



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS**

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS DEL AGUA Y DEL MEDIO
AMBIENTE

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS PARA LA
GESTIÓN DE LA COSTA

TESIS DOCTORAL

MODELADO NUMÉRICO DE SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA DEL OLEAJE BASADOS EN LA TECNOLOGÍA DE COLUMNA DE AGUA OSCILANTE

Presentada por:

Arantza Iturrioz Eceiza

Dirigida por:

Dr. Raúl Guanche García

Dr. César Vidal Pascual

Santander, Junio de 2014

*Hegoak ebaki banizkio
nerea izango zen,
ez zuen aldegingo.
Bainan honela,
ez zen gehiago txoria izango,
eta nik ...
txoria nuen maite.*

Mikel Laboa

Agradecimientos

De todo lo que implica el desarrollo de una tesis doctoral, esta parte engloba lo único esencial. Porque tan importante como la meta es el camino, porque puede que cambiemos de destino, o simplemente, lleguemos a un sitio distinto al imaginado. En cualquier caso, siempre nos quedará el camino. Me gusta pensar que detrás de cada uno de nosotros hay un camino que llega de lejos, que muchos otros han tenido que andar para que hoy estemos todos nosotros aquí. Pero una vez que nos dan un par de zapatos y comenzamos a andar, son nuestros pasos, unas veces torpes, otras valientes, otras cansados, los que nos llevan a nuestro presente y a nuestro futuro. Andamos, y nuestros caminos se cruzan con los de otros, con algunos nada más ponernos los zapatos, con otros cuando ya están algo manchados. Tenemos la suerte de encontrarnos con caminantes como nosotros, con los que podemos compartir un tramo, o incluso toda la vida. Tan gratificante es compartir el camino, que bien podría ser la única razón para caminar. A todos los que habéis caminado conmigo durante estos cuatro años y los que hicisteis el camino hasta mi kilómetro cero, muchas gracias.

Quiero empezar por agradecer a mis directores, Raúl Guanche y César Vidal, su esfuerzo y dedicación durante estos cuatro años, sin el cual la realización de esta Tesis Doctoral no hubiese sido posible. Me gustaría agradecerles su paciencia, especialmente durante los dos primeros años, durante los cuales tuve la oportunidad de leer, comprender y adquirir conocimientos, constituyendo la base sobre la cual se ha construido esta Tesis Doctoral. Quiero agradecer a César la perspectiva que me ha aportado siempre desde su experiencia, su sentido crítico y su capacidad de relativizar las situaciones, que no problemas. Quiero dar las gracias a Raúl por su confianza, cercanía y comprensión, así como por la madurez que ha demostrado al dirigir su primera tesis doctoral. Quiero subrayar también el esfuerzo realizado por ambos en la revisión del presente documento, ya que sus aportaciones han contribuido de forma muy importante a su mejora.

En cuanto a la producción científica ligada al desarrollo de la presente Tesis, quiero dar las gracias a mis directores, y al resto de los coautores de los distintos trabajos: José A. Armesto, Marco A. Alves, Javier L. Lara e Íñigo J. Losada. Gracias por vuestras imprescindibles aportaciones científicas, que de forma directa han contribuido a ampliar mis conocimientos, y por tanto, a mejorar y completar esta Tesis.

Por brindarme la oportunidad de desarrollar mi Tesis Doctoral en el IH Cantabria me gustaría dar las gracias muy sinceramente a Íñigo J. Losada y Raúl Medina. Por constituir un ejemplo de trabajo y entrega para todos. Gracias a vuestra confianza y esfuerzo he podido aprender mucho y madurar como investigadora, cumpliendo la meta personal establecida cuando decidí comenzar el doctorado.

Me gustaría dar las gracias también a todas las personas que han colaborado en la realización de esta Tesis, ya que sin su trabajo no hubiese sido posible. Para comenzar, quiero dar las gracias a todo el equipo del laboratorio, en especial a Leo Migoya, Álvaro Álvarez y Pedro Lomónaco, por hacer posible con su trabajo la campaña experimental desarrollada en el marco de esta Tesis. Me gustaría también agradecer a José A. Armesto su trabajo imprescindible en los códigos desarrollados en el marco de esta Tesis. No quisiera olvidarme del apoyo recibido por parte del grupo de Hidrodinámica e Infraestructuras Costeras. Gracias especialmente a Gabriel Barajas, Pablo Higuera y Javier L. Lara. Muchas gracias también a Iñaki Silanes y Felipe Maza por hacer que nuestro cluster funcione y haber tenido la paciencia de atender las necesidades y resolver todos los problemas que han surgido durante el desarrollo de esta Tesis. Por último, me siento muy agradecida a Marco A. Alves, por la generosidad y excelente disposición mostrada siempre a lo largo del desarrollo de este trabajo.

