

Jornadas de Automática

Restricciones Geométricas y Umbrales de Estabilidad en Flotadores Híbridos OWC-FOWT con Columnas Integradas

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

^aDpto. de Arquitectura de Computadores y Automática, Facultad de Física, Universidad Complutense de Madrid (UCM), Madrid, 28040, España.

^bInstituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid (UCM), Madrid, 28040, España

To cite this article: Aboutalebi, Payam, Santos, Matilde. 2026. Geometric Constraints and Stability Thresholds in Column-Integrated OWC-FOWT Hybrid Floaters.

Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13782>

Resumen

Los grandes movimientos de plataforma siguen siendo una de las principales barreras para la expansión de los aerogeneradores eólicos flotantes offshore (FOWTs) en entornos de aguas profundas, ya que reducen la producción energética y aceleran la fatiga estructural. Este trabajo investiga el diseño numérico y los límites de desempeño pasivo de una novedosa plataforma híbrida semisumergible derivada del concepto de 12 MW INO WINDMOOR, modificada para incorporar cámaras de Columna de Agua Oscilante (OWC) dentro de sus columnas principales. El sistema se evalúa estrictamente bajo un marco pasivo, aislando el impacto geométrico de los espacios abiertos de columna de agua sobre la restauración hidrostática y la dinámica en frecuencia de oleaje. Los resultados revelan un complejo compromiso geométrico: las configuraciones internas mejoran significativamente las características del período natural de cabeceo, pero pueden provocar fallos bajo los estándares de la Norwegian Maritime Authority cuando el escalado de las cámaras desplaza reservas internas críticas de lastre.

Palabras clave: Aerogenerador eólico marino flotante, Columna de agua oscilante, Plataforma semisumergible, Reducción pasiva del movimiento, Estabilidad hidrostática, Interacción ola–estructura, Restricciones geométricas, Modelado numérico.

Geometric Constraints and Stability Thresholds in Column-Integrated OWC-FOWT Hybrid Floaters

Abstract

Large platform motions remain a key barrier to expanding floating offshore wind turbines (FOWTs) into deep-water environments, reducing energy yield and accelerating structural fatigue. This brief investigates the numerical design and passive performance bounds of a novel hybrid semisubmersible platform derived from the 12 MW INO WINDMOOR concept, modified to incorporate Oscillating Water Column (OWC) chambers inside its main columns. The system is evaluated strictly under a passive framework, isolating the geometric impact of open water-column spaces on hydrostatic restoration and wave-frequency dynamics. The results uncover an intricate geometric trade-off: internal configurations significantly improve pitch natural period characteristics but risk catastrophic compliance failure under Norwegian Maritime Authority (NMA) standards when chamber scaling displaces critical internal ballast reserves.

Keywords: Floating offshore wind turbine, Oscillating water column, Semisubmersible Platform, Passive motion reduction, Hydrostatic stability, Wave–structure interaction, Geometric constraints, Numerical modeling.

*Autor para correspondencia: payamabo@ucm.es

1. Introducción

El despliegue de aerogeneradores eólicos marinos flotantes (FOWTs) de gran capacidad —del orden de 12 MW— exige una elevada estabilidad y una óptima distribución del desplazamiento hidrostático (Bagheri-Rouch et al., 2026; Aboutalebi et al., 2026a). Paralelamente, la mitigación de los movimientos de balanceo, cabeceo y arfada inducidos por el oleaje es un requisito crítico para prolongar la vida útil de los componentes estructurales y optimizar la eficiencia del sistema de conversión energética (Segundo Esteban, 2026; Villoslada et al., 2022).

Para contrarrestar estas cargas ambientales, la literatura científica ha explorado tradicionalmente diversas metodologías de mitigación desde enfoques aerodinámicos y estructurales. En el plano aerodinámico, se han implementado estrategias avanzadas basadas en el control del ángulo de paso de las palas y del par del generador, las cuales buscan desacoplar la inestabilidad clásica de cabeceo que surge en condiciones de vientos superiores a la velocidad nominal (López-Queija et al., 2022; Stockhouse et al., 2023). Estas técnicas regulan las fuerzas sobre el rotor para estabilizar de forma activa la inclinación de la subestructura flotante (Salic et al., 2019). Por otro lado, en el ámbito del control estructural, se ha consolidado el uso de amortiguadores de masa sintonizados (TMD) y amortiguadores de columna de líquido sintonizados (TLCD), los cuales redistribuyen las fuerzas inerciales internas para reducir las respuestas vibratorias globales ante el acoplamiento aero-hidrodinámico extremo (Truong et al., 2022; Wang et al., 2026).

