

Análisis del control de paso y dinámica estructural en un prototipo de turbina eólica marina

Muñoz-Palomeque, E.^{a,*}, Esteban, S.^b, Santos, M.^c, Fallo, L.^d

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

^bDepartamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

^cInstituto de Tecnologías del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

^dUniversidad de Brescia, Brescia, Italia.

Resumen

En este trabajo se presenta la fabricación e implementación experimental de una plataforma modular de aerogenerador marino a pequeña escala. Los grados de libertad del movimiento de las palas se encuentran activos en el modelo diseñado, lo que otorga la capacidad de implementar control colectivo de paso de pala. El sistema integra una arquitectura mecánica segmentada, transmisión compacta, actuador de pitch e instrumentación embebida para la adquisición de variables aerodinámicas y estructurales. Se evalúa su comportamiento bajo distintas combinaciones de velocidad de viento y ángulo de paso fijos, analizando la velocidad del generador y la respuesta dinámica de la torre. Los resultados demuestran la viabilidad del prototipo como banco experimental para estudios de control aerodinámico, optimización energética y validación de modelos dinámicos reducidos. El enfoque se centra en reproducibilidad, modularidad estructural y capacidad de experimentación en lazo cerrado.

Palabras clave: Sistema mecatrónico, Manufactura aditiva, Energías renovables, Turbina eólica marina, Diseño mecánico.

Prototype of an offshore wind turbine for research in pitch control and structural dynamics

Abstract

This paper presents the manufacture, and experimental implementation of a small-scale modular offshore wind turbine platform. The degrees of freedom of blade movement are active in the designed model, which provides the ability to implement collective blade pitch control. The system integrates a segmented mechanical architecture, compact transmission, pitch actuator, and embedded instrumentation for the acquisition of aerodynamic and structural variables. Its behavior is evaluated under different combinations of fixed wind speed and pitch angle, analyzing the generator speed and the dynamic response of the tower. The results demonstrate the viability of the prototype as an experimental bench for aerodynamic control studies, energy optimization, and validation of reduced dynamic models. The focus is on reproducibility, structural modularity, and closed-loop experimentation capability.

Keywords: Mechatronic system, Additive manufacturing, Renewable energies, Offshore wind turbine, Mechanical design.

1. Introducción

La energía eólica y las tecnologías para su aprovechamiento, constituyen uno de los recursos fundamentales en la transición hacia sistemas energéticos descarbonizados. De acuerdo con reportes recientes de la International Energy Agency y el Global Wind Energy Council, la capacidad eólica instalada, donde intervienen sistemas terrestres y marinos, ha experimentado un crecimiento sostenido en la última década, impulsado por avances en aerodinámica, electrónica de poten-

cia y estrategias de control (IEA), (GWEC). En aerogeneradores modernos de gran escala, el control activo de paso de pala (pitch control) representa uno de los mecanismos principales para regular la potencia capturada, mitigar cargas estructurales y garantizar operación segura en régimen de viento elevado (Chen et al., 2023), (Gambier, 2021).

Desde el punto de vista aerodinámico, la potencia extraída por un rotor eólico está limitada teóricamente por el límite de Betz (Bontempo and Manna, 2025). Este coeficiente de potencia C_p establece una dependencia respecto al tip-speed ratio

*Autor para correspondencia: egmunoz@scc.uned.es

(TSR) y el ángulo de paso, lo que en conjunto muestran la existencia de un óptimo aerodinámico asociado al ángulo de ataque efectivo.

Por otra parte, el estudio estructural de las turbinas eólicas como base para perseguir una estabilización estructural y preservación de la vida útil del dispositivo y sus componentes, mitigando los efectos de perturbaciones inducidas sobre el sistema, es un campo de creciente interés e importancia. Los movimientos estructurales de la turbina eólica y el impacto de los fenómenos ambientales, especialmente en entornos marinos, ocasionan vibraciones y el surgimiento de esfuerzos perjudiciales para el aerogenerador, los cuales deben ser minimizados para un óptimo rendimiento del sistema y la conservación de sus componentes mecánicos.

Bajo estas consideraciones asociadas a un aerogenerador marino y a la naturaleza mecánica de las palas y su influencia sobre el sistema, el control de pitch y el estudio de las repercusiones estructurales sobre la turbina eólica adquieren relevancia. El diseño de sistemas de control se basa en modelos dinámicos no lineales que integran aerodinámica, dinámica estructural y conversión electromecánica. Sin embargo, la validación experimental de nuevas estrategias de control en turbinas de escala real presenta limitaciones significativas asociadas a altos costes, riesgos operacionales y restricciones de acceso a infraestructura experimental (Aboutalebi et al., 2024; Muñoz-Palomeque et al., 2025).

