos, M. 2025. Metaheuristic Techniques for the Control of Offshore Wind Turbines: State of the Art and Perspectives. XX Simposio CEA de Control Inteligente, Huelva (Spain), 2025.

Resumen

La creciente complejidad de los sistemas eólicos marinos ha impulsado el desarrollo de estrategias de control avanzadas capaces de afrontar condiciones operativas no lineales, inciertas y dinámicamente acopladas. Este artículo presenta una revisión del reciente estado del arte en técnicas de optimización metaheurísticas aplicadas a la mejora y sintonía de controladores en aerogeneradores offshore. Se analizan enfoques que integran metaheurísticas con modelos predictivos, lógicos y adaptativos, abarcando aplicaciones clave como el control de pitch y torque, la regulación del punto de máxima potencia, la mitigación de vibraciones estructurales y cargas dinámicas. Además, se identifican los principales desafíos técnicos y limitaciones que afectan su escalabilidad e implementación industrial. La revisión evidencia el alto potencial de estas estrategias para avanzar hacia sistemas de control más eficientes, robustos y sostenibles en el ámbito eólico marino.

Palabras clave: Control inteligente, energía eólica, optimización metaheurística, aerogeneradores offshore.

Hybrid Metaheuristic Techniques for Offshore Wind Turbine Control: State of the Art and Future Directions

Abstract

The increasing complexity of offshore wind systems has driven the development of advanced control strategies capable of handling nonlinear, uncertain, and dynamically coupled operational conditions. This paper presents a review of the recent state of the art in metaheuristic optimization techniques applied to the improvement and tuning of offshore wind turbine controllers. It analyzes approaches that integrate metaheuristics with predictive, fuzzy, and adaptive models, covering key applications such as pitch and torque control, maximum power point tracking, structural vibration mitigation, and dynamic loads. Additionally, it identifies major technical challenges and limitations affecting scalability and industrial deployment. The review highlights the high potential of these strategies to advance toward more efficient, robust, and sustainable control systems in the offshore wind domain.

Keywords: Intelligent control, offshore, wind energy, hybrid optimization, wind turbines.

1. Introducción

La energía eólica se ha consolidado como una de las alternativas renovables más prometedoras para satisfacer la creciente demanda energética mundial (Song et al. (2024)). En 2022 la capacidad eólica instalada superó los 900 GW a nivel global, con previsiones de agregar otros 500 GW antes de 2030 (Narayanan et al. (2025)). Dentro de este auge, los aerogeneradores offshore destacan por aprovechar vientos más fuertes y constan-

tes que sus equivalentes en tierra, sin las limitaciones de espacio y con menor impacto visual y acústico (Serrano et al. (2022)). Su potencial de generación, sin las restricciones espaciales de los sistemas terrestres, contrasta con una serie de desafíos técnicos que afectan directamente al rendimiento, fiabilidad y vida útil de los aerogeneradores. Entre ellos destacan la alta turbulencia, la variabilidad del viento y las condiciones ambientales extremas, que dificultan el diseño de controladores robustos y

*Autor para correspondencia: ebayona@ubu.es

eficientes, especialmente en turbinas flotantes en aguas profundas (Muñoz-Palomeque et al. (2024)).

Para garantizar seguridad operativa, máxima captación de potencia y vida útil prolongada, los sistemas de control de aerogeneradores offshore deben regular variables críticas como el ángulo de pala (pitch) y el par del generador, manteniendo la velocidad de rotor y la potencia dentro de límites deseados incluso bajo perturbaciones severas (Wen et al. (2025)). Los métodos de control convencionales, si bien efectivos en condiciones nominales, presentan limitaciones al enfrentar dinámicas altamente no lineales o perturbaciones estocásticas comunes en aerogeneradores marinos (Didier et al. (2024)). Como respuesta, se produce búsqueda de estrategias de control avanzadas, incluyendo técnicas de inteligencia artificial (IA) y algoritmos metaheurísticos de optimización, que permitan un desempeño más robusto y adaptativo (Bouabdallaoui et al. (2023)).

En años recientes ha cobrado impulso el uso de técnicas metaheurísticas aplicadas al control eólico. Estas combinan algoritmos de optimización bio-inspirados –como *Particle Swarm Optimization (PSO)*, *algoritmos genéticos (GA)*, *Differential Evolution (DE)* o *Grey Wolf Optimizer (GWO)*– con modelos de IA y control inteligente –como redes neuronales artificiales (ANN), lógica difusa, o aprendizaje por refuerzo profundo– para diseñar controladores capaces de enfrentar las condiciones desafiantes de los aerogeneradores offshore (Machado et al. (2024b)).