A pesar de la efectividad de estos mecanismos mecánicos y aerodinámicos, la tendencia actual busca soluciones que optimicen la propia hidrodinámica del flotador sin añadir sistemas mecánicos móviles complejos. En este escenario, la integración de convertidores de energía undimotriz, específicamente los de Columna de Agua Oscilante (OWC), emerge como una solución sinérgica: no solo permite el aprovechamiento de recursos energéticos marinos adicionales, sino que actúa como un mecanismo hidrodinámico pasivo capaz de modificar favorablemente la respuesta dinámica de la plataforma (Aboutalebi et al., 2024b, 2021; Muñoz-Palomeque et al., 2025).

A diferencia de los diseños previos (Kluger, 2017; Haji et al., 2018), que habitualmente dependen de dispositivos undimotrices externos, adosados o independientes —lo que incrementa la complejidad estructural y las interferencias hidrodinámicas negativas—, este estudio propone un enfoque de diseño integrado. El objetivo es establecer la viabilidad estructural primaria y los límites físicos de operación de configuraciones OWC alojadas directamente en el núcleo de las columnas de la plataforma. En particular, se analizan las restricciones geométricas que gobiernan esta disposición interna, donde la incorporación de las cámaras de aire y agua compite de forma directa y reduce el espacio central disponible para el lastre estructural.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se detalla la descripción del sistema híbrido propuesto, especificando las modificaciones geométricas realizadas sobre la plataforma semisumergible de referencia y las propiedades de masa resultantes tras la integración de las cámaras OWC. La Sección 3 presenta el marco meto-

dológico empleado para la evaluación de la estabilidad y el análisis dinámico en el dominio de la frecuencia, fundamentado en las normativas internacionales aplicables. Los resultados numéricos y la discusión sobre el umbral crítico de estabilidad frente a las restricciones geométricas se exponen en la Sección 4. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las principales conclusiones del estudio y se esbozan las líneas de investigación futuras orientadas al codiseño y control activo del sistema.

2. Topología de la plataforma y escalado geométrico

La contribución principal de este trabajo radica en identificar cuantitativamente el umbral geométrico crítico a partir del cual el escalado de estas cámaras compromete irreversiblemente la estabilidad intacta bajo los estándares de la Norwegian Maritime Authority (NMA). El esquema general de este concepto híbrido OWC-FOWT se presenta en la Figura 1.

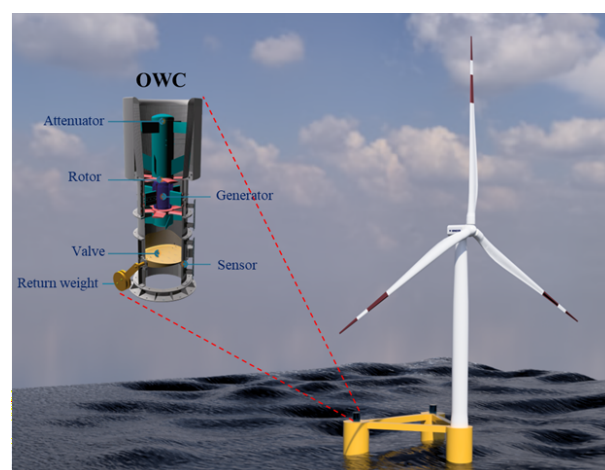


Figura 1: Esquema de la plataforma híbrida semisumergible OWC-FOWT.

Como se muestra en la Figura 1, la plataforma mantiene la configuración semisumergible de referencia con tres columnas externas y una central. La modificación principal consiste en rediseñar el interior de las columnas externas para integrar cámaras cilíndricas concéntricas que funcionan como OWC.

La arquitectura subyacente se basa en el modelo de validación de tres columnas de la plataforma semisumergible INO WINDMOOR (Silva de Souza et al., 2021). El aerogenerador de 12 MW, de tipo a barlovento, se sitúa directamente sobre una de las principales columnas estructurales. Los pontones interconectados y el pilar tubular de acero de gran profundidad permiten distribuir las cargas a través de una configuración triangular, con una distancia entre centros de 61 m.