I would also like to thank Professor S. Grilli from the University of Rhode Island, for the opportunity he gave me to know marine renewables and wave energy for the first time during my internship with him. Thank you very much for all your help during our stay in the USA.

Por supuesto, quiero dar las gracias a mis compañeros y amigos del grupo en Ingeniería Offshore y Energías Marinas, por transmitirme siempre su apoyo y su ánimo para la realización de esta Tesis. Porque las risas y los buenos momentos que acompañan nuestro trabajo diario han supuesto muchas veces para mí el

empuje que necesitaba para seguir adelante con una sonrisa. Gracias a Víctor, Michele, Lucía, José, Fernando, Adrián, Javi, Elena y Joseba. Me siento muy afortunada de formar parte de un grupo como este, donde todos y cada uno de vosotros me habéis aportado mucho más de lo que podéis imaginar. No quisiera olvidarme tampoco de los compañeros que ya han dejado el grupo para embarcarse en otras aventuras. Gracias a Victoria, Gema, Javi López y Miguel.

Quiero acordarme también del equipo de administración del instituto por hacer que esta casa funcione. Gracias a Yolanda, Silvia, Ana, Sonia y todos los demás. Muchas gracias a Patri por animarme durante la última etapa de la Tesis. También quiero agradecer a los informáticos, Javi y Rafa, que hayan sido capaces de arreglar todo lo que he destrozado durante estos cuatro años. En general, quiero dar las gracias a toda la gente que he conocido en el instituto y que me ha tendido su mano sin dudar. Muchas gracias a Felipe y Gabi por todos los cafés y chaskis compartidos.

También quiero agradecer a INORE la oportunidad que me ha dado de conocer otros jóvenes investigadores del ámbito de las energías renovables marinas, despertando en mí la consciencia de pertenecer a una generación que trabaja hacia un futuro mejor.

Como no podría ser de otra forma, quiero dar las gracias a todos mis amigos, tanto a los que he tenido la suerte de conocer en Santander, como a los que me llevan acompañando toda la vida. A los primeros, por compartir los baches del camino y risas inolvidables. Gracias muy especialmente a Yanira, Chris, Andrea, Elvira, Ainara, Marta, Francesca, Amets y Joseba, por compartir momentos únicos. Por profundizar en nuestra amistad hasta llegar a ese punto de no retorno, donde cada uno se muestra tal y como es, y hace de cada pequeño detalle una experiencia de humanidad. A los amigos de toda la vida, quiero agradecerles su amistad incondicional, incluso cuando no he sacado tiempo para cuidarla. Por hacer que cada vez que voy a Donosti sea como si nunca me hubiese ido. Quiero agradecer a toda mi cuadrilla, y de forma muy especial a Ainara e Irati, que hayan estado siempre conmigo. Por esa relación de profundo conocimiento, respeto y admiración mutua que nos une y que siempre nos unirá.

Y podría alargar indefinidamente esta lista de agradecimientos, y seguiría olvidándome de alguien importante. Por favor, a todos los que habéis estado a mi

lado, muchísimas gracias.

El más profundo de los agradecimientos lo guardo para mi familia. Para mis padres, Lourdes y Jose Mari, que fueron los que me dieron los zapatos para poder andar mi camino. Por mostrarme con su ejemplo la esencia de la vida. Por enseñarme que para ser feliz, la vida no tiene por qué ser fácil, sino plena. Por saber transmitirme los valores que me hacen escribir estas palabras de sincero agradecimiento. Por regalarme una infancia muy feliz y quererme como adulta, respetando y acompañando cada una de mis decisiones. Por darme fuerzas siempre para ser fiel a mis principios y preguntarme si soy la protagonista de mi vida. Eskerrik asko aita eta ama, maite nauzuen bezela maite nauzuelako.

Para mis hermanos, Iñigo y Beñat, por ser mis primeros compañeros de camino, los que me han enseñado a compartir, a pelear, a ser uno más, a comprender, a defender, creando sin buscarlo todo lo que me une a ellos de una forma tan especial. Por decir las palabras más bellas sin hablar.