En este plano, los modelos a pequeña escala constituyen una alternativa eficaz para la investigación en diferentes subáreas de estudio de las turbinas eólicas, tanto en modelos emplazadas en tierra como modelos de aerogeneradores flotantes. Entre estos campos de investigación destacan el control activo de pitch (Sierra-García et al., 2022), el control para el seguimiento de la máxima potencia (MPPT) (Muñoz-Palomeque et al., 2024), la estimación de estados aerodinámicos del dispositivo eólico, la dinámica torre-rotor acoplada, la maximización del tiempo de vida del sistema (Njiri et al., 2019) y la validación de modelos simplificados.

Por esta razón, la literatura ha mostrado un interés creciente en plataformas experimentales a pequeña escala que permitan validar modelos aerodinámicos y estrategias de control en entornos controlados (Wang et al., 2024), (Barzegar-Kalashani et al., 2023). Estas plataformas facilitan la validación preliminar de algoritmos de control y análisis de naturaleza variada sobre el sistema eólico y sus componentes constructivos.

No obstante, muchos prototipos reportados en la literatura emplean configuraciones de paso fijo, lo cual limita el análisis de fenómenos asociados a variación dinámica del ángulo de ataque. La incorporación de pitch activo en pequeña escala introduce desafíos adicionales de integración mecánica y control, particularmente cuando se busca mantener bajo coste y modularidad estructural.

En este ámbito de estudio, el presente artículo expone la fabricación y prueba de reacción en condiciones establecidas de viento y pitch de un modelo de turbina eólica marina como una plataforma de investigación en dinámica acoplada. El sistema se construye utilizando la herramienta de impresión 3D o manufactura aditiva (FDM), y se ensambla como un modelo fácilmente adaptable a un uso como turbina eólica terrestre o acoplado en una plataforma para futuras pruebas en condiciones

que repliquen entornos marinos. El aerogenerador se encuentra dotado de un movimiento de pitch que facilita el cambio de posicionamiento de las palas y sensores para medir variables estructurales y de funcionamiento. El objetivo es validar tendencias físicas y capacidades experimentales bajo un marco reproducible y controlado.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera. La sección 2 describe la fabricación del sistema eólico y la adaptación de instrumentos básicos de actuación y de medición. La sección 3 presenta el desarrollo de los experimentos y sus resultados. Finalmente, la sección 4 resume las conclusiones del trabajo y etapas futuras de investigación.

2. Diseño y configuración experimental del sistema

El sistema desarrollado corresponde a un aerogenerador de eje horizontal a pequeña escala, concebido bajo una arquitectura modular para el fácil ensamble mecánicos de sus componentes y posibles reconfiguraciones estructurales del modelo. La configuración básica desarrollada está compuesta por un rotor de tres palas, un sistema de transmisión compacto, un actuador de pitch, una torre segmentada desmontable y una base estructural adaptable a configuración fija o flotante. La Tabla 1 recoge algunas características adicionales importantes de este prototipo de turbina eólica.

Tabla 1: Características de la turbina eólica

Característica	Definición
Tipo de aerogenerador	Terrestre/flotante
Número de palas	3
Factor de la caja de engranes	1:1
Diámetro del rotor	438 mm
Altura del aerogenerador + plataforma	546 mm
Altura de la plataforma	60 mm
Tipo de ajuste de pitch	Colectivo

El diseño geométrico fue modelado con el software FreeCAD (FreeCAD Association, 2026), un programa de diseño asistido por computadora (CAD) de código abierto, permitiendo iteraciones rápidas y control dimensional preciso. La fabricación de los componentes estructurales se realizó mediante manufactura aditiva empleando PLA, priorizando reproducibilidad, bajo coste y facilidad de reemplazo de piezas.

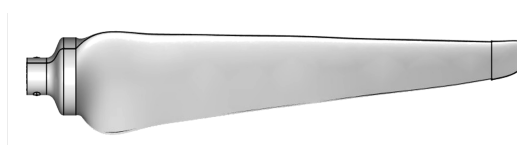


Figura 1: Pala del prototipo físico construido.

