



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Modelado numérico de una plataforma multiuso para la extracción de energía eólica y undimotriz en grandes profundidades

Trabajo realizado por:

Larraitz Bengoetxea Gómez de Salazar

Dirigido:

César Vidal Pascual

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos**

Santander, Febrero de 2017

TRABAJO FINAL DE MASTER



Modelado numérico de una plataforma multiuso para la extracción de energía eólica y undimotriz en grandes profundidades

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	ESTADO DEL ARTE DE LAS PLATAFORMAS.....	12
3.	ESTADO DEL ARTE DE LAS OWC	24
4.	MOTIVACIÓN	27
5.	METODOLOGÍA.....	30
5.1	Implementación <i>del modelo numérico</i>	30
5.1.1.	<i>Física y resolución del modelo</i>	32
5.1.2.	<i>Breve resumen de las hipótesis y asunciones para el desarrollo modelado numérico</i>	38
5.2	Ensayos experimentales.....	38
5.2.1.	<i>Instalaciones</i>	38
5.2.2.	<i>Ensayos</i>	40
5.2.3.	<i>Resultados</i>	52
6.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	55
6.1	Calibración hidrodinámica de las OWCs Fijas	58
6.2	Calibración hidrodinámica de la plataforma	65
6.3	Calibración numérica del PTO	73
6.4	Validación del modelo.....	74
7.	ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL CONCEPTO EN CANARIAS	81
7.1.	<i>Aspectos técnicos, económicos y de localización</i>	81
7.2.	<i>Análisis de visibilidad (ArcGis)</i>	84
7.3.	<i>Preocupación Ambiental</i>	87
8.	CONCLUSIONES	90
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	94



Numerical modeling of a multiuse platform for the extraction of wind and wave energy at great depths

1. Introduction
2. State of the art of the floating platforms
3. State of the art of the OWCs
4. Motivation
5. Methodology
 - 5.1. Implementation of the numerical model
 - 5.1.1. Physics in the model and its resolution
 - 5.2. Experimental Testing (description)
 - 5.2.1. Installations
 - 5.2.2. Tests
 - 5.2.3. Brief resume of the results
6. Calibration and Validation of the model
 - 6.1. Hydrodynamic calibration of the fixed OWCs (k_l and k_{nl} coefficients and y Cd coefficient)
 - 6.2. Hydrodynamic calibration of the Platform (k_l and k_{nl} coefficients)
 - 6.3. Numerical calibration of the PTO (Power Take-Off): energy extraction.
 - 6.4. Model validation
7. Viability of the concept in Canary
 - 7.1. Technical, economical and localization aspects
 - 7.2. Visibility Analysis (ArcGIS)
 - 7.3. Environmental concern
8. Conclusions
9. Bibliography

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Prototipo Plataforma Mermaid	8
Ilustración 2. Parque eólico marino	10
Ilustración 3. Dispositivo Pelamis instalado	13
Ilustración 4. Esquema funcionamiento WaveDragon.....	13
Ilustración 5. Plataforma Poseidon instalada.....	14
Ilustración 6. Diferentes vistas del prototipo Marina platform semisubmersible (flotante con tres OWCs)	15
Ilustración 7. Plataforma Seagen W	16
Ilustración 8. Esquema funcionamiento plataforma WEGA	16
Ilustración 9. Proyecto H2Ocean.....	17
Ilustración 10. Proyecto TROPOS	18
Ilustración 11. Metodología para integrar convertidores de energía en plataformas Offshore	19
Ilustración 12. Análisis de los recursos disponibles: criterios de selección	20
Ilustración 13. Plataformas flotantes	22
Ilustración 14. Evolución desde estructuras fijas a estructuras flotantes.....	22
Ilustración 15. Esquema general de la Columna de Agua Oscilante (OWC)	24
Ilustración 16. Planta de OWC de Mutriku	26
Ilustración 17. Esquema sistema de ecuaciones incluidas en el modelo numérico desarrollado	34
Ilustración 18. Representación gráfica de los 6 g.d.l de cualquier cuerpo flotando.....	35
Ilustración 19. Representación gráfica del diseño de la plataforma.....	36
Ilustración 20. Gran Tanque de Oleaje del IHCantabria.....	38
Ilustración 21. Vista del generador de oleaje.....	39
Ilustración 22. Metodología de desarrollo del trabajo realizado	40
Ilustración 23. Disco giratorio en representación de la turbina eólica	40
Ilustración 24. Configuraciones de las aperturas de orificios ensayadas.....	42
Ilustración 25. Vista en laboratorio de los orificios del dispositivo.....	43
Ilustración 26. Actuador lineal y émbolo para la calibración del PTO en seco	50
Ilustración 27. Esquema disposición OWCs en la plataforma	53
Ilustración 28. Esquema representativo del concepto de Coeficiente de fricción por fondo	57
Ilustración 29. Representación del parque Offshore Mermaid	81
Ilustración 30. Desarrollo sostenible.....	83
Ilustración 31. Representación en ArcGis del parque situado a 2 km de la costa de Gran Canaria	85
Ilustración 32. Representación del resultado de visibilidad para la primera malla creada a 2km de la costa de Gran Canaria.	85
Ilustración 33. Representación en ArcGis del parque situado a 8 km de la costa de Gran Canaria	86
Ilustración 34. Representación del resultado de visibilidad para la primera malla (color magenta) creada a 8km de la costa de Gran Canaria.	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos de inclinación	44
Tabla 2. Prueba de remolque	45
Tabla 3. Prueba de desplazamiento estático	45
Tabla 4. Decay tests con anclajes dinámicos.....	46
Tabla 5. Configuración 2: Ensayos de Oleaje Regular	47
Tabla 6. Configuración 3: Ensayos de Oleaje Regular	47
Tabla 7. Configuración 4: Ensayos de Oleaje Regular	48
Tabla 8. Movimientos sinusoidales del pistón ensayado.....	51
Tabla 9. Dimensiones del dispositivo completo.....	51
Tabla 10. Tabla resumen de los ensayos realizados.....	52
Tabla 11. Calibración conjunta de los knl con el error correspondiente respecto a cada columna oscilante (Emed< 15%).....	59
Tabla 12. Características principales de la ubicación Atlántica analizada para el proyecto Mermaid.....	82
Tabla 13. Tasa de actividad y de paro (cuarto trimestre 2016) por sexos.....	88
Tabla 14. Cantidad de personas (en miles) activas según sector en el cuarto trimestre del 2016.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas representativas de los coeficientes cuadráticos del modelo en función del peralte de ola, para la primera columna (knl1) y para las columnas posteriores (knl2,3).	60
Figura 2. Resultado de la variación de la superficie libre dentro de cada OWC para el periodo de 22s.	62
Figura 3. Zoom entre los 1850 y 2000 m de la serie temporal para el periodo de 22 s.	62
Figura 4. Resultado de la variación de la superficie libre dentro de cada OWC para el periodo de 10s.	64
Figura 5. Resultados entre los 1850 y 2000 m de la serie temporal para el periodo de 10 s.	64
Figura 6. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta y movimiento en Pitch	67
Figura 7. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta y movimiento en Pitch, una vez calibrados los coeficientes de fricción.....	68
Figura 8. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta y movimiento en Heave, una vez calibrados los coeficientes de fricción.....	68
Figura 9. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma cerrada y movimiento en Surge	69
Figura 10. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta en la calibración conjunta de Sway y Yaw	71
Figura 11. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta en la calibración conjunta de Sway y Yaw.	71
Figura 12. Resultado obtenido para los 6 DOFs en la configuración de OWCs abiertas.....	75



Figura 13. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales en la configuración de OWCs abiertas, T=14 s.	76
Figura 14. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales en la configuración de OWCs abiertas, T=20 s.	76
Figura 15. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales ante oleaje irregular incidente y periodo 12.99 s, OWCs abiertas.....	77
Figura 16. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales ante oleaje regular incidente y periodo 8 s, OWCs cerradas	77
Figura 17. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales ante oleaje regular incidente y periodo 20 s, OWCs cerradas	78
Figura 18. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales ante oleaje regular incidente y periodo 22 s, OWCs cerradas	78
Figura 19. Resultado obtenido para los 6 DOFs ante oleaje irregular incidente y periodo 10.39 segundos, OWCs parcialmente abiertas	79
Figura 20. Resultado, para la configuración de OWCs parcialmente abiertas y oleaje irregular incidente y periodo de 10.39 s, de la variación de presión y superficie libre dentro de cada OWC.	79



1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica. La navegación a vela, los molinos de viento o de agua y las disposiciones constructivas de los edificios para aprovechar la energía solar son claros ejemplos de ello.

Hacia la década de 1970 las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales, tanto por su disponibilidad actual y futura garantizada (al contrario que los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación) como por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias, y por esta razón fueron llamadas energías alternativas en su tiempo. En la actualidad muchas de estas energías son una realidad, no una alternativa. Una **realidad** que, a su vez, es **necesidad**. Necesidad que surge a partir del consumo acelerado que estamos haciendo de unos recursos energéticos finitos, el **impacto ambiental** asociado al incesante ritmo de producción acelerado y consumo de las energías tradicionales. La distribución de las reservas de energía, y los precios de las materias primas energéticas, abren paso a la **eficiencia energética** y a las fuentes de energía renovables de forma creciente en la política energética de la mayoría de los países desarrollados.

El desarrollo y la apuesta por las **energías renovables** se convierten en una necesidad ineludible para conseguir un desarrollo sostenible en un mundo en el que la demanda de energía crece sin parar. Las **Energías Renovables Marinas (MRE)** son una de las fuentes de energía renovables más prometedoras y, por otra parte, su desarrollo está totalmente vinculado con los objetivos de la Comisión Europea en lo se denomina “economía azul”. Para el desarrollo eficiente de las MRE, tanto los costes económicos como los impactos ambientales tienen que permanecer dentro de los límites aceptables, lo cual es actualmente un reto para la industria y el mundo académico.

Según datos del año 2010, el consumo mundial de petróleo fue de 86 millones de barriles diarios (aproximadamente 14 mil millones de litros). Con el auge de los países emergentes, en los próximos años este consumo podría aumentar drásticamente, encareciéndose su precio a corto plazo y pudiendo llegar a la extinción a medio-largo plazo. Es por esto por lo que las energías alternativas han experimentado un gran crecimiento en los últimos años. La Unión Europea publicó el 24 de Octubre de 2008 un documento en el que se marcaba como objetivo energético que para el 2020 el 20% de la energía eléctrica total generada por los países que la constituyen proviniera de energías renovables. Son muchos los países que, para cumplir el objetivo, han empezado ya a investigar la creación de parques eólicos en alta mar, siendo los países del norte de Europa los pioneros con varios aerogeneradores ya instalados en alta mar. Dentro de este proceso fundamental para mejorar la eficacia de dispositivos de extracción de energías renovables y de crear nuevos aparatos que se adapten a la demanda y a las condiciones ambientales de cada caso aparece el **Proyecto europeo Mermaid** www.mermaidproject.eu



La idea de la **combinación de diferentes sistemas de conversión de energía en la misma plataforma** ha surgido como una oportunidad de reducción de costes y del impacto medioambiental en los últimos años. Dentro de la energía MRE, el viento, las olas y las corrientes pueden combinarse con el fin de encontrar sinergias entre ellos. Sin embargo, la etapa de desarrollo actual de cada uno de ellos es muy diferente.

¿Por qué energía a partir de recursos eólicos y marinos?

Los recursos energéticos oceánicos se están convirtiendo en un contribuyente muy interesante al programa europeo de energías combinadas. En particular, la energía del viento y las olas en alta mar. La energía eólica marina está creciendo actualmente en todo el mundo, motivado por sus muchos beneficios, ya conocidos:

- La energía eólica es un medio limpio y fuente de energía disponible en todo el mundo.
- Los competitivos costes de la energía eólica.
- Beneficios socioeconómicos (creación de empleo, nuevas actividades industriales) a nivel local y regional son atractivos.
- Los beneficios medioambientales son muy significativos en términos de contaminación acústica y de impacto visual.
- En el mar la rugosidad superficial es muy baja en comparación con el medio terrestre y no existen obstáculos que puedan reducir la velocidad del viento. Esto favorece la circulación del viento a mayores velocidades y hace innecesario el tener que subir la altura de la torre más de lo que obligue la suma del semidiámetro del rotor y la altura máxima de la ola prevista. Por lo general, los vientos van ganando en velocidad al separarnos de la costa.
- El recurso eólico es mayor y menos turbulento que en localizaciones próximas en línea de costa sin accidentes geográficos. La existencia de menor turbulencia ambiental en el mar disminuye la fatiga a la cual se encuentra sometido un aerogenerador aislado, y aumenta su vida útil.
- Las áreas marinas disponen además de enormes espacios donde colocar aerogeneradores, lo que ofrece la posibilidad de instalar parques mucho más grandes que en tierra. El parque de Arklow Bank, en Irlanda, en el que participa la empresa española Acciona, tiene proyectado ampliarse a 520 MW, pero hay propuestas en Alemania y en Francia para crear instalaciones de más de 1.000 MW.
- La amplitud de este medio, unido a su lejanía con los núcleos de población, consigue reducir también el impacto visual sobre el paisaje.

Europa muestra una distribución espacial desigual del recurso eólico. Muchos de los recursos más eficientes se encuentran en el Mar del Norte, el Océano Atlántico, y en algunas partes del Báltico y Mar Mediterráneo. La conversión de energía de las olas se encuentra en una etapa relativamente inmadura. Sin embargo, podría considerarse una de las energías renovables más interesantes por varias razones:

- La energía de las olas es una fuente de energía disponible en todo el mundo.
- Es un recurso predecible, ya que las olas se pueden predecir con precisión desde un corto plazo (3 a 5 días).
- Los convertidores de energía de oleaje ofrecen una forma ambientalmente benigna de generar energía: bajo impacto visual, bajos impactos biológicos, etc.
- La energía de las olas muestra una alta aceptación social debido a su bajo nivel de impacto medioambiental. Por lo tanto, es un nuevo sector potencial adecuado para su desarrollo a nivel tanto regional como local.

La idea de unificar ambos tipos de generación de energía en un mismo dispositivo tiene una clara ventaja a partir del análisis que se acaba de hacer de las ventajas de cada uno y teniendo en cuenta la limitación del estado de desarrollo e investigación de la energía mareomotriz (actualmente mucho más atrasado que la energía eólica): a partir de los conocimientos y experiencias obtenidas de los parques eólicos instalados en alta mar, se trata de incorporar los convertidores de energía de las olas (WECs) de la forma más integrada posible en la propia plataforma. Para ello, se deben adaptar muchos aspectos previamente diseñados (sistemas de anclaje, geometría de plataformas, tipo de turbina eólica, etc.) y experimentar y validar el modelo hasta buscar su máxima eficiencia. Es decir, el objetivo es aprovechar todo el recorrido hecho hasta el momento en los parques eólicos marinos y las Columnas de Agua Oscilantes (OWCs) para incorporar en un mismo sistema de forma eficiente, económicamente rentable y segura ambos conceptos. Es aquí donde surge la oportunidad de desarrollar esta idea de la mano del proyecto europeo Mermaid.

En el presente proyecto se avanza un paso más en cuanto a estructuras flotantes offshore se refiere: **Multi-Use Platform (MUP)**. Este innovador dispositivo permite el aprovechamiento de energía eólica y mareomotriz en una misma plataforma gracias a la combinación de diferentes tecnologías (turbinas de aire, convertidores de energía del oleaje). Surge de la unión entre Columnas de Agua Oscilante (OWC), que se encargan de extraer la energía de las olas, y el Aerogenerador, que extrae energía del viento, en una única plataforma.

Las turbinas situadas sobre la cámara se encargan de transformar la energía mareomotriz y el generador interior de la cabina ubicada en lo alto de la torre es el que se encarga del aprovechamiento de la energía del viento. Al igual que los aerogeneradores clásicos, estas plataformas multiuso oscilantes van ancladas al fondo marino a través de 4 cables de anclaje dinámicos.



Ilustración 1. Prototipo Plataforma Mermaid



El principal objetivo de este estudio es la calibración y validación, a partir de datos experimentales, del modelo numérico desarrollado por el IHCantabria para la plataforma diseñada para su posterior extrapolación a diversas estructuras multipropósito offshore. El modelo de plataforma empleado en el laboratorio está representado a escala 1:35 con una altura total fuera del agua de aproximadamente 4 metros y ha sido analizado para diferentes condiciones de oleaje. Los ensayos fueron diseñados para hacerlos bajo la influencia del viento y sin él, así como, con 3 configuraciones de apertura de las cámaras de las OWC: abiertas ($R=0.033$), parcialmente abiertas (un orificio abierto ($R=0,02$) y el resto cerrados) y cerradas (todos los orificios cerrados por completo).

El primer paso es caracterizar el comportamiento de la plataforma aislada (OWCs fijas) y después, el movimiento del conjunto Plataforma - OWCs bajo condiciones de oleaje regular e irregular. Por otro lado, se analiza el comportamiento y rendimiento de las OWCs para, finalmente, hacer un estudio conjunto del modo de comportarse de la estructura multifuncional bajo distintas condiciones de oleaje y de oleaje y viento conjuntamente.

Para el estudio de idoneidad de esta plataforma se ha empleado un modelo numérico basado en el dominio de tiempo que sirve para evaluar la conducta de las diferentes MUPs. En concreto, el modelo desarrollado por el IHCantabria incorpora una serie de simplificaciones para crear un modelo numérico eficiente y extrapolable a diferentes condiciones (oleaje y viento) impuestas, que obtenga resultados del comportamiento de dicha plataforma en un tiempo de computación razonable. Para albergar los efectos provocados por ciertos fenómenos que se obvian al hacer dichas simplificaciones surge la necesidad de incorporar al modelo numérico una serie de coeficientes (Coeficiente de fricción, coeficiente de descarga, etc). Estos deberán ser calibrados para lograr que, una vez finalizado el proceso de calibración y validación, el modelo numérico sea capaz de representar perfectamente el movimiento de la plataforma objeto de estudio registrado mediante los ensayos experimentales previamente realizados. *Es en este proceso de calibración y validación en el que se centra este Trabajo Fin de Máster. Para poder realizar esta calibración de coeficientes y su posterior validación ante una serie de condiciones de oleaje regulares e irregulares impuesta, ha sido necesario emplear el modelo numérico desarrollado en el IHCantabria así como los ensayos de laboratorio llevados a cabo como fase previa a este estudio del modelo numérico. Para ello se ha partido de una serie de información previa y de unas premisas socio-económicas y medioambientales que se consideran determinantes:*

Estabilidad de la producción de energía

El viento y la energía de las olas muestran altas sinergias entre ellos. Además, las grandes infraestructuras y superficies son necesarias para ambos desarrollos. Por lo tanto, las ventajas de la economía de escala quedan claramente identificadas. Además, la producción de energía en picos y valles de ambas fuentes de energía no siempre coinciden. Esto significa que hay

veces que hay una abundancia de energía de oleaje y poco recurso eólico. La combinación de ambas fuentes de energía colabora en la reducción de la variabilidad a corto plazo de producción de energía; es decir, mejora la regularidad en la producción de energía en vistas a un dispositivo multiuso.

Turbinas de viento

Las turbinas eólicas se han desarrollado durante décadas. En la actualidad, se puede decir que es un sector maduro gracias a la experiencia adquirida en la actividad eólica terrestre. Así pues, dentro de este marco de las energías renovables toman especial importancia los parques eólicos debido a su potencialidad. La generación Onshore (en tierra firme) sigue siendo la más popular y acapara 9.766 MW del total de las nuevas instalaciones, con lo que alcanza los 131 GW. La offshore (en alta mar) constituye una tercera parte de esa cantidad (3.034 MW), llegando a los 11GW. Sin embargo, la inversión en ésta última superó en 130 millones de euros a la que se hizo en la Onshore. Esto es debido a que las instalaciones eólicas marinas presentan características muy ventajosas frente a las instalaciones en tierra, en especial porque el recurso eólico existente en el mar es superior que en las costas próximas. Además, gracias a su ubicación mar adentro, el impacto visual y acústico es menor que el de los parques eólicos en tierra, lo que permite un mayor aprovechamiento del recurso eólico existente, con máquinas más grandes y la utilización de geometrías de pala más eficaces. Igualmente, la menor rugosidad superficial en el mar favorece la utilización de mayores alturas de torre.



Ilustración 2. Parque eólico marino

Por su parte, la viabilidad comercial de las plataformas flotantes para la implantación de aerogeneradores en aguas profundas es todavía una incógnita debido a aspectos como la dificultad para lograr cimentaciones adecuadas para esas profundidades y esas instalaciones, el corto desarrollo hasta el momento de plataformas flotantes, etc. Es en este concepto OffShore en el que a día de hoy se centran muchos de los estudios de investigación.

Convertidores de energía de oleaje

La posibilidad de extraer energía de la Océanos fue identificado hace mucho tiempo. La primera atente de energía de las olas fue presentada en Francia por Girard, padre e hijo. Sin embargo, no fue hasta 1973 que el interés por la energía a partir del oleaje del mar aumentó



debido a la crisis del petróleo. Entre las décadas de los ochenta y los noventa, sin tener en cuenta algunas excepciones, se ha desarrollado especialmente bajo un el escenario de I+D+I.

En 1991, la energía de las olas fue incluida en la Comisión Europea de Energías Renovables, y luego comenzó a crecer constantemente. Para extraer energía de las ondas, se supone que el dispositivo necesita crear una ola que interfiera de forma destructiva con la ola entrante. Para describir esto es ampliamente conocido que: "Para que un sistema de oscilación absorba la onda de forma de forma óptima, el dispositivo debe oscilar con una cierta amplitud y fase de onda".

Los cuerpos flotantes se mueven en 6 grados de libertad; luego, para obtener una óptima absorción de energía, deben aplicarse diferentes fuerzas para cada grado de libertad correspondiente. Por lo tanto, el proceso de conversión de energía de las olas puede ser explicado en dos pasos:

1. La energía se transfiere del mar al sistema oscilante y
2. esta energía mecánica se convierte, mediante un dispositivo apropiado, en energía útil (por ejemplo, electricidad).

La gran variedad de prototipos de convertidores de energía de las olas que se están probando hoy en día muestran que aún no se ha alcanzado ninguna convergencia en el sector de energía a partir del oleaje. De hecho, actualmente todavía hay una gran variedad de WECs en desarrollo, lo que es un claro síntoma de sector inmaduro.

Factores medioambientales, socioeconómicos y comerciales

El aspecto comercial de esta plataforma multiuso debe ser analizado con vistas a su comercialización en distintos países y distintas orientaciones marítimas, cada cual con sus condiciones particulares de calado, oleaje y viento. Aspecto, este último, que requiere un análisis de varios factores transcendentales cuando se trata de energías renovables como son: análisis de visibilidad, impacto acústico, impacto sobre el vuelo de las aves migratorias, impacto sobre la pesquería y la fauna marina de la zona así como el positivo impacto socioeconómico, etc.



2. ESTADO DEL ARTE DE LAS PLATAFORMAS

En los últimos años, diversos proyectos europeos y compañías privadas han desarrollado varias plataformas multiuso offshore. Estas plataformas multiuso tienen como objetivo la extracción de energía procedente de las olas, el viento y las corrientes pudiendo combinar diferentes usos en un mismo espacio. España se situó en 2013 en segunda posición a nivel europeo en potencia eólica instalada. Sin embargo, ninguno de sus generadores se encuentra todavía en condiciones de explotación mar adentro, cosa que aquí resulta muy complejo porque las costas son muy profundas, lo que exige que las plataformas sean flotantes, y esta tecnología está aún en etapa de diseño, investigación y desarrollo para poder operar en esas condiciones. Por lo que, la gran parte de los megavatios de eólica marina ya instalados en el mundo, están situados en aguas poco profundas inferiores a 25 metros, principalmente en los Mares Bálticos y el Mar del Norte.

Los océanos europeos estarán sujetos a un desarrollo masivo de infraestructuras marinas en un futuro próximo. El más obvio es el de las instalaciones de producción de energía offshore por ejemplo, parques eólicos marinos, la explotación de la energía de las olas, la expansión de conexiones eléctricas y también el desarrollo y la aplicación de la acuicultura marina. Todas estas actividades también darán lugar a una mayor necesidad de infraestructuras marinas para apoyar la instalación y el funcionamiento continuo de las instalaciones. Sin embargo tanto los costes económicos como el impacto ambiental tienen que ser reducidos con el fin de incrementar la viabilidad de la utilización del espacio marino.

Para poder aprovechar mejor estas infraestructuras se está estudiando la viabilidad de su uso con otros fines, como son la acuicultura sostenible o la creación de hábitats para la proliferación de comunidades marinas, que son dos de los objetivos principales de la Unión Europea dentro de esta convocatoria de proyectos.

En este apartado se hará una breve descripción de las plataformas multipropósito más prometedoras diseñadas hasta el momento, según el tipo de energías que son capaces de extraer en un mismo dispositivo.

Oleaje

La energía undimotriz, u olamotriz, es la energía que permite la obtención de electricidad a partir de energía mecánica generada por el movimiento de las olas. Es uno de los tipos de energías renovables más estudiados actualmente, y presenta enormes ventajas frente a otras energías renovables debido a que en ella se presenta una mayor facilidad para predecir condiciones óptimas que permitan la mayor eficiencia en sus procesos. Es más fácil llegar a predecir condiciones óptimas de oleaje, que condiciones óptimas en vientos para obtener energía eólica, ya que su variabilidad es menor. En artículos como [Polinder & Scuotto \(2005\)](#) y, actualizada, en [Falcão, \(2010\)](#) se analizan diferentes tecnologías y convertidores de energía de las olas.



- **HiWave** un innovador dispositivo que “palpita” con la energía de las olas, ya que genera electricidad con el mismo sistema de bombeo del corazón humano, a través del movimiento de las olas. El dispositivo será capaz de generar electricidad con un oleaje ligero, por lo que se podrá instalar en infinidad de costas del mundo, generando cada boya entre 0,5-1 MW/hora, suficiente para que pueda competir con otras tecnologías de generación eléctrica. Las boyas quedarán ancladas al mar mediante varias líneas, sin necesidad de que haya que hacer perforaciones en el lecho marino.
- **Pelamis** es un dispositivo que utiliza el movimiento de las olas para generar electricidad. Los aparatos de 750 kilovatios están instalados entre 2 y 10 kilómetros de la costa, en aguas de más de 50 metros de profundidad. Pelamis, de 180 metros de largo, parece una gran boya roja. Está formada por cinco tubos unidos por juntas que les permite doblarse en dos direcciones. El conjunto flota semisumergido en la superficie en dirección a las olas. Cuando éstas pasan por el artefacto, las secciones se curvan y su movimiento se transforma en electricidad a través de los sistemas de energía hidráulica instalados en cada junta.



Ilustración 3. Dispositivo Pelamis instalado

- **WaveDragon** La tecnología empleada en este artefacto flotante es realmente sencilla: Se trata de elevar las olas del océano, mediante un dispositivo diseñado para ello (overtopping), hasta un depósito situado por encima del nivel del mar. El agua abandona dicho tanque pasando a través de una serie de turbinas, de esta manera la energía generada es transformada en electricidad.

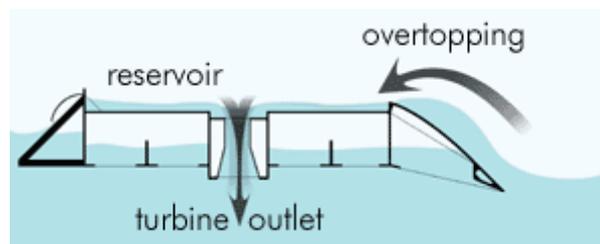


Ilustración 4. Esquema funcionamiento WaveDragon

Oleaje-Viento

Se trata de lograr un modelo híbrido que una ambos sistemas en la misma estructura de forma que aumenten las sinergias entre ellos y la producción.

- **Poseidon:** es un concepto para una central eléctrica flotante que transforma la energía del oleaje en electricidad. La planta de energía, además, sirve como una base flotante para los molinos de viento en alta mar, creando así un híbrido de energía sostenible. Esta instalación puede medir desde 100 hasta los 420 metros, dependiendo de la fuerza de las olas y las condiciones del viento en el lugar elegido. Basa su tecnología en flotadores, que son los que absorben la energía inherente de las olas para, por medio de una bomba de pistón de doble función, transformar su fuerza en presión del agua, que luego es enviada a través de una turbina, generando electricidad. Gracias a una boya de anclaje se garantiza que las olas siempre golpean en la parte delantera de la planta, lo que reduce la altura de las olas de manera significativa, creando aguas tranquilas detrás y permitiendo, por ejemplo, el fácil acceso para fines de mantenimiento.



Ilustración 5. Plataforma Poseidon instalada

- **2Wave1Wind:** El dispositivo de energía híbrida utiliza dos tecnologías de conversión de onda además de molinos de viento. El sistema principal es un flotador neumático en la categoría de overtopping al igual que en Wave Dragon. Además, el flotador neumático puede albergar absolvedores de puntos.

Un conversor de energía de onda necesita tres módulos para hacerlo estable cuando son empleadas plataformas neumáticamente estabilizadas. Cuando el aire presurizado se mueve libremente dentro de la plataforma, las olas tienen menos impacto en la construcción como un agujero y soportarán olas más grandes. Las turbinas van colocadas normalmente en el centro de la plataforma.

- **Multipropósito desarrollado durante el proyecto Marina Platform:** Durante el proyecto Marina Platform fueron diseñadas y examinadas tres plataformas multiuso en diversos laboratorios en Europa. La primera de ellas se trata de Plataformas flotantes con múltiples

WECs con un diseño de plataforma triangular y con un molino de viento situado en uno de los vértices de la base. La segunda, es una turbina flotante con WEC. La tercera, en cambio, es la que más similitud presenta con la plataforma Mermaid objeto de estudio: se trata de una plataforma flotante semi- sumergible con tres WECs rotativos que combina energía obtenida a partir del oleaje y del viento.

