

Jornadas de Automática

Soluciones Innovadoras de Energía Marina: Combinando Columnas de Agua Oscilante y Turbinas Eólicas Flotantes para una Mayor Eficiencia

Aboutalebi, Payam.^{a,*}, M'zoughi, Fares.^a, Ahmad, Irfan.^a, Bagheri Rouch, Tahereh.^a, Garrido, Izaskun.^a, Garrido, Aitor J.^a

^aAutomatic Control Group-ACG, Institute of Research and Development of Processes-IIDP, Department of Automatic Control and Systems Engineering, Faculty of Engineering of Bilbao, University of the Basque Country-UPV/EHU, Bilbao, Spain

To cite this article: Aboutalebi, Payam., M'zoughi, Fares., Ahmad, Irfan., Bagheri Rouch, Tahereh., Garrido, Izaskun., Garrido, Aitor J. 2024. Innovative Offshore Energy Solutions: Combining Oscillating Water Columns and Floating Wind Turbines for Enhanced Efficiency. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10932>

Resumen

Este artículo investiga la incorporación de Columnas de Agua Oscilante (OWCs) en Turbinas Eólicas Flotantes (FWTs) semisumergibles para mejorar la extracción de energía en alta mar. El objetivo de combinar OWCs con FWTs es reducir los movimientos oscilatorios causados por las olas y el viento, mejorando así la eficiencia del sistema y extendiendo su vida operativa. El estudio implica el rediseño de la plataforma FWT existente, conocida como WINDMOOR, para integrar OWCs en dos de sus tres columnas, específicamente para un sistema de FWT de 12 MW. El proceso de rediseño prioriza la estabilidad hidrostática y el rendimiento hidrodinámico para soportar los elementos adicionales de OWC. Se realizan análisis hidrodinámicos para evaluar el rendimiento de la plataforma híbrida en comparación con el diseño original, centrándose en la reducción de los movimientos oscilatorios. Los resultados destacan los beneficios potenciales de integrar OWCs en los sistemas FWT, particularmente en términos de mejorar la eficiencia de generación de energía y la resistencia estructural. El objetivo es avanzar en las tecnologías de energía marina al ofrecer conocimientos sobre la viabilidad y efectividad de los sistemas híbridos para la producción sostenible de energía renovable.

Palabras clave: Energía offshore, Turbinas eólicas flotantes, Columnas de agua oscilante, Energía renovable, Estabilidad hidrodinámica

Innovative Offshore Energy Solutions: Combining Oscillating Water Columns and Floating Wind Turbines for Enhanced Efficiency

Abstract

This research investigates the incorporation of Oscillating Water Columns (OWCs) into Semi-Submersible Floating Wind Turbines (FWTs) to improve offshore energy extraction. The goal of combining OWCs with FWTs is to reduce the oscillatory motions caused by waves and wind, thus enhancing system efficiency and extending operational lifespan. The study involves redesigning the existing FWT platform, known as WINDMOOR, to integrate OWCs into two of its three columns, specifically for a 12 MW FWT system. The redesign process prioritizes hydrostatic stability and hydrodynamic performance to support the additional OWC elements. Hydrodynamic analyses are performed to assess the hybrid platform's performance relative to the original design, focusing on the reduction of oscillatory motions. The results highlight the potential benefits of integrating OWCs within FWT systems, particularly in terms of improving power generation efficiency and structural resilience. This research advances offshore energy harvesting technologies by offering insights into the feasibility and effectiveness of hybrid systems for sustainable offshore renewable energy production.

Keywords: Offshore energy, Floating wind turbines, Oscillating water columns, Renewable energy

1. Introducción

El apremiante problema del calentamiento global, impulsado principalmente por la extensa utilización de combustibles fósiles, se ha convertido en una profunda preocupación para nuestro planeta. El aumento exponencial de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera ha provocado temperaturas cada vez más altas y patrones climáticos erráticos, anunciando repercusiones ambientales, sociales y económicas de gran alcance. En la lucha contra esta crisis, la transición lejos de los combustibles fósiles hacia fuentes de energía renovable como la solar, eólica e hidroeléctrica emerge como una estrategia fundamental para mitigar los efectos perjudiciales del calentamiento global. Las tecnologías de energía renovable ofrecen la promesa de generar electricidad con emisiones mínimas o nulas de gases de efecto invernadero, posicionándolas como elementos cruciales en la lucha contra el cambio climático. Acelerar el desarrollo y la adopción de tecnologías de energía renovable puede mitigar simultáneamente los impactos del calentamiento global mientras fomenta el crecimiento económico, fortalece la seguridad energética y fomenta la sostenibilidad ambiental.