El rotor incorpora tres palas acopladas a un buje central que integra un mecanismo de actuación para el cambio de ángulo de paso. La Figura 1 muestra el modelo de pala elaborado para el prototipo físico y la Figura 2 presenta el ensamble de las palas sujetas al eje del rotor. El mecanismo es accionado con un servomotor embebido en la góndola, lo que permite variar el

ángulo de pitch. Esta configuración proporciona una plataforma adecuada para estudios de regulación aerodinámica. El sistema de transmisión acopla el rotor a un generador DC de pequeña potencia utilizado para caracterización experimental bajo condiciones sin carga externa controlada.



Figura 2: Ensamble de las palas del prototipo sujetas al mecanismo de rotación.

La torre (Figura 3) está compuesta por segmentos modulares ensamblados mecánicamente. La rigidez del sistema está determinada principalmente por las propiedades mecánicas del PLA, introduciendo un comportamiento flexible que resulta útil para observar fenómenos de acoplamiento aeroestructural en pequeña escala y estudiar la respuesta estructural del modelo. La base estructural incluye una plataforma con volumen suficiente para garantizar flotabilidad en ensayos preliminares como modelo de turbina marina, ampliando el rango potencial de estudios con este sistema.

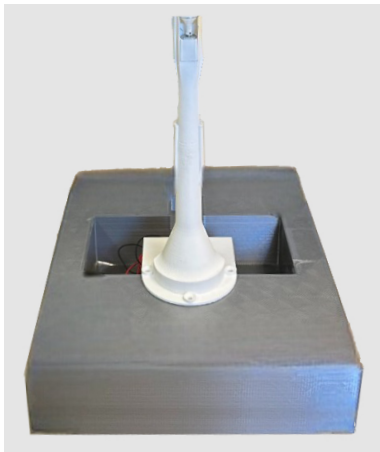


Figura 3: Torre del prototipo físico construido.

La instrumentación integra una plataforma de adquisición basada en Arduino, responsable de registrar las principales variables experimentales. La velocidad angular del rotor se mide mediante un sensor óptico, la velocidad de viento mediante un anemómetro, y la respuesta estructural primaria se obtiene a través de una unidad de medición inercial (IMU) instalada en la

torre para registrar inclinación angular. Adicionalmente, se mide la tensión en bornes del generador como indicador indirecto del comportamiento energético del sistema.

La arquitectura resultante, presentada en la Figura 4 como una vista explosionada de la disposición general de los componentes del prototipo, constituye un sistema mecatrónico integrado que combina estructura, actuación y sensado en una plataforma reproducible. A diferencia de configuraciones de paso fijo comúnmente empleadas en prototipos de bajo coste, la incorporación de un grado de libertad en el movimiento de las palas permite explorar experimentalmente la influencia directa del ángulo de paso sobre la dinámica del rotor y la respuesta estructural. Esta integración posiciona al sistema como un banco experimental adecuado para estudios paramétricos, validación de modelos aerodinámicos simplificados y análisis preliminar de estrategias de control en lazo cerrado.

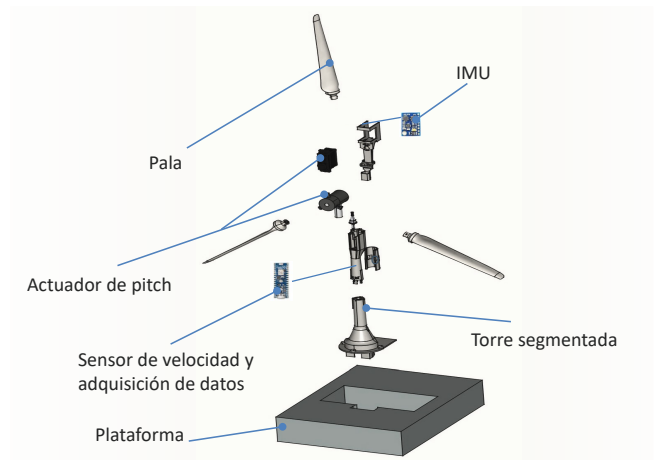


Figura 4: Vista explosionada del prototipo físico construido.

3. Experimentación y resultados

La validación experimental del sistema se realizó bajo condiciones controladas de laboratorio, en un espacio abierto, mediante un banco de ensayos de flujo forzado en el que el flujo de aire incidente se generó mediante una fuente de ventilación de velocidad regulable, lo que permitió reproducir condiciones de viento aproximadamente uniformes. El objetivo fue caracterizar la respuesta aerodinámica y estructural del prototipo ante variaciones sistemáticas del ángulo de paso y de la velocidad del viento incidente. Se definieron tres niveles de velocidad media estabilizada, aproximadamente 3.5 m/s, 4.5 m/s y 5.5 m/s, representativos del rango operativo del dispositivo a pequeña escala. Para cada nivel de viento se evaluaron cuatro configuraciones de pitch: 0°, 5°, 10° y 20°, cubriendo desde el posicionamiento mínimo de las palas hasta un régimen con incremento significativo de la resistencia aerodinámica.

