

Evaluación Hidrodinámica de una Plataforma Eólica Flotante Semisumergible con Columnas de Agua Oscilante Integradas

Aboutalebi, Payam^{a,*}, Santos, Matilde^b

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

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

Resumen

Los grandes movimientos hidrodinámicos continúan siendo una limitación importante para las FWTs semisumergibles, ya que incrementan las cargas estructurales y reducen la eficiencia operativa. Este estudio presenta una evaluación numérica hidrodinámica de una plataforma semisumergible modificada que incorpora cámaras de Columna de Agua Oscilante (OWC), considerando únicamente condiciones de oleaje frontal. La configuración de referencia se adapta para integrar cámaras OWC, manteniendo la estabilidad global del sistema. Se emplea un modelo en el dominio de la frecuencia basado en la teoría lineal de flujo potencial para evaluar la masa añadida, el amortiguamiento por radiación y las fuerzas de excitación del oleaje, mientras que los efectos viscosos se representan mediante términos de arrastre tipo Morison. El análisis mediante Operadores de Amplitud de Respuesta (RAO) muestra que la integración de las cámaras OWC modifica la frecuencia natural de cabeceo y reduce las amplitudes de movimiento en comparación con la plataforma base, manteniendo los períodos naturales fuera del rango dominante de energía del oleaje. Los resultados demuestran la viabilidad hidrodinámica de integrar sistemas OWC como mecanismo pasivo de mitigación de movimientos bajo condiciones de oleaje frontal.

Palabras clave: Turbina Eólica Flotante Semisumergible, Columna de Agua Oscilante, Análisis Hidrodinámico, Operador de Amplitud de Respuesta, Análisis en el Dominio de la Frecuencia.

Hydrodynamic Evaluation of a Semi-Submersible Floating Wind Turbine Platform with Integrated Oscillating Water Columns

Abstract

Large hydrodynamic motions remain a major limitation for semisubmersible Floating Wind Turbines (FWTs), increasing structural loads and reducing operational efficiency. This study presents a numerical hydrodynamic assessment of a modified semisubmersible platform incorporating Oscillating Water Column (OWC) chambers, considering only head-sea conditions. The reference configuration is adapted to include OWC chambers while preserving overall stability. A frequency-domain model based on linear potential-flow theory is used to evaluate added mass, radiation damping, and wave-excitation forces, with viscous effects represented through Morison-type drag terms. Response Amplitude Operator (RAO) analysis shows that OWC integration modifies the pitch natural frequency and reduces motion amplitudes compared to the baseline platform, while maintaining natural periods outside the dominant wave-energy range. The results demonstrate the hydrodynamic feasibility of integrating OWCs for passive motion mitigation under head-wave conditions.

Keywords: Semisubmersible Floating Wind Turbine, Oscillating Water Column, Hydrodynamic Analysis, Response Amplitude Operator, Frequency-Domain Analysis.

1. Introducción

La energía eólica marina se ha convertido en un componente dominante de la expansión renovable en Europa, alcanzan-

do 285 GW de capacidad instalada en 2024, incluidos 37 GW en el mar, y cubriendo cerca del 19 % de la demanda eléctrica (Costanzo et al., 2025). No obstante, el cumplimiento de los ob-

jetivos de descarbonización a largo plazo requiere no solo una aceleración en la instalación, sino también un mejor desempeño en aguas profundas. Paralelamente, la energía undimotriz ha sido reconocida como un recurso predecible y complementario capaz de fortalecer la cartera de energías renovables marinas (Europe, 2020; Muñoz-Palomeque et al., 2025b). La integración conjunta de tecnologías eólica y undimotriz sobre estructuras flotantes compartidas ofrece la posibilidad de aumentar la densidad energética por unidad de área y reducir la intermitencia de la generación (Aboutalebi et al., 2024, 2021b).