El potencial de las plataformas eólicas flotantes para aprovechar tanto los reservorios de energía eólica como de oleaje mediante la incorporación de Columnas de Agua Oscilante (OWCs) representa una atractiva vía en la investigación de energía renovable. Las OWCs, entre las clases más exploradas de Convertidores de Energía de Oleaje (WECs), prometen mejorar la eficiencia de producción de energía en alta mar. La fusión proyectada de Turbinas Eólicas Flotantes (FWTs) con OWCs presenta oportunidades para reducir sustancialmente el coste a través de la infraestructura compartida de operación y mantenimiento, así como aprovechando la infraestructura común de la red eléctrica. Sin embargo, un desafío significativo se cierne en la estabilización de las FWTs para mitigar vibraciones no deseadas de la plataforma y optimizar la producción de energía. Estas vibraciones pueden comprometer la eficiencia aerodinámica, acortar la longevidad de la torre debido a la fatiga y aumentar las tensiones en componentes críticos como las palas, los ejes del rotor y los cojinetes de orientación Slocum et al. (2019). Por lo tanto, mantener los movimientos de la plataforma FWT dentro de parámetros aceptables es imperativo.

Para abordar el desafío de la estabilización y maximizar el potencial de generación de energía, los investigadores han propuesto un espectro de soluciones innovadoras. Estas soluciones abarcan diversos enfoques, incluida la utilización de placas de inmersión Mello et al. (2021), cables de amarre de catenaria Kamarlouei et al. (2020), instalaciones de WECs M'zoughi et al. (2023) e inercias Zhang et al. (2020); Sierra-García and Santos (2021), cada uno adaptado para mitigar aspectos específicos del movimiento de la plataforma y mejorar la eficiencia de extracción de energía. Además, se han explorado sistemas híbridos FWT-WEC para desbloquear sinergias entre la captura de energía eólica y de oleaje, amplificando aún más el potencial de producción de energía renovable Sarmiento et al. (2019); Ahmad et al. (2023b). Los esfuerzos de investigación continuos tienen como objetivo refinar enfoques existentes y descubrir estrategias novedosas para impulsar la adopción generalizada de las FWTs como piedra angular de la

infraestructura de energía renovable.

A pesar del considerable progreso en las FWTs basadas en barcas Aboutalebi et al. (2021a,b, 2023); M'zoughi et al. (2021); Ahmad et al. (2023a), persiste la búsqueda de estrategias efectivas para controlar las válvulas OWC, especialmente en sistemas híbridos con ecuaciones de movimiento no lineales. De manera similar, la optimización del rendimiento de configuraciones híbridas de tipo barcaza FWT-OWC bajo diferentes estados del mar sigue siendo un área propicia para la exploración y el perfeccionamiento. Este documento profundiza en el ámbito de la integración FWT-OWC al proponer la incorporación de OWCs dentro de una plataforma FWT semisumergible mediante esfuerzos de rediseño meticulosos. Se realizan análisis de estabilidad hidrostática e hidrodinámica para evaluar el rendimiento y la viabilidad del sistema FWT-OWC propuesto, ofreciendo valiosas perspectivas sobre su potencial como solución de energía renovable robusta y eficiente.

El resto de este documento está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 dilucida las ecuaciones de movimiento que rigen las FWTs, mientras que la Sección 3 presenta los hallazgos de los análisis de estabilidad hidrostática e hidrodinámica tanto para la FWT original como para el sistema FWT-OWC propuesto. Finalmente, la Sección 4 concluye con ideas destacadas obtenidas del estudio.