Durante cada ensayo se registraron la velocidad angular del rotor (RPM), la tensión del generador (mV) y el ángulo de inclinación de la torre (grados). La velocidad angular fue obtenida mediante un sensor óptico que detecta el paso de las palas, la tensión mediante medición directa en el generador DC, y la inclinación mediante una unidad de medición inercial instalada en la estructura de la torre.

Los resultados, ilustrados en el voltaje (Figura 5 y Tabla 2) y velocidad (Figura 6 y Tabla 3) muestran una dependencia clara entre el ángulo de paso y el desempeño aerodinámico del rotor. Se observa una máxima tensión media aproximada de 50.84 mV para la condición de 5.5 m/s y un ángulo de paso cercano a 5°, asociado a una velocidad de rotor que se sitúa alrededor de 292 rpm. Este comportamiento es consistente con la teoría aerodinámica clásica, en la cual el coeficiente de potencia depende del TSR y del ángulo de ataque efectivo. Ángulos de paso menores no maximizan la sustentación efectiva bajo las condiciones evaluadas, mientras que ángulos superiores a 10° producen una disminución del rendimiento debida al incremento de la componente resistiva y posible inicio de pérdida aerodinámica.

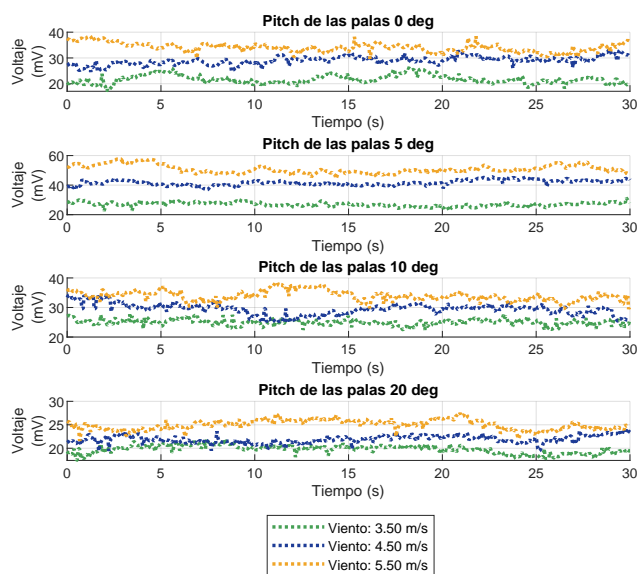


Figura 5: Voltaje producido por la turbina eólica a diferentes configuraciones de funcionamiento.

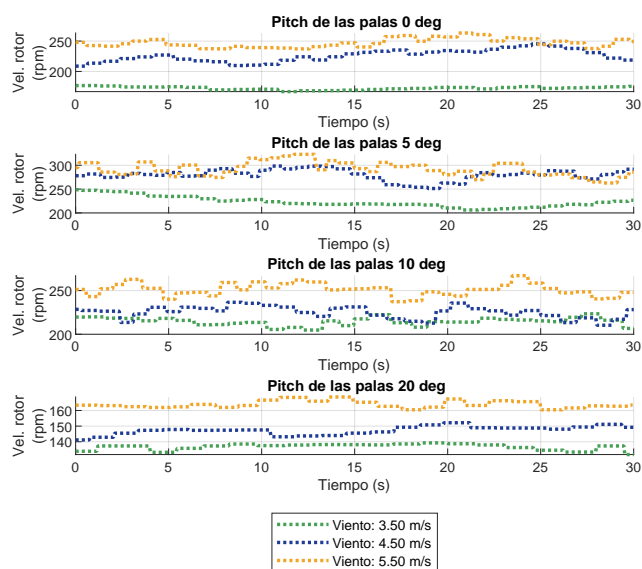


Figura 6: Velocidad de la turbina eólica a diferentes configuraciones de funcionamiento.