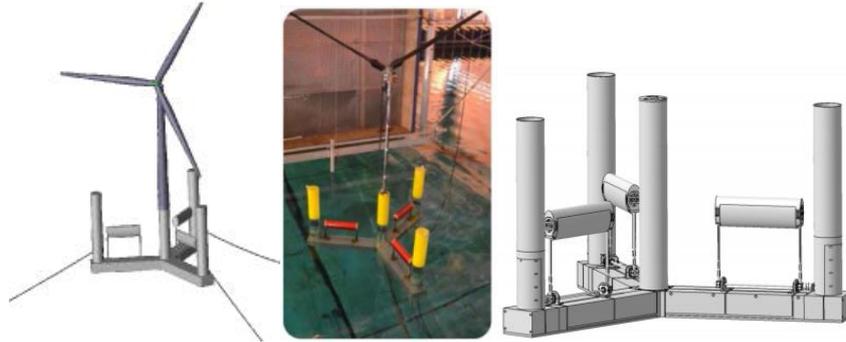


Ilustración 6. Diferentes vistas del prototipo Marina platform semisumergible (flotante con tres OWCs)

Viento-Marea

La energía mareomotriz es la que se obtiene aprovechando las mareas: mediante el uso de un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más segura y aprovechable. Es un tipo de energía renovable (la fuente de energía primaria no se agota por su explotación, y es limpia ya que en la transformación energética no se producen subproductos contaminantes). Sin embargo, la relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios actuales y el coste económico y ambiental de instalar los dispositivos para su proceso han impedido una penetración notable de este tipo de energía. Es por ello por lo que se busca combinar estos dispositivos de extracción de energía mareomotriz con dispositivos capaces de obtener energía a partir del viento, por ejemplo.

En general, pueden ser útiles en zonas costeras donde la amplitud de la marea sea amplia y las condiciones morfológicas de la costa permitan la construcción de una presa que corte la entrada y salida de la marea en una bahía. Se genera energía tanto en el momento del llenado como en el momento del vaciado de la bahía.

- **Seagen W:** El primer SeaGen fue instalado en Strangford Narrow, Irlanda del Norte, en marzo del 2008 y está catalogado para 1.2 MW para toda corriente superior a 2.4m/s con trenes de potencia gemelos de 600kW. Este es el primer tipo de plataforma comercial. La razón de poseer mecanismos rotors gemelos es que captura el doble de energía del rotor por menos de la mitad del coste. Otra de las razones de emplear rotors gemelos es que los

trenes de potencia están montados fuera de la pila de manera que los rotors no se ven afectados por la pila cuando opera en pleamar aguas abajo de la pila.

La cruceta es aerodinámica. La siguiente figura muestra las principales características de la plataforma Seagen W:



Ilustración 7. Plataforma Seagen W

- **WEGA acoplamiento híbrido:** El dispositivo WEGA es un cuerpo articulado semi-sumergido, unido a una estructura de soporte, que oscila en una órbita elíptica con el paso de las olas. El movimiento del cuerpo impulsa un cilindro hidráulico que empuja el agua a alta presión a través de un acumulador y un motor hidráulico, impulsando el generador que produce energía. El cuerpo articulado se une a la estructura de soporte a través de un cabezal giratorio que le permite adaptarse a la dirección de la propagación del oleaje.

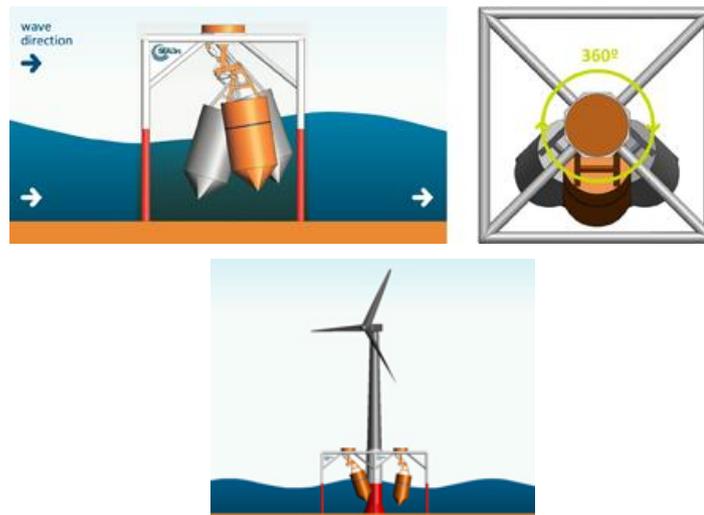


Ilustración 8. Esquema funcionamiento plataforma WEGA

Oleaje – Viento – Acuicultura

A partir de la idea de combinar varios usos en una misma plataforma surge la idea de la acuicultura sostenible o la creación de hábitats para la proliferación de comunidades marinas en el área que estos parques requieren en el mar donde vayan a ser ubicados. Estos son dos de los objetivos principales de la Unión Europea dentro de esta convocatoria de proyectos sostenibles de extracción de energía.

- **H2Ocean** es un proyecto destinado a desarrollar un innovador diseño para una plataforma multi uso económica y ambientalmente sostenible ubicada en mar abierto. La energía de las olas y del viento será extraída y parte de la energía será utilizada para múltiples aplicaciones in situ, incluyendo la conversión de energía en hidrógeno que se puede almacenar y enviar a tierra como portador de energía verde y una granja de acuicultura multitrópica.

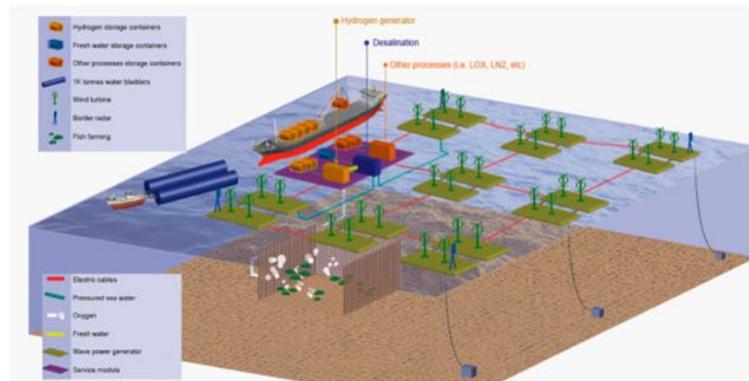


Ilustración 9. Proyecto H2Ocean

- **Plataforma multipropósito diseñada en el proyecto TROPOS** : Durante el proyecto TROPOS fueron diseñadas y examinadas dos plataformas multiuso en diversos laboratorios en Europa.

Tropos está diseñado para trabajar en latitudes intermedias, en las que es posible aprovechar las condiciones climáticas. Para ello, se plantearán tres diseños de plataforma offshore, adaptadas a tres situaciones climáticas; la tropical, subtropical, y mediterránea.

Según Plocan (Plataforma Oceánica de Canarias) “el proyecto forma parte de una apuesta de la Comisión para que Europa lidere y desarrolle las tecnologías para el aprovechamiento sostenible y simultáneo de los recursos marinos integrando el conocimiento acumulado en áreas como las energías marinas, las estructuras flotantes, la acuicultura y las infraestructuras portuarias.



- **Concepto de Isla de Ocio- Islas Canarias**

La siguiente tabla y figura muestran las principales características de la plataforma TROPOS:
Concepto de Isla de Ocio (Multiuso- Producción de energía y Ocio)

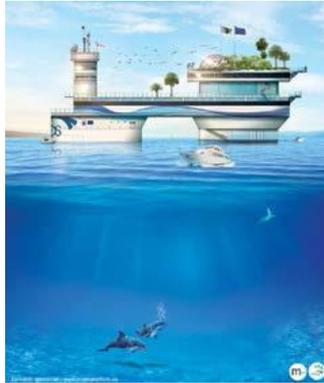


Ilustración 10. Proyecto TROPOS

- ✚ **Metodología para la integración de los convertidores de energía en una plataforma offshore**

La metodología propuesta para la integración de los convertidores de energía se divide en 6 pasos que se deben de llevar a cabo en el siguiente orden:

- 1-. Análisis de las condiciones climáticas en la ubicación final
- 2-. Selección Power Take Off (PTO)
- 3-. Tecnología Offshore
- 4-. Integración de la tecnología y diseño del parque
- 5-. Índice de repercusión ambiental (IRA)
- 6-. Otros posibles usos para el parque offshore

En la siguiente figura se detalla de forma esquemática el proceso a seguir, donde el orden secuencial es un aspecto fundamental ya que cada paso requiere de los inputs obtenidos del paso previo.

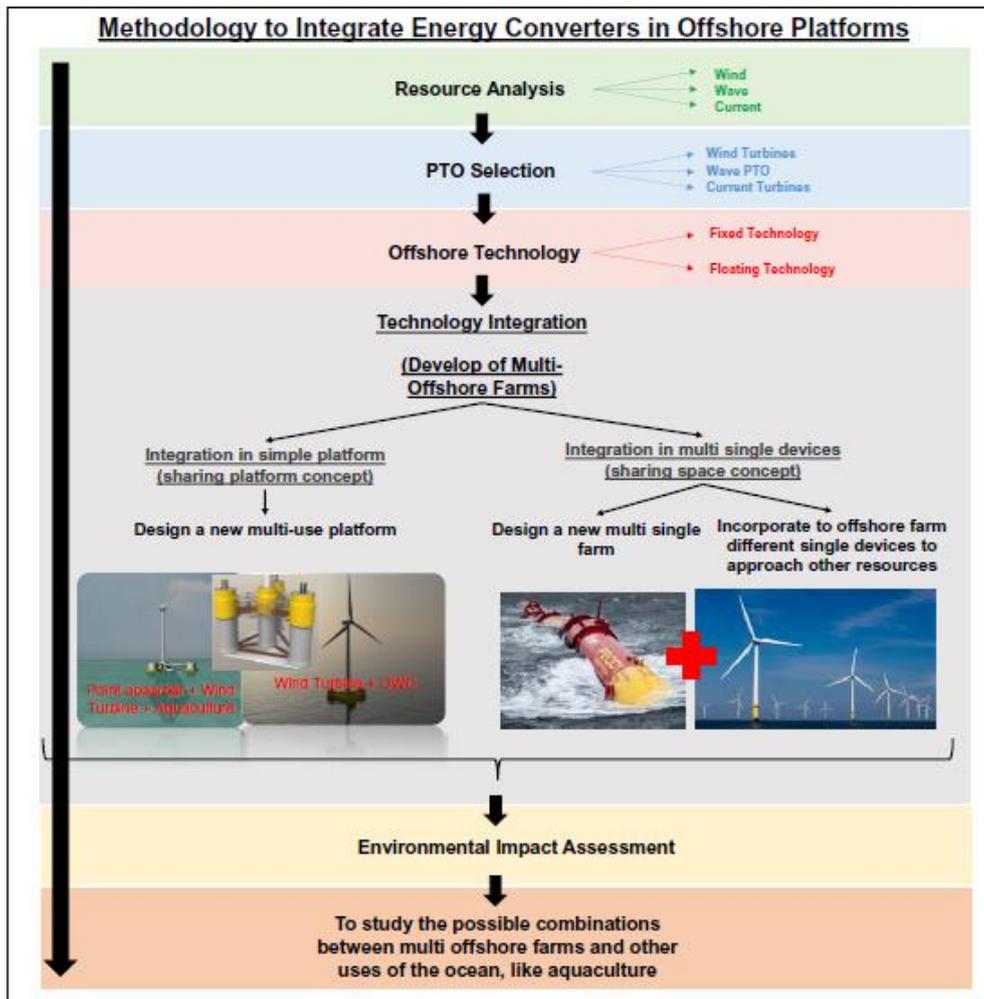


Ilustración 11. Metodología para integrar convertidores de energía en plataformas Offshore

1-. Análisis de las condiciones climáticas en la ubicación definitiva

Con el fin de maximizar la producción de los parques offshore, el primer paso es determinar y analizar los recursos disponibles en la futura ubicación del dispositivo flotante. Esta etapa puede ser considerada como una de las más importantes dentro del proceso de integración de los convertidores de energía dentro de las plataformas offshore.

El análisis de los recursos (intensidad del viento/velocidad, energía de las olas y velocidad de las corrientes) se hará mediante boyas instrumentales situadas en la ubicación de la plataforma y a través del reanálisis de los datos obtenidos por estas (GOW para oleajes).

De forma general la siguiente ilustración muestra los mínimos recursos requeridos para incorporar dispositivos específicos en plataformas multiuso offshore.

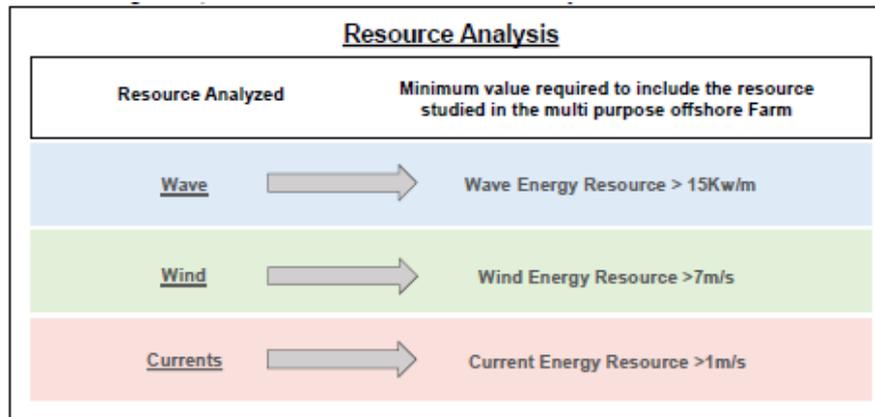


Ilustración 12. Análisis de los recursos disponibles: criterios de selección

2-. Selección del PTO (Power Take-Off)

Una vez el recurso principal de energía es identificado y la viabilidad de la extracción de la fuente está asegurada, el siguiente objetivo es seleccionar el PTO más apropiado para dicha fuente de energía considerada. Para ello, se deberá tener en cuenta que se busca la maximización de la producción de energía.

PTO para energía de las olas

- Turbinas de aire- Oscillating water columns
Turbinas Well, Dennis Auld, Turbinas de impulso, Turbinas radiales, Cross flow and Savonius Turbines.
- Turbinas hidráulicas: Sendekia
- Circuitos hidráulicos y sistemas: Oyster, Pelamis, Wedg, others.
- Generadores de transmisión directa: Wavestar, Wedge, Penguin-Wello.

Habitualmente, la elección del PTO y WEC que se hace para una determinada localización se realiza en función de la intensidad de las olas y la profundidad del agua.

PTO para viento

- Turbinas de eje horizontal
- Turbinas de eje vertical: Nenuphar, Vertiwind Project
- Otras Tecnologías: H-rotor, turbina Darrieus, rotos Savonius.

Actualmente las turbinas de eje horizontal son las más empleadas tanto en parques offshore como Onshore.



PTO para corrientes

- Turbinas de eje horizontal
- Tubo de Venturi
- Turbinas de eje vertical
- Reciprocating hydrofilis.
- Tidal Kite.

3-. Tecnología Offshore: Plataformas flotantes

Una vez determinados los recursos disponibles y el sistema PTO más apropiado haya sido seleccionado, se debe proceder a determinar la tecnología offshore más adecuada para el caso de estudio. La tecnología más apropiada se seleccionará en función de la profundidad de agua existente y del sistema de anclaje, así como el de fondeo se determinarán en función de las características del lecho marino, las restricciones geotécnicas y la profundidad de agua que haya.

Existen dos grandes grupos de estructuras offshore en función de la profundidad de agua existente:

- Estructuras fijas: aguas someras ($h < 50$ m)
- Plataformas flotantes: aguas profundas ($h > 50$ m)

En cuanto a estructuras flotantes se puede hacer la siguiente división:

- Barge ($h > 30$ m)
- SPAR Buoys ($h > 100$ m)
- TLP buoy ($h > 100$ m)
- Plataforma semisumergible ($h > 50$ m)

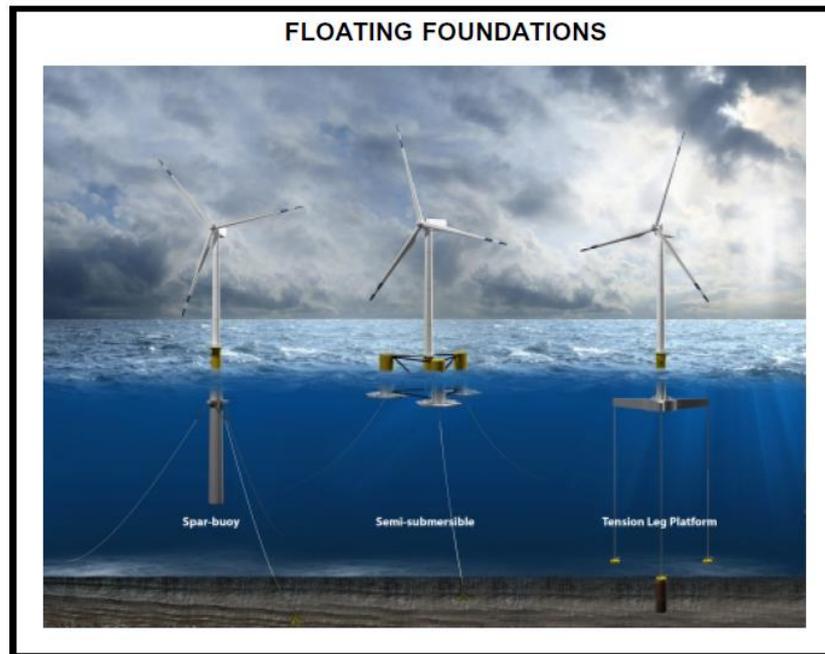


Ilustración 13. Plataformas flotantes

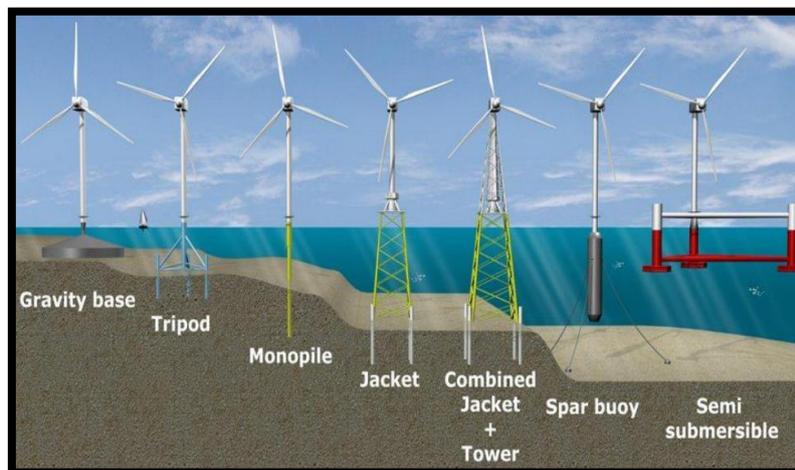


Ilustración 14. Evolución desde estructuras fijas a estructuras flotantes

4-. Integración de la tecnología

Una vez se ha analizado el recurso y el PTO, y la tecnología Offshore ha sido seleccionada, el siguiente paso es la incorporación de distintos convertidores de energía en la misma plataforma. Por lo tanto, se debe realizar un estudio sobre los diversos convertidores de



energía que habría que integrar en la misma área con el fin de maximizar la producción de energía.

Hoy en día, los parques de energía eólica ya están en fase comercial en Europa (actualmente todas las granjas eólicas en alta mar están en los mares del Norte y Báltico). Por otro lado, la energía de las olas y los dispositivos actuales (fase experimental) están en las primeras fases de diseño con prototipos de media o gran escala, todos ellos colocados en diferentes ubicaciones.

Actualmente, el recurso marino más rentable es el viento, por lo que los futuros parques de energía renovable marinos deberán incluir turbinas de viento que se complementen con las características de la zona estudiada. En este caso se acoplan convertidores de energía eólica y de marea en un mismo dispositivo: La plataforma multiuso Mermaid.

En la actualidad, casi todos los lugares alrededor de la costa de Europa, donde las condiciones del viento son óptimas para generar energía, también cuentan con suficientes recursos de oleaje como para compartir la misma zona de alta mar y maximizar la producción de energía offshore y reducir así los costos de energía.

El primer paso para una instalación conjunta de dispositivos de extracción de energía eólica y marina compartiendo un mismo espacio o zona es el siguiente:

Una estructura de intercambio consiste en diseñar una nueva "plataforma multiuso". Dicha nueva plataforma estará formada por diferentes convertidores de energía situados en la misma estructura. El nuevo diseño de la plataforma de usos múltiples debería combinar todo tipo de uso disponible en la ubicación seleccionada.

El diseño de este tipo de plataformas se define por la tecnología de conversión vigente y la distancia mínima recomendada entre los convertidores de energía. En el caso de la creación de un nuevo parque energético con dispositivos para viento, oleaje y corriente, la distancia mínima entre los MUPs quedará fijada por la mínima distancia requerida por las turbinas de viento.

5-. Índice de Repercusión Ambiental (IRA)

El estudio de impacto medioambiental se hará a partir del análisis de los aspectos positivos y negativos que se producirán a partir de la instalación de la plataforma multiuso así como mediante el estudio de las opciones de mitigación de efectos.

Además, otros aspectos como el reto del cambio climático, efectos medioambientales irreversibles y efectos no-lineales son susceptibles de incluir en el estudio del IRA.

3. ESTADO DEL ARTE DE LAS OWC

La tecnología de Columna de Agua Oscilante (OWC) se basa en una o varias cámaras semisumergidas, con determinado volumen de aire atrapado en su interior y comunicadas con la atmósfera, ver Figura 28. (Iturrioz, Guanche, Armesto, Alves, Vidal, & Losada, 2014). El oleaje incidente origina un movimiento ascendente y descendente de la superficie de agua interior de la cámara, provocando la compresión o descompresión del aire confinado y haciéndolo circular a través de una turbina colocada en la parte superior de la cámara y conectada a un generador eléctrico.

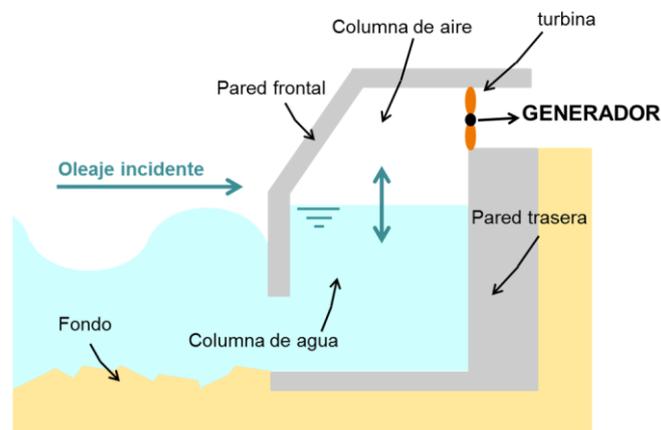


Ilustración 15. Esquema general de la Columna de Agua Oscilante (OWC)

Al igual que cualquier dispositivo de extracción de energía del oleaje (WEC), los dispositivos basados en la tecnología de OWC pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios. (Iturrioz, Guanche, Armesto, Alves, Vidal, & Losada, 2014). Basándose en las dimensiones del dispositivo respecto a la longitud de onda incidente, se pueden clasificar en:

- ✚ Captadores puntuales: El tamaño del dispositivo es muy pequeño en comparación con la longitud de onda del oleaje incidente.
- ✚ Captadores no puntuales: El tamaño del dispositivo es del mismo orden de magnitud o mayor que la longitud de onda del oleaje incidente. En este grupo se clasifican los dispositivos largos, que dependiendo de su orientación pueden ser:
 - Atenuadores: El dispositivo, generalmente de varias cámaras, está alineado con su dimensión más larga en el sentido del oleaje incidente.



– Terminadores: El dispositivo está alineado con su dimensión más larga paralela al frente de ola incidente, es decir, perpendicular a la dirección de incidencia del oleaje.

Sin embargo, con el objetivo de hacer una breve revisión de los prototipos más significativos de OWC conocidos hasta la fecha, se pretende hacer la diferenciación conforme a otro criterio de clasificación, distinguiendo entre:

- Dispositivos fijos.
- Dispositivos flotantes.

A continuación se describen brevemente las características principales de cada tipo, así como los prototipos más relevantes.

Dispositivos Fijos

Los primeros dispositivos de OWC reales desarrollados fueron sistemas fijos anclados en acantilados de la línea de costa o apoyados sobre el fondo marino por gravedad. En general, se trata de dispositivos de carácter experimental y de diseño completamente dependiente del emplazamiento. Se localizan en lugares expuestos a fuerte energía del oleaje, como son los acantilados y los diques rompeolas.

Al encontrarse en profundidades reducidas, la rotura de las olas complica sus condiciones de operatividad y supervivencia, provocando numerosos fallos de las turbinas. En los párrafos que siguen se describen algunos sistemas de OWC de tipo fijo que han llegado a la etapa de experimentación a escala de prototipo.

Bochoux-Praceique (Bordeaux-Francia) desarrolló el primer dispositivo de OWC que se conoce. Data de 1910 y fue ideado y construido para el suministro energético de su casa en Rayon, cerca de Burdeos (Francia). Se trataba de una cámara vertical instalada en un dique asimétrico vertical, con una potencia media de 1kW.

La planta de Cachorro (Pico, Azores-Portugal) (Holmes et al., 1996), fue desarrollada por el Instituto Superior Técnico de Lisboa y actualmente está conectada a red. Se trata de una estructura hueca de hormigón provista de una cámara neumática situada sobre la superficie libre del agua. En funcionamiento desde 1999 hasta hoy en día, pero con constantes interrupciones, cuenta con una potencia instalada de 400 kW. Para evitar sobrepresiones y problemas en la turbina, cuenta con una válvula de alivio de presión de aire en la cámara que regula su apertura en función del estado de mar.

En el caso de España, aprovechando la construcción del nuevo dique de abrigo del puerto de Mutriku, se incorporó al proyecto del dique una planta de aprovechamiento de energía de las olas mediante la tecnología de OWC. Esta planta, de 300 kW de potencia y 16 grupos turbogeneradores, es la primera con configuración multiturbina del mundo (www.eve.es). El dispositivo lo conforman 16 cámaras OWC instaladas a lo largo de 100 metros de dique a

cota de -5 metros. Cada cámara está compuesta por piezas prefabricadas de forma trapezoidal y cuenta con una apertura sumergida para el oleaje incidente.



Ilustración 16. Planta de OWC de Mutriku

Dispositivos Flotantes

Los dispositivos de OWC flotantes se emplazan en zonas más lejanas de la costa que los fijos, en profundidades superiores a 40 metros (offshore). La mayor ventaja de los dispositivos offshore es la de disponer de regímenes de oleaje mucho más energéticos, así como el encontrarse en zonas alejadas de las de rotura. (A. Iturrioz, 2015)

En el caso de los dispositivos flotantes, la fuerza neumática se obtiene del movimiento relativo entre la cámara y la columna de agua (OWC) interior. Según la teoría de cuerpos oscilantes se conoce que un sistema compuesto por dos cuerpos tendrá dos picos de resonancia, uno correspondiente a la dinámica de cada cuerpo. Si el sistema se sintoniza para que dichos picos de frecuencia sean próximos a un valor usual del oleaje en un emplazamiento determinado, es posible aumentar el rango de frecuencias en el que el comportamiento del sistema es adecuado, siendo esta una de las fortalezas más importantes de los dispositivos OWC flotantes (Gomes et al., 2011).



4. MOTIVACIÓN

El significado del proyecto Mermaid

Los océanos europeos se van a ver sometidos a un desarrollo masivo de infraestructuras marinas en un futuro cercano. Dicho desarrollo se centra en la extracción de energía mediante instalaciones como: parques eólicos marinos, explotación de energía marina, así como el desarrollo e implementación de acuicultura marina. Esta novedosa técnica hace que el concepto de plataforma multiuso offshore sea especialmente interesante.

El proyecto Mermaid se fundamenta en una tecnología marina efectiva a la vez que económica y ambientalmente viable (dentro de límites aceptables). La distinta naturaleza y características de las industrias del sector desafían la idea de la plataforma multiuso. Por lo tanto, es tarea de futuro cercano direccionar esta novedosa propuesta y desarrollar de forma clara su potencial, dentro del proyecto fundado como "The Ocean Of Tomorrow".

El multidisciplinar e intersectorial enfoque de este proyecto es muy innovador y el beneficio de la UE se encuentra en los estudios de casos que abordan cuatro mares de la UE - regionales. El principal desafío hasta el momento es el desarrollo de una plataforma multiuso en alta mar, con los condicionantes de diseño y durabilidad que ello conlleva.

El proyecto Mermaid se desarrolló desde 2012 hasta 2015 y está comprendido por 29 integrantes de toda Europa; incluidas 11 universidades, 8 institutos de investigación (entre los que se encuentra el IH Cantabria), 6 industrias y 4 pequeños y medianos negocios.

Desafíos y el potencial de las plataformas multiuso marinas

Pese a ser muy complicado predecir el futuro, se puede obtener un indicativo de la tendencia basándonos en el desarrollo sufrido por el área marina en los últimos 20 años. En 1995 la industria offshore de petróleo y gas alcanzó su estado de madurez. Son muchos los países europeos que cuentan con una industria offshore ampliamente desarrollada en el campo del petróleo y gas: Inglaterra, Noruega, Dinamarca, Holanda e Italia. Sin embargo, antes del desarrollo de dicha industria el mar del Norte era explotado por el sector pesquero, para el transporte de mercancías, así como para el transporte de arenas y gravas.

Viento marino

En los últimos 15-20 años el recurso eólico marino ha sido profundamente explorado. Así, son numerosas las plataformas offshore instaladas para la obtención de energía a partir del viento en la mar, lo cual ha provocado un amplio desarrollo de la industria del sector.



El primer parque eólico offshore fue instalado en aguas Danesas con capacidad de aproximadamente 160 MW. Hoy en día, el país que cuenta con mayor capacidad instalada es Inglaterra con el 56% al que le sigue Dinamarca con un 16%, Alemania con un 13% y Bélgica con un 9% (Corbetta et al.2015).

Las profundidades relativamente pequeñas (15-40 m) del mar Norte y Báltico las hacen especialmente interesantes para este tipo de tecnología offshore.

El mayor reto para la extracción de energía offshore del viento es el coste de dicha energía (CoE). Este es actualmente elevado por lo que se deberá focalizar en tratar de reducir el coste de este tipo de energía renovable.

Acuicultura

La acuicultura marina ha ido creciendo en Europa en los últimos años, sobre todo la producción de salmón en Noruega. Sin embargo, en Estados Unidos la producción de acuicultura se ha visto estancada a partir del año 2000 aproximadamente. En Europa la producción de peces a través de la acuicultura ha ido creciendo, mientras que la producción de marisco se ha visto reducida en cierta medida desde 1999.