La transición hacia turbinas eólicas flotantes en aguas profundas (FWTs) introduce desafíos dinámicos significativos. Las interacciones acopladas aero-hidro-servo-elásticas generan movimientos considerables de la plataforma, lo que disminuye la eficiencia aerodinámica y aumenta las cargas de fatiga (Saenz-Aguirre et al., 2022; Muñoz-Palomeque et al., 2025a). Las estrategias convencionales de mitigación incluyen apéndices hidrodinámicos pasivos y dispositivos estructurales de amortiguamiento (Villoslada et al., 2022), sistemas de amarre optimizados (Lin and Yang, 2023) y técnicas avanzadas de control (Pao et al., 2024). Aunque estos enfoques mejoran la estabilidad, no contribuyen directamente a incrementar la producción energética (Aboutalebi et al., 2023).

Los conceptos híbridos eólico-undimotrices ofrecen una vía alternativa al transformar parte del movimiento de la plataforma en energía útil. Diversos convertidores de energía undimotriz (WECs), incluidos absorbedores puntuales, sistemas tipo toroide, dispositivos tipo flap y cuerpos oscilantes articulados, han sido acoplados a plataformas eólicas flotantes (Tian et al., 2023; Lin et al., 2025). Entre estas tecnologías, la Columna de Agua Oscilante (OWC) resulta especialmente atractiva por su simplicidad mecánica y su capacidad inherente de amortiguamiento, ya que convierte las oscilaciones inducidas por las olas en energía neumática al tiempo que modifica la hidrodinámica de la plataforma (Ahmad et al., 2024; Aboutalebi et al., 2021a; Bagheri-Rouch et al., 2025). Estudios recientes sobre configuraciones semisumergibles derivadas del concepto WINDMOOR han demostrado la viabilidad de integrar cámaras OWC dentro de las columnas estructurales para reducir la respuesta en cabeceo (Aboutalebi et al., 2026).

Sin embargo, las consecuencias hidrodinámicas asociadas a la topología de las cámaras OWC aún no han sido cuantificadas de manera suficiente. Las investigaciones existentes se centran principalmente en la producción energética o en dispositivos montados externamente, prestando atención limitada a comparaciones sistemáticas de estabilidad hidrostática y características de radiación (Hallak and Guedes Soares, 2025).

El presente trabajo aborda esta brecha mediante la investigación numérica de una plataforma eólica flotante semisumergible que incorpora configuraciones OWC dentro de todas las columnas de la subestructura. Se emplea un marco de modelado acoplado que combina la estimación de fuerzas viscosas tipo Morison y el análisis mediante el método de paneles basado en flujo potencial para evaluar masa añadida, amortiguamiento por radiación y Operadores de Amplitud de Respuesta (RAOs). Los resultados aclaran cómo las cámaras influyen en la mitigación del movimiento y en la absorción de energía undimotriz, aportando criterios de diseño para sistemas híbridos renovables marinos de próxima generación. La principal contribución de

este trabajo radica en la evaluación sistemática del efecto de la integración interna de cámaras OWC en la respuesta hidrodinámica de plataformas semisumergibles, considerando su impacto directo en masa añadida, amortiguamiento y estabilidad dinámica.

2. Configuración de la Plataforma Híbrida

El sistema propuesto consiste en una FWT de tipo semisumergible que integra cámaras de OWC dentro de sus columnas estructurales. A diferencia de los dispositivos externos añadidos, las cámaras están embebidas en la subestructura, modificando directamente el volumen interno y la distribución de masas de la plataforma. Esta configuración permite la captación simultánea de energía eólica y undimotriz, al tiempo que altera las características hidrostáticas y dinámicas. La disposición general se muestra en la Figura 1.

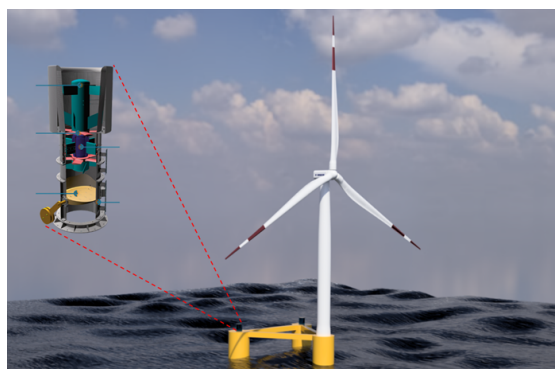


Figura 1: Esquema de la plataforma híbrida semisumergible FWT-OWC.