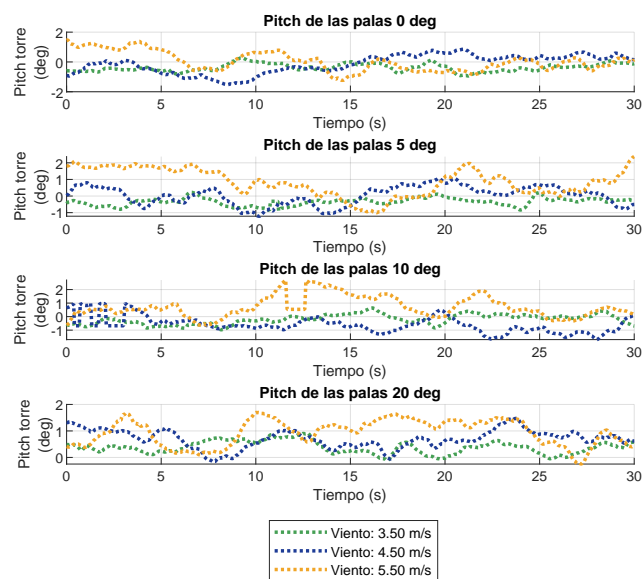


Figura 7: Ángulo pitch de la torre a diferentes configuraciones de funcionamiento.

El análisis muestra que, al aumentar la velocidad del viento, también aumentan la velocidad de giro del rotor (RPM) y la tensión generada, especialmente cuando el ángulo de paso está cerca del valor óptimo. Esto indica que una mayor energía disponible en el viento produce un mayor desempeño del sistema. Sin embargo, la relación entre el rendimiento y el ángulo de paso no es lineal, lo que confirma que el comportamiento aerodinámico del rotor es inherentemente no lineal, incluso en este modelo a pequeña escala.

En cuanto a la respuesta estructural, la inclinación media de la torre se mantuvo alrededor de magnitudes bajas, de hasta 0.7° en condiciones de operación moderada, alcanzando valores máximos cercanos a 3.4° bajo las condiciones de viento a mayor velocidad, con una media de 0.81° en la posición óptima del pitch (Figura 7 y Tabla 4). Esta respuesta indica una flexibilidad estructural apreciable, que se corresponde con las propiedades mecánicas del material empleado en la impresión de los componentes y a las características y dimensiones constructivas y geométricas que influyen en la rigidez del conjunto. La variación de inclinación indica la existencia de acoplamiento entre cargas aerodinámicas y deformación estructural, que en el prototipo a pequeña escala resulta medible.

Tabla 2: Medidas del voltaje en los experimentos

Pitch Palas (deg)	Estad. voltaje	Voltaje (V)		
		Viento 1	Viento 2	Viento 3
0°	Media	21.6997	29.0140	34.0556
	Std dev	1.6601	1.6618	1.7237
5°	Media	27.0023	41.6204	50.8403
	Std dev	1.4657	1.7515	2.7028
10°	Media	25.0511	29.4472	33.9398
	Std dev	1.1214	2.0621	1.8012
20°	Media	19.7575	21.8974	25.0038
	Std dev	0.9246	0.8034	1.0676

Tabla 3: Medidas de la velocidad angular en los experimentos

Pitch Palas (deg)	Estad. Vel. Gen.	Velocidad generador (rpm)		
		Viento 1	Viento 2	Viento 3
0°	Media	172.3571	226.1651	247.1014
	Std dev	2.5643	9.9297	7.3766
5°	Media	223.0624	279.8032	292.1568
	Std dev	11.2787	11.7256	15.3162
10°	Media	214.1984	225.0636	250.6651
	Std dev	5.2542	6.8451	8.0608
20°	Media	135.7467	147.3066	164.2358
	Std dev	3.2183	2.6777	2.6661

Tabla 4: Medidas de la inclinación de la torre en los experimentos

Pitch Palas (deg)	Estad. Pitch torre	Pitch torre (deg)		
		Viento 1	Viento 2	Viento 3
0°	Media	-0.3777	-0.1381	0.0313
	Std dev	0.2586	0.6194	0.6372
5°	Media	-0.3527	0.0357	0.8179
	Std dev	0.2389	0.5673	0.8158
10°	Media	-0.2064	-0.5017	0.7978
	Std dev	0.3585	0.7243	0.8747
20°	Media	0.3777	0.6944	0.9371
	Std dev	0.2343	0.3445	0.4910

Los resultados permite validar experimentalmente la funcionalidad del sistema eólico y demostrar su sensibilidad tanto a variaciones aerodinámicas como estructurales. Las tendencias observadas en el comportamiento del sistema en diferentes configuraciones experimentales confirma su idoneidad para estudios paramétricos y como un modelo apto para la integración con sistemas de control y entornos ambientales más realistas. La plataforma demuestra así su capacidad para servir como entorno experimental reproducible para análisis de comportamiento no lineal en aerogeneradores a pequeña escala.