Siguiendo el trabajo de Bouabdallaoui et al. (2023) en materia de predicción de vientos o Leon-Medina et al. (2025) acerca del uso de técnicas de gemelo digital, este artículo presenta una revisión del estado del arte en técnicas metaheurísticas para el control de aerogeneradores offshore. Se identifican y analizan las principales técnicas aplicadas al sintonizado y mejora del control de aerogeneradores en esta línea emergente de investigación. Asimismo, se discuten los desafíos técnicos actuales y se esbozan perspectivas futuras para orientar nuevas investigaciones desde un enfoque interdisciplinario.

2. Aplicaciones de técnicas metaheurísticas en el control de aerogeneradores offshore

2.1. Control de Pitch

El control del ángulo de las palas (pitch) tiene un uso fundamental en aerogeneradores offshore para regular la potencia generada y mitigar las cargas estructurales, especialmente en turbinas flotantes. Las técnicas metaheurísticas de optimización han demostrado ser eficaces para superar las limitaciones de los controladores clásicos mediante enfoques más adaptativos, como el de (Maroufi et al. (2020)), en el que se propone un controlador FFPID, optimizado con el *Bat Algorithm (BA)*, para controlar una turbina eólica con generador síncrono de imanes permanentes (WT-PMMSG). El objetivo es maximizar la potencia a bajas velocidades de viento y proteger la turbina a altas velocidades mediante control de pitch.

Otro enfoque planteado en Narayanan et al. (2025), donde se propone un controlador de pitch en cascada basado en una red Elman mejorada, cuyos parámetros se ajustan mediante un PSO personalizado. Este esquema neuro-controlador optimizado por enjambre mostró generar potencia nominal de forma efi-

caz bajo vientos turbulentos, superando a redes neuronales no optimizadas.

De modo similar, Fan et al. (2025) integran metaheurísticas como gravitational search, bat algorithm o grupos de partículas para entrenar modelos neuronales en esquemas de control inteligente de sistemas eólicos y su gestión operativa en tiempo real.

En Serrano et al. (2022) se desarrolla un sistema de control difuso para el paso de palas (pitch control) en turbinas flotantes que combina controladores fuzzy con optimización mediante algoritmos genéticos (GA). El sistema se implementa en una simulación realista con FAST, mostrando mejoras significativas en la reducción de vibraciones (hasta un 33 % en pitch de plataforma y 23 % en desplazamiento de torre).

Además, Asghar et al. (2024) implementaron un controlador de pitch basado en redes neuronales recurrentes para turbinas de velocidad variable, logrando una mejora significativa en la eficiencia energética y la reducción de cargas dinámicas en comparación con métodos tradicionales.

Además de combinarse con modelos de IA, los propios algoritmos metaheurísticos pueden utilizarse con técnicas de lógica difusa para aprovechar sus fortalezas complementarias. En este caso, en Pehlivan et al. (2022) presentan un enfoque innovador para el control del ángulo de pitch en aerogeneradores, combinando lógica difusa con algoritmos genéticos para optimizar el rendimiento bajo condiciones de viento variables. Los parámetros de este controlador se ajustan mediante un algoritmo genético, lo que permite una adaptación eficaz a las fluctuaciones del viento.

2.2. Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) y control de torque

El seguimiento eficiente del punto de máxima potencia (MPPT) bajo condiciones inciertas de viento es un desafío importante en turbinas offshore. Los enfoques combinados permiten un seguimiento más robusto y preciso del punto óptimo sin requerir modelos exacto como se muestra en Mohamed et al. (2023) donde se muestran resultados prometedores con controladores PID optimizados por técnicas metaheurísticas basadas en *Particle Swarm Optimizaation* y *Gravitational Search Algorithm (GSO)* para aumentar el rendimiento en plantas offshore.

Recientemente, Song et al. (2021) presentaron un esquema de control predictivo no lineal (NMPC) para maximizar la energía capturada por turbinas de gran diámetro, donde el solucionador de la optimización en línea emplea un algoritmo *Yin-Yang* basado en *Grey Wolf Optimizer*. En esta estrategia, el modelo de la turbina predice la potencia futura y el algoritmo GWO modificado busca la secuencia óptima de par de control que mantenga al sistema en su punto de máxima eficiencia aerodinámica. El resultado fue un controlador MPPT capaz de reaccionar rápidamente a cambios de viento, alcanzando el punto óptimo de potencia de manera más estable y veloz que técnicas basadas únicamente en gradiente

Muñoz-Palomeque et al. (2023) implementan un controlador MPPT para una turbina offshore de 1.5 MW combinando redes neuronales de base radial (RBF-NN) con algoritmos genéticos. La estrategia fue evaluada en OpenFAST, mejorando la captación energética frente a controladores difusos o lineales no optimizados.