La plataforma de referencia se deriva del concepto semisumergible WINDMOOR. En su configuración original, el lastre se distribuye en los pontones y en columnas seleccionadas para garantizar el equilibrio y una capacidad adecuada de adrizamiento (Figura 2a). Las propiedades detalladas del modelo base se presentan en (Aboutalebi et al., 2026).

En la configuración híbrida, se incorporan cámaras OWC cilíndricas (diámetro de 3.5 m) dentro de las columnas (Figura 2b). Esta modificación reduce el volumen disponible para el lastre, lo que requiere una redistribución interna del mismo para mantener el equilibrio estático y la estabilidad en posición vertical. El ajuste incrementa la altura del lastre y modifica la posición vertical del centro de gravedad, generando cambios en el calado, el volumen desplazado y la distribución de flotabilidad.

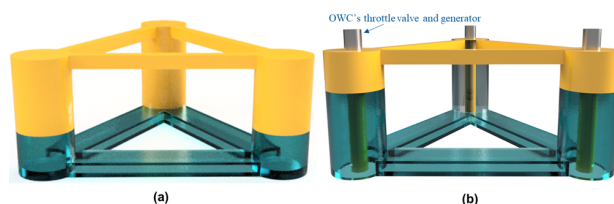


Figura 2: Configuración base (a) de la FWT semisumergible WINDMOOR y (b) configuración híbrida con la ilustración de la distribución del lastre.

La Tabla 1 resume las principales propiedades hidrostáticas y de masa de las configuraciones base e híbrida.

Tabla 1: Comparación entre la configuración base WIND-MOOR y la configuración híbrida FWT-OWC.

Parámetro	Base	FWT-OWCs (Interna)
Diámetro de la cámara (m)	—	3.5
Altura del lastre (m)	11.85	20.83
Peso de la subestructura (t)	12058	11379
Peso total del sistema (t)	14094	13189
Calado (m)	18.40	17.64
Volumen desplazado (m ³)	13750	12867
Cambio en volumen de subestructura	0 %	-5.44 %
CdG del FWT (z, m)	4.03	6.04
Centro de flotabilidad (z, m)	-8.85	-9.28

La integración interna de las cámaras OWC produce una reducción del 5.4 % en el volumen de la subestructura y un desplazamiento apreciable hacia arriba del centro de gravedad. Estas modificaciones influyen en la capacidad de adrizamiento y en el comportamiento dinámico, lo que demuestra que la geometría de las cámaras y la configuración del lastre deben optimizarse de manera conjunta en el diseño de plataformas híbridas semisumergibles.

3. Modelo hidrodinámico y ecuaciones de gobierno

La FWT se modela como un cuerpo rígido con seis grados de libertad (surge — desplazamiento longitudinal, sway — desplazamiento transversal, heave — movimiento vertical, roll — balanceo, pitch — cabeceo y yaw — guiñada). Suponiendo teoría lineal de olas y movimiento armónico, la dinámica se formula en el dominio de la frecuencia como

$$\left[-\omega^2 I_{FWT}(\omega) + i\omega B_{FWT}(\omega) + C_{FWT}\right]X(\omega) = f_{FWT}(\omega) \quad (1)$$

donde $X(\omega)$ es el vector complejo de movimiento, I_{FWT} incluye las contribuciones de masa estructural y masa añadida, B_{FWT} representa el amortiguamiento hidrodinámico y viscoso, y C_{FWT} contiene los términos de restauración hidrostática y del sistema de amarre. ω es la frecuencia angular de la ola incidente. La fuerza de excitación incluye los efectos de olas incidentes, difractadas y radiadas. Dado que el sistema PTO no está activado, se desprecian las fuerzas inducidas por el PTO.