Para mis abuelos, Ramoni, Joxeba, Jesusa y Ramón, por ser para mí, y para mis padres, un gran ejemplo de esfuerzo, trabajo y humildad. Por haber andado mucho y por duros caminos, para que yo hoy esté aquí. Porque he podido ver en sus miradas la paz de una vida bien hecha.

Para todos mis primos, primas, tíos y tías, especialente para mi madrina Maite, por hacerme sentir siempre tan querida.

Para Roland, por aparecer un buen día junto a mi camino y querer volar conmigo. Por tu humanidad, por tu naturalidad, por tu sencillez, por tu paz, por tu mirada transparente. Por tu apoyo y entrega. Por convertirte en el lugar donde buscarme cuando no me encuentro. Merci beaucoup aussi à Anne, Guillaume, Lucien et Mamie, pour votre soutien et pour vos encouragements depuis le premier moment.

Eskerrik asko,

Arantza

julio 2014

Resumen

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 semisumergida 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 cuenta con muy pocas partes móviles, y además se encuentran emergidas, facilitando notablemente las labores de mantenimiento.

Durante las pasadas décadas varios diseños de OWC han llegado a la fase de ensayos en prototipo, pero la mayoría de ellos no cumplió las expectativas esperadas, lo que pone de manifiesto la necesidad de profundizar en el conocimiento y comprensión del problema de la OWC. Además, la construcción de prototipos a gran escala 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. En este trabajo se desarrolla un modelado híbrido (experimental y numérico) de la OWC.

En la bibliografía pueden encontrarse algunos trabajos de modelado experimental a escala reducida y numerosas aproximaciones numéricas al problema. Sin embargo, los resultados del modelado experimental (tanto de laboratorio como de campo), no se encuentran en general disponibles para su uso, y además, raramente incluyen medidas simultáneas de todas las variables de interés del problema: la oscilación de la superficie libre interior de la cámara, la presión del aire de la cámara y el flujo de aire entre la cámara y la atmósfera.

En lo que respecta a los modelos numéricos, diversos autores han desarrollado

una gran variedad de herramientas numéricas para abordar el problema, pero se identificó un vacío metodológico dirigido al modelado optimizado del problema a lo largo de las distintas etapas del desarrollo. Cada etapa del desarrollo se caracteriza por unas tareas específicas a resolver y unos recursos disponibles para ello. Por dicho motivo, el objetivo general del presente trabajo es proponer y verificar una metodología optimizada para el modelado numérico de dispositivos OWC, proponiendo el uso de modelos numéricos específicos para cada tarea del proceso de diseño. Para la consecución de dicho objetivo, el equilibrio entre el esfuerzo computacional y la precisión de los resultados deseada se ha perseguido desde las fases más tempranas hasta las más avanzadas del desarrollo. Dado que todo modelo numérico requiere ser experimentalmente calibrado y validado para poder utilizarlo de manera fiable, se desarrolló una campaña de ensayos experimental en el marco de la presente Tesis. Las distintas herramientas numéricas incluidas en la metodología propuesta se calibran y validan basándose en dichos resultados. Posteriormente, se lleva a cabo una aplicación la metodología propuesta con el objetivo de verificar su adecuación al problema para el cual ha sido desarrollada.

Abstract

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 technology has very few moving parts, and the existing ones are not submerged, which simplifies significantly maintenance works.

During the past decades several OWC designs have reached prototype-scale testing stage, but most of them have not respond as expected, which indicates a strong need to deepen in the knowledge and comprehension of the OWC problem. In addition, big-scale model building 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. In this work, a hybrid modelling (experimental and numerical) of an OWC is developed.

Some small-scale testing works and several numerical approaches can be found in the bibliography. However, experimental testing results (field or laboratory) are not in general available to use them and, additionally, they rarely include simultaneous measurements of all the variables of interest of the problem: chamber free surface oscillation, air pressure in the chamber and air flow between the chamber and the atmosphere.

Regarding the numerical models, a wide variety of numerical tools have been developed by many authors, but it was identified a lack of methodology for an optimized numerical modelling of the problem during the different stages of the development of an OWC device. Each development stage is characterized by its specific tasks to solve and its available resources. For this reason, the general

objective of this work is to propose and verify an optimized methodology for the numerical modelling of OWC devices, proposing the use of specific numerical models for each task of the design process. With that aim, the equilibrium between the computational effort and needed results accuracy is pursued from the early to the most advanced stages. 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 in the scope of this PhD Thesis. The different numerical models included in the methodology proposed are calibrated and validated based on these results. Afterwards, the methodology proposed is applied in order to verify its adequacy for the problem faced.