Tabla 1: Principales técnicas de optimización aplicadas al control de aerogeneradores offshore

Subsistema	Técnica Aplicada	Fuente	Validación / Simulador	Objetivo de Control
Control de Pitch	Controlado FFPID sintonizado mediante BA	Maroufi et al. (2020)	Turbina eólica con generador síncrono de imanes permanentes (WT-PMSG)	Controlador FFPID, optimizado con BA para control del pitch para proteger la turbina y maximizar la potencia
	Red Elman mejorada con PSO	Narayanan et al. (2025)	Turbina en entorno turbulento	Controlador en cascada capaz de mantener potencia nominal bajo viento turbulento con rápida convergencia
	NN entrenadas con GSA, Bat y PSO	Fan et al. (2025)	Sistema eólico simulado	Entrenamiento de redes para control inteligente adaptativo en tiempo real de turbinas eólicas
	Controlador fuzzy optimizado con GA	Serrano et al. (2022)	FAST (modelo flotante)	Reducción de vibraciones: 33 % en pitch y 23 % en desplazamiento de torre, mejorando robustez estructural
	RNN adaptativa en sistema offshore	Asghar et al. (2024)	Modelo VSVT offshore	Minimización de cargas dinámicas, aumento de eficiencia energética bajo viento variable
	Lógica difusa (3 entradas) con ajuste GA	Pehlivan et al. (2022)	Plataforma simulada	Adaptación rápida a variabilidad del viento mediante ajuste óptimo de reglas difusas
MPPT / Torque	Particle Swarm Optimization combinado con Gravitational Search Algorithm	Mohamed et al. (2023)	Entorno simulado offshore	Seguimiento estable y preciso del punto de máxima potencia bajo turbulencia incierta
	NMPC con GWO modificado (Yin-Yang)	Song et al. (2021)	Turbina offshore de gran diámetro	Predicción de potencia futura y cálculo en línea del par óptimo maximizando eficiencia aerodinámica
	RBF-NN con ajuste por GA	Muñoz-Palomeque et al. (2023)	OpenFAST	Aumento significativo en generación energética respecto a métodos convencionales no optimizados
	Fuzzy adaptativo + NIWOA	Lei et al. (2025)	Sistema simulado	Mayor precisión de ajuste difuso para mejorar la captación de potencia con respuesta rápida y eficiente
	Método con conductancia adaptativa + P&O	Chen et al. (2019)	Sistema offshore eólico-solar	Menores oscilaciones en régimen permanente, con mejoras en estabilidad de seguimiento MPPT
	ML con regresión para MPPT	Li and Hou (2025)	Matlab/Simulink	Control MPPT basado en predicción de condiciones de viento, mejorando eficiencia en tiempo real
Control estructural	RL multiagente + DE	Yu and Lu (2023)	Parque eólico offshore completo	Coordinación yaw-potencia distribuida optimizada para maximizar rendimiento conjunto y eficiencia global
	PSODI para optimización de ANFIS	M'zoughi et al. (2024)	Plataforma offshore con OWC	Atenuación de vibraciones debidas a viento y oleaje mediante ajuste inteligente de válvulas OWCs
	Diseño optimizado de metamateriales estructurales	Machado et al. (2024a)	Torre estructural offshore	Disipación pasiva de vibraciones en frecuencias resonantes típicas del mástil, logrando reducción de 15–30 %
	TMD con ajuste mediante GA y técnicas H_2	Patro et al. (2024)	Plataforma flotante 5MW (FOWT)	Reducción de cabeceo y mantenimiento de potencia estable en entornos oceánicos dinámicos
	MR-TVA con técnica evolutiva	Martynowicz et al. (2025)	Modelo tridimensional offshore	Reducción de deflexión estructural en condiciones extremas de viento y oleaje mediante amortiguación adaptativa
	Controlador convencional complementado con RNN	Chang and Peng (2025)	Turbinas eólicas offshore flotantes	Estabilidad de potencia y disminución de vibraciones en la torre bajo viento cambiante
	MTMD optimizados con GA	Han et al. (2022)	Turbinas offshore sometida a viento y oleaje	Reducción efectiva de vibraciones mediante optimización multi-masa semiactiva
	PID difuso con ajuste PSO/GWO	Ferahtia et al. (2023)	Simulador dinámico	Afinación robusta de parámetros PID bajo turbulencias elevadas para control estructural efectivo
Control de Pitch	IPC con fuzzy adaptativo + PSO	Zhang et al. (2025)	Aerogenerador offshore 3D	Reducción de momentos de vuelco y cargas asimétricas en turbinas individuales mediante optimización del control IPC