Para alojar la cámara interna (Topologías 1 y 2), el núcleo estructural de la columna se vacía, lo que obliga a desplazar el peso restante y el lastre hacia una posición más elevada o hacia la periferia de la columna. Las distribuciones de masa resultantes y las configuraciones precisas se detallan a continuación:

Baseline WINDMOOR: Columnas sólidas de 15 m de diámetro, calado de 18.40 m, con centro de gravedad vertical de referencia (CG_z) de 4.03 m (véase la Figura 2a).

FWT-OWC 1 (cámara interna de 3.5 m): La cámara interna del núcleo genera un volumen individual de 298.25 m³. La altura del lastre aumenta hasta 20.83 m, y el CG_z se desplaza hasta 6.04 m (Topología 1, véase la Figura 2b).

FWT-OWC 2 (cámara interna de 4.5 m): La cámara interna de mayor diámetro incrementa el volumen a 493.03 m³, lo que provoca un aumento más pronunciado de la altura del lastre hasta 24.64 m, elevando el CG_z global hasta 6.38 m hasta 6.04 m (Topología 2, véase la Figura 2b).

La Figura 2 presenta la configuración base de la plataforma semisumergible WINDMOOR y la configuración híbrida OWC-FOWT propuesta, destacando la modificación geométrica de las columnas principales y la redistribución del lastre necesaria para integrar las cámaras OWC internas.

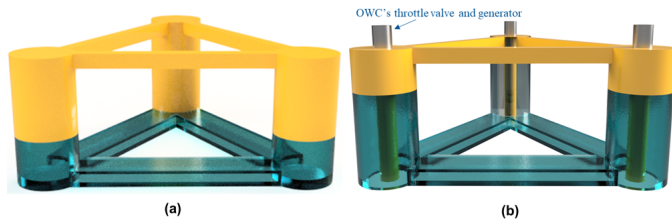


Figura 2: Configuración base (a) de la FOWT semisumergible WINDMOOR y (b) configuración híbrida con la ilustración de la distribución del lastre

Tabla 1: Nomenclatura y variables de matrices estructurales

Símb.	Descripción	Unidad
ω	Frecuencia angular de excitación de ola	rad/s
$\mathbf{I}_{\text{FWT}}$	Matriz total de inercia del sistema cuerpo rígido	–
$\mathbf{X}$	Vector complejo de desplazamiento de la plataforma (6-DOF)	–
$\mathbf{M}_{\text{FWT}}$	Matriz de masa estructural de la plataforma	–
$\mathbf{A}_{\text{Hydro}}$	Masa añadida dependiente de la frecuencia	–
$\mathbf{B}_{\text{FWT}}$	Matriz total de amortiguamiento del sistema	–
$\mathbf{B}_{\text{Hydro}}$	Amortiguamiento por radiación de ondas	–
$\mathbf{B}_{\text{vis}}$	Matriz de amortiguamiento viscoso linealizado	–
$\mathbf{C}_{\text{FWT}}$	Matriz de restauración (hidrostática + amarre)	–
$\mathbf{f}_{\text{FWT}}$	Vector de excitación de olas	–
$\mathbf{F}_D$	Vector de fuerza viscosa de arrastre	N
ρ	Densidad del agua de mar	kg/m ³
ρ_{air}	Densidad del aire ambiente	kg/m ³
σ	Elemento de área proyectada de la columna	m ²
C_D	Coefficiente adimensional de arrastre viscoso	–
V_{max}	Amplitud máxima de velocidad estructural	m/s
v	Velocidad local de partícula fluida	m/s
$\dot{x}$	Componente de velocidad estructural	m/s
F_{Thrust}	Fuerza de empuje aerodinámica del rotor	N
A_{rotor}	Área barrida del rotor eólico	m ²
V	Velocidad de viento uniforme en el buje	m/s
C_t	Coefficiente de empuje del rotor de 12 MW	–
θ	Ángulo de escora de la plataforma	rad
z_{hub}	Coordenada vertical del centro del buje	m
z_{CoB}	Coordenada vertical del centro de carena	m
F_{wind}	Fuerza aerodinámica en torre/casco	N
H_z	Brazo de palanca vertical del viento	m
M_{wind}	Momento de escora por viento ambiental	N·m