Las matrices del sistema se definen como

$$I_{FWT} = M_{FWT} + A(\omega) \quad (2)$$

donde M_{FWT} representa la matriz de masa estructural (masa de la plataforma y la turbina) y $A(\omega)$ es la matriz de masa añadida, que cuantifica la inercia del fluido que se desplaza con la estructura.

$$B_{FWT} = B_{rad}(\omega) + B_{vis} \quad (3)$$

donde $B_{rad}(\omega)$ es el amortiguamiento por radiación, debido a las olas generadas por el movimiento de la propia plataforma. B_{vis} representa el amortiguamiento viscoso linealizado, estimado mediante formulaciones tipo Morison para capturar efectos que la teoría de flujo potencial no considera.

$$C_{FWT} = C_{hydro} + C_{moor} \quad (4)$$

donde C_{hydro} es la matriz de restauración hidrostática, que depende de la flotabilidad y la estabilidad de la plataforma. C_{moor} representa la rigidez del sistema de amarre (mooring), que estabiliza la posición de la estructura.

Los coeficientes hidrodinámicos (masa añadida, amortiguamiento por radiación y fuerzas de excitación) se calculan mediante teoría lineal de flujo potencial utilizando un método de elementos de contorno de radiación-difracción. El amortiguamiento viscoso linealizado se estima mediante formulaciones tipo Morison.

Las cámaras OWC se modelan como volúmenes internos abiertos sin considerar la compresibilidad del aire ni los efectos del PTO. Su influencia es, por tanto, puramente hidrodinámica y se origina en la modificación geométrica de la superficie mojada y en los cambios resultantes en masa añadida, amortiguamiento y propiedades de restauración.

Los RAOs se obtienen como

$$RAO(\omega) = \frac{X(\omega)}{\xi} = \frac{F(\omega)}{-\omega^2 I_{FWT}(\omega) + i\omega B_{FWT}(\omega) + C_{FWT}} \quad (5)$$

donde ξ es la amplitud de la ola incidente. Esta formulación permite la comparación directa entre las configuraciones base e híbrida en términos del desempeño en mitigación de movimientos.

Los coeficientes hidrodinámicos se obtuvieron utilizando el módulo hidrodinámico HydroD, basado en un método de elementos de contorno en el dominio de la frecuencia. La superficie mojada de la plataforma se discretizó mediante un mallaado uniforme con un tamaño característico de panel de 0.75 m, garantizando una representación adecuada de la geometría, incluyendo las regiones cercanas a las aberturas de las cámaras OWC. Se realizó un análisis de sensibilidad del mallaado verificando la estabilidad de los coeficientes de masa añadida y amortiguamiento por radiación frente a refinamientos adicionales. Se comprobó que las variaciones en dichos coeficientes permanecían dentro de un margen inferior al 3 %, lo que confirma la convergencia de la solución numérica.

El rango de frecuencias considerado cubre adecuadamente los periodos naturales de la plataforma, incluyendo la región de resonancia. Asimismo, se verificó la consistencia física de los resultados mediante la suavidad de las curvas de respuesta (RAOs) y la ausencia de oscilaciones numéricas no físicas.

La Tabla 2 resume los principales parámetros del modelo hidrodinámico empleado en el análisis numérico.

Tabla 2: Parámetros del solver hidrodinámico empleado

Parámetro	Valor
Software	GeniE, HydroD y WADAM (DNV)
Tipo de modelo	Dominio de la frecuencia
Método numérico	Elementos de contorno (BEM)
Teoría	Flujo potencial lineal
Tamaño de panel	0.75 m
Grados de libertad	6 (surge, sway, heave, roll, pitch, yaw)
Condiciones de oleaje	Lineales, monocromáticas
Modelo viscoso	Términos tipo Morison
Análisis de convergencia	Sí (< 3 %)

4. Resultados y Discusión

El comportamiento dinámico de las plataformas eólicas marinas flotantes está regido principalmente por su respuesta ante la resonancia y las amplitudes de movimiento asociadas bajo la excitación del oleaje. En este contexto, la integración de dispositivos hidrodinámicos pasivos, como las cámaras de OWC, puede influir significativamente en las características de respuesta global al modificar la masa añadida, el amortiguamiento y las propiedades de restauración.