Índice general

Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xxi
0 Summary	1
0.1 Introduction	3
0.2 State of the art	5
0.3 Objectives and proposed methodology	8
0.4 Experimental testing description	10
0.5 Description of the numerical models	12
0.6 Calibration and validation of the numerical models	15
0.7 Application of the methodology proposed and discussion	19
0.8 Conclusions	23
1 Introducción	29
2 Estado del arte	35
2.1 Breve reseña del principio de OWC	36
2.2 Revisión de prototipos existentes	38
2.2.1 Dispositivos fijos	38
2.2.2 Dispositivos flotantes	42
2.2.3 Conclusiones	45
2.3 Revisión del modelado experimental	47
2.3.1 Conclusión del modelado experimental	48

ÍNDICE GENERAL

2.4	Modelos numéricos para la simulación de dispositivos de OWC . . .	49
2.4.1	Modelado en el dominio de la frecuencia	52
2.4.1.1	Revisión del modelado en el dominio de la frecuencia	56
2.4.2	Modelado en el dominio del tiempo	58
2.4.2.1	Cálculo de la integral de convolución de la fuerza de radiación	59
2.4.2.2	Modelado de la fuerza debida al sistema de extracción de energía	66
2.4.2.3	Revisión del modelado en el dominio del tiempo	69
2.5	Conclusiones	72
3	Objetivos, metodología propuesta y organización de la Tesis	75
3.1	Objetivos del trabajo	76
3.2	Metodología propuesta - Modelado híbrido de la OWC	77
3.3	Verificación de la metodología propuesta	81
3.4	Organización de la tesis	82
4	Experimentación en modelo físico	83
4.1	Justificación de la campaña experimental en modelo físico	85
4.2	Objetivo general de los ensayos	85
4.3	Disposición general de los ensayos	86
4.4	Instrumentación	89
4.5	Ensayos realizados	92
4.5.1	Ensayos de calidad y análisis de la reflexión	92
4.5.2	Ensayos con la apertura superior de la cámara cerrada . . .	93
4.5.3	Ensayos con cámara abierta	97
4.5.4	Ensayos para la selección de aperturas	98
4.5.5	Ensayos regulares con las aperturas seleccionadas	99
4.5.6	Ensayos irregulares	99
4.6	Resumen de los resultados obtenidos	100
4.6.1	Superficie libre interior	101
4.6.2	Presión del aire en la cámara	104
4.6.3	Velocidad vertical del aire entre la cámara y la atmósfera .	106

4.7	Conclusiones de la campaña experimental	109
5	Descripción de los modelos numéricos empleados	111
5.1	Modelado numérico en el dominio de la frecuencia	113
5.1.1	Cálculo de los coeficientes hidrodinámicos	113
5.1.2	Procedimiento de cálculo de la producción media de un estado de mar	115
5.1.3	Selección de la constante de PTO óptima (D_{opt})	116
5.2	Modelado numérico en el dominio del tiempo	119
5.2.1	Física modelada y asunciones	119
5.2.2	Resolución del modelo	123
5.2.3	Cálculo de la producción media de un estado de mar	128
5.2.3.1	Producción hidromecánica	128
5.2.3.2	Producción neumática	129
5.2.4	Selección del amortiguamiento óptimo por PTO	130
5.3	Modelado con CFD	132
5.3.1	IH-2VOF	132
5.3.2	OpenFOAM	135
5.4	Resumen del capítulo	137
6	Calibración y validación de los modelos numéricos	139
6.1	Modelado numérico en el dominio de la frecuencia	140
6.1.1	Verificación del modelo en el dominio de la frecuencia	140
6.1.2	Calibración de las pérdidas por fricción en el modelo en el dominio de la frecuencia	141
6.2	Modelado numérico en el dominio del tiempo	143
6.2.1	Primera verificación del modelo	143
6.2.2	Calibración de la fuerza de fricción	144
6.2.3	Calibración del coeficiente de descarga	146
6.2.4	Validación del modelo	148
6.2.5	Conclusiones de la calibración y validación del modelado en el dominio del tiempo	152
6.3	Modelado con herramientas de CFD	154
6.3.1	IH-2VOF	154