Así el reto para la acuicultura offshore es doble. Por un lado, uno de los retos principales es la obtención del permiso para la explotación del espacio oceánico para la producción de peces. Por otro lado, se debe tener en cuenta que las condiciones climáticas se vuelven mucho más severas en mar adentro; lo que implica oleajes mucho más fuertes.

En mar abierto o cerca de la costa

Si bien es cierto que el 70% de la superficie terrestre está cubierta por agua, todo el espacio oceánico no tiene el mismo interés en cuanto al desarrollo de la industria offshore. De hecho, la mayoría de las actividades desarrolladas en el mar están comprendidas a 50-100 km de la costa. Así, las distancias más alejadas de la costa solamente son interesantes desde el punto de vista de transporte por la superficie del mar.

Cada vez son más escasas las zonas de mar abierto apropiadas y disponibles para explotar, a lo que debe unirse el hecho de que la instalación de un parque eólico incluye la obtención de derechos exclusivos de un área muy grande mar adentro. Este aspecto puede suponer un límite al desarrollo de este tipo de industria, por lo que surge la idea de que varias industrias colaboren dentro del mismo espacio.

Varias industrias trabajando de forma conjunta

Hay una clara diferencia entre las características del coste de las industrias de viento y las de acuicultura. En los vientos Offshore, la mayor parte del desembolso se hace en extracción y



conversión de energía (80%) mientras que solo el 20% son gastos de operación. En cambio, en acuicultura sucede lo contrario: el 70-80 % del gasto se corresponde a la operación.

Las dos industrias son diferentes, pero tienen un interés común relacionado con la operatividad de sus instalaciones. Aquí, el uso común de los sistemas de predicción y aviso, alojamiento plataformas, y compartir parte del personal. Sin embargo, como en muchas otras industrias tanto la energía eólica marina y la acuicultura tienen un alto enfoque en sus propias necesidades y posibilidades.

Por otro lado, el espacio necesario para la instalación de piscifactorías es de aproximadamente 500m x 500m, lo que es muy inferior a los 5km x 5km a 10 km x 10km necesarios para la instalación offshore de parques eólicos.



5. METODOLOGÍA

5.1 Implementación *del modelo numérico*

Para la determinación del comportamiento teórico de la plataforma multiuso objeto de estudio, se emplea un modelado numérico que puede obtenerse a partir de la combinación de los modelos numéricos correspondientes al estudio de las tecnologías aplicadas en dicha plataforma. En el presente caso de estudio, el movimiento de la plataforma flotante incluye seis grados de libertad (DOFs) (movimiento de cualquier cuerpo libre flotando), además por parte de las tres columnas de agua oscilantes (OWC) integradas en el dispositivo se le suman otros 3 DOFs referidos a los movimientos de la superficie libre del agua dentro de las columnas. Todas las Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDOs) correspondientes al movimiento del cuerpo flotante son de 2º orden. Además de los 3 DOFs debidos al movimiento en Heave de las OWCs, hay que considerar las presiones dentro de las mismas; siendo estas EDOs de 1er orden.

Por otro lado, el movimiento del cuerpo flotante se ve afectado por las fuerzas producidas por el sistema de anclaje sobre la plataforma para retener el dispositivo en posición y, cuando se instale la turbina de viento, por la fuerza que ejerce el aire sobre la ella. Todas estas fuerzas deberán ser incluidas en el estudio del movimiento de la plataforma.

Explicación fundamento numérico aplicado en el presente caso de estudio

El modelado del comportamiento del cuerpo en el mar se ha formulado a partir de la teoría de flujo potencial.

Los efectos de la viscosidad de los fluidos reales quedan limitados a las regiones del espacio (muchas veces pequeñas) donde tienen lugar fuertes gradientes de la velocidad (capas límite, o regiones donde el flujo es turbulento). En el grueso del flujo los efectos de la viscosidad son despreciables y el fluido se puede suponer ideal.

En el modelo numérico empleado en este proyecto se han hecho una serie de **simplificaciones** hasta llegar a simular el flujo como un flujo ideal (Armesto, et al., 2016). Es decir, se ha supuesto:

- Flujo incompresible (lo que implica que la densidad es constante a lo largo del tiempo):

Ley de conservación de masa

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0$$



- Para el uso de teoría potencial, consideraremos la viscosidad nula. Si bien es cierto que ésta hipótesis sólo es válida para número de Reynolds suficientemente grandes, considerarlo así permite simplificar en gran medida el problema y así resolverlo con mayor rapidez.

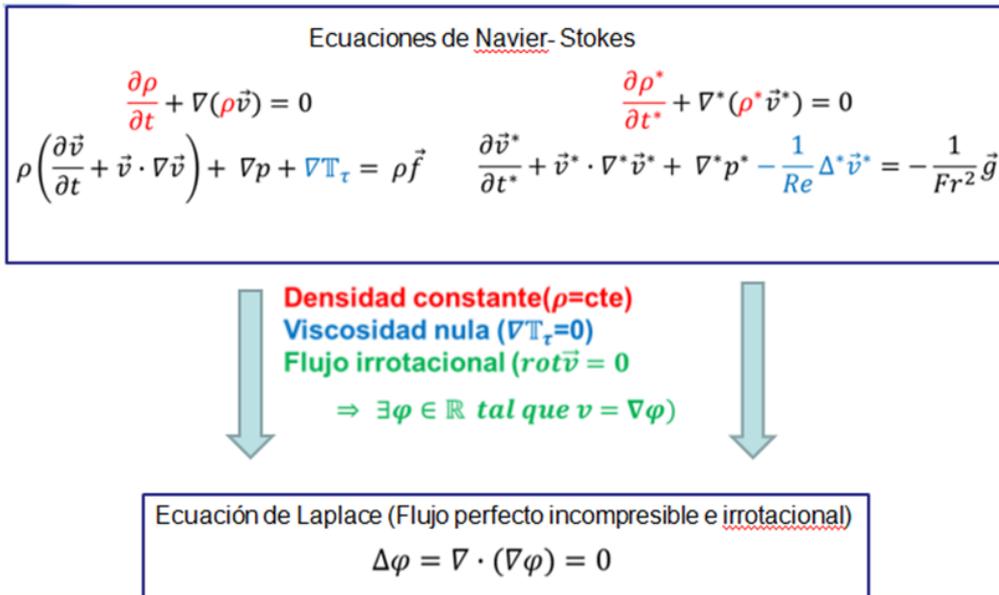
Al considerar la viscosidad nula:

Ley de conservación de momentos (lineales)

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} + \vec{\nabla} p + \text{div} \mathbb{T}_\tau = \rho \vec{f}$$

- Además, se ha considerado ser un flujo irrotacional: $\text{rot } \vec{v} = 0$

Partiendo de la ecuación de continuidad y aplicando las simplificaciones anteriormente mencionadas, se llegó a que el problema queda formulado como:



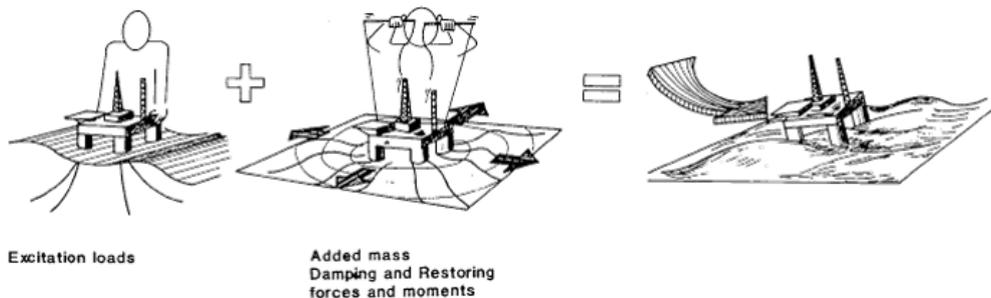
Se ha trabajado a partir de esta *ecuación de flujo ideal*, por lo que ha sido preciso emplear un término denominado **Coefficiente de Fricción o Damping** que trate de compensar las simplificaciones realizadas (Iturrioz, Guanche, Armesto, Alves, Vidal, & Losada, 2014). Es decir, debido al gran número de simplificaciones que se han hecho para llegar a una ecuación capaz de computar cada situación ensayada en un periodo de tiempo razonable, se han obviado efectos importantes que sí estarán presentes en el cuerpo (fricción, viscosidad, damping, etc.). Lo que se pretende conseguir con la introducción de estos coeficientes de damping, que será preciso calibrar con ensayos de laboratorio, es simular las fuerzas obviadas por la simplificación del modelo constitutivo, es decir, acercarnos más a lo que pueda ser la realidad en el comportamiento del cuerpo.

5.1.1 Física y resolución del modelo

El movimiento en el tiempo de cualquier cuerpo flotante puede ser modelado mediante la ecuación de Cummins (Cummins, 1962), empleando los coeficientes hidrodinámicos obtenidos mediante teoría potencial, usando el Boundary Element Method (BEM) en el dominio de la frecuencia tal como Nemoh (Babarit & Delhommeau, 2015):

$$(M + A_{\infty}) \ddot{z}(t) + \int_0^t K(t - \tau) \dot{z}(\tau) d\tau + Cz(t) = \sum F_{ext}(t) \quad (1)$$

Donde, "M" es la matriz de masas correspondiente a la estructura y "A ∞ " es la otra parte de las fuerzas de radiación, proporcional a la aceleración (masa añadida); es decir, la masa que arrastra en su movimiento además de la propia. Por su parte, "z (t)" es el vector de incógnitas que sufre la OWC con respecto al nivel del mar en cada momento, que incluye los 6 DOFs de la plataforma. "K(t)" representa la memoria del fluido; es decir, la respuesta que presenta el cuerpo ante estímulos pasados (IRF). Este término $\int_0^t K(t - \tau) \dot{z}(\tau) d\tau$ representa las fuerzas amortiguación (added damping) debidas a la radiación de ondas consecuencia de los movimientos del cuerpo flotante. Estas fuerzas son hidrodinámicas, como son las de excitación (incidentes + dispersadas por la estructura supuesta fija). "Cz" es el coeficiente de recuperación hidrostática, y el sumatorio de fuerzas referidas a un determinado momento incluye las fuerzas actuantes exteriores, donde pueden ir incluidas las de las olas, el viento, los anclajes, la fricción, las fuerzas del PTO, así como las demás fuerzas presentes en dicho momento.





Para conseguir la información necesaria para resolver la ecuación (1) se emplea la teoría de **WADAM**, un modelo numérico de elementos de contorno (BEM) que mediante una técnica de panelado de la superficie sumergida del flotante, permite la resolución del potencial de velocidades alrededor del flotante y facilita las matrices de masa y amortiguación añadidas. Permite obtener información como la masa añadida ($A(\omega)$), el damping ($B(\omega)$) y las fuerzas de excitación del oleaje ($F_e(\omega)$) dentro del dominio de frecuencias. La IRF se calcula usando el damping obtenido de las frecuencias predefinidas (Armesto, Guanche, del Jesus, Iturrioz, & Losada, 2015) :

$$K(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2)$$

La masa añadida calculada debe verificar que se cumple lo siguiente para cada dominio de frecuencias (ω_j):

$$A(\omega_j) = A^{\infty} - \frac{1}{\omega_j} \int_0^{\infty} K(t) \sin(\omega_j t) dt \quad (3)$$

Sin embargo, con los datos proporcionados por el modelo potencial no es posible obtener el valor de A^{∞} requerido en la ecuación (3). Debe emplearse el término $A^{\infty}(\omega_j)$:

$$A^{\infty}(\omega_j) = A(\omega_j) + \frac{1}{\omega_j} \int_0^{\infty} K(t) \sin(\omega_j t) dt \quad (4)$$

Así, el valor a introducir en la ecuación (1) será el valor medio de la masa añadida infinita obtenida anteriormente, lo cual puede provocar que el periodo natural computado para el modelo numérico difiera algo del observado en los ensayos de laboratorio.

Por otro lado, tal y como se ha explicado anteriormente, en este estudio se han calibrado las fuerzas de damping o fricción. El amortiguamiento (damping) es una fuerza hidrodinámica que tiene en cuenta las pérdidas impuestas por la viscosidad a la entrada de las OWCs y las turbulencias presentes en la parte sumergida del cuerpo flotante. Según queda reflejado en (Iturrioz, Guanche, Armesto, Alves, Vidal, & Losada, 2014) la fuerza de fricción tiene dos componentes; uno lineal y el otro no lineal.

$$F_f(t) = k\dot{z}(t) = (kl + knl\dot{z}(t)) |\dot{z}(t)| \quad (6)$$

Donde, “ kl ” es el coeficiente lineal y “ knl ” el coeficiente no-lineal, los cuales se van a calibrar hasta llegar, para cada grado de libertad, al modelo que más se ajuste a los resultados experimentales llevados a cabo en el Gran Tanque de Ingeniería Marítima (CCOB) de IHCantabria. Siendo el objetivo final de este modelo llegar a determinar los valores de estos coeficientes kl y knl que representen el comportamiento de este tipo de plataformas para cualquier periodo y altura de oleaje.

Para obtener, resolviendo la ecuación de Cummins (1962) a partir de la teoría potencial, la caracterización del comportamiento del sistema el problema se ha dividido en tres partes que



estarán acopladas entre sí, ya que para resolver la ecuación (1) son precisos datos obtenidos a partir de las ecuaciones planteadas para los otros dos modelos.

- **Modelo hidrodinámico:** Este modelo estudia el comportamiento de la plataforma flotante objeto de estudio.
- **Modelo de Moorings:** Modelo empleado para analizar la influencia de los anclajes sobre el movimiento de la plataforma, así como la obtención de las fuerzas que ejercen las líneas de anclaje sobre ella.
- **Modelo aerodinámico:** Es un modelo de estudio de la velocidad de rotación de la turbina eólica, que proporciona la energía producida y las fuerzas resultantes y los momentos sobre la plataforma.

Todos los modelos se acoplan en un único sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que comparten información en cada paso de tiempo.

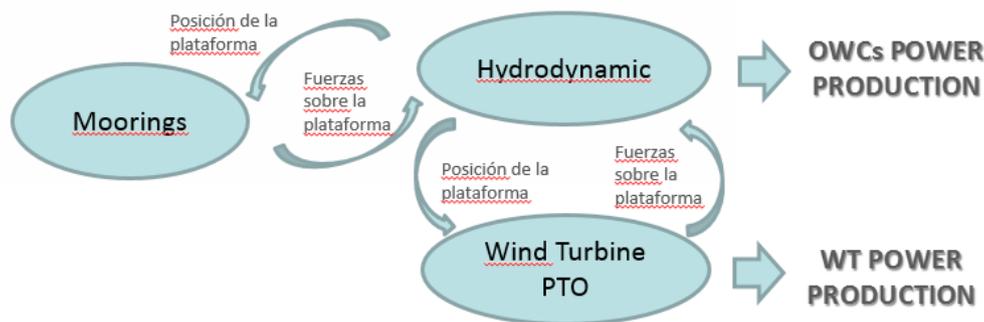


Ilustración 17. Esquema sistema de ecuaciones incluidas en el modelo numérico desarrollado

Hidrodinámica (movimiento del cuerpo)

El movimiento libre de la plataforma en el agua incluye 6 grados de libertad (DOFs): Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch y Yaw:

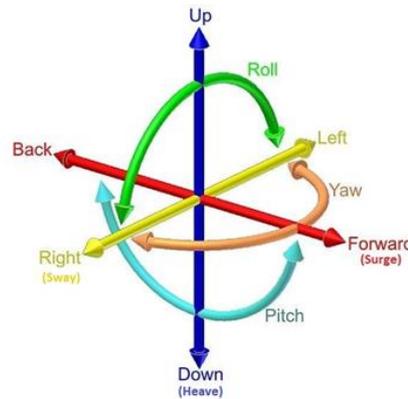


Ilustración 18. Representación gráfica de los 6 g.d.l de cualquier cuerpo flotando

Para caracterizar dicho comportamiento se aplica **WADAM** con el objetivo de obtener la respuesta de un cuerpo flotante con sus DOFs. Además, debido a la presencia de las OWCs en el MUP, hay que estudiar la interacción de superficie libre con el aire dentro de las cámaras (Iturrioz et al. 2014). Para estudiar el movimiento de la superficie libre, en la ecuación (1) deberán incluirse tantos DOFs como OWCs tenemos en el MUP: en este caso serían 3. En el presente estudio nos encontraríamos, para el dominio de frecuencias, ante:

$$X = [x, y, z, \phi, \theta, \psi, \eta_1, \eta_2, \eta_3]^T$$

Hasta el momento estaríamos trabajando con 9 variables (que son EDOs de 2º orden) dentro de la ecuación de Cummins (1). Una vez alcanzado este punto se procede a realizar un cambio de variable para facilitar el paso de la ecuación con EDOs de segundo orden a EDOs de primer orden para 2*(6 o 9) DOFs.

Por otro lado, cabe señalar que el aire se comporta como un gas ideal bajo las condiciones de presión y temperatura consideradas en el modelado (Sarmiento and Falcao, 1985). Sin embargo, la validación del modelo numérico ha sido realizada a pequeña escala luego el efecto de la compresibilidad del aire puede ser despreciado. Por otro lado, se asume que el intercambio de calor con el ambiente es muy pequeño, como es muy habitual asumir en situaciones de calentamiento y enfriamiento del gas debido a la oscilación de presión (Falcao and Justino, 1999). Lo cual significa que la parte de energía que no puede ser transferida permanece constante durante las operaciones de llenado y vaciado. Por lo que, para el dominio del tiempo, deberán añadirse los 3 DOFs correspondientes a las presiones dentro de las cámaras. El objetivo será convertir esta ecuación (1) en un sistema de ecuaciones de 1er orden incluyendo el efecto de la presión que ejerce el agua dentro de las cámaras.



La compresibilidad del aire deberá tomarse en cuenta en el modelo con el fin de estudiar la producción de energía. La evolución de la masa de aire dentro de cada cámara puede ser modelada de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{air,i}(t) = - \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{air} V_{air,i}(t)), i = 1,2,3. \quad (7)$$

Donde, $m_{air,i}$ representa la masa de aire dentro de la cámara i , ρ_{air} es la densidad del aire y $V_{air,i}$ el volumen de aire dentro de la cámara i .

Tras una serie de adaptaciones, (Iturrioz, Guanche, Armesto, Alves, Vidal, & Losada, 2014), la ecuación que describe la variación de presión dentro de las cámaras queda reducida a una EDO de primer orden:

$$\dot{P}_i(t) = [s1 + s2] P_i^*(t) \quad (8)$$

$$s1(t) = - \frac{A_v C_d \gamma}{\rho_{air} S} \operatorname{sgn}(P_i^*(t) - 1) \sqrt{2 P_0 \rho_{air} P_i^*(t)^{-\frac{1}{\gamma}} |P_i^*(t) - 1|} \quad (9)$$

$$s2(t) = \gamma \dot{\eta}_i(t)$$

Donde, P_0 es la presión atmosférica, ρ_{air} la densidad del aire a presión atmosférica y $P_i^*(t)$ es la presión relativa:

$$P_i^*(t) = P_i(t)/P_0 = (\Delta P_i(t) + P_0)/P_0 \quad (10)$$

Como se ha mencionado anteriormente, la ecuación (1) es un sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO) de segundo orden y la ecuación (6) es otro sistema de EDOs de primer orden. Haciendo un simple cambio de variable, la ecuación (1) puede ser transformada a un sistema de EDOs de primer orden con el doble del número de ellas que de ecuaciones, empleando la incógnita Z y su respectiva derivada. Así, ambos sistemas de ecuaciones (1) y (6) pueden ser resueltos de manera conjunta como un único sistema de ODEs de primer orden, con un total de 21 incógnitas (11).

$$x = [x, y, z, \phi, \theta, \Psi, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\Psi}, \dot{\eta}_1, \dot{\eta}_2, \dot{\eta}_3, P_1^*, P_2^*, P_3^*] \quad (11)$$

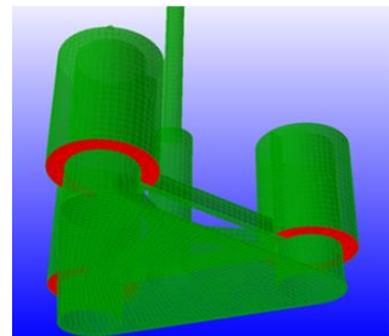


Ilustración 19. Representación gráfica del diseño de la plataforma



Para mayor detalle sobre el proceso de modelado numérico llevado a cabo, consúltese el artículo (Armesto, et al., 2016).

Moorings

Las fuerzas de anclaje que actúan en un cuerpo flotante pueden ser directamente calculadas. Existen tres métodos principales para resolverlas dinámicamente:

- 1) usando la ecuación del movimiento de un cable con flexión y rigidez torsional despreciables. (Aamo and Fossen, 2000, 2001; Montano et al., 2007; Palm et al., 2013).
- 2) A través del modelo de masas concentradas (Gar-ret, 1982; Hall and Goupee, 2015; Walton and Polachek, 1959).
- 3) Mediante la teoría de barras (Zhu, 2010).

Estos métodos resuelven la dinámica de cada línea de catenaria, dividiendo la línea en nodos (en este caso 30 nodos cada catenaria), y analizan su comportamiento así como las fuerzas producidas por las líneas sobre el cuerpo flotante. El gran inconveniente de estos métodos es su coste computacional, ya que se resuelve una ecuación en derivadas parciales que mediante un Modelo de Elementos Finitos (FEM) se puede escribir como un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden con 3 DOFs por cada nodo, ya que se analiza el movimiento en el espacio 3D. Como se ha comentado anteriormente las fuerzas que provocan las líneas de anclaje (Moorings) se incluyen dentro de las fuerzas externas de la ecuación de Cummins (1).

Turbina eólica

Las fuerzas aerodinámicas actuantes en la turbina de viento pueden ser calculadas por medio de "**Blade Element Momentum Method**" (Hansen, 2008). Este método se usa para calcular las fuerzas locales en la pala de una turbina de aire. Se combinan "Blade Element Theory" con "Momentum Theory" para solucionar ciertas dificultades a la hora de calcular las velocidades inducidas en el rotor. Para ello, habrá que predecir el movimiento de la plataforma flotante así como la producción de energía aplicando la correspondiente formulación. Para determinar la fuerza de empuje habrá que tener en cuenta que la velocidad del núcleo estará influenciado por el movimiento del cuerpo flotante. Según (Martini, Guancho, Armesto, Losada, & Vidal, 2015) basta con una formulación simple para predecir dicho movimiento, así como la producción de energía.

Este será un aspecto a analizar más en profundidad en próximas fases de desarrollo del presente estudio.

5.1.2. Breve resumen de las hipótesis y asunciones para el desarrollo modelado numérico

El movimiento del cuerpo flotante se estudia en el dominio del tiempo modelado por la ecuación de Cummins (1) basada en la teoría potencial lineal de primer orden. Las fuerzas de fricción se han incluido, pero es necesario calibrar los coeficientes de fricción lineal y no-lineal.

Se supone que el aire es un gas ideal y los procesos de inhalación y la exhalación se consideran adiabáticos. La compresibilidad del aire se tiene en cuenta en el modelo con el fin de estudiar la producción de energía así como la variación del volumen de agua dentro de cada cámara.

Los modelos de anclaje se simplifican con el fin de reducir el coste computacional, al igual que se deberá hacer con el modelo aerodinámico a tener en cuenta en futuros desarrollos del presente estudio. La fuerza producida por el modelo aerodinámico sobre la plataforma flotante y la producción de energía se calcularían como funciones de la velocidad al cubo. En cambio, las fuerzas ejercidas por las líneas de anclaje son fuerzas dinámicas, en función de la distancia entre la plataforma y cada anclaje. Teniendo en cuenta la dinámica propia de las cadenas.

5.2 Ensayos experimentales

5.2.1. Instalaciones

Los ensayos de laboratorio han sido llevados a cabo en el IHCantabria. El *Cantabria Coastal and Ocean Basin* (CCOB) se enmarca dentro del programa de Infraestructuras Científico – Tecnológicas Singulares del Ministerio de Ciencia e Innovación, en el que participan la Comunidad Autónoma de Cantabria como financiadora y la Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, que se encarga de la gestión de las instalaciones. Su misión fundamental es dotar de conocimiento científico-tecnológico, servicios y tecnología para el desarrollo de la ingeniería marítima (offshore y costera) nacional e internacional.

Este Instituto de investigación mixta dispone del Laboratorio de Ingeniería de Costas, Oceanografía e Hidráulica (IHLab Hidro), donde realiza ensayos en modelo físico con el fin de estudiar fenómenos relacionados con la



Ilustración 20. Gran Tanque de Oleaje del IHCantabria

generación y propagación del oleaje, interacción ola-ola y ola-estructura. Con una anchura de 42 m, 30 m de longitud y profundidad variable, es una instalación diseñada para la realización de ensayos en ingeniería marítima y costera a gran escala. Con capacidad de generar oleaje multidireccional, corriente omnidireccional y viento, además de disponer de un foso de 6 m de diámetro y 8 m adicionales de profundidad que permite ensayar en profundidades máximas de 11,7 m.

- Profundidad máxima: 3.5 m
- Profundidad mínima: 0.2 m
- Área de ensayos máxima: 760 m²

Equipamiento:

- Generador de oleaje: 64 palas independientes de 0.5 m de anchura y 4.5 m de altura, capaces de generar oleaje multidireccional con una altura de ola de hasta 1 m.
- Generador de corrientes: 12 agitadores de 900 mm de diámetro, capaces de generar un caudal de hasta 18 m³/s en sentido longitudinal o transversal al tanque.
- Generador de viento: Dispositivo portátil de altura variable, capaz de generar viento de alta calidad con una intensidad de más de 20 m/s.
- Puente Grúa con capacidad para 10 toneladas

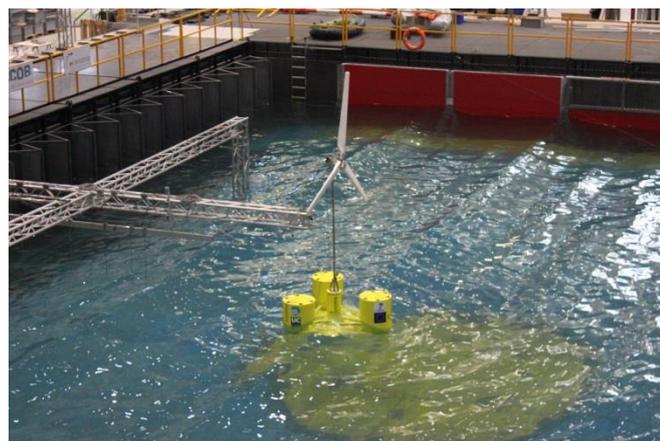


Ilustración 21. Vista del generador de oleaje

Capacidades:

Generación de oleaje multidireccional, generación de corrientes multidireccional, generación de viento y absorción dinámica de oleaje tridimensional.



A continuación se muestra la metodología que se va a seguir para el correcto desarrollo del proceso completo de diseño de la MUP objeto de estudio:

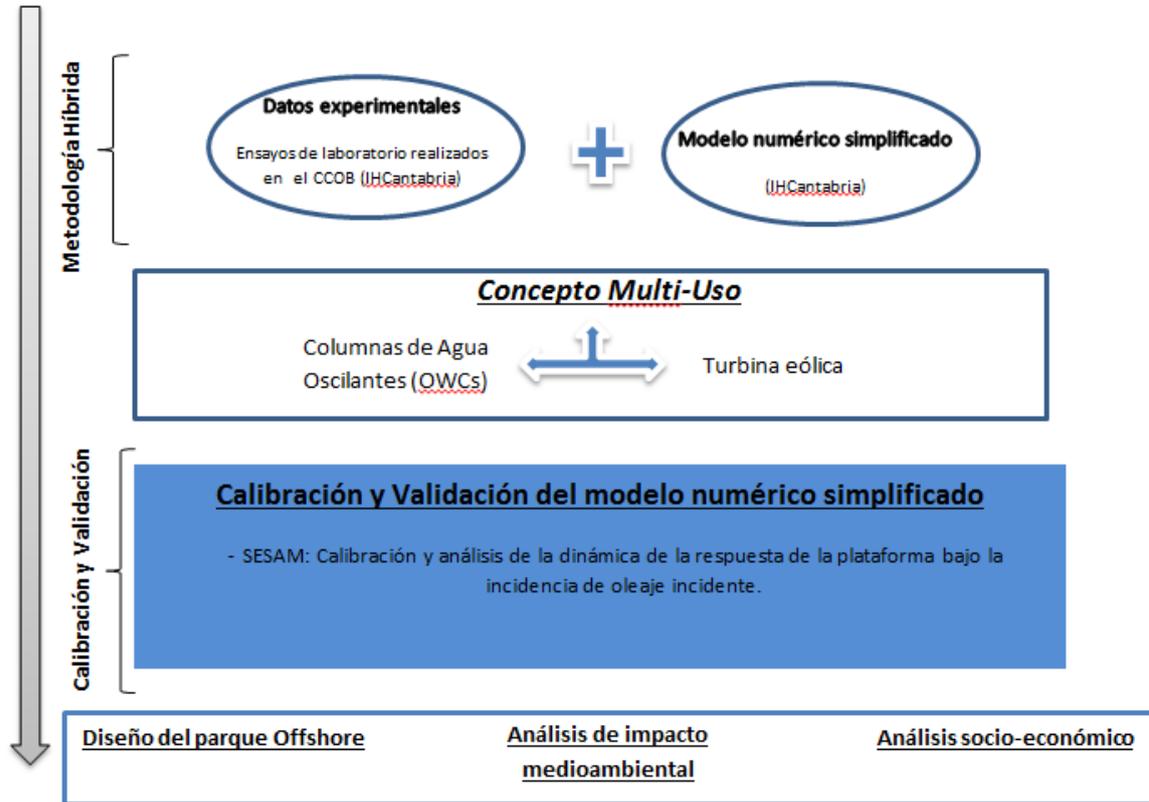


Ilustración 22. Metodología de desarrollo del trabajo realizado

5.2.2. Ensayos

Los ensayos del modelo físico han sido realizados en el Cantabria Coastal & Ocean Basin (CCOB). La plataforma creada para llevar a cabo los ensayos en el CCOB ha sido escalada teniendo en cuenta el escalado de Froude.