2. Declaración del Problema

Este proyecto de investigación se centra en la integración de Columnas de Agua Oscilantes (OWCs, por sus siglas en inglés) en un sistema de Turbina Eólica Flotante (FWT, por sus siglas en inglés) semisumergible. El modelo de subestructura original, conocido como INO WINDMOOR, sirve como base para esta modificación, diseñado inicialmente para alojar la turbina eólica WINDMOOR de 12 MW Aboutalebi et al. (2024). Como se muestra en la Figura 1, el INO WINDMOOR encarna una plataforma de turbina eólica semisumergible caracterizada por tres columnas interconectadas, apoyadas por pontones y vigas de cubierta. La Tabla 1 proporciona una descripción detallada de las especificaciones de la plataforma INO WINDMOOR.



Figura 1: Concepto de la turbina eólica flotante WINDMOOR de 12 MW con ilustración de lastre de agua.

Tabla 1: Preferencias para el diseño de un controlador

Propiedad	Valor
Diámetro de la columna	15 m
Altura de la columna	31 m
Ancho del pontón	10 m
Altura del pontón	4 m
Distancia centro-centro	61 m
Ancho de la viga de cubierta	3.5 m
Altura de la viga de cubierta	3.5 m
Masa total de la subestructura incluyendo lastre	12058 t
Centro de gravedad total de la subestructura CGx	-6.34 m
Centro de gravedad total de la subestructura CGy	0 m
Centro de gravedad total de la subestructura CGz	-10.02 m

Además, el sistema de amarre consta de tres líneas de cadenas empleando una combinación de materiales de cadena y poliéster, proporcionando una pretensión de 1050 kN, considerando una profundidad de agua de 150 m durante la fase de diseño. Mientras se preservan los atributos fundamentales de la turbina eólica WINDMOOR 12MW, se han realizado modificaciones en la subestructura de la turbina eólica para acomodar sistemas OWC duales. Específicamente, se han integrado cámaras con un diámetro de 4.5 m en las columnas de la subestructura donde no se instala la torre, como se muestra en la Figura 2. Los OWC incorporados en la turbina eólica modificada WINDMOOR 12MW comprenden una cámara de aire vinculada a un generador de turbina a través de un mecanismo de toma de fuerza (PTO). Estas cámaras cuentan con aberturas por debajo de la línea de flotación, permitiendo que la acción de las olas impulse agua hacia adentro, comprimiendo el aire dentro. Las válvulas de los OWC regulan la compresión y descompresión del aire dentro de las cámaras, contribuyendo a la amortiguación de las oscilaciones del sistema. Sin embargo, para los fines de este estudio, las válvulas de regulación de los OWC permanecen abiertas para evaluar la estabilidad del sistema sin ninguna intervención de control.

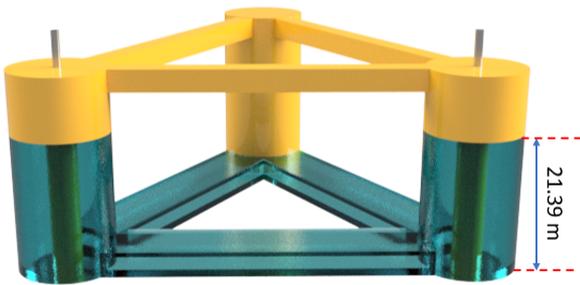


Figura 2: La subestructura para el sistema FWT-OWCs con representación de lastre.

La ecuación de movimiento en el dominio de la frecuencia se expresa como:

$$I_{FWT}(\omega)\ddot{x} + B_{FWT}(\omega)\dot{x} + K_{FWT}x = \vec{f}_{FWT}(\omega) \quad (1)$$

donde I_{FWT} , B_{FWT} y K_{FWT} representan las matrices de inercia, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, después de la linealización. $\vec{f}_{FWT}(\omega)$ denota la fuerza hidrodinámica y las cargas aerodinámicas, con x describiendo el movimiento de la plataforma como se delineó en la Ecuación 2.

$$x = \begin{bmatrix} \text{avance} \\ \text{abatimiento} \\ \text{desplazamiento vertical} \\ \text{balanceo} \\ \text{cabeceo} \\ \text{guiñada} \\ \text{avance de torre} \\ \text{lado a lado de la torre} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Los elementos de inercia de la FWT se definen como:

$$I_{FWT}(\omega) = A_{Hydro}(\omega) + M_{Platform} + M_{Tower} \quad (3)$$

donde $M_{Platform}$ denota la masa de la plataforma y M_{Tower} representa la masa de la torre, incluida la assembly de la góndola en la parte superior de la torre. A_{Hydro} denota la masa agregada de la plataforma, calculada utilizando el programa de radiación de paneles WADAM DNV (2017).