ÍNDICE GENERAL

6.3.2	OpenFOAM	155
6.3.2.1	Disposición numérica de las simulaciones realizadas en OpenFOAM	155
6.3.2.2	Superficie libre fuera y dentro de la cámara . . .	159
6.3.2.3	Presión de aire en la cámara	162
6.3.2.4	Velocidad de aire a través de la apertura	165
6.3.2.5	Conclusiones de la validación de OpenFOAM .	169
7	Aplicación de la metodología propuesta y discusión	171
7.1	Selección de la localización óptima para un dispositivo: modelado en el dominio de la frecuencia	173
7.2	Estimación de la producción en la localización seleccionada: modelado en el dominio del tiempo	179
7.3	Análisis detallado las dinámicas en torno a la cámara: modelado con OpenFOAM	186
7.3.1	Análisis del escalado del problema con OpenFOAM . . .	186
7.3.2	Análisis detallado del problema mediante OpenFOAM . .	191
7.4	Discusión de la metodología propuesta	201
7.4.1	Influencia de la compresibilidad en la producción energética	201
7.4.2	Valoración de la metodología propuesta	206
8	Conclusiones	209
9	Futuras líneas de trabajo	215
	Referencias	217

Índice de figuras

1.1	Fenómenos asociados al oleaje aprovechados por los convertidores de energía undimotriz (WEC).	31
2.1	Esquema general de la Columna de Agua Oscilante (OWC).	36
2.2	(a) Esquema de los prototipos Kvaener (Noruega) y (b) Sakata Port (Japón).	40
2.3	(a) Esquemas de Limpet plant (Escocia) y (b) Pico plant (Azores, Portugal).	41
2.4	Planta de OWC de Mutriku.	42
2.5	(a) Kaimei-Jamstec (Japón) y (b) Mighty Whale (Japón).	44
2.6	Esquema general del concepto BBDB.	45
3.1	Esquema de la estructura de la tesis.	79
3.2	Línea de diseño en el tiempo.	81
4.1	Esquema del canal.	87
4.2	Canal y modelo de cámara OWC.	87
4.3	Geometría del modelo de OWC.	88
4.4	Sensores de nivel para el análisis de incidente y reflejada.	89
4.5	Esquema de los sensores capacitivos en el interior de la cámara (a: planta, b: alzado) y foto.	90
4.6	Esquema de la localización de los sensores de presión (a: planta, b: alzado) y foto.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

4.7	Esquema de la localización del anemómetro ultrasónico (a: planta, b: alzado) y foto.	92
4.8	Esquema del canal en ausencia del modelo de OWC.	93
4.9	Series temporales de superficie libre durante los ensayos de calidad. Caso C8 (H=0.08 m, T=1.1 s).	95
4.10	Resultados de un ensayo de estanqueidad. Series temporales de superficie libre y presión en la cámara.	96
4.11	Resultados de la selección de aperturas con el caso N58 (H=0.03 m, T=1.2 s).	98
4.12	Oscilación de la superficie libre en el interior de la cámara registrada por los 3 sensores utilizados para un caso de oleaje regular. Caso C24 (H=0.08 m, T=1.3 s), apertura superior de 50 mm.	101
4.13	Oscilación de la superficie libre en los casos de oleaje regular ensayados.	102
4.14	Oscilación de la superficie libre en los casos de oleaje irregular ensayados.	103
4.15	Oscilación de la presión del aire en los casos de oleaje regular ensayados.	105
4.16	Oscilación de la presión del aire en los casos de oleaje irregular ensayados.	106
4.17	Oscilación de la velocidad vertical del aire a través de la apertura en los casos de oleaje regular ensayados.	107
4.18	Oscilación de la velocidad vertical del aire a través de la apertura en los casos de oleaje irregular ensayados.	108
5.1	Resultados de WADAM para la masa añadida, A , el coeficiente de amortiguamiento hidrodinámico, B , y la amplitud de la fuerza de excitación, $ \hat{f}_{exc} $ para la geometría de la cámara modelada experimentalmente.	114
5.2	Selección del D_{opt} y producción media horaria correspondiente para un rango de frecuencias y altura de ola incidente de 1 m. Geometría equivalente a la modelada experimentalmente pero a escala de prototipo.	118