Teniendo en cuenta la geometría de la estructura, la profundidad del agua, el sistema de anclaje y el tamaño de las instalaciones del IH Cantabria donde se han llevado a cabo los ensayos físicos, la escala más adecuada es 1/35.



Ilustración 23. Disco giratorio en representación de la turbina eólica



El material empleado para fabricar la plataforma va a ser acero. A la hora de determinar el peso y el espesor de la sección se debe tener en cuenta que dichos parámetros deberán mantener la distribución del peso impuesto por el escalado geométrico una vez la instrumentación este instalada.

El dispositivo rotor prototipo será simulado a través de un disco giratorio previamente calibrado. Este representa la carga de viento correspondiente así como los efectos giroscópicos debido a la rotación de la turbina de aire. El peso del disco y el motor instalado se corresponderá, a escala geométrica, con el peso total del rotor y de la góndola en la escala prototipo.

Los objetivos generales de estos ensayos físicos de laboratorio son los siguientes:

- Determinar experimentalmente el operador de amplitud de respuesta de la estructura en el dominio de frecuencia obtenido a partir de los resultados del modelo numérico.
- Analizar la respuesta dinámica de la estructura bajo condiciones de operatividad combinando acciones de viento, oleaje y corrientes actuantes sobre la plataforma flotante.
- Estudiar la evolución de la estructura bajo condiciones extremas en situación de turbina fuera de servicio.
- Llegar a generar una respuesta experimental para la correcta validación del modelo ensayado.

Los ensayos se llevarán a cabo bajo diferentes condiciones (con y sin viento, con oleaje regular e irregular) así como para diferentes aperturas de los orificios de las OWCs. Dichas aperturas son las mostradas a continuación:

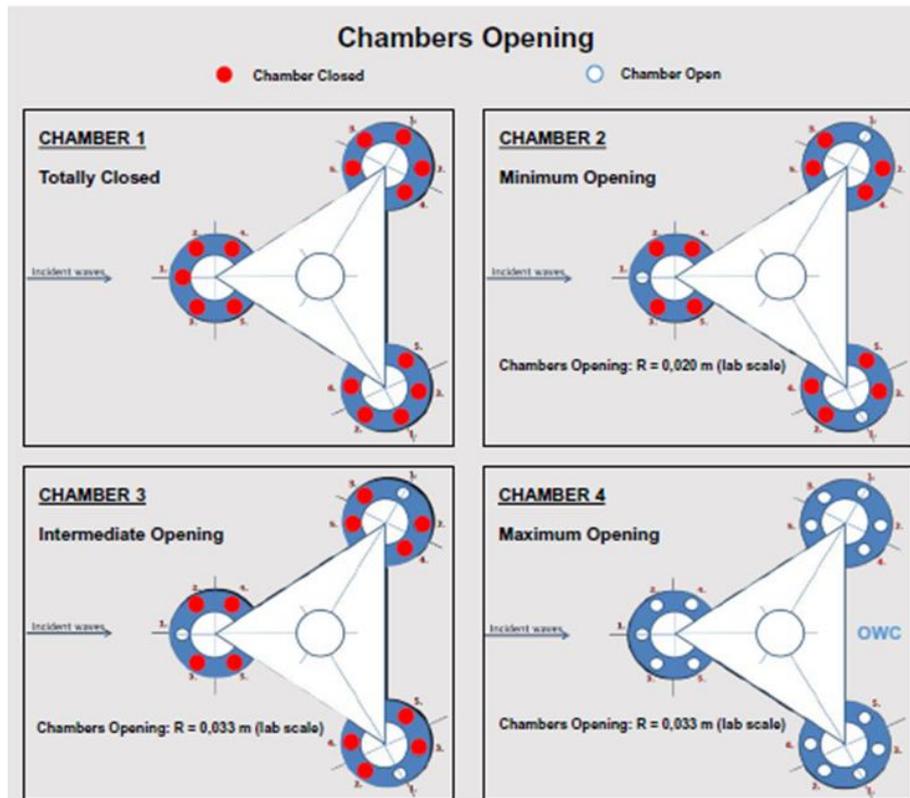


Ilustración 24. Configuraciones de las aperturas de orificios ensayadas

Donde,

CHAMBER 1: Orificios totalmente cerrados en las 3 cámaras

CHAMBER 2: Orificio 1 con apertura mínima y el resto cerrados ($R=0.02$ m, a escala laboratorio)

CHAMBER 3: Orificio 1 con apertura máxima y el resto cerrados ($R=0.033$ m, a escala laboratorio).

CHAMBER 4: Orificios totalmente abiertos ($R= 0.033$ m, a escala laboratorio)

Los ensayos de la plataforma multiuso con estas 4 configuraciones de apertura de orificio permiten obtener una base de datos experimentales suficiente para calibrar el modelo numérico y así caracterizar el comportamiento hidrodinámico del dispositivo.



Ilustración 25. Vista en laboratorio de los orificios del dispositivo

En primer lugar, se deben obtener las características físicas del dispositivo (mediante ensayos previos), así como las de las cámaras. A continuación, mediante los **Decay test**, se caracteriza el comportamiento hidrodinámico del dispositivo (con sistemas de anclaje dinámicos y OWCs abiertas y cerradas). Por último, se realizarán una serie de ensayos para determinar la interacción entre el oleaje regular e irregular con la plataforma flotante, a la que se le añadirá después la presencia de viento y corriente; es decir, se validará el supuesto comportamiento de la plataforma en conjunto.

En la etapa de calibración del modelo se han tratado de hallar, por separado, los valores óptimos de los coeficientes de fricción que mejor se ajusten al comportamiento que presenta la plataforma. Para ello, los ensayos de laboratorio se han realizado para cada situación y grado de libertad; es decir, se han discretizado la plataforma y las OWC y, a su vez, se han supuesto diversos casos para cada uno de ellos.

En cuanto a los ensayos llevados a cabo con el objetivo de caracterizar el comportamiento de la plataforma, se ha partido de la situación de **OWCs cerradas** (Configuración 1: cuerpo flotante) con catenarias de anclaje dinámicas en ausencia de oleaje. Para estudiar el movimiento de la plataforma ante una excitación en cada grado de libertad, por separado, basta con implementar un desequilibrio en esa dirección. Esto se consigue de diversas formas, en función del grado de libertad que se desee estudiar en cada caso: colocando pesos en la dirección correspondiente y al retirarlos obtener la respuesta de la estructura, implementando tirones en la dirección correspondiente y soltando para observar su comportamiento o, en el caso de Heave, hundiendo la plataforma y soltándola, etc.



El mismo procedimiento es empleado para **OWCs abiertas** (Configuración4: todos los orificios abiertos al máximo: el agua fluye libremente a través de ellos). Con estos ensayos se consigue caracterizar el comportamiento hidrodinámico de la plataforma.

Por otro lado, se ensaya el comportamiento que tendrán las OWC estudiándolas de forma aislada a la plataforma. Para ello, en este caso, se ha partido de la situación de OWC fijas; es decir para la plataforma se ha calibrado cada grado de libertad individualmente (Surge, Sway, Heave, Pitch, Roll, y Yaw) y a partir de esos valores se ha buscado la calibración de todos ellos en conjunto (que es como aparecerán habitualmente). En el caso de las OWC, se ha buscado un error aceptable para los coeficientes de fricción en cada columna oscilante para cada periodo por separado. Posteriormente se ha buscado, para cada periodo, que el error en cada periodo de las 3 columnas en conjunto esté en un rango aceptable. Todo ello comparando los datos de los ensayos realizados con los resultados obtenidos del modelo numérico.

A continuación, se hace una breve descripción de los ensayos realizados en el tanque del IH Cantabria:

1. Ensayos de identificación

Ensayo de distribución del peso

El objetivo de este ensayo es comprobar que la distribución del peso del modelo de corresponde con el prototipo escalado que ha sido construido de acuerdo a las especificaciones. Incluirá las siguientes tareas: medir la masa del modelo, determinación del centro de gravedad del modelo y comprobar la geometría del modelo.

INCLINING TEST			
D.O.F.	RESULTS	Column ballast C1, C2, C3	CONFIGURATION 4 (Totally Open) Orifice R1, R2, R3, R4, R5 (m)
Pitch	metacentric height GM	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
Roll		95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033

Tabla 1. Ensayos de inclinación

Ensayo de inmersión e inclinación

El objetivo de estos ensayos es comprobar la posición del centro de flotación de la estructura y del metacentro.



Ensayo de lastrado y carga

El modelo deberá ser lastrado por encima de la línea de mar supuesta, incluyendo altura y fondo, cuadrando con el centro de gravedad.

Prueba de remolque

El objetivo de este ensayo es determinar el coeficiente de arrastre hidrodinámico de la plataforma multiuso. Dicho coeficiente será determinado empíricamente. Esto permitirá hacer la correcta calibración de las fuerzas de corriente. El coeficiente de arrastre es estimado a partir de la velocidad y las fuerzas registradas. Para llevar a cabo este ensayo solo se empleará la configuración 4 (orificios totalmente abiertos) y se ensayará bajo 4 corrientes distintas (2,4,6,8).

Towing Test				
Towing speed (kn)	Force direction °	RESULTS	Column ballast (tn) C1, C2, C3	CONFIGURATION 4 (Totally Open) Orifice R1, R2, R3, R4, R5 (m)
2	0		95,95,95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
4	0	towing resistance and drag coeff	95,95,95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
6	0		95,95,95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
8	0		95,95,95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033

Tabla 2. Prueba de remolque

Prueba de desplazamiento estático

Basado en la estructura anclada, la rigidez del sistema de anclaje será evaluado así como la pretensión de dicho sistema estará correctamente representada en el laboratorio. Para este ensayo también se ha usado únicamente la configuración 4 (orificios totalmente abiertos) y se han evaluado los desplazamientos en 2 grados de libertad:

MOORING STIFFNESS TEST				
DOF	Force direction °	RESULTS	Column ballast C1, C2, C3	CONFIGURATION 4 (Totally Open) Orifice R1, R2, R3, R4, R5 (m)
Surge	0	restoring force of the moored model	95,95,95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
Sway	90		95,95,95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033

Tabla 3. Prueba de desplazamiento estático



Decay tests (Pruebas de caída)

Estos ensayos son empleados en la estructura flotante con el objetivo de determinar el periodo natural y la amortiguación hidrodinámica del sistema. Serán llevados a cabo para el sistema con líneas de anclaje dinámicas. Así, se evaluará la amortiguación del sistema bajo la influencia del sistema de anclajes dinámico.

En este caso, las configuraciones de apertura de orificios a emplear serán la 4 (orificios totalmente abiertos) y la 1 (orificios totalmente cerrados: cuerpo flotante).

Decay Test with Mooring System			
D.O.F.	RESULTS	Column ballast C1, C2, C3	Orifice R1, R2, R3, R4, R5 (m)
Configuration 1			
Surge		95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
Sway		95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
Heave	natural periods and damping coeff of	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
Roll	the free model	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
Pitch		95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
Yaw		95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
Configuration 3			
Surge		95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
Sway		95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
Heave	natural periods and damping coeff of	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
Roll	the free model	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
Pitch		95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
Yaw		95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033

Tabla 4. Decay tests con anclajes dinámicos

Ensayos de oleaje regular

La razón de ensayar la plataforma multiuso objeto de estudio es determinar la respuesta de la estructura frente a un oleaje incidente regular y comprobar las frecuencias naturales de la estructura. Para ello, se ensayarán 9 periodos (T=8s, 10s, 12s, 14 s, 16s, 18s, 20s, 22s, 25s) y la altura de ola considerada será de H=3 m en escala prototipo.

Tras calibrar el modelo bajo oleaje regular sin viento se hará una validación del mismo con viento.

Los ensayos de oleaje regular sin viento se llevarán a cabo para las 4 configuraciones posibles de apertura de orificio, mientras que dichos ensayos bajo la influencia del viento se harán únicamente para las configuraciones 1 y 4.



PaCOS - Regular Wave - Configuration 1 - OWC Totally Closed							
Wind Speed (m/s)	Waves		Depth (m)	Wave Spectrum	Escale factor	Column ballast (tn) C1, C2, C3	CONFIGURATION 1 (Close) Orifice R1, R2, R3, R4, R5 (m)
	Height (m)	Period (s)					
11,5	3	8	105	REG	1/35	285, 0, 0	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
11,5	3	12	105	REG	1/35	285, 0, 0	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
11,5	3	14	105	REG	1/35	285, 0, 0	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
11,5	3	18	105	REG	1/35	285, 0, 0	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
11,5	3	22	105	REG	1/35	285, 0, 0	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
11,5	3	25	105	REG	1/35	285, 0, 0	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	8	105	REG	1/35	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	10	105	REG	1/35	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	12	105	REG	1/35	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	14	105	REG	1/35	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	16	105	REG	1/35	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	18	105	REG	1/35	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	20	105	REG	1/35	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	22	105	REG	1/35	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	25	105	REG	1/35	95, 95, 95	closed/ closed/ closed/ closed/ closed

Table 29. Configuration 1: Regular wave test.

PaCOS - Regular Wave - Configuration 2 - OWC Minimum Opening							
Wind Speed (m/s)	Waves		Depth (m)	Wave Spectrum	Escale factor	Column ballast (tn) C1, C2, C3	CONFIGURATION 2 (Minimum Opening) Orifice R1, R2, R3, R4, R5 (m)
	Height (m)	Period (s)					
0,0	3	8	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,02/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	10	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,02/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	12	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,02/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	14	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,02/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	16	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,02/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	18	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,02/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	20	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,02/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	22	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,02/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	25	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,02/ closed/ closed/ closed/ closed

Tabla 5. Configuración 2: Ensayos de Oleaje Regular

PaCOS - Regular Wave - Configuration 3 - OWC Intermediate Opening							
Wind Speed (m/s)	Waves		Depth (m)	Wave Spectrum	Escale factor	Column ballast (tn) C1, C2, C3	CONFIGURATION 3 (Intermediate Opening) Orifice R1, R2, R3, R4, R5 (m)
	Height (m)	Period (s)					
0,0	3	8	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	10	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	12	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	14	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	16	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	18	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	20	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	22	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033/ closed/ closed/ closed/ closed
0,0	3	25	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033/ closed/ closed/ closed/ closed

Tabla 6. Configuración 3: Ensayos de Oleaje Regular



PaCOS - Regular Wave - Configuration 4 - OWC Open							
Wind Speed (m/s)	Waves		Depth (m)	Wave Espectrum	Escale factor	Column ballast (tn) C1, C2, C3	CONFIGURATION 4 (Totally Open) Orifice R1, R2, R3, R4, R5 (m)
	Height (m)	Period (s)					
11,5	3	8	105	REG	1/35	285, 0, 0	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
11,5	3	12	105	REG	1/35	285, 0, 0	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
11,5	3	14	105	REG	1/35	285, 0, 0	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
11,5	3	18	105	REG	1/35	285, 0, 0	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
11,5	3	22	105	REG	1/35	285, 0, 0	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
11,5	3	25	105	REG	1/35	285, 0, 0	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
0,0	3	8	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
0,0	3	10	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
0,0	3	12	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
0,0	3	14	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
0,0	3	16	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
0,0	3	18	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
0,0	3	20	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
0,0	3	22	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033
0,0	3	25	105	REG	1/35	95, 95, 95	0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033 / 0,033

Tabla 7. Configuración 4: Ensayos de Oleaje Regular

Ensayos de oleaje irregular

Dentro de estos ensayos se han incluido las condiciones de oleaje, viento y corrientes en conjunto. Para ello, se han dividido en diferentes grupos de ensayos:

1. Solo oleaje irregular incidente (comportamiento de la plataforma ante un oleaje irregular actuante)
2. Oleaje irregular + corrientes (determinación de la influencia de la corriente sobre la plataforma multiuso en condiciones de oleaje irregular)
3. Estado de mar operativo: oleaje irregular + viento + corrientes (se corresponde con un estado de mar real, cuando la turbina de aire y las columnas oscilantes están en acción)
4. Estado de mar extremo: oleaje irregular extremo + viento extremo + corrientes extremas (se corresponde con situación de estado de mar totalmente desarrollado, sirve para determinar el comportamiento no-lineal de la plataforma flotante)

Una vez llevados a cabo todos los ensayos se consiguen valores teóricamente característicos de cada situación de ensayo, por separado. Sin embargo, para validar el modelo deben hacerse ensayos finales que comprueben un comportamiento adecuado del sistema completo (plataforma y OWCs) ante unas condiciones de oleaje determinadas. Para ello, se unifican los valores previamente calibrados individualmente de coeficientes de fricción, y coeficiente de descarga de los orificios en una sola situación a ensayar.

Una vez se ha comprobado que el movimiento de la plataforma, la variación de presión dentro de las cámaras y las masas de agua que equilibran el sistema funcionan adecuadamente se puede tomar como modelo fiable y extrapolable.

Tal y como se ha señalado anteriormente, la compresibilidad del aire a pequeña escala es despreciable pero, en cambio, a escala real la variación de la presión producida será considerable y, por tanto, la densidad del aire variará en función a dicha variación de presión, luego el aire será compresible. Por lo que, la masa del flujo de aire que atraviesa el orificio de la cámara puede expresarse como (Alves, 2012):

$$\dot{m}_{air}(t) = C_d \cdot A_v \cdot \text{sgn}(\Delta P(t)) \cdot \left[\frac{2 \cdot m_{air}(t) \cdot |\Delta P(t)|}{V_{air}(t)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Donde, " A_v " es el área de la apertura del orificio, " C_d " es el coeficiente de descarga, " ΔP " es la variación de presión, " V_{air} " es la velocidad del flujo de viento y " m_{air} " es la masa del flujo de aire.

Calibración del coeficiente de descarga

La calibración del sistema Power Take-Off (PTO) es fundamental a la hora de conseguir la mayor eficiencia del dispositivo. Según la ubicación de la plataforma estará sometida a diferentes condiciones tanto de oleaje como de viento, por lo que es preciso estudiar la configuración de plataforma más adecuada según la situación. Así, en condiciones extremas provocadas por temporales los orificios deberán estar cerrados para evitar posibles desperfectos en el sistema. En esta configuración no se obtendría energía pero tampoco se pondría en peligro la integridad del aparato ya que se comportaría como un cuerpo flotante en el mar. Lo único que permanecería en peligro serían las catenarias que debido a las condiciones de la mar podrían romperse dejando la plataforma a la deriva. Es por esto por lo que el correcto diseño de las líneas de anclaje y su capacidad de amortiguación se considera fundamental dentro del conjunto de la MUP. Por otro lado, tras llevar a cabo el estudio de la variabilidad en la producción de energía según la apertura de orificio y coeficiente de descarga de este, se considera la opción de adaptar la apertura de orificio según las condiciones del entorno de la plataforma en distintos periodos de tiempo. Esta regulación se hará siempre con un doble objetivo: por un lado el de maximizar la producción energética y, por otro lado, el de mantener las condiciones seguras de operatividad.

Para una buena calibración del fenómeno es imprescindible la caracterización del **Coficiente de Descarga (C_d)** para cada apertura de orificio (cada uno de ellos reemplaza la turbina de cada OWC y permiten estimar la producción de energía de las olas que se lograría). Es decir, la pérdida de carga que se produce cuando el flujo atraviesa dicho segmento (debido a la fricción, el cambio brusco de la sección, etc.). Para ello, se ha llevado a cabo un ensayo en seco

a escala representativa de la realidad en el laboratorio del IH Cantabria en el que se ha empleado un orificio de 40 mm de diámetro.

La máquina empleada está compuesta por un émbolo (ilustración 26) y un pistón que es empujado por un actuador lineal y va avanzando a velocidad lenta y constante del aire (movimiento sinuoidal) dentro de la cámara. El diámetro del pistón es de 0.30 m.

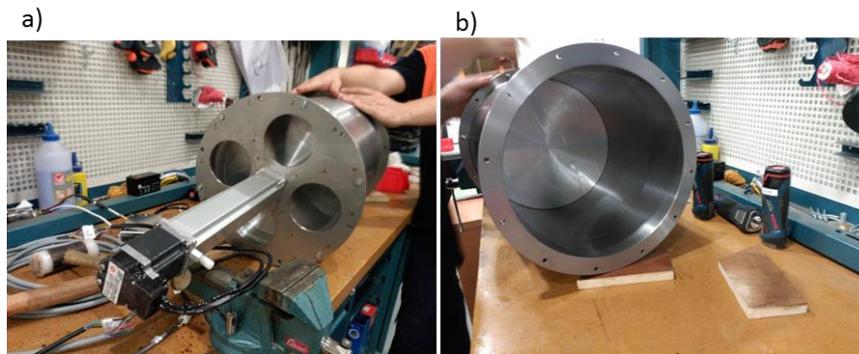


Ilustración 26. Actuator lineal y émbolo para la calibración del PTO en seco

Durante el ensayo se medirán:

- La serie temporal de la posición del pistón (de la cual se obtiene el caudal)
- La presión de aire en el interior del émbolo
- La temperatura interior del émbolo

Con los datos recogidos para el orificio ensayado, se representa la curva característica (Caudal- Presión) correspondiente.

Para llevar a cabo estos ensayos se coloca el pistón en un extremo del émbolo y una tapa con el orificio que se desee ensayar en el otro extremo. Accionando el actuador lineal se impondrá al pistón un movimiento determinado que provocará que el aire circule a través del orificio ensayado.

❖ Plan de ensayos

- *Orificios ensayados:* En este caso se caracterizó un único orificio de diámetro de 40 mm.
- *Casos de movimiento del pistón:* Se ensayaron movimientos sinusoidales de las siguientes amplitudes y periodos:



Amplitud, A (m)	Periodo, T (s)
0.12	5
0.12	10

Tabla 8. Movimientos sinusoidales del pistón ensayado

Por otro lado, las OWCs no han sido escaladas a partir de las leyes de compresibilidad ya que esto llevaría a un cambio sustancial en la geometría de la cámara. Esto provocará un comportamiento dinámico significativamente distinto entre el prototipo (a escala) y el modelo real.

Características Principales	Dimensiones	Unidades
Masa Plataforma	8931262	<i>kg</i>
Calado	18	<i>m</i>
Diámetro cilindros ext.	11.97	<i>m</i>
Diámetro cilindros int.	8.015	<i>m</i>
Lado de la base (triang.)	65.905	<i>m</i>
Centro gravedad de la base	15.47	<i>m</i>
Capacidad de la OWC	1150	<i>KW</i>
Diámetro ext. de la OWC	17.99	<i>m</i>
Diámetro int. de la OWC	11.97	<i>m</i>
Profundidad del agua	105	<i>m</i>
Peso del sistema de anclaje	186	<i>kg/m</i>
Longitud de los cables de anclaje	400 y 600	<i>m</i>
Número de líneas de anclaje	4	<i>ud</i>

Tabla 9. Dimensiones del dispositivo completo



5.2.3. Resultados

En la siguiente tabla se muestran resumidos los ensayos llevados a cabo:

Wind Speed (m/s)	Waves		Current	Depth (m)	Wave spectrum	Scale factor	Orifice R1,R2,R3,R4,R5 (m)
	Height (m)	Period (s)					
0	3	8	-	105	REG	1/35	closed/closed/closed/closed/closed
0	3	10	-	105	REG	1/35	closed/closed/closed/closed/closed
0	3	12	-	105	REG	1/35	closed/closed/closed/closed/closed
0	3	14	-	105	REG	1/35	closed/closed/closed/closed/closed
0	3	16	-	105	REG	1/35	closed/closed/closed/closed/closed
0	3	18	-	105	REG	1/35	closed/closed/closed/closed/closed
0	3	20	-	105	REG	1/35	closed/closed/closed/closed/closed
0	3	22	-	105	REG	1/35	closed/closed/closed/closed/closed
0	3	25	-	105	REG	1/35	closed/closed/closed/closed/closed
0	3	8	-	105	REG	1/35	0.033/ closed/closed/closed/closed
0	3	10	-	105	REG	1/35	0.033/ closed/closed/closed/closed
0	3	12	-	105	REG	1/35	0.033/ closed/closed/closed/closed
0	3	14	-	105	REG	1/35	0.033/ closed/closed/closed/closed
0	3	16	-	105	REG	1/35	0.033/ closed/closed/closed/closed
0	3	18	-	105	REG	1/35	0.033/ closed/closed/closed/closed
0	3	20	-	105	REG	1/35	0.033/ closed/closed/closed/closed
0	3	22	-	105	REG	1/35	0.033/ closed/closed/closed/closed
0	3	25	-	105	REG	1/35	0.033/ closed/closed/closed/closed
0	3	8	-	105	REG	1/35	0.02/ closed/closed/closed/closed
0	3	10	-	105	REG	1/35	0.02/ closed/closed/closed/closed
0	3	12	-	105	REG	1/35	0.02/ closed/closed/closed/closed
0	3	14	-	105	REG	1/35	0.02/ closed/closed/closed/closed
0	3	16	-	105	REG	1/35	0.02/ closed/closed/closed/closed
0	3	18	-	105	REG	1/35	0.02/ closed/closed/closed/closed
0	3	20	-	105	REG	1/35	0.02/ closed/closed/closed/closed
0	3	22	-	105	REG	1/35	0.02/ closed/closed/closed/closed
0	3	25	-	105	REG	1/35	0.02/ closed/closed/closed/closed
0	3	8	-	105	REG	1/35	0.033/0.033/0.033/0.033/0.033
0	3	10	-	105	REG	1/35	0.033/0.033/0.033/0.033/0.033
0	3	12	-	105	REG	1/35	0.033/0.033/0.033/0.033/0.033
0	3	14	-	105	REG	1/35	0.033/0.033/0.033/0.033/0.033
0	3	16	-	105	REG	1/35	0.033/0.033/0.033/0.033/0.033
0	3	18	-	105	REG	1/35	0.033/0.033/0.033/0.033/0.033
0	3	20	-	105	REG	1/35	0.033/0.033/0.033/0.033/0.033
0	3	22	-	105	REG	1/35	0.033/0.033/0.033/0.033/0.033
0	3	25	-	105	REG	1/35	0.033/0.033/0.033/0.033/0.033

Tabla 10. Tabla resumen de los ensayos realizados.

El siguiente esquema muestra la distribución de los orificios en cada columna de agua oscilante, así como la orientación que teóricamente debería tener la plataforma respecto a la dirección de procedencia del oleaje:

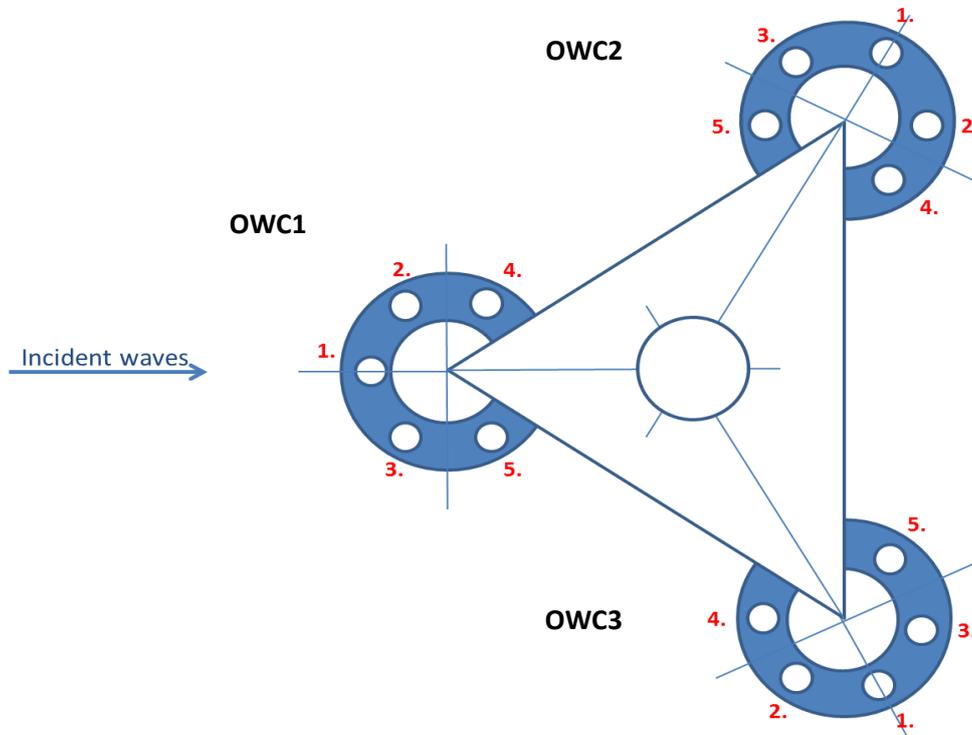


Ilustración 27. Esquema disposición OWCs en la plataforma

Los ensayos llevados a cabo para calibrar los coeficientes de fricción de las OWCs fijas se han hecho fijando la posición de la plataforma y estudiando el movimiento interior de una supuesta masa de agua constante. Estos ensayos se han llevado a cabo para tres situaciones de apertura de orificios:

- CHAMBER 1: Todos los orificios totalmente cerrados
- CHAMBER 2: Orificio 1 parcialmente abierto ($R= 0,02$ m) y el resto cerrados.
- CHAMBER 3: Orificio 1 totalmente abierto ($R= 0,033$ m) y el resto cerrados.
- CHAMBER 4: Todos los orificios abiertos por completo.

Si se superponen los resultados obtenidos para estas 3 situaciones se aprecia como la variación de la superficie libre dentro de la cámara es inapreciable mientras que la variación de presión va en ascenso. Esto es, con los 5 orificios abiertos no se produce variación de presión en las cámaras ya que el flujo atraviesa libremente. Sin embargo, cuando se cierran 4 de los orificios y el orificio 1 permanece totalmente abierto, la variación de presión es pequeña, pero existe.



Por último, si el orificio 1 se abre parcialmente ($R= 0,02$ m) y el resto se mantienen cerrados la presión interior varía significativamente debido a la obstrucción que se encuentra el aire para atravesar la plataforma.

Por otro lado, para identificar los coeficientes de fricción de la plataforma se han utilizados dos situaciones de apertura de orificios:

- OWCs abiertas los 5 orificios abiertos al máximo posible ($R= 0,033$ m). Situación sin presión.
- OWCs cerradas los 5 orificios cerrados por completo. En este caso la plataforma se comportaría como cualquier cuerpo flotante.