Esta sección evalúa el comportamiento en el dominio de la frecuencia de la plataforma semisumergible de referencia WINDMOOR y de la configuración híbrida FWT-OWC con un tamaño de cámara de 3.5 m. Las Figuras 3 y 4 presentan los RAO en cabeceo (pitch) con mar de proa ($\beta = 0^\circ$) y en balanceo (roll) con mar de través ($\beta = 90^\circ$), respectivamente.

La configuración de referencia exhibe un pico de resonancia pronunciado en cabeceo a aproximadamente 31 s, alcanzando una amplitud máxima de unos 6 deg/m. La respuesta se caracteriza por un pico agudo, lo que indica un amortiguamiento limitado alrededor del periodo natural. Por otro lado, la configuración híbrida muestra una clara modificación de la respuesta en cabeceo: la amplitud del pico de resonancia disminuye a aproximadamente 4 deg/m, lo que corresponde a una reducción de alrededor del 30%. Además, el pico se desplaza hacia periodos ligeramente más largos (alrededor de 36 s) y la curva de resonancia se vuelve más amplia. Este comportamiento sugiere un aumento del amortiguamiento hidrodinámico efectivo y una redistribución de la inercia debido a la modificación geométrica introducida por las cámaras OWC. Dado que no se incluyen efectos de amortiguamiento por toma de fuerza (PTO) ni de compresibilidad del aire, la mitigación observada se atribuye únicamente a las interacciones hidrodinámicas pasivas.

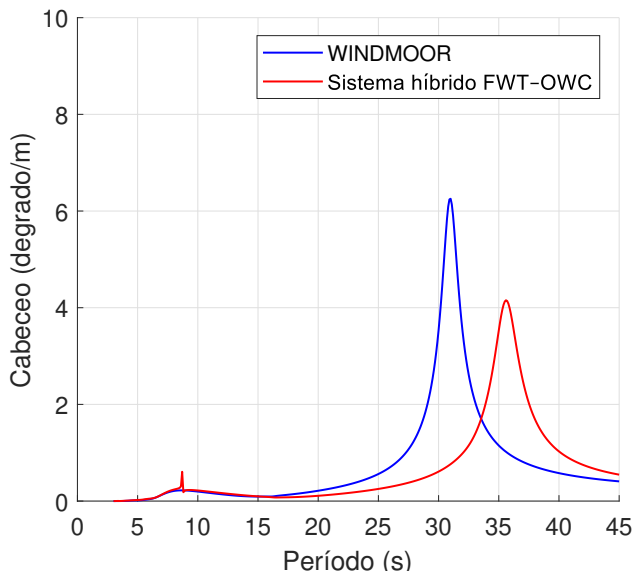


Figura 3: RAO de cabeceo de la plataforma de referencia WINDMOOR (curvas azules) y de la configuración híbrida FWT-OWC (curva roja discontinua) con oleaje de frente ($\beta = 0^\circ$).

Se observa una tendencia similar en el balanceo bajo excitación de olas de través. La plataforma de referencia presenta un

pico de resonancia dominante cerca de los 29 s con una amplitud de aproximadamente 4.5 deg/m. Para el sistema híbrido, la amplitud del pico disminuye a unos 3 deg/m, lo que representa una reducción del orden del 30–35%. El periodo de resonancia se desplaza ligeramente hacia valores más altos y la curva de respuesta se suaviza cerca de la resonancia, indicando una mejora en los efectos de amortiguamiento por radiación.