5.3	Obtención de la fuerza de excitación mediante simulaciones CFD.	121
5.4	Diagrama de resolución del modelo en el dominio del tiempo (Iturrioz <i>et al.</i> , 2014a).	124
5.5	Selección de apertura óptima en el dominio del tiempo. Caso: $H_s=5.5$ m, $T_p=8.46$ s. Geometría equivalente a la ensayada en el laboratorio pero a escala de prototipo.	131
6.1	Comparación RAOs de WADAM y del modelo en el dominio de la frecuencia con y sin PTO.	141
6.2	Series temporales de superficie libre interior experimental y del modelo en el dominio de la frecuencia calibrados. Oleajes regulares C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s, $c_l=180$) y C22 ($H=0.08$ m, $T=1.1$ s, $c_l=70$), apertura de 50 mm.	142
6.3	RAO de WADAM y del modelo numérico en el dominio del tiempo.	144
6.4	Curvas de calibración de los coeficientes de fricción lineal (k_l) y no-lineal (k_{nl}) y errores con y sin calibración de la fricción.	146
6.5	Calibración del coeficiente de descarga c_d basándose en los casos de oleaje regular con apertura de 9 mm y diferencias entre datos numéricos y experimentales.	147
6.6	Comparación entre IH-2VOF y el modelo simplificado en el dominio del tiempo para un ensayo de decaimiento. Elevación inicial en la cámara de 0.12 m.	148
6.7	Series temporales de superficie libre interior experimental y numérica. Oleaje regular C28 ($H = 0,08$ m, $T = 3,2$ s), apertura de 50 mm, coeficientes de fricción $k_l = 17,9315$ y $k_{nl} = 0$.	149
6.8	Series temporales de superficie libre y oscilación de la presión de aire interior experimental y numérica. Oleaje regular C22 ($H = 0,08$ m, $T = 1,1$ s), apertura de 4.5 mm, $c_d = 0,8643$.	150
6.9	Series temporales de superficie libre interior del modelo simplificado e IH-2VOF. Oleaje irregular ($H_s = 0,08m$, $T_p = 2,2s$), cámara abierta, coeficientes de fricción $k_l = 16$ y $k_{nl} = 35$.	151

ÍNDICE DE FIGURAS

6.10	Espectros experimentales y numéricos de superficie libre y presión. Oleaje irregular Ir14 ($H_s = 0,06$ m, $T_p = 3,2$ s), apertura de 4.5 mm, coeficiente de descarga $c_d = 0,9107$	152
6.11	Comparación de superficie libre interior experimental y de IH-2VOF. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 50 mm.	154
6.12	Comparación de resultados de superficie libre de un caso simulado considerando el dominio entero del canal y el dominio reducido. Caso C26 ($H=0.08$ m, $T=1.7$ s), apertura superior de 50 mm.	156
6.13	Esquema del dominio simulado en OpenFOAM.	157
6.14	Series temporales de superficie libre experimentales y numéricas en los sensores de nivel colocados antes de la cámara. Caso C26 ($H=0.08$ m, $T=1.7$ s), apertura superior de 50 mm.	159
6.15	Series temporales de superficie libre experimentales y numéricas en los sensores de nivel colocados después de la cámara. Caso C26 ($H=0.08$ m, $T=1.7$ s), apertura superior de 50 mm.	160
6.16	Series temporales de superficie libre experimentales y numéricas en las 3 secciones interiores a la cámara. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 50 mm.	161
6.17	Series temporales de superficie libre experimentales y numéricas en las 3 secciones interiores a la cámara. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 9 mm.	162
6.18	Series temporales de presión del aire en la cámara experimentales y numéricas. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 9 mm.	164
6.19	Series temporales de presión del aire en la cámara experimentales y numéricas. Caso C27 ($H=0.08$ m, $T=2.2$ s), apertura superior de 9 mm.	164
6.20	Series temporales de presión del aire en la cámara experimentales y numéricas. Caso C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s), apertura superior de 9 mm.	165