La matriz de rigidez K_{FWT} se expresa como:

$$K_{FWT} = K_{Hydro} + K_{Mooring} + K_{Tower} + K_{PTO} \quad (4)$$

donde K_{Hydro} , $K_{Mooring}$, K_{Tower} y K_{PTO} representan la matriz de restauración hidrostática, la rigidez del resorte de las líneas de amarre, los coeficientes de rigidez de la torre y la rigidez del PTO, respectivamente.

Los coeficientes de amortiguamiento se describen como:

$$B_{FWT}(\omega) = B_{Hydro}(\omega) + B_{Tower} + B_{PTO} \quad (5)$$

donde B_{Hydro} denota los elementos de amortiguamiento de la plataforma derivados del problema de radiación y amortiguamiento por arrastre, B_{Tower} representa la matriz de amortiguamiento de la torre flexible y B_{PTO} representa el amortiguamiento del PTO.

Para calcular la masa agregada, los coeficientes de amortiguamiento, la matriz de restauración y la fuerza hidrodinámica, se analiza un modelo de elementos finitos de la plataforma en malla utilizando la herramienta WADAM.

3. Estabilidad Hidrostática y Análisis Hidrodinámicos

En esta sección, se han realizado análisis de estabilidad hidrostática y análisis hidrodinámicos. El análisis de estabilidad hidrostática es crucial para el diseño de turbinas eólicas marinas, asegurando la capacidad de una turbina eólica flotante (FWT) para mantener su posición vertical durante condiciones operativas. Evalúa la resistencia del FWT a la volcadura o inclinación debido a fuerzas externas como el viento y las olas. Las direcciones de las olas y el viento se muestran en la Figura 3.

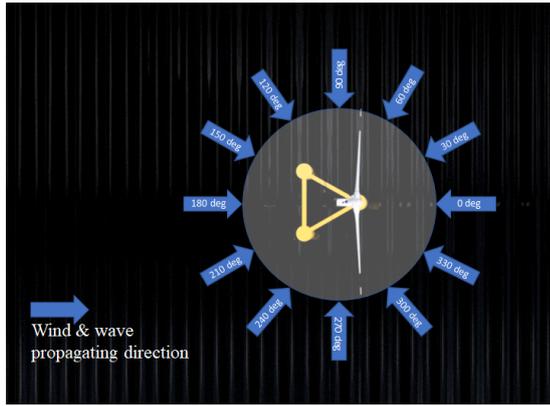


Figura 3: Direcciones del viento y las olas.

Las Figuras 4 y 5 ilustran los momentos de enderezamiento y momentos de inclinación del viento respecto al ángulo de inclinación para la FWT remodelada de 12 MW WINDMOOR y el sistema híbrido FWT-OWCs rediseñado. El momento de volcamiento expuesto a la turbina eólica se ha calculado en función de la máxima fuerza sobre las palas. Este momento de volcamiento está representado en las figuras por la línea de trazos negros que denota el momento de inclinación del viento. Los momentos de enderezamiento se han trazado en función de diferentes direcciones de ángulo de inclinación para evaluar la estabilidad intacta de ambos sistemas.

La estabilidad estática intacta se ha evaluado en base a cinco criterios:

- El ángulo de inclinación de equilibrio con el viento no debe superar los 17 grados.
- La intercepción del segundo momento de enderezamiento/inclinación debe superar los 30 grados.
- La curva del momento de enderezamiento debe ser positiva en todo el rango de ángulos desde la posición vertical hasta la segunda intercepción.
- La altura metacéntrica en equilibrio debe ser mayor que 1 m.
- Para unidades estabilizadas por columna, el área bajo la curva del momento de enderezamiento hasta el ángulo de inundación no debe ser menor al 30 % en exceso del área bajo la curva del momento de inclinación del viento hasta el mismo ángulo límite.