Existen propuestas de controladores de potencia basados en lógica difusa adaptativa, cuyo objetivo es maximizar la potencia extraída por el aerogenerador. Para optimizar este control difuso Lei et al. (2025) emplearon un algoritmo inspirado en la naturaleza –*Whale Optimization Algorithm* (WOA) mejorado– que ajusta las reglas y parámetros difusos. El *Novel Improved WOA* (NIWOA) demostró convergencia más rápida y mayor precisión de optimización que versiones estándar, contribuyendo a incrementar la generación energética del aerogenerador.

Chen et al. (2019) desarrollan un esquema combinado MPPT para sistemas offshore eólico-solar, utilizando una combinación de métodos de incremento de conductancia adaptativos y observación de perturbaciones. Este enfoque mejora la velocidad de convergencia y reduce las oscilaciones en estado estacionario.

Li and Hou (2025) proponen un método de modelado basado en aprendizaje automático para implementar el control MPPT en turbinas eólicas offshore, logrando una mejora en la eficiencia energética y una respuesta más rápida a las variaciones del viento.

A nivel de parques eólicos completos, trabajos como Yu and Lu (2023) han ensayado combinar RL con heurísticas evolutivas para optimizar la generación total. Se propuso un esquema donde múltiples agentes de aprendizaje por refuerzo coordinan el ángulo de yaw y la consigna de potencia de turbinas distribuidas, mientras un algoritmo de evolución diferencial multi-objetivo ajusta los parámetros de los agentes para maximizar la producción conjunta y eficiencia neta del parque.

2.3. Mitigación de vibraciones y de cargas dinámicas

La atenuación de vibraciones estructurales es un aspecto fundamental para aumentar la vida útil de los componentes en aerogeneradores offshore. Los enfoques combinados han demostrado una notable capacidad para integrar control estructural activo o semiactivo con estrategias de optimización evolutiva. En el enfoque planteado por M'zoughi et al. (2024) se usa PSODI (Particle Swarm Optimization con inercia decreciente), un algoritmo de metaheurística evolutiva, para optimizar los parámetros de ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*), sistema inteligente basado en lógica difusa y redes neuronales, que ajusta en tiempo real las válvulas de los OWCs (*Oscillating Water Columns*) para reducir la vibración estructural inducida por el viento y las olas.

Machado et al. (2024a) proponen un sistema de control pasivo basado en metamateriales estructurales integrados en la torre del aerogenerador. Mediante una optimización de diseño, los autores mostraron una reducción significativa de amplitudes de vibración en frecuencias de resonancia típicas del mástil.

Patro et al. (2024) investigan la optimización paramétrica de amortiguadores de masas múltiples sintonizadas (MTMDs) distribuidos a lo largo de una torre y una estructura de monopilote sometidas a fuerzas estocásticas de viento y oleaje. Los parámetros de los amortiguadores sintonizados (TMD) se optimizan mediante técnicas H_2 , empleándose algoritmos metaheurísticos, como el algoritmo genético (GA), para refinar la determinación de estos parámetros óptimos.

Además, Martynowicz et al. (2025) desarrollaron un sistema combinado de amortiguadores de masa sintonizados con amortiguadores de fluido magnetorreológico (MR-TVA) para

turbinas offshore, logrando una reducción en la deflexión máxima de la torre en condiciones de viento y oleaje alineados.

De forma análoga, se han reportado controladores fuzzy-PID cuyas constantes K_p , K_i , K_d son afinadas por PSO, GWO u otras heurísticas, combinando la robustez de la difusa con la optimización global de estas técnicas (Ferahtia et al. (2023)). Estas aproximaciones genético-difusas han mostrado mejor desempeño que ajustes manuales, especialmente bajo turbulencia.

Chang and Peng (2025) desarrollaron una arquitectura combinada para turbinas flotantes que combina controladores convencionales con redes neuronales recurrentes. El sistema fue validado en simulaciones, y mostró mejoras tanto en estabilidad de potencia como en reducción de vibraciones de la torre aumentando hasta un 30 % la eficiencia del controlador comparado con controladores tradicionales TMD.