ÍNDICE DE FIGURAS

6.21	Series temporales de velocidad del aire sobre la cámara. Caso C24 (H=0.08 m, T=1.3 s), apertura superior de 50 mm.	166
6.22	Series temporales de velocidad del aire sobre la cámara. Caso C24 (H=0.08 m, T=1.3 s), apertura superior de 9 mm.	167
6.23	Instantes de máximo caudal de aire de salida y de entrada y posición del volumen de medida del anemómetro.	167
6.24	Series temporales de velocidad del aire sobre la cámara. Caso C27 (H=0.08 m, T=2.2 s), apertura superior de 9 mm.	168
6.25	Series temporales de velocidad del aire sobre la cámara. Caso C28 (H=0.08 m, T=3.2 s), apertura superior de 9 mm.	169
7.1	D_{opt} óptima en función del periodo y la producción media horaria correspondiente.	174
7.2	Mapa de los emplazamientos considerados en el proceso de selección (Babarit <i>et al.</i> , 2012).	175
7.3	Matrices de ocurrencia correspondientes a los emplazamientos considerados.	176
7.4	Matriz de potencia del dispositivo estudiado, estimada en el dominio de la frecuencia.	177
7.5	Matrices de producción correspondientes a los emplazamientos considerados, estimadas en el dominio de la frecuencia.	178
7.6	Relación óptima entre el área de la apertura y el área interior de la cámara para cada estado de mar considerado y curva en función del peralte de cada estado de mar.	181
7.7	Curvas de producción con y sin fricción en función de la relación de áreas para la selección del amortiguamiento óptimo para distintos estados de mar.	182
7.8	Matrices de potencia y de producción correspondientes a Belmullet, estimadas en el dominio del tiempo.	183
7.9	Diferencias entre la matriz de producción correspondiente a Belmullet en el dominio del tiempo y de la frecuencia.	184
7.10	Resultados de los casos comparados para el análisis del escalado de la producción con OpenFOAM.	190

ÍNDICE DE FIGURAS

7.11 Series temporales de superficie libre en la cámara, oscilación de la presión del aire, velocidad de la superficie libre y velocidad del aire a través de la apertura superior. Caso C28 (H=0.08 m, T=3.2 s), apertura superior de 9 mm.	192
7.12 Presión dinámica (Pa) a lo largo del canal durante un ciclo de presurización-despresurización de la cámara. Caso C28 (H=0.08 m, T=3.2 s), apertura superior de 9 mm.	193
7.13 Oscilación de la presión (Pa) en la cámara durante un ciclo de presurización-despresurización de la cámara. Caso C28 (H=0.08 m, T=3.2 s), apertura superior de 9 mm.	195
7.14 Velocidad vertical del aire (m/s) en la cámara durante un ciclo de presurización-despresurización de la cámara. Caso C28 (H=0.08 m, T=3.2 s), apertura superior de 9 mm.	196
7.15 Vorticidad en el agua [(m/s)/m] durante un ciclo de presurización-despresurización de la cámara. Caso C28 (H=0.08 m, T=3.2 s), apertura superior de 9 mm.	199
7.16 Vorticidad del aire [(m/s)/m] durante un ciclo de presurización-despresurización de la cámara. Caso C28 (H=0.08 m, T=3.2 s), apertura superior de 9 mm.	200
7.17 Resultados de los casos comparados para el escalado de la producción con el modelo simplificado en el dominio del tiempo. . .	204
7.18 Variación de la densidad del aire durante las simulaciones realizadas con el modelo simplificado en el dominio del tiempo.	205

Índice de tablas

4.1	Posición de los sensores de superficie libre según el periodo (Mansard & Funke, 1980).	90
4.2	Casos de oleaje regular en ausencia del modelo de OWC en el canal.	94
4.3	Casos de oleaje regular realizados con las aperturas seleccionadas.	97
4.4	Aperturas ensayadas con oleaje regular.	99
4.5	Casos de oleaje irregular con apertura superior de 4.5 mm.	100
4.6	Casos de oleaje irregular con apertura superior de 9 mm.	100
6.1	Casos regulares de laboratorio simulados con OpenFOAM.	155
6.2	Velocidades de simulación medias en función del tamaño de la apertura superior.	158
7.1	Producciones anuales en los emplazamientos considerados, estimadas en el dominio de la frecuencia.	178
7.2	Producciones anuales en Belmullet, estimadas mediante el modelo en el dominio de la frecuencia y del tiempo.	185
7.3	Casos de oleaje regular comparados para el análisis del escalado de la producción con OpenFOAM.	187
7.4	Escalado de las diferentes magnitudes según la semejanza de Froude.	188
7.5	Casos regulares comparados para el escalado de la producción con el modelo simplificado en el dominio del tiempo.	203
7.6	Escalado observado de las diferentes magnitudes considerando la compresibilidad del aire.	205