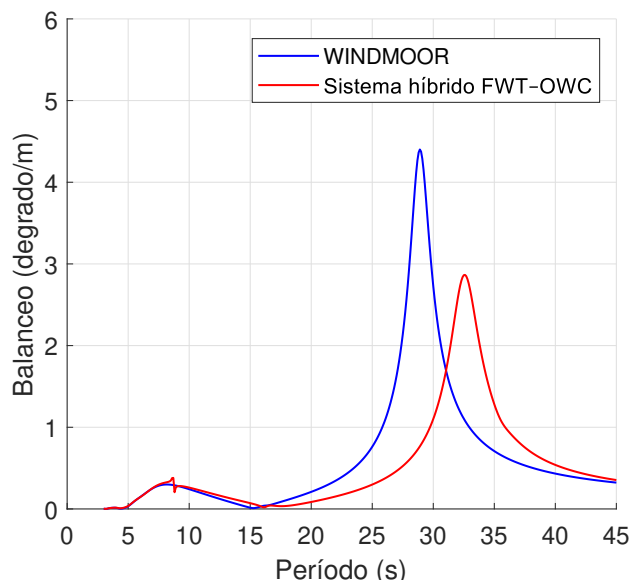


Figura 4: RAO de balanceo de la plataforma de referencia WINDMOOR (curvas azules) y de la configuración híbrida FWT-OWC (curvas rojas discontinuas) bajo mar de costado ($\beta = 90^\circ$).

En general, la integración de cámaras OWC de 3.5 m conduce a reducciones consistentes en las amplitudes máximas de movimiento tanto en cabeceo como en balanceo, con desplazamientos moderados en los periodos naturales. Las mejoras más significativas se producen en la resonancia, donde las cargas estructurales y el daño por fatiga suelen ser críticos para los sistemas eólicos flotantes. Estos resultados demuestran que la integración pasiva de OWC puede proporcionar una mitigación medible del movimiento a través de mecanismos puramente hidrodinámicos, mejorando la estabilidad de la plataforma sin necesidad de extracción activa de energía.

5. Conclusiones

Evaluación del Diseño de la Plataforma Semisumergible Híbrida FWT-OWC Este estudio explora la arquitectura numérica y la eficiencia hidrodinámica de una novedosa plataforma eólica FWT de tipo semisumergible, integrada con convertidores de energía undimotriz de OWC. Mediante análisis hidrodinámicos en el dominio de la frecuencia, la investigación confirma la viabilidad técnica de incorporar cámaras OWC dentro del marco de referencia WINDMOOR, destacando una evolución hacia estructuras marinas multifuncionales.

La evaluación hidrodinámica, centrada en los RAO, indica que la integración de los sistemas OWC reconfigura fundamentalmente el perfil dinámico de la plataforma. Específicamente, la modificación geométrica altera las características de masa

añadida y amortiguamiento del sistema, lo que induce desplazamientos favorables en los periodos naturales y una atenuación sustancial de las amplitudes máximas de respuesta tanto en balanceo (roll) como en cabeceo (pitch). Esta reducción resulta especialmente crítica durante la resonancia, fase en la que la integridad estructural se encuentra bajo mayor riesgo.

En última instancia, estos resultados preliminares posicionan el concepto híbrido FWT–OWC como una solución sofisticada de doble propósito. Más allá de la generación de energía, el sistema actúa como un estabilizador pasivo de movimiento, ofreciendo una vía prometedora para captar simultáneamente energía del oleaje y mejorar la estabilidad aero-hidrodinámica de los aerogeneradores flotantes mediante mecanismos hidrodinámicos integrados.

Como línea futura de investigación, se prevé la validación experimental de la configuración propuesta mediante ensayos en canal de oleaje, con el objetivo de contrastar los resultados numéricos obtenidos. Asimismo, se plantea la comparación con configuraciones híbridas previamente publicadas en la literatura, así como la incorporación de modelos más avanzados que incluyan la compresibilidad del aire y la interacción con el sistema PTO.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado en parte por los proyectos PID2021-23543OB-C21-C22 y PID2024-155653OB (MICIU/AEI/FEDER). Además, esta investigación fue financiada por la beca de Incorporación Juan de la Cierva (JDC2023-052400-I) a través de MCIN/AEI/10.13039/501100011033, cofinanciada por el Fondo Social Europeo Plus (FSE+).