Tanto la FWT de 12 MW WINDMOOR como el sistema híbrido FWT-OWCs han cumplido estos criterios después de la evaluación utilizando la herramienta Hydro desarrollada por DNV MANUAL (2017). Esto subraya la robustez y la capacidad de ambos sistemas para mantener la estabilidad bajo cargas extremas, lo que es fundamental para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente en entornos marinos desafiantes. Esta validación respalda la viabilidad y la fiabilidad de la integración de OWC en las FWT semisumergibles, promoviendo su adopción en futuros proyectos de energía eólica marina.

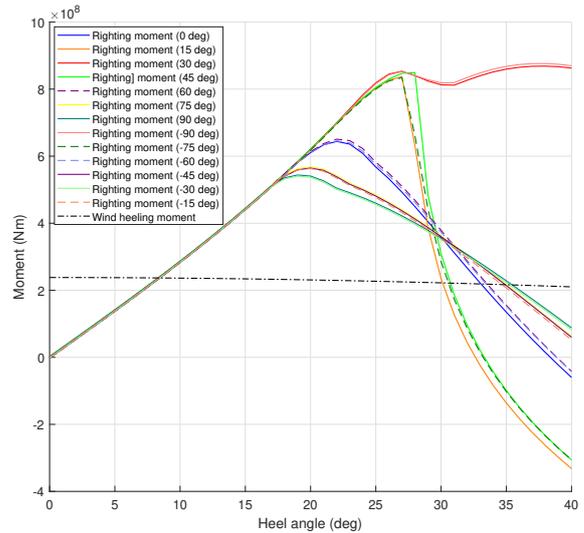


Figura 4: Momentos para la FWT remodelada WINDMOOR sin OWCs.

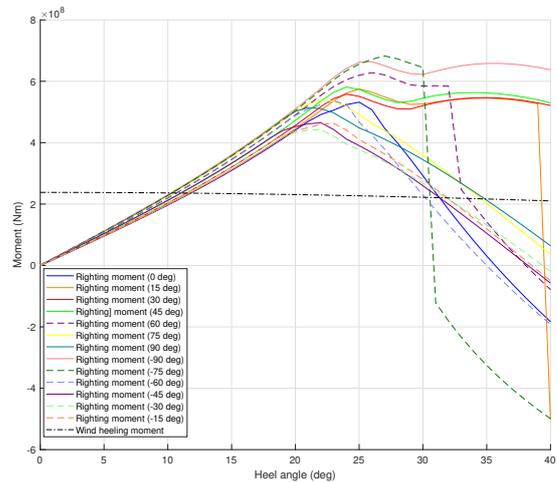


Figura 5: Momentos para el sistema híbrido FWT-OWCs.

Una vez que se asegura la estabilidad estática del sistema, se pueden evaluar las hidrodinámicas a través de los Operadores de Amplitud de Respuesta (RAOs) para observar el comportamiento del sistema. Los RAOs suelen expresarse como funciones de la frecuencia de entrada y se pueden calcular mediante análisis teóricos, simulaciones numéricas o pruebas físicas. Son parámetros esenciales en el diseño y análisis de estructuras marinas, prediciendo la respuesta de la estructura a diversas condiciones de entrada. Por lo tanto, se ha realizado un análisis de WADAM para obtener las funciones de transferencia para diferentes estados de los sistemas.

Los RAOs para el desplazamiento vertical, balanceo y cabeceo se presentan en 6, 7, 8, respectivamente. Las curvas azules y rojas representan los RAOs para la FWT de WINDMOOR y el sistema híbrido FWT-OWCs, respectivamente. Además, la dirección de la ola para todos los RAOs se ha considerado como la ola de dirección cero grados. El RAO de desplazamiento vertical aumenta en amplitud a medida que el período de la ola se alarga hasta que alcanza su frecuencia natural, después de lo cual disminuye. Es notable que el RAO

de desplazamiento vertical para el FWT-OWCs es menor que para el FWT de WINDMOOR, lo que indica un impacto positivo del diseño novedoso en la reducción de oscilaciones en la frecuencia natural de desplazamiento vertical. Debido a la dirección de la ola de cero grados, el estado de balanceo no se ha provocado como se puede ver en la Figura 7.