A partir de los resultados de los coeficientes de fricción obtenidos para cada situación por separado, a la hora de validar el modelo se han utilizados estas mismas configuraciones de apertura de orificios tanto en el modelo numérico como en el experimental: todos los orificios totalmente abiertos, el orificio 1 totalmente abierto y el resto cerrados y el orificio 1 parcialmente abierto y el resto cerrados.



6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Mediante la calibración y validación del modelo numérico se pretende que este se ajuste al comportamiento que presenta la plataforma objeto de estudio. Para ello, se han empleado los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados en el tanque de oleaje del IHCantabria como referencia y, a partir de estos, se ha procedido al ajuste del modelo numérico hasta hacerlo coincidir con lo observado en laboratorio. Es decir, una vez extraídos los datos experimentales del movimiento de la plataforma en laboratorio el objetivo es llegar a calibrar una serie de parámetros para crear un modelo numérico que represente el movimiento visto en laboratorio.

En el modelo numérico empleado para este caso, como se ha señalado en el apartado 5.1, se han asumido una serie de simplificaciones que obvian ciertos procesos físicos que sí estarán presentes en la interacción plataforma-oleaje. Es por esto por lo que se hace necesario emplear unos coeficientes de calibración; para simular el efecto de los fenómenos que no se han tenido en cuenta en el modelo numérico empleado.

Con tal objetivo aparecen, en primer lugar, los **Coefficientes de Damping lineal y no-lineal** (K_l y K_{nl}) para cada caso de estudio. En diversos estudios se ha visto como la fricción se puede representar mediante estos dos coeficientes, uno proporcional a la velocidad del cuerpo (k_l) y el otro proporcional a la velocidad al cuadrado (k_{nl}) (Iturrioz, et al., 2014). Estos pretenden albergar el efecto de la viscosidad a la entrada de las cámaras, luego cuanto mayor sea este coeficiente más frenado estará el movimiento de la plataforma debido a las pérdidas por fricción. Esta fuerza aparece representada en la ecuación de Cummins (1) como $F_{fricción}(t)$ y se ha definido según aparece detallado en el apartado 5.1.1 del presente documento.

Además, se producen una serie de pérdidas cuando el aire atraviesa los orificios que son representadas mediante el **Coefficiente de descarga** (C_d). Este afecta a la evolución de la presión dentro de las cámaras según queda reflejado en la ecuación (3) del apartado 5.2.2. La calibración de este parámetro se ha realizado mediante ensayos en seco, tal y como se ha explicado en el mencionado apartado 5.2.2.

En el procedimiento de calibración de estos parámetros se va comprobando el correcto comportamiento del dispositivo en sus distintas configuraciones y se obtendrán los valores óptimos, para cada grado de libertad (DOF). La aceptación de los coeficientes de amortiguamiento como buenos dependerá del error que estos presenten respecto a los datos experimentales registrados. Para ello, se ha calculado el error (%):

$$E(\%) = \frac{Hmo^{mod} - Hmo^{lab}}{Hmo^{lab}} * 100$$



Para este caso de estudio se ha fijado un error máximo aceptable del 15% con el fin de ajustar lo máximo posible el comportamiento simulado mediante el modelo numérico al observado en laboratorio.

A continuación se presentan dichas configuraciones y los parámetros correspondientes a cada ensayo realizado:

- Calibración en seco de C_d
- Calibración de K_I y K_{nI} para las OWCs con la plataforma fija
- Calibración de K_I y K_{nI} de los DOFs de la plataforma mediante ensayos de decay con las OWCs abiertas
- Calibración de K_I y K_{nI} de los DOFs de la plataforma mediante ensayos de decay con las OWCs cerradas

Una vez calibrado el modelo numérico tanto para OWCs abiertas como para cerradas, se procede a la validación del mismo. En esta etapa se comprueba el comportamiento de la plataforma (configuraciones: OWCs abiertas ($R=0,033$ m), cerradas ($R=0$ m) y parcialmente abiertas ($R= 0.02$ m)) ante un oleaje incidente regular o irregular. Habiéndose realizado las siguientes verificaciones:

- OWCs abiertas:
 - ✓ Oleajes regulares
 - ✓ Oleajes irregulares
- OWCs cerradas:
 - ✓ Oleajes regulares
 - ✓ Oleajes irregulares
- OWCs parcialmente abiertas:
 - ✓ Oleajes regulares
 - ✓ Oleajes irregulares

Tras verificar que la plataforma se comporta adecuadamente ante diversas condiciones impuestas, queda justificada su utilidad para distintas situaciones y localizaciones. La situación más representativa de productividad de este tipo de plataformas flotantes es con cámaras parcialmente abiertas, con anclajes de tipo dinámico y en presencia de oleaje incidente regular o irregular. Sin embargo, por cuestiones de supervivencia del dispositivo ante temporales extremos, el comportamiento del mismo en su configuración de cámaras cerradas es fundamental.

En cuanto al sistema de anclajes, en este estudio se han considerado anclajes de tipo dinámico; es decir, se ha tomado en cuenta la propia dinámica de las catenarias (estas también tienen su propio movimiento). Para ello, deberán incluirse nuevas ecuaciones en el modelo numérico que caracterizarán el comportamiento del sistema completo (plataforma – OWC- anclajes), como se explica en el apartado 4.1.1 del presente documento. Las fuerzas correspondientes a los anclajes dependerán de las características de las catenarias que sujetan la plataforma así como de la distancia entre el anclaje de dichas catenarias y el propio cuerpo flotante, y formarán parte de las fuerzas externas de la ecuación de Cummins (1).

Además, se incluye un **Coefficiente de fricción por fondo** que en la simulación se corresponde con un muelle que provoca una fuerza de elevación. Esta fricción por fondo pretende representar la existencia del fondo marino sobre el que se apoya la catenaria (por supuesto, en ningún caso podría atravesarlo en la simulación realizada); siendo imprescindible la inclusión de este coeficiente en el modelo debido a que este no identifica la existencia del fondo. De esta manera, se consigue situar virtualmente la catenaria apoyada en el fondo en la parte que corresponda en cada caso y así a la hora de considerar el peso de la catenaria, solo influirá la parte correspondiente a la hipotética línea de la cadena que está por encima del fondo.

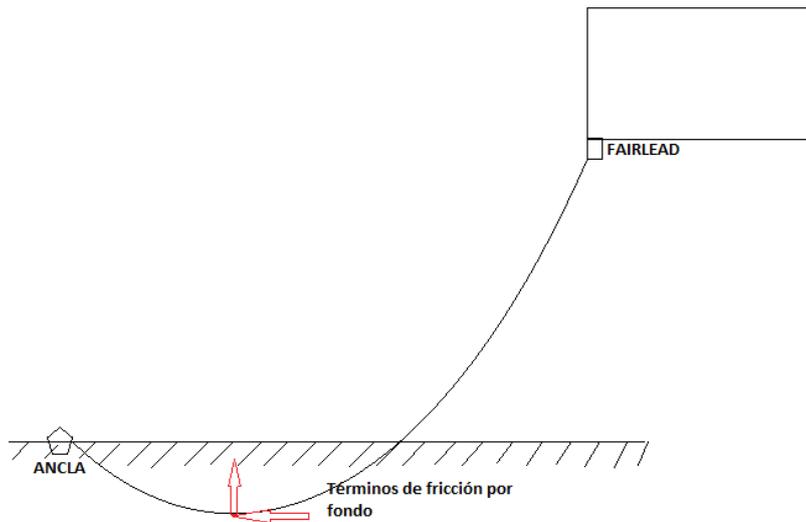


Ilustración 28. Esquema representativo del concepto de Coeficiente de fricción por fondo



6.1 Calibración hidrodinámica de las OWCs Fijas

Esta calibración se refiere a la situación en la que la plataforma está fija y solo se mueven las OWCs. Únicamente se estudia la situación en la que todos los orificios están totalmente abiertos (Configuración 4: R1, R2, R3, R4, R5 = 0.033 m), es decir, el aire atravesaría libremente los agujeros, teniendo en cuenta la viscosidad en la entrada de la cámara. De esta manera se evita la aparición de la componente neumática que induciría la cámara. Como ya se ha mencionado anteriormente, para esta situación la variación de presión dentro de la OWC es despreciable ya que el aire circula libremente a través de estos orificios.

Mediante este ensayo se analiza el movimiento de la masa de agua dentro de la cámara de forma aislada al movimiento que las OWCs tendrían respecto al de la propia plataforma; sin ningún tipo de presión dentro de las cámaras.

Por otro lado, según lo reflejado en [Iturrioz, et al. \(2014\)](#), empleando los resultados experimentales como referencia, se pueden calibrar ambas fuerzas de damping (kl y knl). En cambio, si partimos de la idea que presenta [Babarit et al. \(2012\)](#), las pérdidas viscosas son consideradas como una función cuadrática de la velocidad vertical de la masa de agua. Por lo que, podría ser suficiente con la calibración de Knl. Es por esto por lo que este caso se ha procedido a la calibración del coeficiente no lineal en primer lugar, obteniendo unos resultados de calibración del modelo razonablemente buenos, por lo que no se ha considerado necesario calibrar el coeficiente lineal.

El proceso de calibración se ha hecho por partes; es decir, en primer lugar se ha buscado el coeficiente de fricción no-lineal óptimo para la primera OWC (knl1) de forma independiente a los knl2,3 para hacer un primer acercamiento de valores. Una vez obtenido dicho valor, se ha procedido al calibrado de los valores de las columnas 2 y 3 (Knl 2,3) a partir del knl 1 óptimo previamente determinado. Cabe destacar que en este proceso de calibración se ha supuesto que estos valores (knl2 y knl3) son iguales debido a que, al estar situados respecto a la primera simétricamente y a la misma distancia, la radiación que les llega teóricamente es la misma. Sin embargo, a la hora de calcular el error conjunto (ver Tabla 11) se puede comprobar como este no es igual para estas dos columnas debido a pequeñas imprecisiones de las células de medición en el ensayo experimental.

La aceptación de un valor de knl dependerá del error que este produzca respecto al resultado experimental, obtenido con ayuda del Matlab, como se ha detallado en el apartado anterior. En este caso, al haber tomado como valor límite de error aceptable un 15%, para las columnas 2 y 3 se ha tenido en cuenta la media de los errores de las mismas ya que, como se ha comentado anteriormente, se debe considerar la posible imprecisión de medida en el ensayo de laboratorio.



Una vez obtenidos los valores de knl1 y knl2,3 mediante el procedimiento anteriormente expuesto, y obtenida la calibración conjunta, para el sistema de plataforma fija y columnas oscilantes, se verifica que para cada periodo analizado los knl de las 3 columnas tengan un error inferior al 15% respecto lo registrado en laboratorio respectivamente.

T	knl1	knl2,3	Error (%)		
			OWC1	OWC2	OWC3
10	10000	415720	4,1406	24,2019	11,8445
12	2500000	388230	7,2901	10,6764	-14,6755
14	2534520	371650	-2,1167	2,4982	4,5477
16	2837200	3887500	4,7428	-2,2142	-1,2391
20	3166200	10735000	0,25422	13,8959	8,9433
22	19404000	13474000	3,1455	0,51562	-4,7589

Tabla 11. Calibración conjunta de los knl con el error correspondiente respecto a cada columna oscilante (Emed< 15%)

Una vez se ha logrado, para cada periodo, el valor conjunto calibrado se representa cada coeficiente gráficamente en función del peralte, tal y como se muestra en las siguientes figuras 1 y 2:

$$p = \text{peralte} = \frac{H}{L}, \text{ donde "H" es la altura de ola y "L" la longitud de ola}$$

El objetivo de la siguiente presentación gráfica de los valores obtenidos de la calibración individual, por periodos, es lograr una ley representativa del coeficiente de fricción no lineal de cada columna oscilante en función del peralte. De esta manera, se podrán obtener los coeficientes de fricción para diversas condiciones de oleaje y así extrapolar el comportamiento (tras haber sido validado) de la plataforma a nuevas situaciones de estudio. Para ello, se procede a ajustar dichos puntos a una ley que represente el comportamiento de la estructura para cada caso aisladamente (knl1 y knl 2,3) y así poder generar nuevas gráficas representativas para el modelo calibrado.

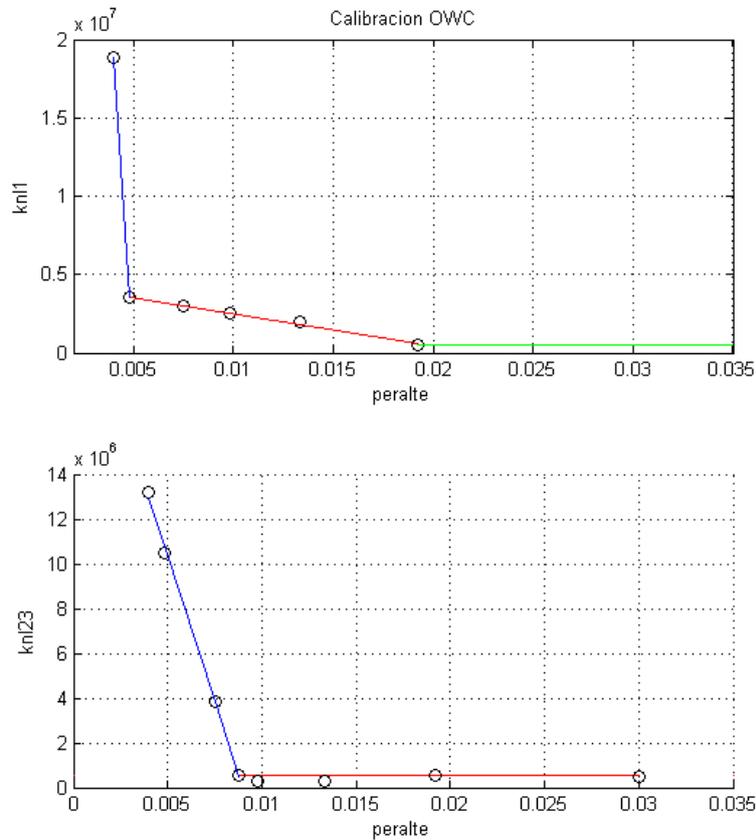


Figura 1. Curvas representativas de los coeficientes cuadráticos del modelo en función del peralte de ola, para la primera columna (knl1) y para las columnas posteriores (knl2,3).

A partir de estas curvas obtenemos las siguientes leyes representativas:

✚ Knl1

$$9.1653e7 - 1.8346e10 p; \frac{H}{L} < 0.0048$$

$$4.6178e6 - 2.0997e8 p; 0.0048 > \frac{H}{L} > 0.0192$$

$$0; \frac{H}{L} > 0.0192$$

✚ Knl23

$$2.3267e7 - 2.5982e9 p; \frac{H}{L} < 0.0088$$

$$knl=540.000; \frac{H}{L} > 0.0088$$



Finalmente, una vez definidos los valores óptimos para cada situación aisladamente, se busca la solución óptima conjunta (a partir de las rectas de las leyes de comportamiento general definidas) que será la que interese a la hora de caracterizar el comportamiento de las OWCs. Para ello, se toman los valores referenciales calibrados (Tabla 11) y se comprueba el error respecto a las leyes definidas (Figura 1), para cada periodo, empleando ambos términos, knl1 y knl2,3 de manera conjunta. En los casos en los que el error supere el rango aceptable, deberán variarse las combinaciones de knl1 y knl23 llegando a un ajuste final aceptable.

En la siguiente tabla se presenta la calibración final de knl1 y knl 2,3 para las OWCs con errores comprendidos dentro del rango aceptable $E < 15\%$, habiendo hecho las correspondientes variaciones de los coeficientes de fricción no-lineal a partir de las ecuaciones características obtenidas anteriormente.

Modelo Ajustado

	knl1	knl2,3	Error		
			OWC1	OWC2	OWC3
c8	w2w<lab				
c10	584280	540000	-8,6089	20,2479	8,2857
c12	1816800	540000	17,4586	8,663	-16,2285
c14	2560094	540000	-2,4488	1,659	3,6915
c16	3043025	3782500	3,2846	-1,5293	-0,54729
c18	w2w<lab				
c20	3567950	10278000	-0,84353	15,3655	10,3491
c22	18269000	12876200	5,5052	2,0143	-3,3389

Tabla 12. Calibración óptima conjunta a partir de las leyes representativas del modelo propuesto

Para los periodos de 8 y 18 segundos la curva correspondiente a los resultados experimentales es mayor que la correspondiente al modelo numérico, por lo que en ningún caso se consideraría añadirle coeficiente de fricción porque estaríamos desajustando el modelo aún más. En la práctica se tomarán valores muy pequeños de knl.

En la siguiente figura se muestra el resultado obtenido de la calibración final para el periodo de 22 segundos con $kn1= 1826900$ y $kn2,3=12876200$. Mediante Matlab se presenta una comparativa entre los resultados de laboratorio (línea negra), resultados numéricos sin fricción (línea roja) y la calibración numérica con los parámetros de fricción que se han fijado (la línea azul).

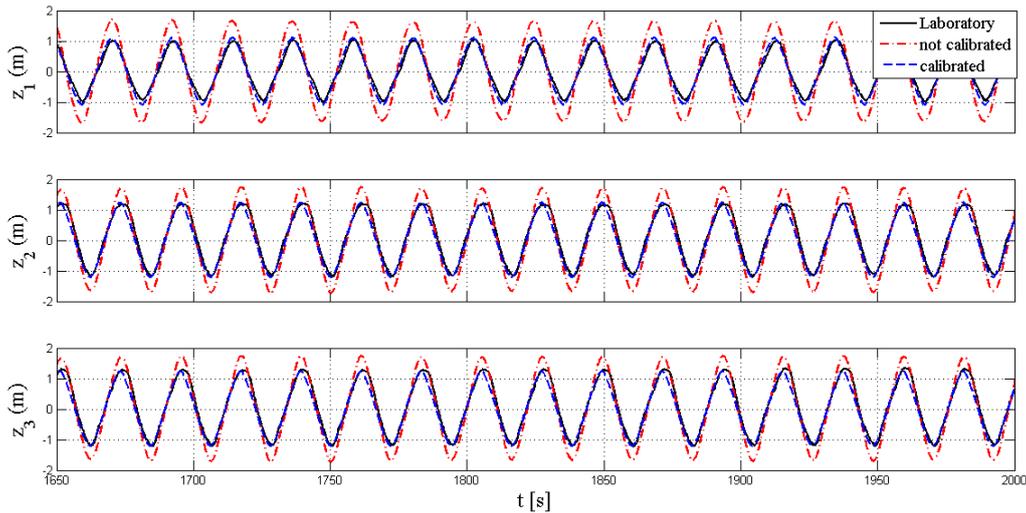


Figura 2. Resultado de la variación de la superficie libre dentro de cada OWC para el periodo de 22s.

Para la verificar el ajuste obtenido se hace un zoom de cada OWC de la zona más regular de toda la serie de 2500 segundos simulados numéricamente (con el fin de agilizar la computación).

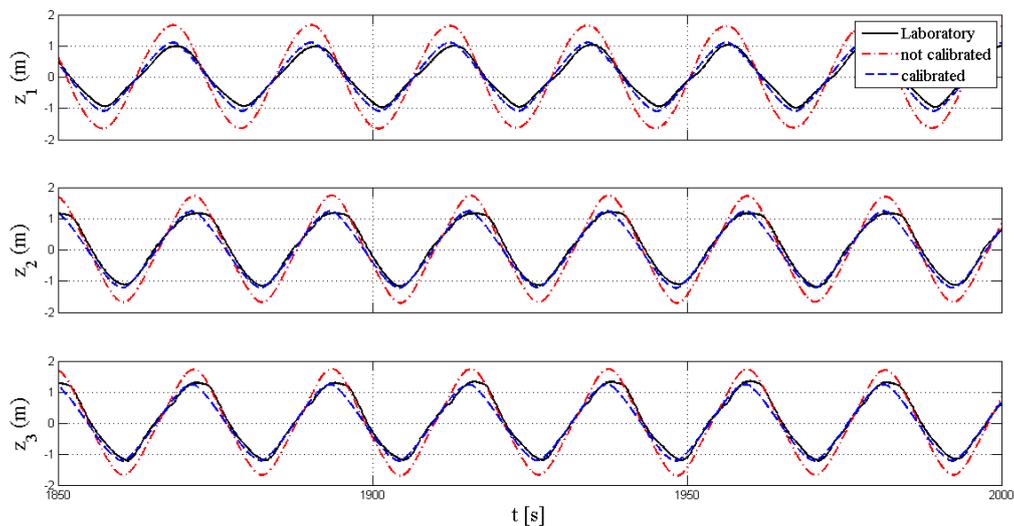


Figura 3. Zoom entre los 1850 y 2000 m de la serie temporal para el periodo de 22 s.



En la figura 3 se aprecia perfectamente el nivel de precisión ganado con la calibración de los coeficientes de fricción no-lineal mediante la representación del movimiento de cada OWC obtenido antes de calibrar los coeficientes (línea roja) y una vez calibrados (línea azul) frente al registro experimental (línea negra) para el mismo caso de estudio.

Al ejecutar el programa MatLab correspondiente que se encarga de dibujar los resultados de laboratorio frente a los obtenidos numéricamente con y sin la calibración de los coeficientes de fricción, se obtienen los errores (%) para cada caso respecto a los resultados experimentales.

Como se puede ver a continuación, esta calibración ($T=22\text{ s}$) está dentro del rango aceptable ya que una vez realizada la calibración del Knl los errores para las 3 OWCs son inferiores al 15% máximo establecido.

		<i>Diferencia entre laboratorio y numérico (%)</i>	
		<i>Sin Fricción</i>	<i>Con Fricción</i>
T =22 s	OWC 1	58,096	5,505
	OWC 2	34,231	2,014
	OWC 3	27,203	(-) 3,338

Tabla 13. Error en % entre lectura de laboratorio y los datos obtenidos del modelo numérico para el periodo de 22 s.

En la siguiente tabla aparecen reflejados los errores (%) obtenidos para el resto de periodos con su OWC correspondiente:

		<i>Diferencia entre laboratorio y numérico (%)</i>	
		<i>Sin Fricción</i>	<i>Con Fricción</i>
T= 10 s	OWC 1	9,3632	(-) 7,947
	OWC 2	39,925	20,683
	OWC 3	25,341	8,106
T= 12 s	OWC 1	42,751	13,385
	OWC 2	10,283	5,834
	OWC 3	(-) 16,034	(-) 19,424
T= 14 s	OWC 1	24,014	(-) 2,271
	OWC 2	29,158	1,362
	OWC 3	32,137	3,766
T= 16 s	OWC 1	22,912	6,482
	OWC 2	21,685	1,430
	OWC 3	22,967	2,495
T= 20 s	OWC 1	1,086	(-) 0,887
	OWC 2	44,279	15,602
	OWC 3	39,621	11,861

A continuación se presentan los resultados correspondientes al periodo $T=10$ s:

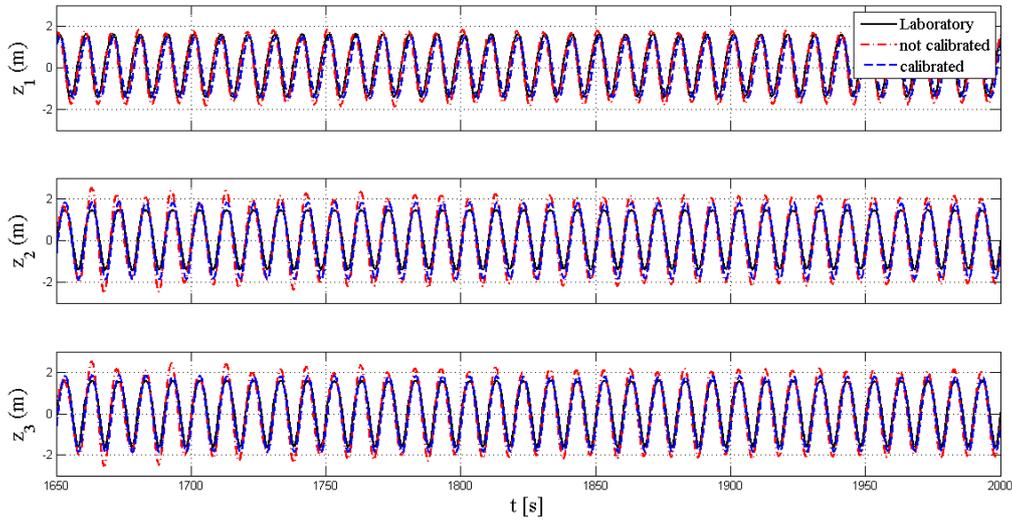


Figura 4. Resultado de la variación de la superficie libre dentro de cada OWC para el periodo de 10s.

Con el fin de ver con mayor precisión el ajuste obtenido, respecto a laboratorio, mediante la inclusión del coeficiente de fricción, se hace un zoom de los resultados obtenidos entre los 1850 y 2000 s:

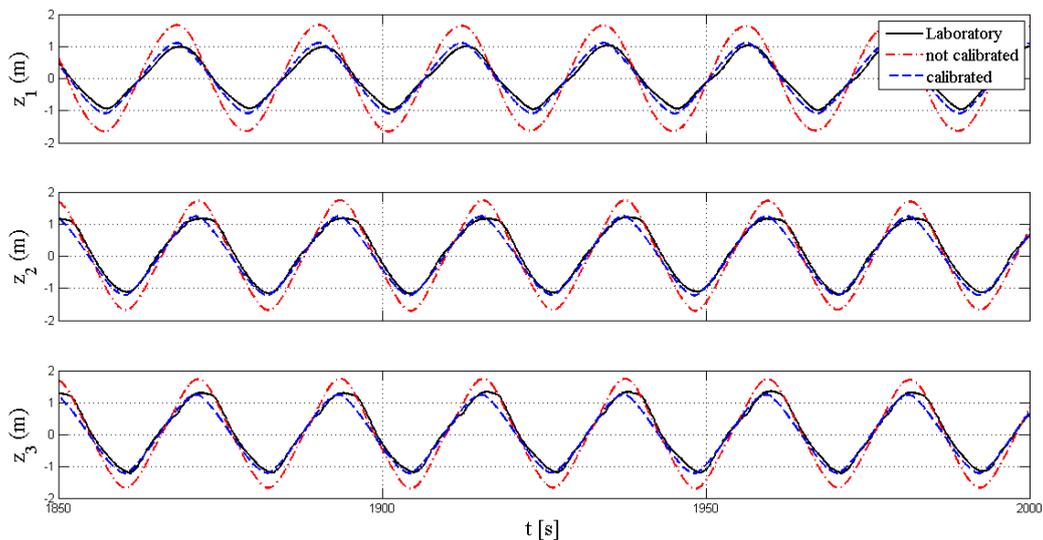
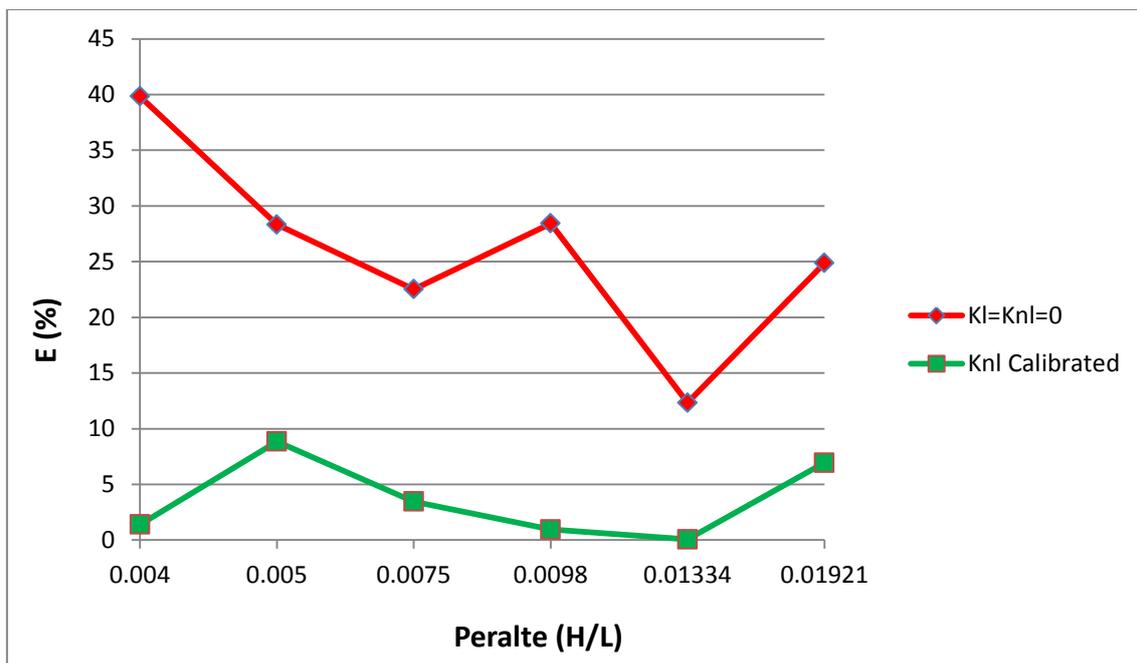


Figura 5. Resultados entre los 1850 y 2000 m de la serie temporal para el periodo de 10 s.



Del mismo modo que se ha podido apreciar en los resultados para el periodo de 22 segundos, en este caso el nivel de precisión una vez calibrados los coeficientes de fricción de las OWCs Fijas es prácticamente perfecto.

A continuación, se muestra una gráfica que representa de forma clara la evolución en el error respecto a los registros de laboratorio que se produce gracias a la calibración realizada de los coeficientes no lineales en función del peralte de ola y de los errores (%).



Mediante esta representación gráfica de los errores antes y después de la calibración se aprecia claramente la mejora sustancial obtenida con esta calibración en el ajuste del modelo numérico respecto al experimental.

6.2 Calibración hidrodinámica de la plataforma

En la calibración de la plataforma flotante, se hace uso del *Decay test* preparado con los datos experimentales obtenidos de los ensayos de laboratorio, llevados a cabo en el tanque del CCOB del IHCantabria y comparándolos con los resultados numéricos obtenidos en la simulación. Dicho ensayo experimental, se fundamenta en crear el desequilibrio en el cuerpo de estudio en función al grado de libertad que se esté calibrando; es decir, se aplica una perturbación en un determinado sentido sobre el cuerpo en reposo y se deja oscilar hasta que recupere su posición de equilibrio. El movimiento de la plataforma incluye 6 DOFs, al igual que cualquier cuerpo flotante.