3. Fundamento Matemático del Modelo

La plataforma híbrida se modela como un sistema dinámico de cuerpo rígido con seis grados de libertad (DOFs) acoplados, interactuando con una superficie libre interna pasiva y no presurizada. Bajo la teoría de flujo potencial lineal, suposiciones de pequeñas amplitudes y excitación ondulatoria armónica, la ecuación de movimiento en el dominio de la frecuencia se formula como (Bagheri-Rouch et al., 2025):

$$-\omega^2 \mathbf{I}_{\text{FWT}}(\omega) \mathbf{X}(\omega) + i\omega \mathbf{B}_{\text{FWT}}(\omega) \mathbf{X}(\omega) + \mathbf{C}_{\text{FWT}} \mathbf{X}(\omega) = \mathbf{f}_{\text{FWT}}(\omega) \quad (1)$$

3.1. Nomenclatura y Definición de Variables

Para garantizar claridad analítica, todas las matrices físicas, vectores operativos y designaciones de coordenadas utilizadas en los modelos matemáticos se presentan de forma sistemática con sus unidades en la Tabla 1.

3.2. Matrices de Inercia y Amortiguamiento

La matriz de inercia total dependiente de la frecuencia $\mathbf{I}_{\text{FWT}}(\omega)$ incluye tanto las propiedades inerciales de la estructura como el efecto de la masa añadida hidrodinámica (Aboutalebi et al., 2023):

$$\mathbf{I}_{\text{FWT}}(\omega) = \mathbf{M}_{\text{FWT}} + \mathbf{A}_{\text{Hydro}}(\omega) \quad (2)$$

Esta ecuación representa el balance inercial completo del sistema acoplado. Donde $\mathbf{M}_{\text{FWT}}$ es la matriz de masa estructural de la plataforma en aire, mientras que $\mathbf{A}_{\text{Hydro}}(\omega)$ representa la matriz de masa añadida hidrodinámica, la cual varía en función de la frecuencia angular de la ola (ω) y cuantifica el volumen de fluido circundante que es acelerado por el movimiento del flotador en sus seis grados de libertad.

La matriz global de amortiguamiento combina los efectos de la radiación de ondas y el arrastre viscoso linealizado, garantizando la disipación de energía del sistema frente a la excitación ambiental:

$$\mathbf{B}_{\text{FWT}}(\omega) = \mathbf{B}_{\text{Hydro}}(\omega) + \mathbf{B}_{\text{vis}} \quad (3)$$

En esta expresión, $\mathbf{B}_{\text{Hydro}}(\omega)$ denota la matriz de amortiguamiento por radiación potencial, que depende de la frecuencia e indica la energía disipada en forma de ondas generadas por las propias oscilaciones de la plataforma en la superficie libre. Por su parte, $\mathbf{B}_{\text{vis}}$ representa la matriz de amortiguamiento viscoso linealizado, necesaria para capturar los efectos de desprendimiento de vórtices y fricción del fluido que la teoría potencial pura no puede modelar.

Las fuerzas de arrastre viscoso no lineales se evalúan originalmente mediante un enfoque de elementos tipo Morison y se transforman en una contribución lineal equivalente bajo una frecuencia dominante de operación:

$$\mathbf{F}_D \approx \frac{1}{2} \rho \sigma C_D \frac{8}{3\pi} V_{\text{max}} (v - \dot{x}) = \mathbf{B}_{\text{vis}} (v - \dot{x}) \quad (4)$$

Esta aproximación se fundamenta en el criterio de igual disipación de energía para linealizar el término cuadrático de la ecuación de Morison. Dentro de los parámetros que definen la fuerza de arrastre $\mathbf{F}_D$, ρ representa la densidad del agua de mar, σ es el área proyectada de los miembros cilíndricos de la plataforma perpendicular al flujo, C_D corresponde al coeficiente adimensional de arrastre viscoso y V_{max} es la amplitud

Tabla 2: Resumen de cumplimiento de criterios de estabilidad intacta NMA.

Configuración	C1 ($\leq 17^\circ$)	C2 ($> 30^\circ$)	C3	C4 (GM > 1 m)	C5 (ratio)
WINDMOOR Base	8,18° ✓	33–36° ✓	✓	11,51 m ✓	3,80× ✓
OWC Interno 3,5 m	10,19° ✓	31–38° ✓	✓	9,41 m ✓	1,84× ✓
OWC Interno 4,5 m	11,32° ✓	27–28° ✗	✓	8,03 m ✓	1,10× ✗

Nota: C1–C5 según reglamentación NMA (1991). ✓ = Cumple, ✗ = Incumple, reportado para todas las direcciones de viento consideradas.