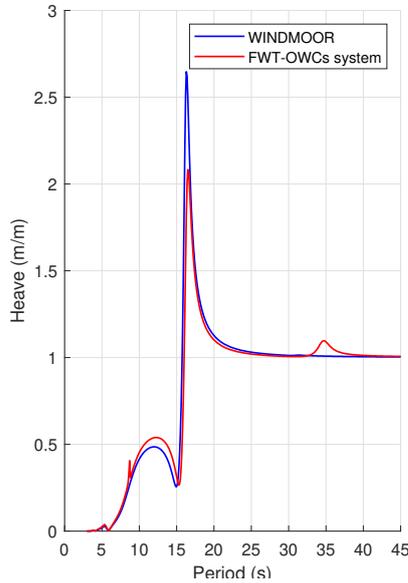


Figura 6: RAO de desplazamiento vertical en la dirección de la ola de 0 grados.

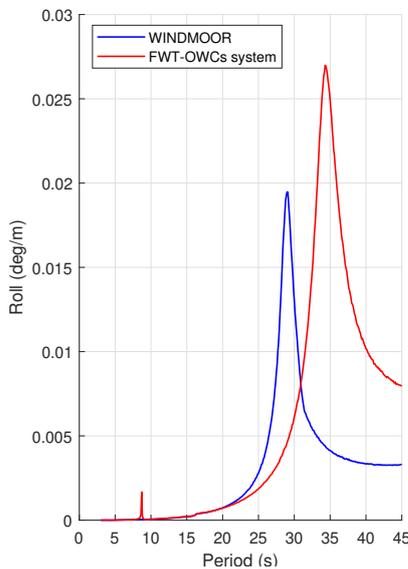


Figura 7: RAO de balanceo en la dirección de la ola de 0 grados.

El modo más crítico en este estudio es el de cabeceo, que impacta significativamente en la extracción de energía. Como se muestra en la Figura 8, el RAO de cabeceo se alarga con el aumento del período de la ola hasta la frecuencia natural. Después de eso, disminuye, con la frecuencia natural desplazada hacia adelante para el sistema híbrido FWT-OWCs en comparación con el FWT de WINDMOOR. Este cambio se debe a cambios en la distribución de masa o al GMT/GML.

Además, la amplitud del cabeceo ha disminuido significativamente para el sistema FWT-OWCs en comparación con el FWT de WINDMOOR, demostrando el efecto positivo de los OWCs en la amortiguación de oscilaciones en las FWTs.

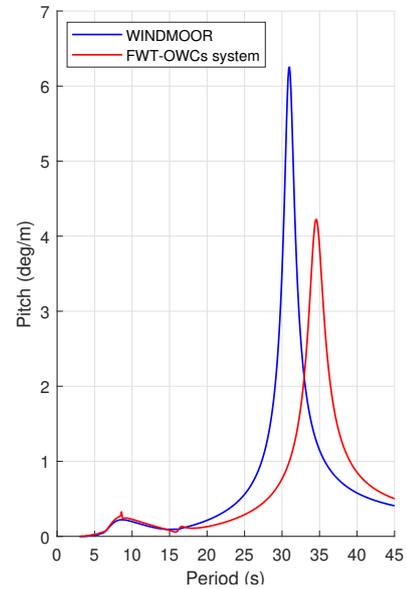


Figura 8: RAO de cabeceo en la dirección de la ola de 0 grados.

4. Conclusiones

Este estudio profundizó en la integración de Columnas de Agua Oscilantes (OWCs) dentro de Turbinas Eólicas Flotantes (FWTs) semisumergibles. Envolvió un examen exhaustivo de las ecuaciones de movimiento en el dominio de la frecuencia para FWTs, junto con evaluaciones de estabilidad hidrostática y análisis hidrodinámicos. Se realizó un análisis comparativo entre la FWT original de WINDMOOR y el sistema híbrido propuesto FWT-OWCs.