Otra línea de investigación sugiere el uso de dispositivos adicionales, como amortiguadores sintonizados múltiples (MTMD), cuyos parámetros se optimizan mediante algoritmos metaheurísticos. Han et al. (2022) evaluaron estrategias de control pasivo en turbinas flotantes semisumergibles, optimizando la configuración de los MTMD mediante algoritmos genéticos para reducir las vibraciones inducidas por viento y olas. Los resultados demostraron una mejora significativa respecto a otros enfoques, y el modelo fue validado con OpenFAST para garantizar realismo dinámico.

El control de pitch individual (IPC) destaca por su capacidad para mitigar cargas cíclicas en aerogeneradores. Algunos estudios han aplicado optimización metaheurística para diseñar controladores IPC avanzados. Zhang et al. (2025), por ejemplo, utilizaron PSO para ajustar un controlador IPC basado en lógica difusa adaptativa, logrando reducir momentos de vuelco y cargas asimétricas en un aerogenerador offshore 3D. Aunque el IPC implica mayor complejidad, las metaheurísticas permiten una calibración eficiente de estos controladores de alta dimensión.

3. Desafíos actuales y direcciones futuras en el control de aerogeneradores offshore

A partir del análisis de las aplicaciones recientes, se identifican varios desafíos técnicos y metodológicos que condicionan la madurez y aplicabilidad de técnicas combinadas en el contexto offshore. En este apartado se discuten estos aspectos clave y se esbozan algunas líneas de investigación futuras que surgen como consecuencia natural de las limitaciones actuales.

3.1. Desafíos en la Implementación de Técnicas Combinadas

Uno de los principales retos radica en la selección y ajuste de los componentes del sistema de control, tanto desde el punto de vista del algoritmo de optimización como del modelo del sistema. La combinación de técnicas puede resultar en una arquitectura con alta complejidad computacional, lo que limita su aplicabilidad en tiempo real en sistemas embebidos de turbinas offshore. Un ejemplo de ello es el trabajo de Bošnjaković et al. (2025) donde aborda la integración de redes neuronales como modelos sustitutos (surrogate models) en algoritmos evolutivos como PSO (Particle Swarm Optimization) y algoritmos genéticos (GA) para optimizar el diseño aerodinámico de palas de turbinas eólicas. Esta combinación busca reducir la carga computacional asociada a las simulaciones aerodinámicas complejas.

Tabla 2: Resumen de desafíos y líneas futuras en el uso de técnicas evolutivas para aerogeneradores offshore

Categoría	Descripción	Ejemplo / Fuente	Aplicabilidad	Técnicas implicadas
Complejidad computacional	Controladores avanzados presentan latencia o sobrecarga en ejecución embebida	Kumar et al. (2023), Wang et al. (2024)	Implementación en tiempo real	MPC, NMPC, Técnicas metaheurísticas
Reducción de complejidad computacional	Aplicación de IA para optimizar el diseño aerodinámico de palas mediante iteraciones rápidas y eficientes	Bošnjaković et al. (2025)	Diseño de turbinas más eficiente y adaptable a condiciones cambiantes	Redes neuronales, algoritmos de optimización, modelos de predicción
Optimización online	Ajuste dinámico del modelo mediante medición en planta	Andersson and Imsland (2020)	Control en campo con realimentación de datos	Modifier Adaptation
Validación experimental	Predominio de validaciones en simulación sobre entornos reales	Wang et al. (2024), Leon-Medina et al. (2025)	Simulación vs. prototipado físico	OpenFAST, entornos de simulación
Digital twins	Reconfiguración de control basada en gemelos digitales	Haghshenas et al. (2023), Leon-Medina et al. (2025)	Mantenimiento predictivo y autoajuste de controladores	Gemelo digital + SCADA
Optimización multiobjetivo	Co-diseño estructural y de control bajo múltiples objetivos simultáneos	Wang et al. (2025), Ramli et al. (2023)	Diseño de sistemas y controladores	NSGA-II, MOEA/D
Benchmarking y validación cruzada	Comparación homogénea entre algoritmos en entornos abiertos	Manikowski et al. (2021), Monroc et al. (2025)	Validación reproducible y comparativa	WFCRL, entornos RL

También Kumar et al. (2023) observa que ciertos controladores no lineales, como los basados en MPC o NMPC, logran mejoras significativas en simulación, pero conllevan un incremento sustancial en demanda computacional, lo cual compromete su aplicabilidad en campo.