Para llevar a cabo la calibración del movimiento de la plataforma flotante, en primer lugar se ajustan los coeficientes de fricción lineal y no-lineal (k_l y k_{nl}) de la plataforma, con las cámaras



totalmente abiertas y con cámaras cerradas. Para ello, se lanzan una serie de valores que proporcionen un barrido de posibles combinaciones para cada periodo de oleaje y configuración de plataforma. De este modo, tras la representación gráfica para cada par de valores de k_l y k_{nl} , se puede obtener el rango de valores a partir del cual el modelo es más susceptible a variar.

A partir de aquí, se trata de llegar a los valores de k_l y k_{nl} que mejor se ajusten al movimiento presentado por la plataforma en los ensayos experimentales para cada DOF.

Como se ha explicado anteriormente, en esta calibración se deberá tener en cuenta el efecto que produce en el movimiento del sistema la presencia de la masa de agua dentro de las cámaras, así como el agua que acompaña al movimiento del cuerpo. Actúa como masa añadida al sistema y deberá calibrarse en cada caso de estudio (periodo y DOF) para obtener un buen ajuste en el comportamiento del conjunto.

Además, a la hora de emplear el modelo de teoría potencial se posiciona el cuerpo en una posición que no es la que le correspondería, ya que se tiene en cuenta el peso de las catenarias. Ese peso no irá incluido en la masa del modelo, pero sí que interviene en el volumen de agua desplazada por el cuerpo. Al incluir el sistema de fondeo, ese peso vuelve a actuar sobre el cuerpo, por lo que lo estaríamos aplicando 2 veces, por lo que se introduce este término para restar esta componente una vez. Esta se representa actuando en los 4 puntos correspondientes a la unión de los anclajes con la plataforma.

Para la configuración de OWCs abiertas (Configuración 4: los 5 orificios totalmente abiertos, $R=0.033$ m)), deberán incluirse los coeficientes de fricción de las OWCs fijas previamente calibrados con el fin de representar la influencia de la oscilación vertical (en Heave) de las columnas sobre el movimiento del dispositivo. Por lo que, esta configuración incluye 9 DOFs en total, 6 correspondientes al movimiento de la plataforma y otros 3 provenientes del movimiento del agua dentro de las cámaras (OWCs) a parte de las correspondientes a las líneas de anclaje. Al estar los orificios totalmente abiertos, el movimiento de las OWCs no influye en el movimiento de la plataforma.

En cambio, para la plataforma con las OWCs cerradas (Configuración 1 ($R= 0$)) estos coeficientes no necesitan ser incluidos ya que el aire no atraviesa los orificios (la plataforma se comporta como un cuerpo flotante). Luego, solo aparecerán 6 DOFS, los correspondientes al movimiento de la plataforma.

Por medio de la comparativa entre datos experimentales y numéricos para cada DOF (Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch y Yaw), mediante el Decay Test en MatLab, se ve gráficamente si los coeficientes de amortiguación empleados logran que el modelo numérico represente el comportamiento en laboratorio del cuerpo (damping, periodo, etc.).



En la figura 6 se presenta el resultado del modelo numérico correspondiente al movimiento en **Pitch** para **OWCs Abiertas**, y con valores insuficientes para k_l y k_{nl} ($k_l=4e4$ y $k_{nl}=9e9$). Posteriormente, la figura 7 presenta los resultados una vez que estos coeficientes son correctamente calibrados ($k_l=6e6$ y $k_{nl}=2e10$).

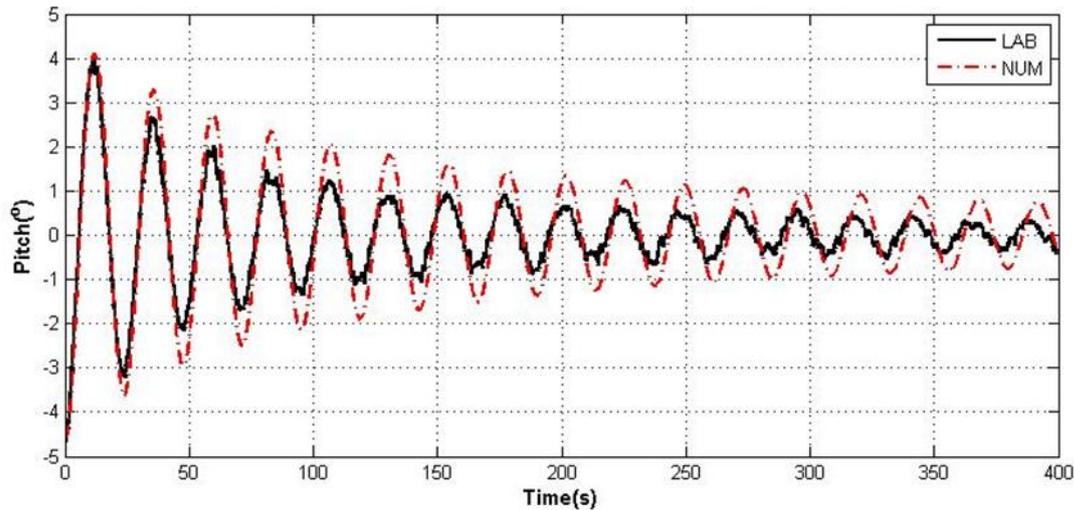


Figura 6. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta y movimiento en Pitch

En esta figura se aprecia como falta damping (el cuerpo precisa mayor fuerza de frenado) tanto en la parte derecha, correspondiente al estado regular (lineal), como en los momentos iniciales (comportamiento no-lineal). Según dicha comparación será necesario un valor algo mayor de los coeficientes de fricción lineal y no-lineal pero, en cambio, la fase se ajusta muy bien.

Tras añadir el amortiguamiento necesario, el ajuste final que se ha alcanzado es el representado en la siguiente figura, con valores de $k_l= 6e6$ y $k_{nl}=2e10$.

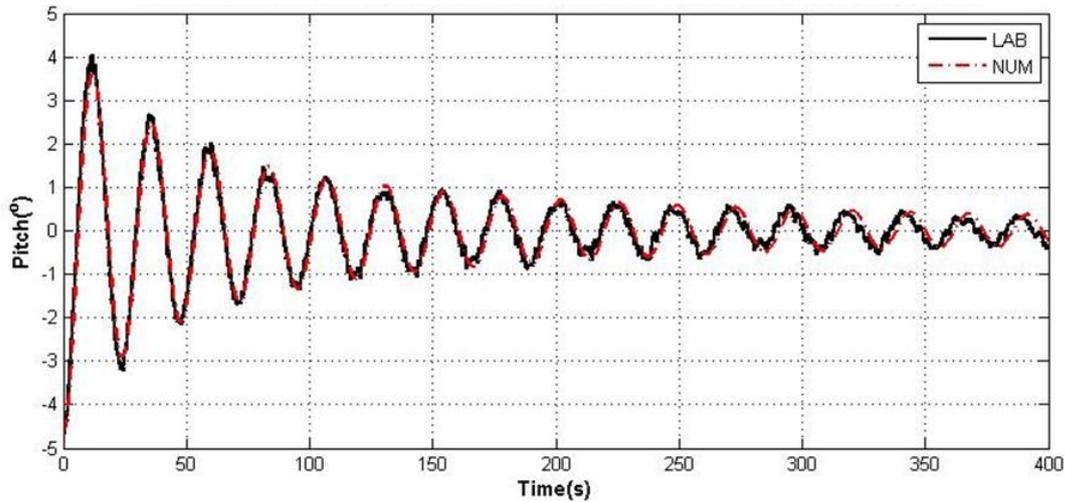


Figura 7. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta y movimiento en Pitch, una vez calibrados los coeficientes de fricción

En el caso de **OWCs Abierta** para el movimiento **Heave** con los valores de coeficientes de fricción $k_l = 1e5$ y $k_n = 9e6$, el resultado obtenido es el deseado ya que tanto el periodo como el damping están ajustados con gran precisión como se puede comprobar en la siguiente figura obtenida con MatLab.

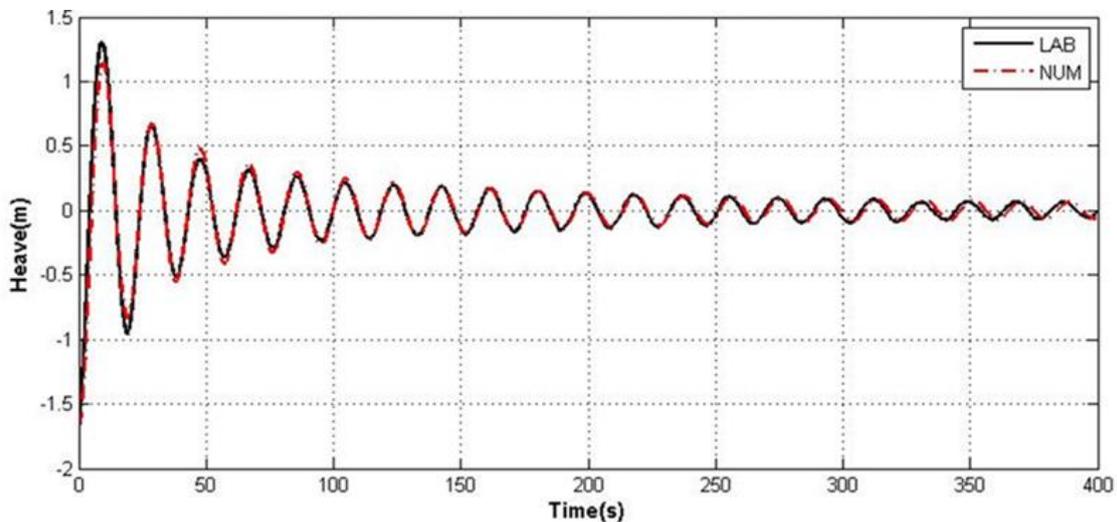


Figura 8. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta y movimiento en Heave, una vez calibrados los coeficientes de fricción

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, la configuración de la plataforma con las OWCs cerradas solo incluye 6 grados de libertad ya que el aire es considerado incompresible y no existe variación de presión del agua dentro de las cámaras; es decir, actúa como un cuerpo flotante. Caracterizar el comportamiento de la plataforma cuando los orificios están

totalmente cerrados es fundamental por varios motivos: por un lado, para conocer el comportamiento de la plataforma cuando este simplemente flotando y, por otro lado, porque ante situaciones críticas (por temporales fuertes, por ejemplo) se cierran los orificios con el objetivo de que el agua no pase a través de ellos y estropee las turbinas. En esta situación no estaríamos generando energía con las OWC pero tampoco ponemos en riesgo la integridad del sistema de OWCs.

En la siguiente figura 9 se muestra el resultado para el caso de **OWCs Cerradas** y movimiento **Surge** donde el ajuste final se obtiene con $k_l = 0e0$ y $k_{nl} = 5e5$:

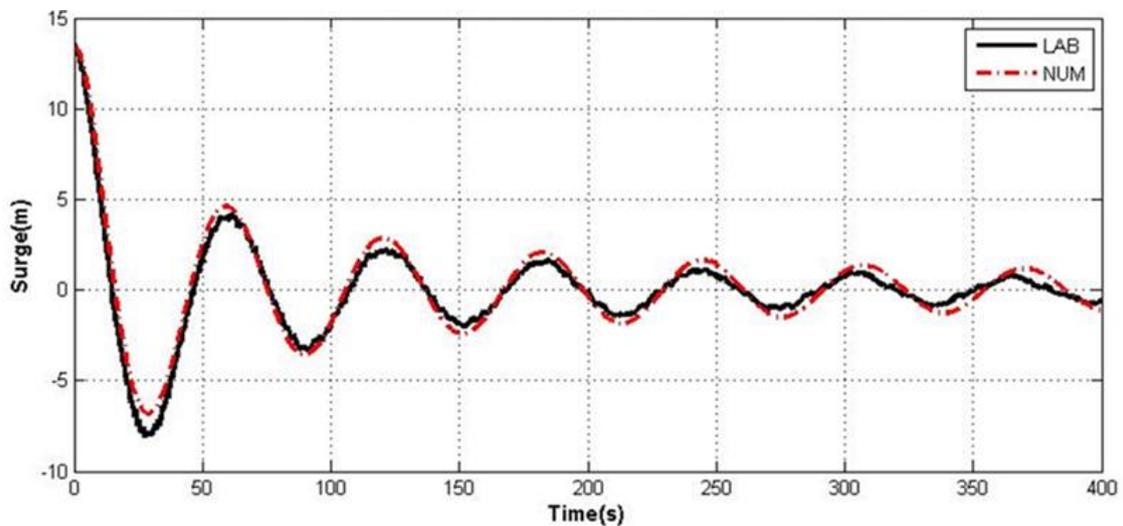


Figura 9. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma cerrada y movimiento en Surge

Como se puede comprobar mediante la gráfica en el tiempo para Surge, el ajuste también es muy preciso tanto para la zona de comportamiento lineal como para la no-lineal.

Una vez analizados todos los DOFs mediante MatLab con el Decay test, se obtienen los siguientes coeficientes de fricción, que se presentan en la Tabla 14, para cada grado de libertad que minimicen el error respecto a los resultados experimentales:



	Plataforma Abierta		Plataforma Cerrada	
	<i>kl</i>	<i>knl</i>	<i>kl</i>	<i>knl</i>
Surge	3e5	1e5	0e0	5e5
Sway	5e5	5e5	0e0	5e5
Heave	1e5	9e6	5e5	8e6
Roll	6e7	9e9	8e2	2e10
Pitch	6e6	2e10	2e7	2e10
Yaw	5e5	5e5	5e5	5e5

Tabla 14. Coeficientes calibrados para ambas configuraciones de plataforma (cámaras abiertas y cámaras cerradas)

En este conjunto de ensayos realizados, los resultados producidos por el modelo numérico se corresponden en su mayoría con lo observado en laboratorio, a excepción del Decay de **Sway** y **Yaw**. Para estos dos casos el acoplamiento entre ambos grados de libertad afecta más al modelo numérico que a la observación en laboratorio para ambas situaciones (plataforma abierta y plataforma cerrada). Es por esta razón por la que se ha procedido a un proceso de calibración simultánea para estos dos g.d.l mencionados. Para ello, partiendo de los coeficientes calibrados para el resto de g.d.l, se han ido variando a la vez los coeficientes de Sway y de Yaw hasta alcanzar la combinación de valores que mejor representación del movimiento obtenga respecto a lo observado en laboratorio. (conjunto de coeficientes que minimiza el acoplamiento entre ambos g.d.l).

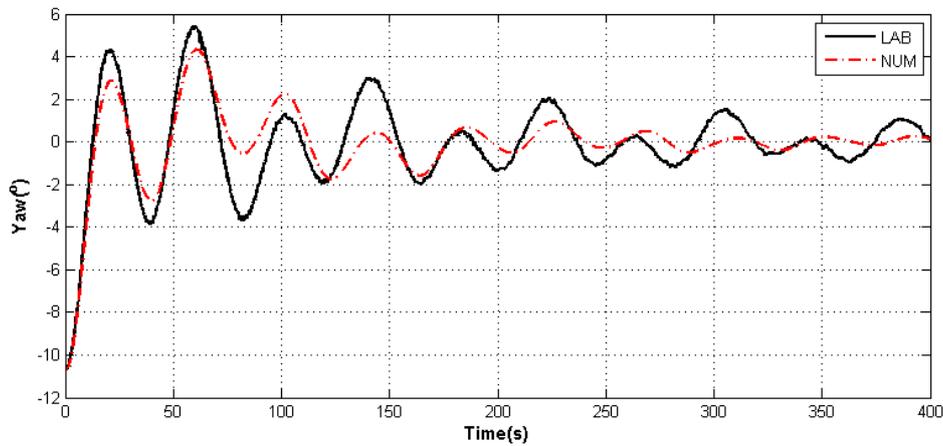


Figura 10. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta en la calibración conjunta de Sway y Yaw

Como puede comprobarse en el resultado obtenido para Yaw, la amplitud de oscilación (con el modelo numérico generado) sí va amortiguándose al par que lo hace en laboratorio.

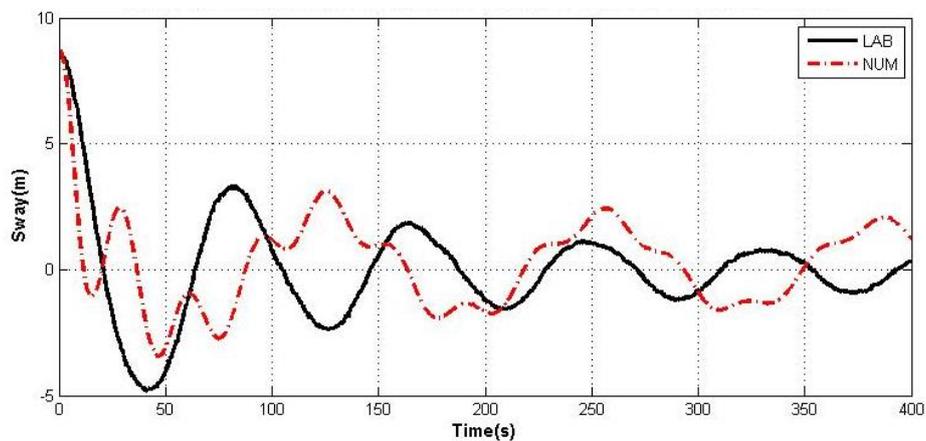


Figura 11. Resultado obtenido del Decay test para la configuración de plataforma abierta en la calibración conjunta de Sway y Yaw.

Al igual que se veía en la gráfica de Yaw, para el caso de Sway (en calibración conjunta con Yaw) se aprecia como en orden de magnitud se consiguen resultados concordantes, pero sin llegar a obtener una buena representación del comportamiento real del dispositivo. En este aspecto, debe tenerse en cuenta a la hora de analizar los resultados obtenidos y su aceptación que los principales grados de libertad de esta plataforma objeto de estudio son Surge, Heave y Pitch. Lo cual deja en segundo lugar los mencionados Sway y Yaw (además de roll), grados de libertad que presentan mucho mayor grado de acoplamiento entre ellos en el simplificado modelo numérico empleado.



Es por esto por lo que, mientras el orden de magnitud sea bueno (capaz de dar una idea del comportamiento de la plataforma) no existe motivo para desestimar la calibración realizada ya que, como se ha expuesto en el apartado 5.1, se ha empleado un modelo numérico muy simplificado del que se obtienen resultados buenos en un tiempo de computación aceptable. Aspecto este fundamental a la hora de estudiar la posible respuesta de la plataforma ante unas condiciones previstas o sobrevenidas, en vista a posibles paradas de emergencia por avería o paradas de mantenimiento. En estas situaciones el tiempo para obtener posibles fallos de producción o incoherencias en el comportamiento del dispositivo es un aspecto fundamental para tener información suficiente y tomar las decisiones oportunas a tiempo (como cerrar los orificios totalmente ante temporales extremos y así dejar de producir energía pero preservar la integridad del aparato).

Para algunos aspectos objeto de estudios más precisos (como el comportamiento del flujo a su paso a través de los orificios), existen modelos CFD (Computational Fluid Dynamic) que consiguen resultados con altos niveles de precisión pero que, a cambio, requieren un alto coste computacional.



6.3 Calibración numérica del PTO

La calibración del sistema Power Take-Off (PTO) es fundamental a la hora de conseguir una mayor eficiencia de la columna de agua oscilante. Debe ser capaz de convertir el flujo de aire que va tanto fuera como dentro de la cámara de recogida en energía. Según la ubicación de la plataforma, esta estará expuesta a diferentes condiciones tanto de oleaje como de viento, por lo que es preciso estudiar la configuración de plataforma más adecuada según la situación. Así, en condiciones extremas provocadas por temporales los orificios deberán permanecer totalmente cerrados para evitar posibles desperfectos en el sistema. Con esta configuración no se produce energía pero tampoco se pone en peligro la integridad del aparato ya que se comportaría como un cuerpo flotante en el mar. Lo único que permanecería en peligro serían las catenarias que debido a las condiciones de la mar podrían romperse dejando la plataforma a la deriva. Es por esto por lo que el correcto diseño de las líneas de anclaje y su capacidad de amortiguación se considera fundamental dentro del conjunto de la MUP.

Los sistemas PTO empleados para las OWCs están compuestos por turbinas de aire automáticas acopladas a un generador. Esta turbina genera una resistencia al flujo de aire que pasa a través de los orificios, comportándose como una fuerza de damping en la OWC. Esta depende del tipo de turbina y de la fuerza ejercida por el alternador.

En los modelos de flujo de aire convertidos a electricidad, el sistema de toma de fuerza consiste en una turbina bidireccional. Esto significa que la turbina siempre gira en la misma dirección independientemente de la dirección del flujo de aire, permitiendo que la energía se genere de forma continua. Se ha comprobado experimentalmente que en este estudio llevado a cabo la compresibilidad del aire es insignificante en la escala de trabajo empleada.

Por otro lado, a la hora de analizar la productividad de las turbinas es fundamental conocer las pérdidas que se producen (debido a varios fenómenos) cuando el aire atraviesa los orificios. Con el fin de albergar este conjunto de fenómenos que provocan pérdidas que, a su vez, disminuyen la presión del aire se incluye un **Coefficiente de descarga (Cd)** (que cuanto mayor sea el valor de Cd, mayor será la presión del aire dentro de las OWCs) en la entrada de la turbina (menor producción energética).

Tal y como se describe en la sección 4.2.2, el coeficiente de descarga (Cd) ha sido calibrado por un ensayo en seco hecho en una escala representativa de la realidad en el laboratorio del IHCantabria en el que se ha utilizado una abertura de orificio 40 mm de diámetro. A su vez, se han hecho diferentes simulaciones para comprobar la afección de este parámetro sobre la presión y superficie libre dentro de las cámaras. Según se ha podido comprobar este parámetro es muy sensible; es decir, influye mucho en la presión que se produce dentro de las cámaras siendo menos acusado el efecto en el movimiento de la superficie libre. Así, cuanto mayor es el valor del coeficiente de descarga, mayor es la presión dentro de las cámaras y menor la variación de superficie libre. Finalmente, se ha alcanzado un valor óptimo de **Cd=0,6** que será el empleado para la etapa de validación ante oleajes regulares e irregulares.



Por todo ello, tras llevar a cabo el estudio de la variabilidad en la producción de energía según la apertura de orificio y coeficiente de descarga, se considera la opción de adaptar la apertura de orificio según las condiciones del entorno de la plataforma en distintos periodos de tiempo. Esta regulación se hará siempre con un doble objetivo: por un lado el de maximizar la producción energética y, por otro lado, el de mantener las condiciones seguras de operatividad.

6.4 Validación del modelo

Para validar el diseño de plataformas se empleará SESAM, un modelo simplificado para el dominio de la frecuencia (Nemoh) y otro para el dominio del tiempo (IHwave2wire) elaborado en IH Cantabria. Durante este proceso de validación diferentes estados de mar serán simulados con el fin de obtener la respuesta dinámica de la plataforma y las cargas sobre el sistema de anclaje.

Por otro lado, la producción de energía de oleaje generada por las OWCs de la plataforma será analizada también mediante el modelo simplificado de dominio en el tiempo "IHwave2wire". El objetivo es optimizar la apertura de las cámaras de OWC, teniendo en cuenta la relación entre la producción de energía de las olas y la estabilidad de la plataforma flotante. Esto permitirá adecuar la apertura de los orificios a las condiciones locales según la ubicación del dispositivo con el objetivo de lograr la máxima eficiencia en la extracción de energía.

El principal objetivo de esta etapa de validación es hacer el estudio del caso en el que los orificios están parcialmente abiertos (la apertura de los orificios irá en función de la potencia de turbina que se pretenda instalar), con el fin de simular el estado real en el que se va a encontrar durante su funcionamiento la plataforma: turbinas situadas en esos orificios que son las encargadas de la generación de energía a partir de la oscilación del agua dentro de las propias columnas. Sin embargo, a modo de comprobación, se analiza también el movimiento de la plataforma para las configuraciones de plataforma abierta ($R=0,033$) y plataforma cerrada.

- OWCs abiertas:
 - ✓ Oleajes regulares
 - ✓ Oleajes irregulares

- OWCs cerradas:
 - ✓ Oleajes regulares
 - ✓ Oleajes irregulares

- OWCs parcialmente abiertas:
 - ✓ Oleajes regulares
 - ✓ Oleajes irregulares



Como ya se ha comentado en anteriores apartados, la turbina impone una resistencia a la salida y entrada del flujo haciendo que el aire contenido en la cámara ejerza como fuerza de amortiguamiento sobre el movimiento de la columna de agua durante los procesos de carga y descarga de la cámara. Dicha fuerza de amortiguamiento dependerá de la turbina y de la fuerza ejercida por el alternador, la cual puede ser modificada en el tiempo mediante un sistema de control diseñando para optimizar la producción energética. Claro está que en este caso, se deberá tener en cuenta la compresibilidad del aire con el fin de estudiar la producción de energía en cada situación. La evolución de la masa de aire dentro de dichas OWC puede ser modelada mediante la ecuación (3).

Para la correcta validación del modelo se comprueba, para oleajes regulares e irregulares, que el movimiento de la plataforma es el adecuado en función de los parámetros previamente calibrados.

Como se puede comprobar en las siguientes representaciones gráficas el modelo numérico es muy concordante con el modelo experimental; es decir, la plataforma se comporta según lo esperado mediante la simulación hecha con el modelo numérico desarrollado (dentro de las limitaciones propias de un modelo numérico simplificado).

6.4.1 Validación OWCs Abiertas

✚ Resultados movimiento de la plataforma ante Oleaje Regular incidente:

T=12 s

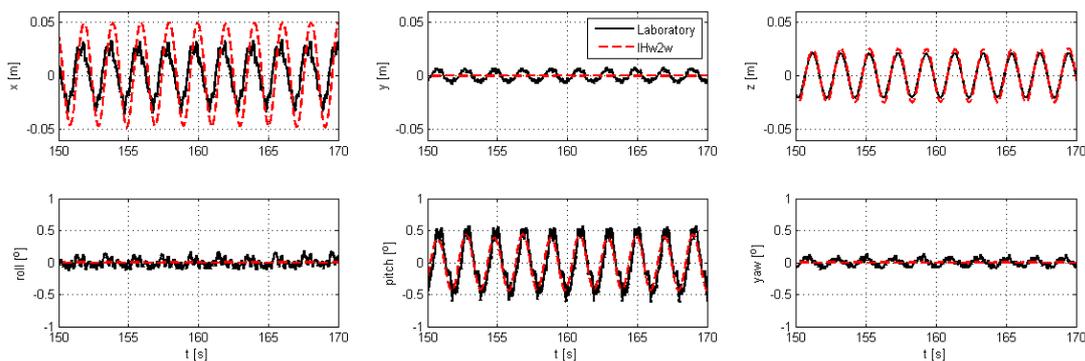


Figura 12. Resultado obtenido para los 6 DOFs en la configuración de OWCs abiertas

Como se puede comprobar en la figura anterior, los tres grados de libertad principales para esta plataforma (Surge, Heave y Pitch) son los que presentan movimientos acordes entre los resultados obtenidos del laboratorio con los que muestra el modelo numérico. En el resto de DOFs el movimiento es despreciable, por lo que en lo sucesivo solamente se presentarán los correspondientes a Surge, Heave y Pitch.



T=14 s

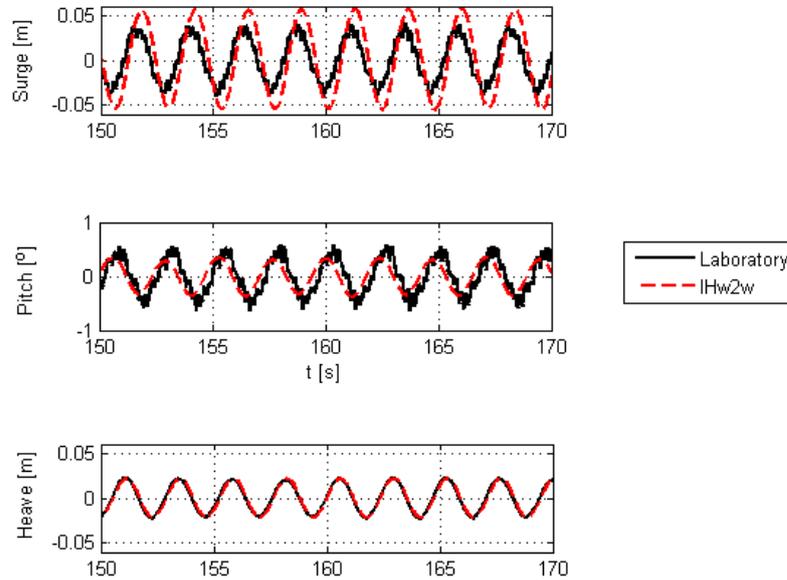


Figura 13. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales en la configuración de OWCs abiertas, T=14 s.

T=20 s

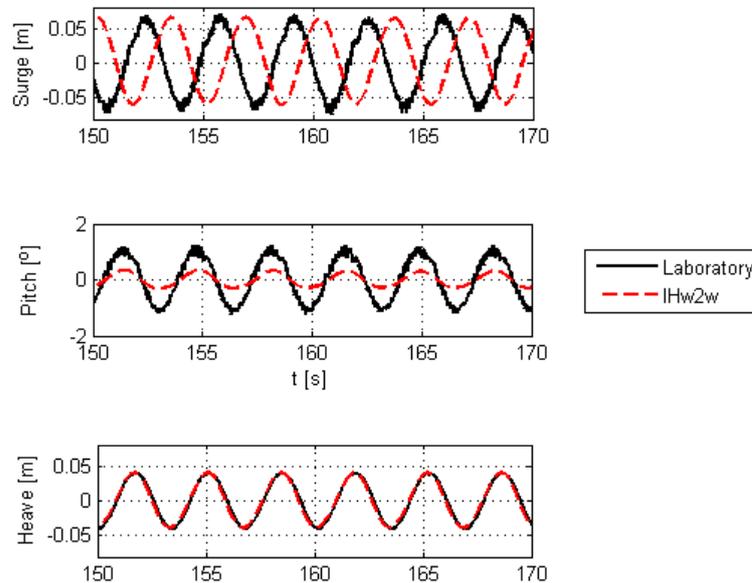


Figura 14. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales en la configuración de OWCs abiertas, T=20 s.