máxima de la velocidad relativa estructural. El término estructural ($v - \dot{x}$) define el diferencial de velocidades, donde v representa la velocidad local de la partícula del fluido inducida por la ola y $\dot{x}$ es la componente de velocidad de la plataforma en el grado de libertad analizado. Finalmente, esta formulación permite aislar de manera directa la matriz de amortiguamiento viscoso equivalente como:

$$\mathbf{B}_{vis} = \frac{4}{3\pi} \rho \sigma C_D V_{max} \quad (5)$$

3.3. Modelo Aerodinámico de Escora por Viento

Para evaluar la estabilidad intacta según los criterios regulatorios internacionales, se asume un campo de viento estacionario que actúa sobre la superestructura, el cual genera una fuerza de empuje aerodinámico (F_{Thrust}) en el rotor y un momento de escora global (M_{wind}) en la plataforma:

$$F_{Thrust} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_{rotor} V^2 C_t \quad (6)$$

Esta ecuación determina la fuerza de empuje cuasi-estática perpendicular al plano del rotor. Donde ρ_{air} representa la densidad del aire ambiente, A_{rotor} es el área total barrida por las palas del rotor del aerogenerador de 12 MW, V define la velocidad uniforme del viento medida a la altura del buje (hub) y C_t corresponde al coeficiente de empuje del rotor (un parámetro adimensional dependiente de la velocidad del viento y de la estrategia de control del ángulo de paso).

El momento de escora total inducido por el viento, que actúa como la principal fuerza desestabilizadora en las curvas de estabilidad hidrostática, se formula de la siguiente manera:

$$M_{wind} = F_{Thrust}(z_{hub} - z_{CoB}) \cos^2(\theta) + F_{wind} H_z \quad (7)$$

En esta expresión se combinan las dos contribuciones aerodinámicas principales sobre la estructura flotante. El primer término representa el momento volcador debido al empuje del rotor, donde la diferencia ($z_{hub} - z_{CoB}$) define el brazo de palanca vertical principal entre la coordenada del buje (z_{hub}) y el centro de carena o flotabilidad de la plataforma (z_{CoB}). El factor geométrico $\cos^2(\theta)$ se introduce para modelar la pérdida de efectividad del empuje a medida que la plataforma experimenta un ángulo de escora o inclinación (θ). El segundo término añade el momento generado por la fuerza del viento directo sobre las superficies expuestas de la torre y el casco (F_{wind}), multiplicada por su respectivo brazo de palanca vertical de acción (H_z).

4. Resultados

La estabilidad hidrostática de la plataforma WINDMOOR base y las configuraciones híbridas FOWT-OWC se evalúa

comparando el momento adrizante hidrostático con el momento de escora inducido por viento bajo condiciones operativas y extremas representativas. El empuje aerodinámico máximo se produce en la transición entre las Regiones II y III, próximo a la velocidad nominal ($\sim 11,25$ m/s), y constituye la condición de carga más crítica para la evaluación de estabilidad.

A este respecto, cabe destacar que la Región II corresponde a la zona de operación por debajo de la velocidad nominal del viento, donde el sistema busca maximizar la captura de energía mediante el control de par del generador manteniendo un ángulo de paso de pala constante. Por el contrario, la Región III representa la zona de operación por encima de la velocidad nominal, donde el control dinámico del pitch actúa activamente regulando la sustentación aerodinámica para mantener la potencia constante y proteger la estructura. La transición entre ambos regímenes operativos es el punto donde el rotor experimenta la máxima fuerza de empuje axial de diseño, un fenómeno ampliamente documentado y analizado en las estrategias de control dinámico aplicadas a este tipo de plataformas híbridas (Aboutalebi et al., 2024a).

Las curvas del brazo adrizante (GZ) de la Figura 3 muestran la capacidad restauradora hidrostática de cada configuración en función del ángulo de escora. Todas las configuraciones presentan una pendiente inicial positiva, lo que confirma estabilidad inicial positiva y altura adecuada en equilibrio. La plataforma WINDMOOR base en la Figura 3a exhibe una curva GZ bien definida con máximo pronunciado y amplio rango de estabilidad positiva, superando holgadamente el mínimo reglamentario del segundo intercepto ($> 30^\circ$) en todas las direcciones de viento consideradas.