En este contexto, el trabajo de Andersson and Imsland (2020) propone el uso de adaptación de modificadores (Modifier Adaptation, MA) como estrategia para reducir el error entre modelos sustitutos y la planta real. Esta técnica se apoya en mediciones reales de la planta para ajustar en tiempo real las decisiones de control, mejorando la viabilidad de aplicar optimización online sin necesidad de modelos completamente precisos. Aunque prometedora, su aplicabilidad a sistemas offshore está limitada por el nivel de instrumentación y fiabilidad de las mediciones en condiciones marinas.

Otro aspecto crítico es la escasez de validaciones experimentales o en bancos de pruebas. Aunque herramientas como OpenFAST permiten simulaciones detalladas, la brecha entre simulación y entorno real sigue siendo amplia. La mayoría de los trabajos publicados que proponen controladores avanzados lo hacen sobre entornos simulados, sin evaluación en plataformas experimentales o prototipos a escala. Esto limita la confianza en su rendimiento real en condiciones marinas (Wang et al. (2024)).

3.2. Direcciones Prometedoras para Investigación Futura

Una dirección clave es el desarrollo de estrategias combinadas adaptativas que ajusten su estructura en función del estado del sistema y el entorno operativo. La integración de gemelos digitales (digital twins) con algoritmos metaheurísticos puede facilitar este enfoque, permitiendo reconfigurar el controlador sobre la marcha. Los gemelos digitales permiten monitorización, simulación paralela y retroalimentación en tiempo real, abriendo la posibilidad a esquemas de aprendizaje adaptativo con mejora progresiva del modelo (Leon-Medina et al. (2025)).

En particular, el trabajo de Haghshenas et al. (2023) presenta una plataforma basada en gemelo digital para mantenimiento predictivo de turbinas eólicas offshore basada en Unity3D para visualización y arquitectura unificada OPC (OPC-UA) para

la comunicación de datos. Esta aproximación permite detectar desviaciones de rendimiento y ajustar la estrategia de control de forma anticipada, lo cual podría extenderse a esquemas de control combinados con aprendizaje continuo.

Otra línea relevante es la incorporación de optimización multiobjetivo no solo para el diseño del controlador, sino también para la toma de decisiones en tiempo real, integrando objetivos energéticos, estructurales y de mantenimiento. Algoritmos como NSGA-II o MOEA/D permiten encontrar configuraciones óptimas con equilibrio entre carga estructural y eficiencia energética. Se han publicado casos de diseño conjunto de controladores y estructuras mediante estas técnicas, con mejoras claras en robustez y comportamiento dinámico (Wang et al. (2025); Manikowski et al. (2021)).

Ramli et al. (2023) analizan en profundidad las características que debe tener un algoritmo evolutivo para optimizar la disposición de turbinas en parques eólicos. Su revisión sistemática sugiere criterios de evaluación para garantizar una convergencia robusta y eficiente, lo cual es directamente aplicable a problemas de control combinados con técnicas de optimización donde se persiguen múltiples objetivos simultáneos.

Finalmente, se identifica una necesidad creciente de marcos estándares para la comparación objetiva de combinaciones de técnicas de optimización. El desarrollo de entornos comunes de benchmarking, como WFCRL, permite evaluar distintas estrategias bajo simuladores compartidos con datos y condiciones homogéneas. Esto mejora la reproducibilidad y fomenta la adopción de buenas prácticas en control inteligente para energías renovables offshore (Monroc et al. (2025)).

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, como parte del proyecto MCI/AEI/FEDER number PID2021-123543OB-C21.

Referencias

Andersson, L. E., Imsland, L., Jul. 2020. Real-time optimization of wind farms using modifier adaptation and machine learning. *Wind Energy Science* 5 (3),