Referencias

Aboutalebi, P., Garrido, A. J., Schallenberg-Rodríguez, 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* 10, 1497123.

Aboutalebi, P., Garrido, I., Nguyen, D. T., Garrido, A. J., 2026. Stabilization and dynamic control of semi-submersible hybrid floating wind turbine—oscillating water column platforms. *Energy Conversion and Management* 348, 120623.

Aboutalebi, P., M'zoughi, F., Garrido, I., Garrido, A. J., 2021a. Performance analysis on the use of oscillating water column in barge-based floating offshore wind turbines. *Mathematics* 9 (5), 475.

Aboutalebi, P., M'zoughi, F., Garrido, I., Garrido, A. J., 2023. A control technique for hybrid floating offshore wind turbines using oscillating water columns for generated power fluctuation reduction. *Journal of Computational Design and Engineering* 10 (1), 250–265.

Aboutalebi, P., M'zoughi, F., Martija, I., Garrido, I., Garrido, A. J., 2021b. Switching control strategy for oscillating water columns based on response amplitude operators for floating offshore wind turbines stabilization. *Applied Sciences* 11 (11), 5249.

Ahmad, I., M'zoughi, F., Aboutalebi, P., Garrido, A. J., Garrido, I., 2024. Advancing offshore renewable energy: Integrative approaches in floating offshore wind turbine-oscillating water column systems using artificial intelligence-driven regressive modeling and proportional-integral-derivative control. *Journal of Marine Science and Engineering* 12 (8), 1292.

Bagheri-Rouch, T., Aboutalebi, P., Garrido, A. J., Garrido, I., 2025. Dynamic performance analysis of floating offshore wind turbines integrated with oscillating water columns matrix. *Ocean Engineering* 339, 122128.

Costanzo, G., Brindley, G., Tardieu, P., 2025. Wind energy in europe—2024 statistics and the outlook for 2025-2030. Wind Europe, Brussels, Belgium.

Europe, O. E., 2020. 2030 ocean energy vision: industry analysis of future deployments, costs and supply chains. Supported by European Technology and Innovation Platform for Ocean Energy, Brussels.

Hallak, T., Guedes Soares, C., 2025. Overview of the recent developments in hybrid floating wind-wave platforms. *Journal of Marine Science and Application* 24 (1), 98–119.

Lin, C., Zhang, Q., Sheng, S., Zhou, B., Xiang, R., Wu, X., Zhou, Z., Jin, P., 2025. Novel design and performance evaluation of a hybrid system of floating offshore wind turbine and sharp-eagle wecs. *Ocean Engineering* 340, 122387.

Lin, T.-H., Yang, R.-Y., 2023. Stability analysis and environmental influence evaluation on a hybrid mooring system for a floating offshore wind turbine. *Journal of Marine Science and Engineering* 11 (12), 2236.

Muñoz-Palomeque, E., Esteban, S., Santos, M., 2025a. Mechanical design and experimental study of a small-scale wind turbine model. *Machines* 13 (10), 929.

Muñoz-Palomeque, E., Sierra-García, J. E., Santos, M., 2025b. 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.

Pao, L. Y., Pusch, M., Zalkind, D. S., 2024. Control co-design of wind turbines. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 7.

Saenz-Aguirre, A., Ulazia, A., Ibarra-Berastegi, G., Saenz, J., 2022. Floating wind turbine energy and fatigue loads estimation according to climate period scaled wind and waves. *Energy Conversion and Management* 271, 116303.

Tian, W., Wang, Y., Shi, W., Michailides, C., Wan, L., Chen, M., 2023. Numerical study of hydrodynamic responses for a combined concept of semi-submersible wind turbine and different layouts of a wave energy converter. *Ocean Engineering* 272, 113824.

Villoslada, D., Santos, M., Tomás-Rodríguez, M., 2022. Tmd stroke limiting influence on barge-type floating wind turbines. *Ocean Engineering* 248, 110781.