La configuración con cámara OWC interna de 3,5 m en la Figura 3b presenta curvas GZ comparables a la configuración base, con variaciones mínimas en el brazo adrizante máximo. El ángulo de equilibrio ($10,19^\circ$) y el segundo intercepto ($31,6^\circ$ – $38,4^\circ$) cumplen todos los criterios de la NMA para todas las direcciones de viento, confirmando que la integración moderada de cámaras internas no compromete la estabilidad hidrostática de la plataforma.

En contraste, la configuración con cámara OWC interna de 4,5 m muestra una reducción notable en el rango de estabilidad positiva (Figura 3c). Aunque el brazo adrizante inicial permanece positivo, el segundo intercepto se produce a ángulos inferiores al mínimo exigido por la NMA (27 – 28° frente al mínimo de 30°), incumpliendo además el criterio de razón de áreas (C5) para la mayoría de direcciones de viento. Esta configuración se identifica como hidroestáticamente crítica: la cámara interna ampliada deteriora la capacidad restauradora a grandes ángulos de escora al desplazar las reservas de lastre disponibles hacia la estrecha región anular que rodea la

cámara, reduciendo significativamente el margen de estabilidad residual.

Para comprender el comportamiento de las configuraciones evaluadas en la Tabla 2, es necesario definir los cinco criterios de estabilidad intacta regulados por la normativa NMA:

- **Criterio 1 (C1 - Ángulo de escora estático, $\theta_{\text{stat}} \leq 17^\circ$):** Este criterio limita la inclinación permanente de la plataforma bajo la fuerza continua del viento de diseño. Garantiza que el ángulo de equilibrio estático (el primer punto de intersección entre la curva del brazo adrizante *GZ* y la curva de escora por viento) no supere los 17° , protegiendo la integridad estructural de la torre y previniendo la pérdida de eficiencia del rotor.
- **Criterio 2 (C2 - Segundo intercepto, $\theta_{\text{int2}} > 30^\circ$):** Define el límite del rango de estabilidad positiva. Exige que el segundo punto de intersección entre la curva de momento adrizante y la curva de escora por viento ocurra a un ángulo mayor de 30° . Esto asegura un margen de seguridad angular suficiente ante inclinaciones dinámicas extremas antes de que el sistema pierda por completo su capacidad de adrizamiento.
- **Criterio 3 (C3 - Brazo adrizante positivo en todo el rango):** Establece de forma estricta que la curva *GZ* neta (restando el efecto de la escora por viento) debe mantenerse estrictamente positiva de manera continua entre el primer y el segundo intercepto, impidiendo la existencia de zonas de restauración nula o inestabilidades locales.
- **Criterio 4 (C4 - Altura metacéntrica inicial, $GM > 1 \text{ m}$):** Evalúa la estabilidad inicial de la plataforma en condiciones de aguas tranquilas (*GZ* a ángulos pequeños). Exige que la altura metacéntrica transversal corregida por el efecto de superficie libre (*GM*) sea superior a 1 metro, lo que dota al flotador de una rigidez hidrostática adecuada para contrarrestar los momentos volcadores iniciales.
- **Criterio 5 (C5 - Razón de áreas o criterio energético):** Es el criterio dinámico más exigente de la normativa. Estipula que el área total bajo la curva de momento adrizante (energía de restauración hidrostática disponible) debe ser sustancialmente mayor que el área bajo la curva de momento de escora por viento (energía desestabilizadora introducida por el entorno), evaluada hasta el ángulo límite de inundación o el segundo intercepto. El cociente entre ambas áreas debe superar un umbral de diseño preestablecido (típicamente de 1,3 o 1,4 según el estándar específico de la estructura).

No obstante, cabe destacar que estas evaluaciones estáticas y en el dominio de la frecuencia están sujetas a las hipótesis del modelado lineal, por lo que su validez se ve restringida ante la aparición de condiciones no lineales o extremas (Aboutaleb et al., 2026b). En primer lugar, la teoría de flujo potencial linealizada asume movimientos de pequeña amplitud en comparación con las dimensiones del flotador; en estados de mar severos o de supervivencia, este enfoque no puede capturar interacciones ola-estructura de orden superior, fenómenos de

impacto estructural (*slamming*) ni el embarque de agua sobre la cubierta (*green water*).

En segundo lugar, la aproximación utilizada para linealizar el término cuadrático de la fuerza de arrastre de Morison asume una disipación de energía equivalente basada en una frecuencia dominante. Bajo oleaje extremo, los efectos viscosos no lineales, como el desprendimiento masivo de vórtices en las aristas de las columnas, pasan a dominar la respuesta dinámica en resonancia, lo que significa que la matriz de amortiguamiento viscoso linealizado B_{vis} podría subestimar la disipación real del sistema.