- 885–896.
DOI: 10.5194/wes-5-885-2020
- Asghar, A. B., Ehsan, R., Naveed, K., Al-Ammar, E. A., Ejsmont, K., Nejman, M., Apr. 2024. Recurrent neural network for pitch control of variable-speed wind turbine. *Science Progress* 107 (2).
DOI: 10.1177/00368504241243160
- Bouabdallaoui, D., Haidi, T., Jaadi, M. E., 2023. Review of current artificial intelligence methods and metaheuristic algorithms for wind power prediction. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 29 (2), 626–634.
DOI: 10.11591/ijeecs.v29.i2.pp626-634
- Bošnjaković, M., Martinović, M., Đokić, K., 2025. Application of artificial intelligence in wind power systems. *Applied Sciences* 15 (5), 2443.
DOI: 10.3390/app15052443
- Chang, T., Peng, Y., Aug. 2025. Hybrid vibration control of floating offshore wind turbine structure considering multi-directional waves. *Ocean Engineering* 335, 121533.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121533
- Chen, J., Yao, W., Zhang, C.-K., Ren, Y., Jiang, L., 2019. Design of robust mppt controller for grid-connected pmsg-based wind turbine via perturbation observation based nonlinear adaptive control. *Renewable Energy* 134, 478–495.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.048>
- Didier, F., Liu, Y.-C., Laghrouche, S., Depernet, D., May 2024. A comprehensive review on advanced control methods for floating offshore wind turbine systems above the rated wind speed. *Energies* 17 (10), 2257.
DOI: 10.3390/en17102257
- Fan, H., Wu, H., Li, S., Han, S., Ren, J., Huang, S., Zou, H., Jan. 2025. Optimal scheduling method of combined wind–photovoltaic–pumped storage system based on improved bat algorithm. *Processes* 13 (1), 101.
DOI: 10.3390/pr13010101
- Ferahtia, S., Houari, A., Machmoum, M., Ait-Ahmed, M., Saim, A., Oct. 2023. Optimal control strategy for floating offshore wind turbines based on grey wolf optimizer. *Applied Sciences* 13 (20), 11595.
DOI: 10.3390/app132011595
- Haghsheenas, A., Hasan, A., Osen, O., Mikalsen, E. T., Jan. 2023. Predictive digital twin for offshore wind farms. *Energy Informatics* 6 (1).
DOI: 10.1186/s42162-023-00257-4
- Han, D., Wang, W., Li, X., Su, X., Nov. 2022. Optimization design of multiple tuned mass dampers for semi-submersible floating wind turbine. *Ocean Engineering* 264, 112536.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112536
- Kumar, A., Sreenath, J. G., Tripathy, P., Dec. 2023. A review of wind energy optimization methods. In: 2023 11th National Power Electronics Conference (NPEC). IEEE, pp. 1–6.
DOI: 10.1109/npec57805.2023.10384999
- Lei, B., Tang, H., Su, Y., Ru, Y., Fei, S., May 2025. Fuzzy adaptive power optimization control of wind turbine with improved whale optimization algorithm and kernel extreme learning machine. *Expert Systems with Applications* 272, 126750.
DOI: 10.1016/j.eswa.2025.126750
- Leon-Medina, J. X., Tibaduiza, D. A., Parés, N., Pozo, F., May 2025. Digital twin technology in wind turbine components: A review. *Intelligent Systems with Applications*, 200535.
DOI: 10.1016/j.iswa.2025.200535
- Li, J., Hou, G., 2025. Data-driven modeling and mppt control of offshore wind turbines based on machine learning approach. *Ocean Engineering* 329.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121121>
- Machado, M., Dutkiewicz, M., Colherinhas, G., Mar. 2024a. Metamaterial-based vibration control for offshore wind turbines operating under multiple hazard excitation forces. *Renewable Energy* 223, 120056.
DOI: 10.1016/j.renene.2024.120056
- Machado, M. O., Fernandes, I. F. d. C., Maia, S. M. D. M., Goldbarg, E. F. G., Dec. 2024b. A hybrid multi-agent metaheuristic for the offshore wind farm cable routing problem. *Expert Systems with Applications* 255, 124668.
DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124668
- Manikowski, P. L., Walker, D. J., Craven, M. J., Dec. 2021. Multi-objective optimisation of the benchmark wind farm layout problem. *Journal of Marine Science and Engineering* 9 (12), 1376.
DOI: 10.3390/jmse9121376
- Maroufi, O., Choucha, A., Chaib, L., May 2020. Hybrid fractional fuzzy pid design for mppt-pitch control of wind turbine-based bat algorithm. *Electrical Engineering* 102 (4), 2149–2160.
DOI: 10.1007/s00202-020-01007-5
- Martynowicz, P., Ślimak, P., Katsaounis, G. M., Apr. 2025. Tlp-supported nrel 5mw floating offshore wind turbine tower vibration reduction under aligned and misaligned wind-wave excitations. *Energies* 18 (8), 2092.
DOI: 10.3390/en18082092