4. Conclusiones

En esta investigación se implementó y evaluó experimentalmente un prototipo modular de aerogenerador marino a pequeña escala con mecanismo de variación de ángulo de paso, utilizado en los ensayos bajo configuraciones de pitch fijo preestablecidas. El sistema demostró un funcionamiento estable en condiciones controladas de laboratorio, permitiendo analizar la influencia del ángulo de pala sobre el comportamiento aerodinámico y estructural. Los resultados evidenciaron una dependencia clara entre el ángulo de paso y el desempeño del rotor, identificándose un máximo cercano a 51 mV y aproximadamente 292 rpm para una velocidad de viento de 5.5 m/s y un ángulo de paso cercano a 5°. Asimismo, se confirmó que la relación entre pitch y respuesta energética es no lineal, observándose una disminución progresiva del rendimiento para ángulos superiores, lo que pone de manifiesto la sensibilidad del sistema ante variaciones geométricas del rotor incluso en pequeña escala.

Desde el punto de vista estructural, la medición de la inclinación de la torre permitió evidenciar una respuesta estructural asociada al incremento de carga aerodinámica, mostrando que

el prototipo es capaz de reflejar el acoplamiento entre el comportamiento del rotor y la deformación de la estructura.

Como trabajos futuros se propone realizar una caracterización completa del sistema para estimar el coeficiente de potencia y desarrollar un modelo dinámico que pueda validarse con los experimentos. Además, se estudiará la implementación de control activo de pitch para evaluar estrategias de regulación automática.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, a través de los proyectos MCI/AEI/FEDER número PID2021-123543OB-C21 y PID2024155653OB-C21.

Referencias

- Aboutalebi, P., Garrido, A. J., Schallenberg-Rodriguez, J., Garrido, I., 2024. Validation of vibration reduction in barge-type floating offshore wind turbines with oscillating water columns through experimental and numerical analyses. *Frontiers in Built Environment* Volume 10 - 2024. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1497123
- Barzegar-Kalashani, M., Seyedmahmoudian, M., Mekhilef, S., Stojcevski, A., Horan, B., 2023. Small-scale wind turbine control in high-speed wind conditions: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 60, 103577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103577>
- Bontempo, R., Manna, M., 2025. A numerical proof of the betz-joukowski limit. *Renewable Energy* 241, 122299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122299>
- Chen, Z., Shi, T., Song, P., Li, C., Cao, Y., Yan, Y., 2023. Improved pitch control strategy for the robust operation of wind energy conversion system in the high wind speed condition. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 153, 109381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109381>
- FreeCAD Association, 2026. *FreeCAD: An Open Source Parametric 3D CAD Modeler*. URL: <https://www.freecad.org>
- Gambier, A., 2021. Pitch control of three bladed large wind energy converters-a review. *Energies* 14 (23). DOI: 10.3390/en14238083
- (GWEC), G. W. E. C., 2025. *Global wind report 2025*. Tech. rep., Global Wind Energy Council, Brussels, Belgium. URL: <https://www.gwec.net/reports/globalwindreport>
- (IEA), I. E. A., 2025. *World energy outlook 2025*. Accessed: 2026-02-15. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
- Muñoz-Palomeque, E., Esteban, S., Santos, M., 2025. Mechanical design and experimental study of a small-scale wind turbine model. *Machines* 13 (10). DOI: 10.3390/machines13100929
- Muñoz-Palomeque, E., Sierra-García, J. E., Santos, M., 11 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
- Njiri, J. G., Beganovic, N., Do, M. H., Söffker, D., 2019. Consideration of lifetime and fatigue load in wind turbine control. *Renewable Energy* 131, 818–828. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.109>
- Sierra-García, J. E., Santos, M., Pandit, R., 2022. Wind turbine pitch reinforcement learning control improved by pid regulator and learning observer. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 111, 104769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104769>
- Wang, L., Bergua, R., Robertson, A., Wright, A., Zalkind, D., Fowler, M., Lenfest, E., Viselli, A., Goupee, A., Kimball, R., 2024. Experimental investigation of advanced turbine control strategies and load-mitigation measures with a model-scale floating offshore wind turbine system. *Applied Energy* 355, 122343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122343>