Finalmente, el modelo asume una superficie libre interna pasiva y no presurizada para las cámaras OWC. En condiciones ambientales extremas, las oscilaciones violentas del fluido dentro de los conductos de 3,5 m o 4,5 m inducirán efectos tridimensionales de chapoteo (*sloshing*) y atrapamiento de aire. Estos fenómenos generan acoplamientos hidro-aerodinámicos altamente no lineales que distorsionan localmente la restauración hidrostática de la plataforma, requiriendo en etapas posteriores de codiseño el uso de simulaciones en el dominio del tiempo mediante herramientas de dinámica multicuerpo acoplada o modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

5. Conclusiones

Este trabajo ha investigado el diseño numérico y el rendimiento hidrostático pasivo de una plataforma semisumergible híbrida FWT–OWC derivada del concepto INO WINDMOOR de 12 MW, con cámaras OWC integradas en el interior de sus columnas principales. El análisis se ha limitado estrictamente a un marco pasivo, aislando el impacto geométrico de las cámaras sobre la restauración hidrostática y la dinámica en frecuencia de oleaje, sin considerar los efectos del sistema de conversión de energía (PTO).

La evaluación de estabilidad hidrostática conforme a los criterios de la NMA revela un compromiso geométrico crítico. La configuración con cámara interna de 3,5 m satisface todos los criterios reglamentarios en todas las direcciones de viento consideradas, demostrando que la integración moderada de cámaras internas es viable sin comprometer la estabilidad de la plataforma. En cambio, al aumentar el diámetro de la cámara a 4,5 m se produce un fallo crítico de cumplimiento: los Criterios 2 y 5 de la NMA no se satisfacen en la mayoría de las direcciones de viento, debido al desplazamiento desfavorable de las reservas internas de lastre y al deterioro del brazo adrizante a grandes ángulos de escora.

Estos resultados ponen de manifiesto que existe un umbral geométrico más allá del cual el escalado de la cámara interna compromete irreversiblemente la estabilidad hidrostática intacta. La identificación de dicho umbral constituye la contribución principal de este trabajo, y proporciona una guía de diseño concreta para las etapas tempranas de desarrollo de plataformas híbridas OWC–FOWT con cámaras integradas en columna.

Como trabajo futuro, se prevé la extensión del análisis a configuraciones con cámaras externas, la incorporación de estrategias de control activo del PTO, y la validación experimental de los resultados numéricos obtenidos.