La evaluación reveló que ambos sistemas cumplían con los criterios de estabilidad intacta bajo condiciones de máxima fuerza del viento. En el análisis hidrodinámico, realizado para una dirección de ola de cero grados, se observaron reducciones notables en los Operadores de Amplitud de Respuesta (RAOs) en las frecuencias naturales para el cabeceo y el desplazamiento vertical, lo que indica la influencia beneficiosa de la integración de OWCs en las FWTs. Además, el estudio delineó la viabilidad potencial de la integración de OWCs en FWTs semisumergibles.

Los esfuerzos futuros podrían implicar la implementación de un sistema de control activo para el sistema híbrido FWT-OWCs, incorporando control de flujo de aire a través de válvulas en los OWCs. Además, los próximos pasos pueden implicar evaluar el sistema bajo condiciones más realistas, teniendo en cuenta los efectos de las olas y el viento irregulares. Esto requeriría realizar simulaciones en el dominio del tiempo para evaluar la eficacia del controlador en mejorar la respuesta y la estabilidad del sistema híbrido.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Gobierno Vasco por financiar su trabajo de investigación a través del proyecto IT1555-22 y a través de los proyectos PID2021-123543OB-C21 y PID2021-123543OB-C22 financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE. Además, los autores desean agradecer a la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) a través de la beca Margarita Salas MARSAA22/09 financiada por UPV-EHU/MIU/Next Generation, UE.

Referencias

- Aboutalebi, P., Garrido, A. J., Garrido, I., Nguyen, D. T., Gao, Z., 2024. Hydrostatic stability and hydrodynamics of a floating wind turbine platform integrated with oscillating water columns: A design study. *Renewable Energy* 221, 119824.
- 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, I., Garrido, A. J., 2023a. Fuzzy logic control of an artificial neural network-based floating offshore wind turbine model integrated with four oscillating water columns. *Ocean Engineering* 269, 113578.
- Ahmad, I., M'zoughi, F., Aboutalebi, P., Garrido, I., Garrido, A. J., 2023b. A regressive machine-learning approach to the non-linear complex fast model for hybrid floating offshore wind turbines with integrated oscillating water columns. *Scientific Reports* 13 (1), 1499.
- DNV, G., 2017. Sesam user manual-wadam. DNV GL Software.
- Kamarlouei, M., Gaspar, J., Calvario, M., Hallak, T., Mendes, M. J., Thiebaud, F., Soares, C. G., 2020. Experimental analysis of wave energy converters concentrically attached on a floating offshore platform. *Renewable Energy* 152, 1171–1185.
- MANUAL, S. U., 2017. Wave analysis by diffraction and morison theory.
- Mello, P. C., Malta, E. B., da Silva, R. O., Candido, M. H., do Carmo, L. H. S., Alberto, I. F., Franzini, G. R., Simos, A. N., Suzuki, H., Gonçalves, R. T., 2021. Influence of heave plates on the dynamics of a floating offshore wind turbine in waves. *Journal of Marine Science and Technology* 26, 190–200.
- M'zoughi, F., Aboutalebi, P., Garrido, I., Garrido, A. J., De La Sen, M., 2021. Complementary airflow control of oscillating water columns for floating offshore wind turbine stabilization. *Mathematics* 9 (12), 1364.
- M'zoughi, F., Garrido, I., Garrido, A. J., De La Sen, M., et al., 2023. Fuzzy airflow-based active structural control of integrated oscillating water columns for the enhancement of floating offshore wind turbine stabilization. *International Journal of Energy Research*.
- Sarmiento, J., Iturrioz, A., Ayllón, V., Guanche, R., Losada, I., 2019. Experimental modelling of a multi-use floating platform for wave and wind energy harvesting. *Ocean Engineering* 173, 761–773.
- Sierra-García, J., Santos, M., 2021. Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 18 (4), 327–335.
- Slocum, A., Kluger, J., Mannai, S., 2019. Energy harvesting and storage system stabilized offshore wind turbines. In: 2019 Offshore Energy and Storage Summit (OSES). IEEE, pp. 1–6.
- Zhang, Y., Zhao, X., Wei, X., 2020. Robust structural control of an underactuated floating wind turbine. *Wind Energy* 23 (12), 2166–2185.