- Mohamed, N. A., Hasanien, H. M., Alkuhayli, A., Akmaral, T., Jurado, F., Badr, A. O., Aug. 2023. Hybrid particle swarm and gravitational search algorithm-based optimal fractional order pid control scheme for performance enhancement of offshore wind farms. *Sustainability* 15 (15), 11912.
DOI: 10.3390/su151511912
- Monroc, C. B., Bušić, A., Dubuc, D., Zhu, J., 2025. Wfcr1: A multi-agent reinforcement learning benchmark for wind farm control. In: 38th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024). arXiv.
DOI: 10.48550/ARXIV.2501.13592
- Muñoz-Palomeque, E., Sierra-García, J. E., Santos, M., 2023. MPPT Control in an Offshore Wind Turbine Optimized with Genetic Algorithms and Unsupervised Neural Networks. Springer Nature Switzerland, pp. 465–477.
DOI: 10.1007/978-3-031-34107-6_37
- Muñoz-Palomeque, E., Sierra-García, J. E., Santos, M., Nov. 2024. Enhancing offshore wind turbines performance with hybrid control strategies using neural networks and conventional controllers. *Journal of Computational Design and Engineering* 12 (3), 80–97.
DOI: 10.1093/jcde/qwae103
- M’zoughi, F., Garrido, I., Garrido, A. J., De La Sen, M., Jul. 2024. Metaheuristic airflow control for vibration mitigation of a hybrid oscillating water column-floating offshore wind turbine system. *Energy Conversion and Management*: X 23, 100629.
DOI: 10.1016/j.ecmx.2024.100629
- Narayanan, V. L., Narayan, J., Dhaked, D. K., Telmoudi, A. J., Mar. 2025. Elman neural network with customized particle swarm optimization for hydraulic pitch control strategy of offshore wind turbine. *Processes* 13 (3), 808.
DOI: 10.3390/pr13030808
- Patro, S. R., Panda, S., Ramana, G., Banerjee, A., Apr. 2024. Optimal multiple tuned mass dampers for monopile supported offshore wind turbines using genetic algorithm. *Ocean Engineering* 298, 117356.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117356
- Pehlivan, A. S., Bahceci, B., Erbatur, K., Sep. 2022. Genetically optimized pitch angle controller of a wind turbine with fuzzy logic design approach. *Energies* 15 (18), 6705.
DOI: 10.3390/en15186705
- Ramli, M. A., Boucekara, H. R., Milyani, A. H., 2023. Wind farm layout optimization using a multi-objective electric charged particles optimization and a variable reduction approach. *Energy Strategy Reviews* 45, 101016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101016>
- Serrano, C., Sierra-Garcia, J.-E., Santos, M., Nov. 2022. Hybrid optimized fuzzy pitch controller of a floating wind turbine with fatigue analysis. *Journal of Marine Science and Engineering* 10 (11), 1769.
DOI: 10.3390/jmse10111769
- Song, D., Liu, J., Yang, Y., Yang, J., Su, M., Wang, Y., Gui, N., Yang, X., Huang, L., Hoon Joo, Y., Apr. 2021. Maximum wind energy extraction of large-scale wind turbines using nonlinear model predictive control via yin-yang grey wolf optimization algorithm. *Energy* 221, 119866.
DOI: 10.1016/j.energy.2021.119866
- Song, D., Shen, G., Huang, C., Huang, Q., Yang, J., Dong, M., Joo, Y. H., Duić, N., Feb. 2024. Review on the application of artificial intelligence methods in the control and design of offshore wind power systems. *Journal of Marine Science and Engineering* 12 (3), 424.
DOI: 10.3390/jmse12030424
- Wang, J., Golnary, F., Li, S., Weerasuriya, A. U., Tse, K. T., Nov. 2024. A review on power control of wind turbines with the perspective of dynamic load mitigation. *Ocean Engineering* 311, 118806.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118806
- Wang, J., Ren, Y., Shi, W., Collu, M., Venugopal, V., Li, X., Jan. 2025. Multi-objective optimization design for a 15 mw semisubmersible floating offshore wind turbine using evolutionary algorithm. *Applied Energy* 377, 124533.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124533
- Wen, H., Liang, D., Song, Z., Liu, Y., Jan. 2025. Adaptive model predictive controller for power regulation and load reduction in large wind turbines. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*.
DOI: 10.1177/01423312241286937
- Yu, X., Lu, Y., Dec. 2023. Reinforcement learning-based multi-objective differential evolution for wind farm layout optimization. *Energy* 284, 129300.
DOI: 10.1016/j.energy.2023.129300
- Zhang, C., Chen, Y., Zhao, D., Li, C., Guo, X., Bu, J., Jan. 2025. Individual pitch control for load reduction of offshore wind turbine based on particle swarm optimization and fuzzy logic. *IET Renewable Power Generation* 19 (1).
DOI: 10.1049/rpg2.70000