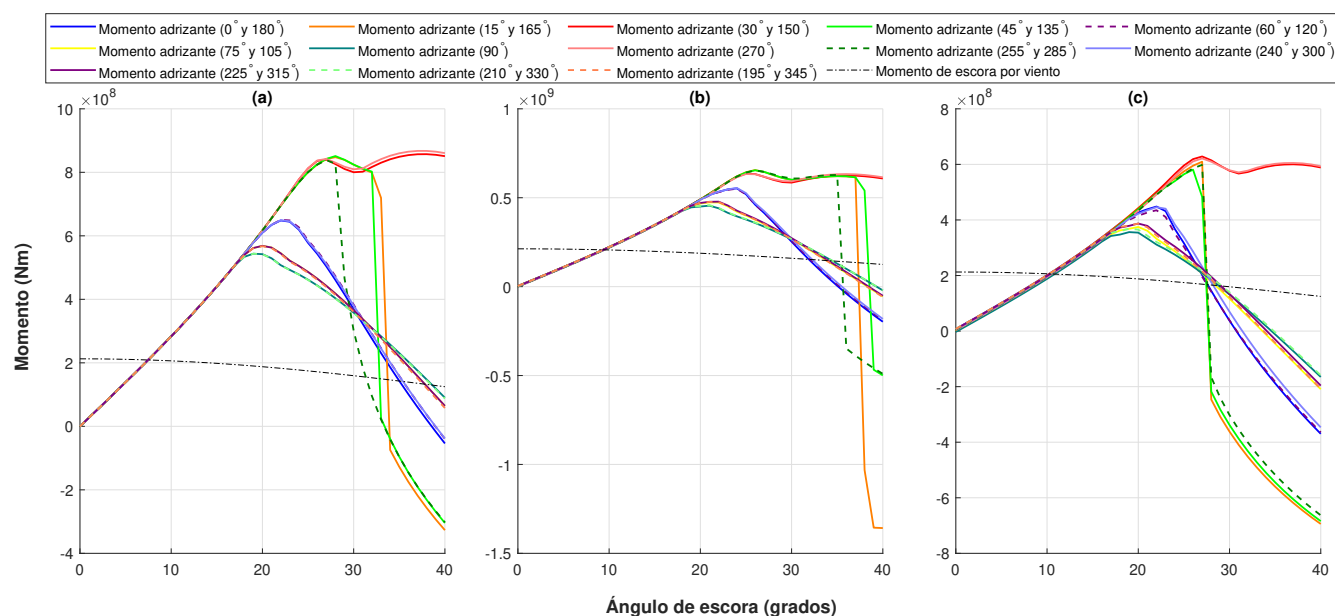


Figura 3: Curvas GZ frente al ángulo de escora para (a) WINDMOOR base, (b) FOWT-OWC con cámara interna 3,5 m y (c) FOWT-OWC con cámara interna 4,5 m.

Agradecimientos

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

Referencias

- Aboutalebi, P., Garrido, A. J., Garrido, I., Nguyen, D. T., Gao, Z., 2024a. Hydrostatic stability and hydrodynamics of a floating wind turbine platform integrated with oscillating water columns: A design study. *Renewable Energy* 221, 119824.
- Aboutalebi, P., Garrido, A. J., Schallenberg-Rodríguez, J., Garrido, I., 2024b. 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., 2026a. 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., 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., 2021. Switching control strategy for oscillating water columns based on response amplitude operators for floating offshore wind turbines stabilization. *Applied Sciences* 11 (11), 5249.
- Aboutalebi, P., Nguyen, D. T., Santos, M., 2026b. Integration of oscillating water column in hybrid semisubmersible floating wind turbine platforms: Design and performance analysis. *Ocean Engineering* 362, 126489.
- 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.
- Bagheri-Rouch, T., Aboutalebi, P., Garrido, A. J., Garrido, I., 2026. Hydrodynamic response investigation of hybrid floating offshore wind turbine and oscillating water column systems. *Results in Engineering* 30, 110909.
- Haji, M. N., Kluger, J. M., Sapsis, T. P., Slocum, A. H., 2018. A symbiotic approach to the design of offshore wind turbines with other energy harvesting systems. *Ocean Engineering* 169, 673–681.
- Kluger, J. M., 2017. Synergistic design of a combined floating wind turbine-wave energy converter. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- López-Queija, J., Robles, E., Jugo, J., Alonso-Quesada, S., 2022. Review of control technologies for floating offshore wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167, 112787.
- Muñoz-Palomeque, E., Esteban, S., Santos, M., 2025. Mechanical design and experimental study of a small-scale wind turbine model. *Machines* 13 (10), 929.
- Salic, T., Charpentier, J. F., Benbouzid, M., Le Boulluec, M., 2019. Control strategies for floating offshore wind turbine: Challenges and trends. *Electronics* 8 (10), 1185.
- Segundo Esteban, M. S., 2026. Development of a mathematical control-oriented model for floating offshore wind turbines. *Computer Modeling in Engineering & Sciences* 147 (1), 0–0.
- Silva de Souza, C. E., Berthelsen, P. A., Eliassen, L., Bachynski, E. E., Engebretsen, E., Haslum, H., 2021. Definition of the ino windmoor 12 mw base case floating wind turbine.
- Stockhouse, D., Phadnis, M., Henry, A., Abbas, N., Sinner, M., Pusch, M., Pao, L. Y., 2023. Sink or swim: A tutorial on the control of floating wind turbines. In: *2023 American Control Conference (ACC)*. IEEE, pp. 2512–2529.
- Truong, H. V. A., Dang, T. D., Vo, C. P., Ahn, K. K., 2022. Active control strategies for system enhancement and load mitigation of floating offshore wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 170, 112958.
- Villoslada, D., Santos, M., Tomás-Rodríguez, M., 2022. Tmd stroke limiting influence on barge-type floating wind turbines. *Ocean Engineering* 248, 110781.
- Wang, S., Zhang, J., Lin, Z., Chea, C. P., Liu, Z., Wei, M., 2026. Vibration control of semi-submersible floating wind turbine using multiple tuned mass damper inerters. *Energy*, 140784.