Como se puede apreciar en los tres periodos anteriormente presentados, los resultados para los 3 DOFs predominantes para esta plataforma los resultados obtenidos son muy buenos. Esto es, la simulación hecha mediante el modelo numérico (con los datos del oleaje (H y T)

regular incidente actuante) representa con gran precisión el comportamiento registrado en laboratorio con el mismo oleaje regular incidente. De hecho, el resultado en todos los casos para el movimiento en Heave es prácticamente igual al registrado en laboratorio, lo que indica que se ha conseguido una concordancia del modelo numérico muy precisa (el movimiento en Heave es el más representativo de esta plataforma multipropósito diseñada).

✚ Resultado movimiento de la plataforma ante Oleaje Irregular incidente:

T= 12.99 s

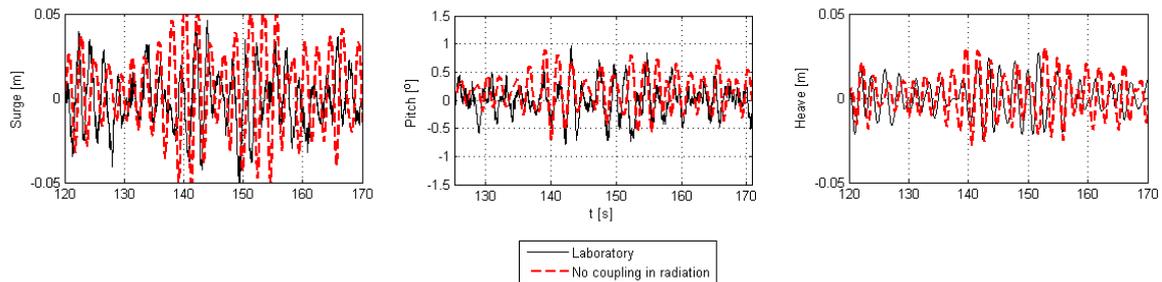


Figura 15. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales ante oleaje irregular incidente y periodo 12.99 s, OWCs abiertas

En este caso, las figuras muestran que ante un oleaje irregular incidente los movimientos que muestran el modelo numérico y los resultados de laboratorio obtenidos van perfectamente acoplados (las amplitudes en cada fracción de tiempo son muy semejantes en ambos registros), a falta de un mayor nivel de precisión lo cual podría venir provocado por las simplificaciones asumidas en el modelo numérico.

6.4.2. Validación OWCs Cerradas

✚ Resultado movimiento de la plataforma ante Oleaje Regular incidente:

T=8 s

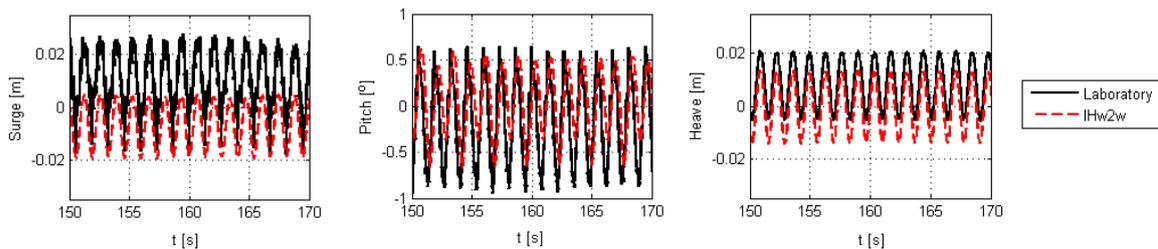


Figura 16. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales ante oleaje regular incidente y periodo 8 s, OWCs cerradas

T=20 s

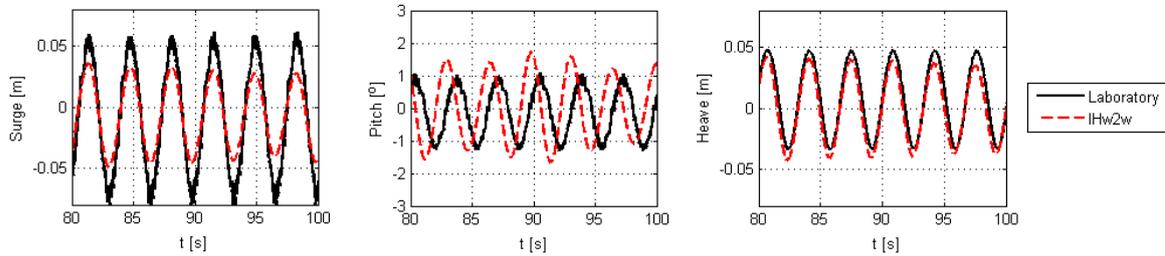


Figura 17. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales ante oleaje regular incidente y periodo 20 s, OWCs cerradas

T=22 s

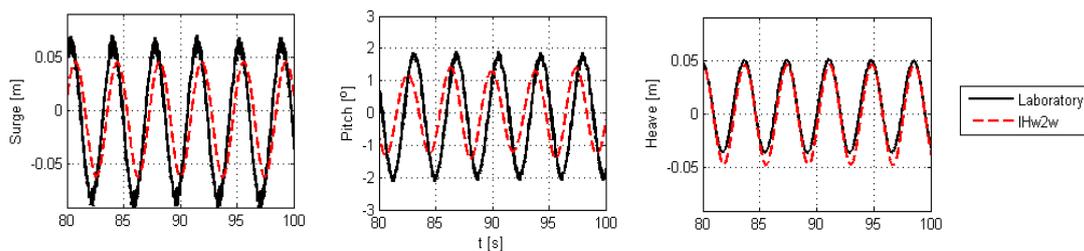


Figura 18. Resultado obtenido para los 3 DOFs principales ante oleaje regular incidente y periodo 22 s, OWCs cerradas

En el caso de los resultados obtenidos para la situación de OWCs cerradas existe mayor variabilidad en la precisión, según el periodo estudiado. Como se puede apreciar en las figuras previas, en general, para el g.d.l de Surge el amortiguamiento obtenido del modelo numérico es mayor que en laboratorio, pero en cambio en Heave los resultados obtenidos vuelven a ser muy buenos. En cambio, en Pitch hay variaciones de precisión según el periodo que se esté estudiando, pero siempre con una precisión buena en el ajuste entre modelos (Lab y Num).

Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, la situación de operatividad más representativa del dispositivo será la plataforma con las cámaras parcialmente abiertas afectada por oleaje irregular incidente. Para comprobar el buen funcionamiento del dispositivo en esta situación, se hacen simulaciones empleando los coeficientes de fricción (tanto de las OWCs como del movimiento de la plataforma) calibrados para la configuración de plataforma abierta así como el coeficiente de descarga óptimo obtenido de la calibración del mismo mediante ensayos en seco. Cabe destacar, para este caso de estudio, que al estar presente la presión que ejerce el aire dentro de las cámaras, y al no poder escalar la compresibilidad del aire, tenemos que hacer las validaciones escalando, mediante Nemoh, los ensayos numéricos a escala de laboratorio ($R = 0.02 \text{ m}$):

6.4.3. Validación OWCs Parcialmente abiertas

- Resultado movimiento de la plataforma y presión y movimiento de la superficie libre en el interior de las cámaras ante oleaje irregular incidente:

T= 10.39 s

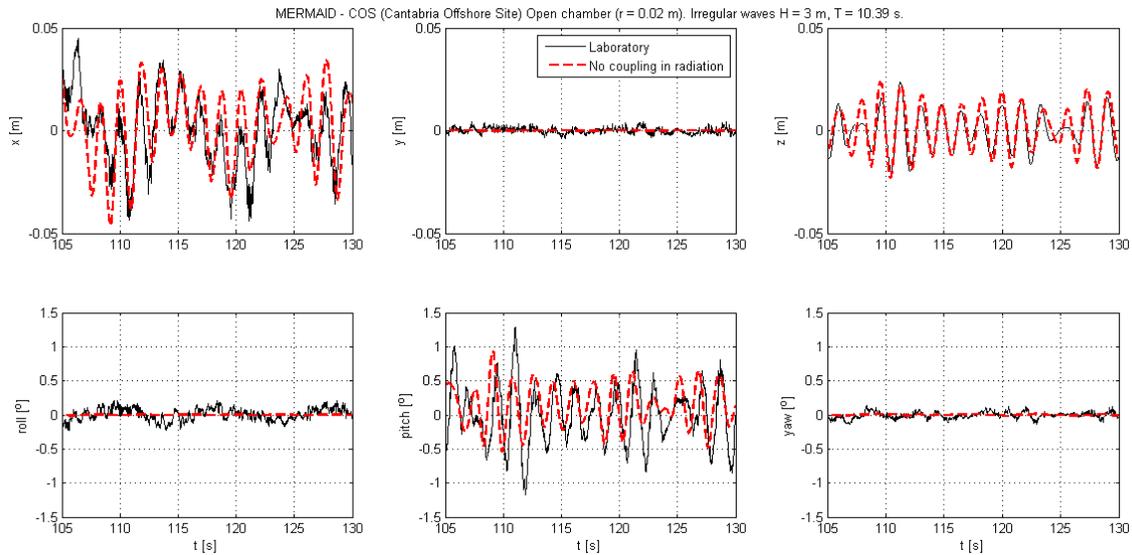


Figura 19. Resultado obtenido para los 6 DOFs ante oleaje irregular incidente y periodo 10.39 segundos, OWCs parcialmente abiertas

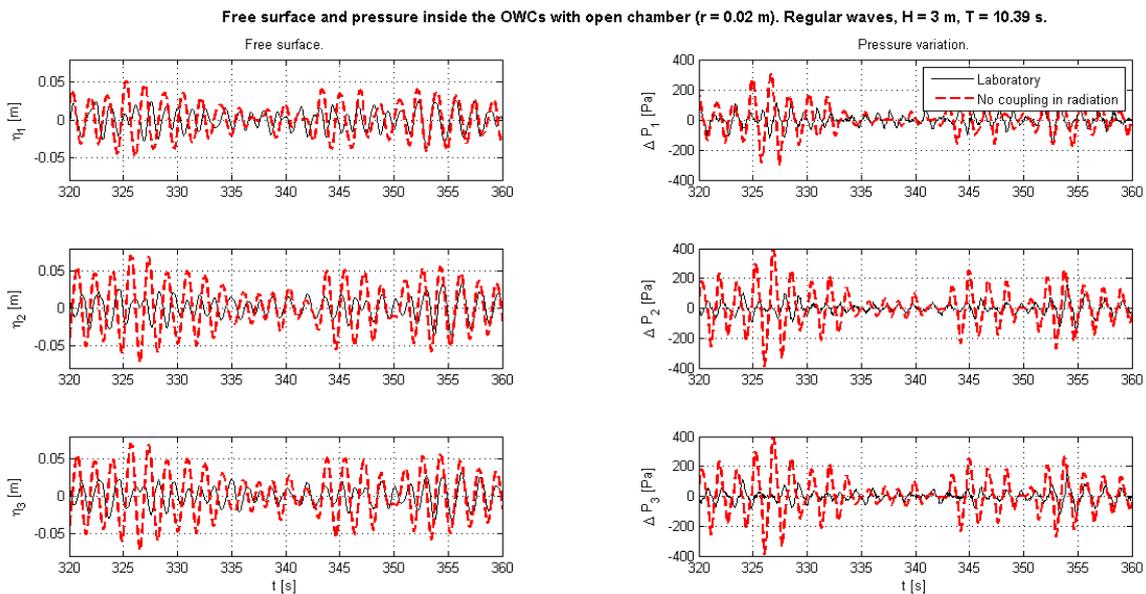


Figura 20. Resultado, para la configuración de OWCs parcialmente abiertas y oleaje irregular incidente y periodo de 10.39 s, de la variación de presión y superficie libre dentro de cada OWC.



Como se puede comprobar en la figura 19, los resultados obtenidos para la situación de cámaras parcialmente abiertas en cuanto a movimientos en Heave, Pitch y Surge son aceptables pero al comprobar la variación de la superficie libre y la presión dentro de las cámaras (figura 20) los resultados no son buenos. Esto puede deberse a varias razones: por una parte, puede que sea preciso incorporar otro parámetro de calibración que incluya la velocidad relativa entre el movimiento de la propia plataforma y de las OWCs. Por otro lado, puede que sea necesario emplear una nueva calibración de coeficientes para la configuración de OWCs parcialmente abiertas para el Decay test y así obtener el movimiento de la plataforma para este caso en particular, en vez de partir de la situación de cámaras abiertas y calibrar los coeficientes de las OWCs.

7. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL CONCEPTO EN CANARIAS

7.1. Aspectos técnicos, económicos y de localización

En Canarias está trabajando activamente la Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN)*, con iniciativas como el liderazgo del proyecto Tropos del que se ha hablado en el apartado 2 del presente documento. De forma paralela al último Congreso de Energías Marinas, la empresa Enerocean –en el marco de este proyecto- reunió a 70 expertos internacionales interesados en el desarrollo de plataformas oceánicas multiuso para explotar de forma sostenible y combinada las energías marinas, la acuicultura, el transporte y el turismo. PLOCAN ya ha dado a luz proyectos como el fondeo del dispositivo undimotriz Welcome, y en 2010 instaló la boya de posicionamiento del dispositivo undimotriz desarrollada en Barcelona en las instalaciones de Anortec, bajo diseño y supervisión de Pipo Systems y la propia PLOCAN. Con una longitud de 9 metros, un diámetro de 2,3 y 24 toneladas de peso, la boya contiene el generador de energía y gran parte de los autómatas de medida y control que conforman el dispositivo undimotriz. Una vez fondeada junto al resto de elementos que integran el sistema, quedará ubicada a una profundidad de aproximadamente 25 metros.

Así mismo, destaca el proyecto Undigen, la fase final de un proyecto base más amplio, consistente en la implementación de un PTO (Power Take-Off System) eléctrico de generación directa para el aprovechamiento energético de las olas del mar que es potencialmente adecuado para diferentes tipos de convertidores de energía de las olas WEC (Wave Energy Converters). Undigen se propone llevar a cabo la tercera de estas tres fases: 1. Construcción de máquina lineal y de su sistema de accionamiento y control. 2. Ensayos en laboratorio: determinación de prestaciones. 3. Desarrollo de un banco de ensayos en el mar y pruebas de funcionalidad marina.

Siguiendo con la idea de los proyectos anteriormente citados y con los objetivos de la propia PLOCAN, se ha pensado estudiar la viabilidad en Canarias de la plataforma multiuso objeto de estudio. Para ello, son varios los aspectos a tener en cuenta: impacto en las mareas, impacto en el vuelo de las aves migratorias, impacto socio-económico, daños sobre la pesquería y a fauna marina de la zona, impacto acústico, posibles repercusiones sobre las playas, impacto visual, etc.



Ilustración 29. Representación del parque Offshore Mermaid



Dentro del proyecto PLOCAN muchos de estos aspectos ya han sido analizados, sin embargo uno de los aspectos a estudiar una vez diseñado el parque (su ubicación se define en teniendo en cuenta la trayectoria de las aves migratorias) es el impacto visual que puede generar. En relación con ello, claro está que al tratarse de un parque eólico situado en grandes profundidades y a más de 2 km de la costa minimiza significativamente todas estas posibles afecciones. Si a eso se añade el hecho de que se trata, tal y como se viene explicando, de una plataforma flotante con anclajes dinámicos el impacto sobre la flora, fauna y pesquería se da por despreciable. Por ello, el impacto visual es el aspecto más determinante cuando se trata de zonas costeras, turísticas y este tipo de plataformas provistas de los inmensos aerogeneradores.

Site, Sea	Enviromental Characteristics	Design Type	Specific Issues
Athantic Ocean Site-Far Offshore Area	Very high wind and wave energy potential	Wind Turbines Floating platform Wave energy converters	Dynamic Moorings Grid connection

Tabla 12. Características principales de la ubicación Atlántica analizada para el proyecto Mermaid

El océano Atlántico está sujeto a condiciones severas como son:

- Olas de hasta 20 m de altura que dan lugar a altas exigencias técnicas.
- Tras los continuos debates entre las partes interesadas, la acuicultura se consideró muy complicada y se optó por la combinación en la extracción de energía offshore a partir de olas y viento.

Al no verse con claridad, por parte de las partes interesadas, la integración de la acuicultura en esta ubicación dentro de plataformas oscilantes surgieron ideas como: turbinas eólicas con jaulas de acuicultura adjuntas a ellas, así como plataformas flotantes provistas de varias turbinas y que proporcionen espacio para otros usos. Por otro lado, también se presentó la idea de una isla temporal para eventos deportivos. Finalmente las partes interesadas argumentaron que la principal solución está en ubicar suficientemente lejos de la costa el parque y que no se disponga en la trayectoria de la desembocadura de un río. Además de forma independiente a su uso, robustez y seguridad el parque debe quedar perfectamente señalado y controlado para evitar accidentes. De igual forma, toma especial importancia el aspecto de la pesquería por intereses económicos y sociales. Para lograr diseños factibles, el proyecto europeo MERMAID pone la integración del carácter técnico, económico, ecológico, espacial y los aspectos sociales en el corazón del desarrollo de las MUOPs. Lo hace de dos maneras:

- En primer lugar, se analizan e integran todos estos aspectos en todo el proceso de diseño.
- En segundo lugar, todos los interesados son participes en todo este proceso de diseño.



De esta forma, se desarrolla un proceso de diseño que incluye, involucra y consulta a los miembros interesados para conseguir la retroalimentación durante toda la etapa de diseño.

En cuanto a los impactos beneficiosos, los más importantes están relacionados con los impactos socioeconómicos. Las regiones como las Islas Canarias son fuertemente beneficiadas por proyectos como el aquí se ha propuesto. La integración de las empresas extranjeras en los sectores industriales ya existentes, y la creación de una nueva actividad económica que reforzará la creación de empleo, la especialización y la competitividad. A la cabeza de los beneficios socioeconómicos, estará el desarrollo sostenible con una generación basada en las energías renovables marinas.

La sostenibilidad requiere la satisfacción simultánea de las siguientes condiciones:

- Eficiencia económica dinámica y espacial y sostenibilidad.
- Equidad social dinámica y espacial y sostenibilidad.
- Sostenibilidad ecológica y ambiental, dinámicas y espaciales.

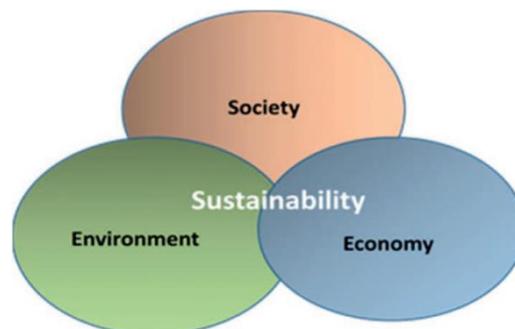


Ilustración 30. Desarrollo sostenible

Finalmente, según estudios realizados dentro del proyecto europeo Mermaid, para el sitio Atlántico MUOP (viento- columnas de agua) Se calcula que el coste de fabricación total es de 364.591.964 euros. Mientras que los gastos totales de capital alcanzan 1.973 Millones de euros (3,20 millones € / MW).

En el siguiente apartado, se va a hacer un estudio exhaustivo de la zona afectada visualmente en 2 hipotéticas distancias desde la costa: parque situado a 5km o a 10 km de la costa. Se hará uso del programa ArcGis para hacer este análisis de visibilidad mediante modelado

Como se ha comentado anteriormente, la altura total de las plataformas sería de 130m sobre el nivel del mar con aspas de unos 45 m. En la parte superior hay un galeón dentro del cual se encuentran instalados unos aerogeneradores de 5MW de potencia máxima. Con este tipo de sistema se pueden alcanzar profundidades de fondeo de hasta 100 metros. La altura total sobre el nivel del mar será de 130m con aspas de unos 45 m. La plataforma flotante se fija al lecho marino mediante cables sujetos a estructuras de hormigón y acero.



Para el desarrollo de este análisis de visibilidad en ArcGis se emplea la herramienta **Visibility** que determina para cada píxel, del modelo terrestre de la zona de Gran Canaria incorporado, si es visible o no los puntos que se están estudiando. Para ello, se ha empleado el modelo

Terrestre (capa MDT) correspondiente a los municipios (capas vectoriales) de la zona de Gran Canaria más próxima a la supuesta ubicación del parque. El objetivo es determinar si la instalación de este parque eólico marino frente a las zonas residenciales y turísticas provocaría un impacto medioambiental en cuanto a visibilidad se refiere sobre sus habitantes. Como se ha comentado, este será uno de los aspectos más determinantes a la hora de determinar la distancia a la que irá ubicado o incluso de tomar la decisión de no llevar a cabo dicho proyecto. En España ya se han dado casos desfavorables de análisis de visibilidad de este tipo de parques, por ejemplo en Castellón.

7.2. Análisis de visibilidad (ArcGis)

Para el desarrollo de esta práctica se emplea la herramienta **Visibility** que determina, para cada píxel, si es visible o no desde los puntos que se están estudiando. Para ello se genera una malla con la geometría del futuro parque que en este caso será de 60 km² (10x6) al constar de 77 plataformas flotantes provistas de un aerogenerador de 130 m de altura sobre el nivel del mar. Con una separación entre plataformas de 1 km se crea el parque una vez incluido los datos del Modelo Digital Terrestre de Gran Canaria. En este caso se ha optado por hacer un primer análisis de visibilidad del parque ubicado a 2km de la costa, pese a que previamente se tenga conocimiento de que a tan corta distancia el impacto visual será alto.

En primer lugar, se añade la Shapefile de Manzanas para poder apreciar la zona posiblemente más poblada de la costa de la isla y partir de la situación más desfavorable (tomar la distancia desde el vértice de la isla situado en una de las zonas con mayor volumen de manzanas). La siguiente figura muestra la preparación del ArcGis con los datos mencionados hasta ahora con el parque ubicado a 2km del vértice de la costa escogido:

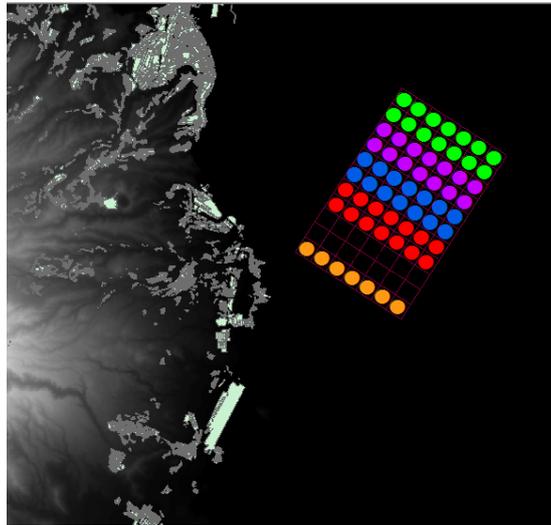


Ilustración 31. Representación en ArcGIS del parque situado a 2 km de la costa de Gran Canaria

La **Fishnet** (creada con la geometría del parque) se debe dividir en mallas de menor tamaño (Shapefiles de puntos) para que el programa sea capaz de computar la visibilidad de estas con el ráster generado a partir del MDT. Una vez dividido el parque en 5 mallas de cada una 14 puntos y otra más con tan solo 7 puntos, se procede a emplear la herramienta **Visibility** para saber la cantidad de píxeles vistos desde cada malla definida. Así, el programa nos ofrece el resultado de píxeles vistos y no vistos desde los Observer Points (cada malla con 130 metros de altura definida). En la siguiente figura se ve el resultado obtenido de la primera malla (puntos naranjas) situada a 2km del vértice de la costa (zona verde= píxeles visibles, zona rosa= píxeles no visibles):

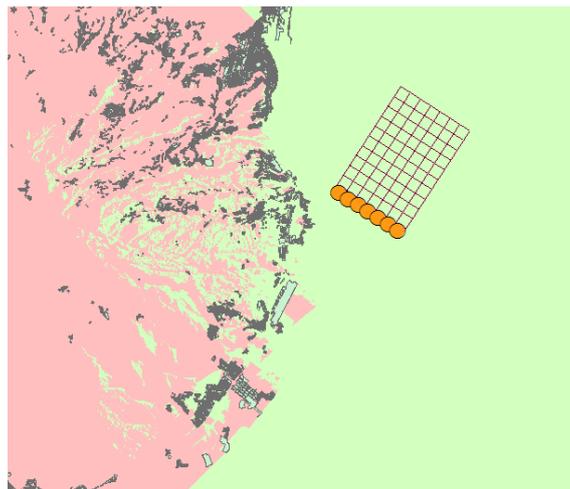


Ilustración 32. Representación del resultado de visibilidad para la primera malla creada a 2km de la costa de Gran Canaria.

Como resultado se obtiene el % de píxeles totales del terreno que son visibles desde dicha malla 1: **64,12%**. Como era de esperar este porcentaje de visibilidad es inadmisiblemente debido al impacto ambiental que supondría sobre la visibilidad de las personas del entorno.

A consecuencia de ello se opta por alejar la ubicación del parque hasta los 8 km desde el mismo vértice y además cambiar la orientación para que las últimas filas de aerogeneradores estén lo más alejadas de la costa posible:

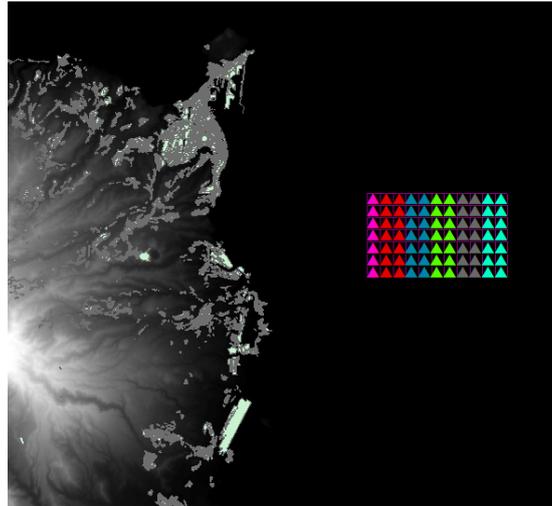


Ilustración 33. Representación en ArcGis del parque situado a 8 km de la costa de Gran Canaria

Se procede a realizar el mismo procedimiento que en el caso anterior, obteniendo un resultado, para la malla 1(triángulos magenta) del **4,23 %** de píxeles vistos (en verde):

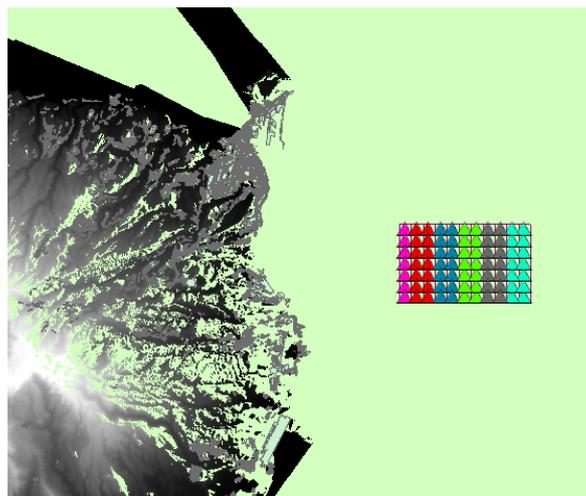


Ilustración 34. Representación del resultado de visibilidad para la primera malla (color magenta) creada a 8km de la costa de Gran Canaria.



Por lo tanto, analizando únicamente la primera malla de aerogeneradores queda verificado el dato que se manejaba de que el impacto visual a nivel del mar es insignificante a una distancia de 8 km (Universidad de Newcastle, 2002).

Una vez comprobado esto, se determina que la ubicación a 8 km es la más apropiada desde el punto de vista del impacto visual que propocará sobre la costa este parque de plataformas flotantes que tendrá una altura fuera de agua de unos 130 m. Teniendo en cuenta que ese 4,23 % de píxeles vistos serán los correspondientes a las zonas más altas del terreno de la isla y que las próximas mallas a analizar están a mayor distancia de la costa cada vez (el % de píxeles vistos irá en descenso), queda más que justificado que esta solución no supondrá alteraciones en las vistas habituales de la zona.

7.3. Preocupación Ambiental

No hay duda que el aspecto medioambiental cobra especial importancia en este tipo de proyectos, pero tal y como se ha analizado en el apartado 7.1 el conjunto de equidad social, sostenibilidad ecológica y ambiental y la eficiencia económica han sido analizados dentro del proyecto Mermaid del que nace el concepto de plataforma del presente TFM. Los estudios sociológicos y económicos medioambientales proporcionan la información suficiente para determinar si la población está a favor o en contra de un determinado proyecto.

La evaluación del impacto ambiental surge en el final de los años 60 en Estados Unidos con el nombre de “environmental impact assessment” (E.I.A.). La EIA introduce las primeras formas de control de las interacciones de las intervenciones humanas con el ambiente (ya sea en forma directa o indirecta), mediante instrumentos y procedimientos dirigidos a prever y evaluar las consecuencias de determinadas intervenciones. Todo esto con la intención de reducir, mitigar, corregir y compensar los impactos.

En efecto en 1985 la Comunidad Europea emana la Directiva 337/85/CEE referida a evaluación del impacto ambiental en determinados proyectos públicos y privados. La primera aplicación de esta nueva normativa se da en Holanda, en 1986, aprobando una norma ampliada, con particular énfasis en las evaluaciones a ser efectuadas en fase de diseño. El elemento central de la norma holandesa es el análisis comparativo de las alternativas y evaluación de sus respectivos impactos, con la finalidad de determinar la mejor solución en términos ambientales. (Boletín IDEA-PUCP, 2009) Las sucesivas directivas provenientes de la Unión Europea obligaron a España a trasponer en su normativa la legislación del impacto ambiental. En un principio existió cierta oposición a la evaluación de impacto ambiental por considerar que cumplir dicha normativa haría menos competitiva a las empresas, aunque a la larga se ha visto que es necesario tener en cuenta los factores ambientales en el estudio de proyectos.

A día de hoy cualquier proyecto debe presentar su correspondiente **Análisis de Impacto Ambiental**. En el presente trabajo estos son los factores que pueden influir y que, por tanto, se han de considerar en el diseño de una instalación eólica marina: factores abióticos, como la geología, la calidad del agua y aire; factores bióticos, como las aves, peces, mamíferos; y



factores socioeconómicos, como la navegación marítima, figuras de protección, plantas acuícolas.

- En el caso del medio abiótico, son más los costes de instalación, que los posibles daños que puedan ocasionar. Este impacto cobraba especial importancia en la instalación de parques anclados al fondo marino donde la excavación alteraba el fondo marino; sin embargo, al introducir esta modalidad de estructuras flotantes la única afección sería la correspondiente a los anclajes requeridos para los moorings.
- En el caso del medio biótico, se concluye que con una adecuada ubicación, no tiene por qué existir una alta tasa de colisiones de aves con los aerogeneradores. Igualmente para la fauna marina local, aunque existe una afectación al hábitat en el momento de la instalación, esta es solo a corto plazo. La profundidad a la que se construye el parque hace que no tenga efecto sobre las comunidades vegetales. En cuanto al electromagnetismo en cetáceos y peces, aunque se sabe que tiene efectos de pérdida de orientación sobre éstos no está demostrado científicamente.
- Evaluando los impactos socio-económicos se puede decir que ningún impacto negativo es significativo para que no se llegue a realizar la instalación del parque marino offshore de estas características. En cambio, si se puede destacar que como impacto positivo está la generación de puestos de trabajo tanto directos como indirectos.
- **IMPACTOS SOCIALES:**

Efectos sobre el turismo: la localidad de Gran Canaria se caracterizan por tener una tradición pesquera muy fuerte. Su situación geográfica hace del turismo un factor importante ya que muchas son las personas que acuden para disfrutar de sus playas, gastronomía y cultura. El uso de este tipo de energías renovables puede ser un atractivo cultural que puede ser explotado para potenciar el turismo de ambos municipios.

Efectos sobre la población: A continuación podemos ver la tasa de personas en activo y en paro registrados por el Instituto Canario de Estadística para el primer trimestre del 2016:

	Tasas de actividad			Tasas de paro		
	AMBOS SEXOS	Hombres	Mujeres	AMBOS SEXOS	Hombres	Mujeres
CANARIAS	60,93	65,66	56,32	24,90	23,45	

Tabla 13. Tasa de actividad y de paro (cuarto trimestre 2016) por sexos.



En la siguiente tabla se muestra (en miles de personas) la cantidad activa por sectores sobre el total:

	TOTAL	Agricultura	Industria	Construcción	Servicios
CANARIAS	826,3	20,8	39,0	43,6	722,9

Tabla 14. Cantidad de personas (en miles) activas según sector en el cuarto trimestre del 2016.

El hecho de ubicar el parque eólico offshore frente a la costa Canaria hará que el número de personas en paro disminuya ya que se fomentará el empleo local en las instalaciones directa e indirectamente relacionadas.



8. CONCLUSIONES

Como bien es sabido, toda herramienta numérica debe ser experimentalmente calibrada y validada para poder utilizarla de forma fiable. En cambio, la experimentación tanto a escala de prototipo como en modelo físico supone costes temporales y económicos que hacen totalmente indispensable el modelado numérico. Por todo ello, surge la necesidad de abordar el problema mediante una metodología híbrida de trabajo que combine herramientas numéricas y los ensayos experimentales para llegar a obtener un modelado numérico fiable, proceso en el que se basa el presente proyecto.

En este trabajo se ha presentado el proceso de calibración y validación del modelo numérico simplificado desarrollado por el IHCantabria con el objetivo de modelar el comportamiento de una plataforma multiuso offshore a partir de unos ensayos experimentales previamente realizados.

Tal y como se ha explicado, la plataforma Mermaid fue diseñada para obtener energía tanto del viento como de las olas. Sin embargo, en este proyecto se ha analizado su comportamiento únicamente ante condiciones de oleaje incidente, tanto regular como irregular, dejando como futura línea de investigación la calibración y validación del sistema completo: viento – oleaje.

Los datos experimentales han sido obtenidos de ensayos de laboratorio llevados a cabo en el Gran Tanque de Oleaje del IHCantabria. Estos ensayos fueron llevado a cabo a escala 1:35 para poder adecuar las condiciones y dimensiones del dispositivo y medio marino objeto de ensayo. En cambio, en el caso de las líneas de anclaje ha sido necesario adaptar la longitud de dos de las cadenas para adaptarlas a las dimensiones del Tanque de Oleaje del IHCantabria.

El dispositivo diseñado incluye sistemas de columna de agua oscilante (OWCs) para la conversión de la energía del oleaje, en concreto cuenta con 3 OWCs, una en cada vértice de la base triangular. Además, en el centro de la plataforma se levanta una columna diseñada para albergar una turbina eólica. Lo cual convierte a esta plataforma multipropósito en un proyecto muy atractivo para el demandante actual sector de las energías renovables. El hecho de incorporar en una misma plataforma un dispositivo que se encuentra en un estado de desarrollo e implementación muy avanzado (turbina eólica) y otros que son, desde el punto de vista de productividad y estudios realizados, muy prometedores (Columnas de Agua Oscilante), hace que se trate de un reto que precisa ser modelado y verificado en su camino hacia la comercialización.

El análisis del comportamiento de esta plataforma multiuso flotante se ha realizado mediante una metodología híbrida experimental y numérica, combinando campañas de ensayos de laboratorio y un modelado numérico eficiente. Se ha empleado un modelado numérico simplificado en el dominio del tiempo que asume una serie de simplificaciones para conseguir un modelo numérico fiable y computacionalmente eficiente. Las turbinas de aire que en un dispositivo real constituirían el sistema de extracción de potencia de las OWCs, se han simulado (conceptualizado) en el laboratorio mediante 5 orificios distribuidos en el techo de cada OWC, los cuales permitían la circulación del aire entre el interior de las OWCs y la



atmósfera. Se ha ensayado en el laboratorio la estructura integrada y se ha calibrado y validado el modelo numérico en el dominio del tiempo con el objetivo de simular el comportamiento del conjunto.

Debido a las simplificaciones realizadas en el modelo numérico se han obviado ciertos procesos físicos que sí estarán presentes en el cuerpo (fricción, viscosidad, damping, etc.). Para simular el efecto de estos fenómenos que no se han tenido en cuenta en el modelo numérico empleado se hace necesario emplear unos coeficientes de calibración, que son los que se han calibrado en este proyecto para después validar el sistema completo.

- **Coefficientes de damping lineal y no-lineal (K_{nl} y K_l):** Estos pretenden albergar el efecto de la viscosidad a la entrada de las cámaras.
 - 1) para las OWCs con la plataforma fija (fricción en la entrada sumergida de las cámaras)
 - 2) de los DOFs de la plataforma mediante ensayos de decay con las OWCs abiertas (amortiguamiento hidrodinámico de la plataforma)
 - 3) de los DOFs de la plataforma mediante ensayos de decay con las OWCs cerradas (amortiguamiento hidrodinámico de la plataforma)
- **Coefficiente de descarga de los orificios de las OWCs (C_d):** representa las pérdidas que se producen cuando el aire atraviesa los orificios de la plataforma (orificios dispuestos con el fin de simular las turbinas que irán instaladas).
- **Coefficiente de fricción por fondo:** pretende representar la existencia del fondo marino sobre el que se apoya la catenaria; siendo imprescindible la inclusión de este coeficiente en el modelo debido a que este no identifica la existencia del fondo

De la comparación de los resultados del modelo calibrado con los registros experimentales ha se puede extraer lo siguiente:

Por un lado, debido a las simplificaciones implementadas en el modelo numérico (flujo incompresible + viscosidad nula + flujo irrotacional = Flujo Ideal) se han obviado términos que sí estarán presentes en el cuerpo (fricción, viscosidad etc.). Es aquí donde surge la interpretación de los resultados obtenidos para cada configuración de la plataforma:

- OWCs Abiertas ($R1=R2=R3=R4=R5= 0,033$): Para la configuración de cámaras abiertas se ha podido calibrar correctamente el comportamiento de la plataforma para los grados de libertad de interés (surge, heave y pitch) y para roll, respecto a los movimientos registrados en el laboratorio para esta configuración. Aunque es cierto que el modelo numérico presenta un acoplamiento importante entre los grados de libertad de Sway y Yaw, el movimiento registrado durante los ensayos de laboratorio en dichos grados de libertad ha sido despreciable y por ello no han mostrado dicho acoplamiento. Por lo tanto,



las comparativas de movimiento para los oleajes se han llevado a cabo únicamente para los grados de libertad de mayor interés. Se ha visto cómo para estos g.d.l se obtiene una buena correspondencia entre los resultados de laboratorio y los resultados numéricos, pero en cambio en el caso de Sway y Yaw únicamente se consigue representar adecuadamente la amplitud de los movimientos (la calibración consigue respetar ordenes de magnitud pero la precisión es muy baja debido al citado acoplamiento que los resultados de laboratorio no tiene registrado).

- OWCs Cerradas ($R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=0$): en la calibración de esta configuración donde la plataforma se comporta como un cuerpo flotante se han calibrado los coeficientes de fricción correspondientes al movimiento de la plataforma dejando fuera los coeficientes correspondientes al movimiento en Heave de las OWCs. Los resultados obtenidos representan el movimiento (en los g.d.l predominantes, al igual que para las OWCs abiertas) de la plataforma perfectamente con la salvedad del acoplamiento anteriormente explicado.
- OWCs parcialmente abiertas ($R_1=0,02$, $R_2=R_3=R_4=R_5=0$): una vez calibradas las dos configuraciones anteriores y llevada a cabo la validación de las mismas ante oleaje regular e irregular incidente, se procede a la validación ante la condición de operatividad más representativa de la plataforma: OWCs parcialmente abiertas ante oleaje irregular incidente. En lo que a movimientos (en los principales g.d.l) de la plataforma se refiere, los resultados obtenidos mediante el modelo numérico son razonablemente buenos respecto a los de laboratorio. En cambio, se produce un desajuste con los resultados que proporciona el modelo numérico dentro de las cámaras (variación de Superficie Libre y Presión) respecto a los datos obtenidos del laboratorio. Esto puede ser debido a varias razones: por una parte, surge la idea de que puede que sea preciso incorporar otro parámetro de calibración que incluya la velocidad relativa entre el movimiento de la propia plataforma y de las OWCs. Por otro lado, puede que el modelo requiera una calibración de coeficientes para la configuración de OWCs parcialmente abiertas para el Decay test y así obtener el movimiento de la plataforma para este caso en particular, en vez de partir de la situación de OWCs abiertas y calibrar los coeficientes del movimiento en Heave de las OWCs.

Tras interpretar los resultados correspondientes a cada configuración estudiada, se ha podido comprobar como el modelo numérico simplificado empleado simula satisfactoriamente el movimiento de los principales grados de libertad representativos de este dispositivo (Heave, Surge y Pitch) para todos los casos estudiados. Donde se produce un fuerte acoplamiento entre g.d.l es entre Sway y Yaw, que da lugar a pensar en las futuras líneas de investigación una vez hecha la crítica del presente estudio.

Por otro lado, no cabe duda de que este modelo numérico tiene una clara ventaja sobre cualquier otro modelo que aporte mayor precisión en su proceso de resolución: se trata de un



modelo que obtiene en un tiempo reducido una correcta recreación del comportamiento de la plataforma objeto de estudio ante las condiciones impuestas. Aspecto este que hace muy atractivo el modelo numérico aquí calibrado y validado ya que ante situaciones sobrevenidas o de operatividad es fundamental tener capacidad de reacción y esto solo es posible si podemos obtener datos en tiempos muy reducidos.

En términos generales, se considera que el trabajo realizado cumple satisfactoriamente los objetivos perseguidos, ya que el proceso de calibración y validación llevado a cabo nos deja como resultado un modelo numérico calibrado capaz de representar con gran precisión el movimiento de la plataforma multipropósito objeto de estudio ante oleaje incidente pero con limitaciones relacionadas con la simplificación del modelo: acoplamientos entre Sway y Yaw y variación de la SL y Pr dentro de las cámaras en situación de operatividad. Además, como todo proceso de investigación, el desarrollo de este trabajo ha permitido identificar necesidades o puntos de interés no recogidos en el presente estudio y a incluir como futuras líneas de investigación.

Cabe destacar que con los trabajos realizados en este TFM se está preparando, de la mano del IHCantabria, un artículo científico para su publicación en una revista internacional de prestigio (Q1) en el campo de la ingeniería Offshore.

Futuras líneas de trabajo

Como ya se ha comentado, en el desarrollo del presente proyecto se han dejado de lado aspectos importantes que podrían motivar cambios sustanciales en los resultados obtenidos y que, por lo tanto, pueden dar lugar a nuevos trabajos de investigación. Esto abre un amplio abanico de posibles líneas de investigación que surgen a partir de las necesidades presentadas por el presente proceso de calibración y validación.

A continuación se recogen las principales ideas a incluir como futuras líneas de trabajo:

- ❖ Inclusión en el modelo numérico de la aerodinámica correspondiente a la turbina eólica a instalar.
- ❖ Compresibilidad del aire a escala de prototipo y su influencia.
- ❖ Necesidad de un modelado con herramientas de CFD para ciertos aspectos de la MUP.
- ❖ Nuevas técnicas experimentales para modelar efectos de acoplamiento entre g.d.l.
- ❖ Incluir nuevos coeficientes de calibración que alberguen efectos como la velocidad relativa de las OWC y la propia plataforma.
- ❖ Ajustes en el modelo numérico simplificado para el análisis de la variación de la SL Y Pr en el interior de las cámaras.
- ❖ Modelado numérico de la optimización del dispositivo ante ciertas condiciones impuestas en alta mar.



9. BIBLIOGRAFÍA

- A. Iturrioz, R. G. (2015). Validation of OpenFOAM for Oscillating Water Column. *Ocean Engineering*.
- Aamo, O. M., & Fossen, T. I. (2000). Finite element modelling of mooring lines. *Mathematics and Computers in Simulation*.
- Armesto, J. A., Guanche, R., Ayllón, V., Barrera, C., Losada, I. J., Vidal, C., et al. (2015). Numerical and experimental study of a pendulum wave energy converter. *11th European Wave and Tidal Energy Conference 2015*. Nantes, France.
- Armesto, J. A., Guanche, R., del Jesus, F., Iturrioz, A., & Losada, I. J. (2015). Comparative analysis of the methods to compute the radiation term in Cummins' equation. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*.
- Armesto, J. A., Guanche, R., Iturrioz, A., Vidal, C., & Losada, I. J. (2014). Identification of state-space coefficients for oscillating water columns using temporal series. *Ocean Engineering*.
- Armesto, J. A., Sarmiento, J., Ayllón, V., Iturrioz, A., Jurado, A., Guanche, R., et al. (2016). Numerical and experimental study of a multi-use platform. *35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Busan, South Korea.
- Babarit, A., & Delhommeau, G. (2015). Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH. *Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference*. Nantes, France.
- Cummins, W. E. (1962). The impulse response function and ship motions. *Schiffstechnik*.
- Iturrioz, A., Guanche, R., Armesto, J. A., Alves, M. A., Vidal, C., & Losada, I. J. (2014). Time-domain modeling of a fixed detached oscillating water column towards a floating multi-chamber device. *Ocean Engineering*.
- Martini, M., Guanche, R., Armesto, J. A., Losada, I. J., & Vidal, C. (2015). Met-ocean conditions influence on floating offshore wind farms power production. *Wind Energy*.
- Palm, J., Eskilsson, C., & Bergdahl, L. (2013). Simulation of Mooring Cable Dynamics Using a Discontinuous Galerkin Method. *V International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*. Barcelona, Spain.
- <http://www.mermaidproject.eu/>
- <http://www.idae.es/>
- <http://aerogeneradores-energia-eolica.blogspot.com.es/2011/12/funcionamiento-aerogeneradores.html>



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Modelado numérico de una plataforma multiuso para la extracción de energía eólica y undimotriz en grandes profundidades

Trabajo realizado por:

Larraitz Bengoetxea Gómez de Salazar

Dirigido:

César Vidal Pascual

Titulación:

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
(Santander, Febrero del 2017).

Palabras clave:

Proyecto Mermaid , Plataforma multiuso (MUP), modelo híbrido, conversión de energía eólica y energía undimotriz, , OWCs, MRE, Coeficientes de damping, análisis de visibilidad, calibración y validación de un modelo numérico, IHCantabria, coeficientes de calibración.

Resumen:

El desarrollo y el compromiso con las energías renovables se convierten en una necesidad ineludible para lograr un desarrollo sostenible en un mundo donde la demanda de energía está creciendo constantemente. Las Energías Renovables Marinas (MRE) son uno de los recursos energéticos renovables más prometedores y, además, su desarrollo está totalmente alineado con los objetivos de la Comisión Europea dentro del Blue Growth.

Para el desarrollo eficiente de las MRE, tanto los **costes económicos** como los **impactos ambientales** tienen que permanecer dentro de unos límites aceptables, lo cual es un desafío actual para la industria y el mundo académico. La idea de combinar diferentes sistemas de conversión de energía en la misma plataforma ha surgido como una oportunidad de reducción de costes durante los últimos años. Dentro de las MRE, la energía del viento, las olas y las corrientes pueden combinarse para encontrar sinergias entre ellas. Sin embargo, la etapa actual de desarrollo de cada una de ellas se encuentra en fases muy diferentes.

La tecnología de **Columna de Agua Oscilante (OWC)** es uno de los conceptos más desarrollados y prometedores de conversión de energía del oleaje. En la simplicidad de su principio de operación reside su mayor virtud. La tecnología consiste en una cámara semi-sumergida con una turbina instalada en la parte superior y conectada a un generador eléctrico. La incidencia del oleaje hace oscilar la superficie libre interior de la cámara, provocando que el aire circule a través de la turbina en ambos sentidos, activando su rotación.



La tecnología de **Turbina Eólica marina** es de sobre conocida y son varios los parques ya instalados en el mar que producen energía a partir del viento. Pese a que no existen parques eólicos comerciales basados en estructuras flotantes, los prototipos ya han sido probados en el mar: Journal of Ocean Engineering and Science (2016). Así, el primer aerogenerador flotante fue instalado por la compañía petrolera noruega Statoil: Hywind con una turbina Siemens de 2,3 MW, en 2009. Posteriormente, una plataforma semi-sumergible llamada WindFloat con una turbina Vestas de 2MW, fue lanzada en 2011.

Pero, ¿por qué energía a partir de recursos eólicos y marinos? La respuesta a esta pregunta es muy clara a día de hoy (tras los estudios realizados) y es, al mismo tiempo, el principal soporte socio-económico para el diseño e investigación de la plataforma objeto de estudio. Como bien es sabido, los recursos energéticos del océano se están convirtiendo en un contribuyente muy interesante al programa europeo de energías combinadas. En particular, la energía del viento y las olas en alta mar. La **energía eólica** marina está creciendo actualmente en todo el mundo, motivado por sus muchos beneficios, expuestos en el presente trabajo. Por otro lado, la conversión de **energía undimotriz** se encuentra en una etapa relativamente inmadura. Lo que contrasta con la idea de que podría considerarse una de las energías renovables más interesantes por varias razones presentadas a lo largo del trabajo.

Debido al desfase existente entre la etapa actual de desarrollo de cada una de estas tecnologías para generar energía de forma sostenible, surge la idea de combinar ambas en una misma plataforma flotante. De esta forma, se consiguen unir los conocimientos en todos los aspectos de las turbinas eólicas ya instaladas con la reciente obtención de datos a partir de nuevas y más detalladas investigaciones sobre la tecnología de OWCs.

La construcción de prototipos a gran escala real para ser verificados en una determinada ubicación implica importantes inversiones económicas que no pueden llevarse a cabo en las etapas iniciales del desarrollo de un diseño. Por ello, los avances en el conocimiento pueden realizarse mediante diferentes herramientas, complementarias entre ellas: el modelado experimental a escala reducida y el modelado numérico. El presente trabajo fue desarrollado dentro del marco del Proyecto Mermaid y en él se avanza un paso más en cuanto a estructuras flotantes offshore se refiere: **modelo híbrido** (experimental y numérico) **de una MUP oleaje-viento**.

Dado que todo modelo numérico requiere ser experimentalmente calibrado y validado para poder utilizarlo de manera fiable, se parte de los datos ya extraídos de una campaña de ensayos experimentales desarrollada previamente en el laboratorio del IHCantabria.

Para el estudio de idoneidad de esta plataforma se ha empleado un modelo numérico basado en un dominio de tiempo que sirve para evaluar la conducta de las diferentes MUPs. El modelo de plataforma empleado en el laboratorio está representado a escala 1:35 simulando las turbinas de las OWCs mediante orificios instalados en la parte superior de la plataforma. La plataforma presenta una altura total fuera del agua de aproximadamente 4 metros y ha sido analizado para diferentes condiciones de oleaje (regular e irregular).

El principal objetivo del presente trabajo es la calibración y validación, a partir de datos experimentales, del modelo numérico desarrollado por el IHCantabria para la plataforma diseñada para su posterior extrapolación a diversas estructuras multipropósito offshore.

En el **modelo numérico** empleado para este caso, se han asumido una serie de **simplificaciones** que obvian ciertos procesos físicos que sí estarán presentes en el cuerpo (fricción, viscosidad, damping, etc.). El objetivo de estas es lograr un modelo numérico computacionalmente eficiente capaz de representar de la forma más precisa posible (dentro de sus limitaciones) el comportamiento de plataforma ante unas condiciones impuestas. Para simular el efecto de los fenómenos que no se han tenido en cuenta en el modelo numérico empleado se hace necesario emplear unos coeficientes de calibración (Coeficiente de damping lineal y no- lineal (K_{nl} y K_l), Coeficiente de descarga (C_d), Coeficiente de fricción por fondo, etc.) que son los que se han calibrado en este proyecto para después validar el sistema completo.

El primer paso para la **calibración** llevada a cabo es caracterizar el comportamiento de la plataforma aislada y después, el movimiento de la misma bajo condiciones de oleaje regular e irregular. Por otro lado, se analiza el comportamiento y rendimiento de las OWCs (en sus diferentes configuraciones) para, finalmente, hacer un estudio conjunto del modo de comportarse de la estructura multifuncional bajo distintas condiciones de oleaje. Como futuras líneas de trabajo queda como objetivo prioritario la incorporación en el modelo desarrollado de la parte aerodinámica de la turbina eólica a instalar en la columna central de la plataforma.

Una vez calibrado el modelo numérico (habiendo fijado un error máximo del 15% respecto a los datos experimentales obtenidos) tanto para OWCs abiertas como para cerradas, se procede a la **validación** del mismo. En esta etapa se comprueba el comportamiento de la plataforma (OWCs abiertas, OWCs cerradas y OWCs parcialmente abiertas) ante un oleaje incidente regular e irregular.

Por otro lado, el aspecto comercial de esta plataforma multiuso debe ser analizado con vistas a su comercialización en distintos países y distintas orientaciones marítimas, cada cual con sus condiciones particulares de calado, oleaje y viento. Aspecto, este último, que requiere un análisis de varios **factores medioambientales** transcendentales cuando se trata de energías renovables a los cuales se hace referencia a lo largo del presente trabajo. En relación a esto, en este trabajo se ha llevado a cabo un **análisis de visibilidad** con la herramienta ArcGis con el objetivo de albergar uno de los aspectos más importante a la hora de la afectación social de este tipo de parques marinos: el impacto visual.

En términos generales, se considera que el trabajo realizado cumple satisfactoriamente los objetivos perseguidos, ya que el proceso de calibración y validación llevado a cabo nos deja como resultado un modelo numérico calibrado capaz de representar con gran precisión el movimiento de la plataforma multipropósito objeto de estudio en los g.d.l predominantes ante oleaje incidente. Si bien es cierto, presenta limitaciones relacionadas con las simplificaciones realizadas: acoplamientos entre Sway y Yaw y variación de la SL y Pr dentro de las cámaras en situación de operatividad. Además, como todo proceso de investigación, el desarrollo de este trabajo ha permitido identificar necesidades o puntos de interés no recogidos en el presente estudio y a incluir como **futuras líneas de investigación**.

Cabe destacar que con los trabajos realizados en este TFM se está preparando, de la mano del IHCantabria, un artículo científico para su publicación en una revista internacional de prestigio (Q1) en el campo de la ingeniería Offshore.

Numerical modeling of a multiuse platform for the extraction of wind and wave energy at great depths

Project made by:

Larraitz Bengoetxea Gómez de Salazar

Directed by:

César Vidal Pascual

University degree:

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
(Santander, February 2017).

Key words:

Mermaid Project, Multiuse Platform (MUP), Hybrid Model, Wind and Wave energy conversion , OWCs, MRE, Damping Coefficients, Visibility Analysis, Calibration and Validation of the numerical model, IHCantabria, Calibration Coefficients.

Abstract:

The development and commitment to renewable energies become an unavoidable necessity to achieve sustainable development in a world where the energy demand is growing steadily. Marine Renewable Energies (MREs) are one of the most promising renewable energy resources, their development is totally aligned with the European Commission's objectives within the Blue Growth. [Pérez et al. \(2015\)](#)

For the efficient development of MREs, both **economic costs** and **environmental impacts** have to remain within acceptable limits, which is a current challenge for industry and the academic world. The idea of combining different energy conversion systems on the same platform has emerged as an opportunity to reduce costs over the last few years. Within MREs, wind, waves and currents energy may be combined in order to find synergies between them. However, the current development stage of each of them is markedly different.

Oscillating Water Column (OWC) technology is nowadays one of the most developed and promising wave energy conversion concepts. The simplicity of its working principle is its main advantage. The technology consists on a half-submerged chamber with an air turbine installed on the top and connected to an electric generator. Ocean waves



incidence activates chamber interior water free surface oscillation, pushing air circulate outwards and inwards through the turbine and making it rotate.

The **Wind Turbine technology** is nowadays well known and several devices are already installed at sea which are producing energy from the wind. Although there are no commercial wind farms based on floating structures, prototypes have already been tested at sea: Journal of Ocean Engineering and Science (2016). Thus, the first floating wind turbine was installed by the Norway oil company Statoil: Hywind with a 2.3 MW Siemens turbine in 2009. Then, a semi-submersible platform called WindFloat with a 2MW Vestas turbine, was launched in 2011.

But, why energy from wind and marine resources? The answer to this question is very clear in these days (after several studies carried out) and is, at the same time, the main socio-economic support for the design and research of the platform under study. As it is known, the ocean's energy resources are becoming a very interesting contributor to the European combined energy program. In particular, wind and waves energy conversion in offshore locations. Marine **wind energy** is currently growing all over the world, motivated by its many benefits, as it is explained in the present work. On the other hand, the **wave energy** conversion is in a relatively immature stage of development. This could contrast with the idea that it should be considered one of the most interesting renewable energies for several reasons presented throughout the present work.

Due to the gap between the current stages of development of these two technologies to generate sustainable energy, comes the idea of combining both technologies on the same floating platform. In this way, the knowledge on lots of the already installed wind turbines aspects can be combined with recent data collection from recent and more detailed researches on OWC technology.

The building of big-scale models involves high economic costs that cannot be faced in the early stages of a design development. Therefore, advances in knowledge can be done by means of different tools, which are complementary between them: small-scale experiments and numerical modelling. The present work was developed within the framework of the MERMAID Innovative Multi-purpose Offshore Platforms. So that, in this work, it is made a step further in terms of floating offshore structures: **Hybrid model of a wave-wind MUP**.

Since every numerical model needs to be experimentally calibrated and validated to be able to use it as a reliable tool, an experimental testing campaign was developed previously at IHCantabria CCOB.

For the study of the suitability of this platform it has been used a numerical model based on a time domain which permitted the evaluation of the behaviour of different MUPs. In particular, the model developed by IHCantabria has a triangular floating platform with 4 vertical columns, The turbines of the OWCs are simulated by 5 holes installed in the upper part of the platform. This has a total height outside the water of approximately 4 meters and has been analysed for different incident wave conditions (regular and irregular).

The main objective of this study is the calibration and validation, based on experimental data, of the numerical model developed by IHCantabria that may be used to validate the sustainability of the platform in several offshore locations.

In the **numerical model** used for this case, some simplifications have been assumed which obviate certain physical processes that will be present in the body (friction, viscosity, damping, etc.). The objective of these **simplifications** is to achieve a computationally efficient numerical model capable of representing, as accurately as possible (within its limitations), the behaviour of the platform under imposed conditions. To simulate the effect of the phenomena that have not been taken into account, it is necessary to use calibration coefficients (Linear and no-linear damping coefficients, Discharge coefficient, Friction coefficient by background ...) which are those that have been calibrated in this project for then getting validate the complete system.

The first step of the **calibration** carried out is to characterize the behaviour of the isolated platform and then, the movement of the platform under conditions of regular and irregular waves. After it, the behaviour and movements of the OWCs is analysed to finally make a joint study of the behaviour of the multipurpose structure under different conditions of incident waves. As future work lines, the main objective is the incorporation to the developed numerical model, the aerodynamic part of the wind turbine that will be installed in the central column of the platform. Once the numerical model has been calibrated (having fixed a maximum error of 15% differing from the experimental data obtained) for both open and closed OWCs configuration, it comes the **validation** process. In this section, the behaviour of the platform (opened OWCs, closed OWCs and partially opened OWCs) is checked against irregular and regular incident waves.

The commercial aspect of this multiuse platform must be analysed with the main objective of its future commercialization in different locations, each one with its particular conditions of depth, waves and wind. This commercial aspect requires a detailed analysis of several **environmental aspects** which are directly related to renewable energies suitability which are mentioned during this work. Related with this, in the present work it has also carried out a **visibility analysis** with the ArcGis programme with the object of clearing up one of the most important aspects related to the social concerning about the acceptance of this kind of huge marine parks: The Visual Impact.

In general terms, it is considered that this project fulfilled satisfactorily the objectives pretended: the calibration and validation process reached a reliable calibrated numerical model which is able to represent (with great precision) the movement of the multipurpose platform under study for its main DOFs for incident waves. It is also true that, due to the number of the assumed simplifications, the model presents some inaccuracies: coupling between Sway and Yaw DOFs as well as free surface and pressure variation within the chambers in operational situation. In addition, as any research process, the development of this work has allowed to identify requirements or some interesting factors that are not included in the present study. These are taken into account for **future researching lines**.

An aspect to highlight is that from the work carried out for this Final Master Project is working, in collaboration with IHCantabria, a **scientific paper** which will be published in a prestigious international magazine (Q1) in the field of Offshore engineering.