ÍNDICE DE TABLAS

7.7	Velocidades de simulación medias en función del tipo de modelo utilizado.	206
-----	---	-----

CAPÍTULO

0

Summary

*Con el objetivo de cumplir con las condiciones establecidas para la consecución de la mención de **Doctor internacional** en la Normativa de los Estudios de Doctorado de la Universidad de Cantabria, aprobada por la Junta de Gobierno el 12 de Marzo de 1999 y actualizada el 18 de Diciembre de 2013, en este capítulo se recogen:*

- *El resumen de la tesis doctoral redactada en inglés (Summary).*
- *Las conclusiones de la tesis doctoral redactadas en inglés, que consiste en el Capítulo 8 íntegramente traducido al inglés en el apartado final del resumen (Summary/Conclusions).*

Numerical modelling of wave energy conversion systems based on Oscillating Water Column technology

0.1 Introduction

During the last decades the global energy demand has exponentially increased, mainly led by the emergent economies such as China and India. Currently, the world energy production faces the challenge to fit this increasing demand. The development of the renewable energies is nowadays a reality, but most of the global energy production still comes from fossil resources. The limitation of these fossil resources together with the international climate targets focused to CO_2 emissions reduction, make necessary a progressive and planned transition to renewable energy resources. In this field, marine renewable energies are one of the most promising alternatives, which indeed are being strongly promoted by the European Commission. Within marine renewables, big effort is being made around wave energy, which is the scope of this PhD Thesis.

0. SUMMARY

The devices designed for generating electric power from wave energy are called Wave Energy Convertors (WEC). There are many reasons for developing WECs. First of all, wave energy is a highly predictable resource. In addition, along the West Coast of Europe, and specifically in the Spanish Atlantic Coasts, the available resource is strong. The potential future locations for this kind of devices are also widespread in all the oceans. It is also a convenient alternative regarding the environmental issues, since they are taken into account and studied from the very beginning of the technology development. To conclude, due to economies of scale, it is expected a reduction of the energy cost as the technology reaches the commercial state.

The idea of transforming wave energy into electrical energy is not new ([Falcão, 2010](#)), but it has never reached a real commercial stage and nowadays efforts are being focused on this. In general, WECs can be based in three types of technologies: Oscillating Bodies, Overtopping Devices and Oscillating Water Columns (OWC). The present work is dedicated to the OWC technology. The simplicity of the working principle of the OWC is its main advantage. The technology consists on a hollow caisson connected to the sea below the sea level. A column of water and an air chamber is trapped inside the caisson. An air turbine and electric generator are installed in top of the air chamber to extract the energy from the pulsating air flow. Incident ocean waves activate the trapped water column forcing the up and down oscillation of the inner free surface, that acts as a piston on the air chamber, forcing the airflow outwards and inwards through the turbine and making it rotate. Some air valves regulate the flow through the turbine and the pressure in the air chamber. The technology has very few moving parts, and the existing ones (air valves and turbo-generator) are not submerged, which simplifies significantly maintenance works. OWC devices can be fixed or floating. The fixed devices are designed to be placed in the coast line at shallow water. Their design is totally dependent on the site characteristics and they are usually exposed to hard operational conditions due to wave breaking. The floating OWC devices are located offshore, far away from wave breaking zones, and exposed to more energetic conditions. In the case of floating devices, the motion of the floater contributes to the dynamics of the inner water column.

0.2 State of the art

To begin with, the existing bibliography was revised, in order to get to know the previous work developed by different authors related to the OWC technology. It was found that many of the concepts that developers are currently trying to bring into a commercial state are not new (Ross, 1979; Falcão, 2010). Several designs reached the prototype field testing stage in the past, both fixed (Bonke & Ambli, 1986; Ohneda *et al.*, 1991; Heath *et al.*, 2000; Whittaker *et al.*, 1993; Holmes *et al.*, 1996; Ravindram & Koola, 1991; Torre-Enciso *et al.*, 2009) and floating (Masuda, 1971, 1979; Washio *et al.*, 2000; Alcorn *et al.*, 2005; Masuda & McCormick, 1987; Nagata *et al.*, 2011). However, most of them, except the powering navigation buoys (Masuda *et al.*, 1993, 1995), did not fulfill the desired expectations, showing a clear need to deepen in the knowledge and comprehension of the OWC problem. What is more, prototype construction and full-scale testing involve high economic costs that can not be afforded during early stages of a development.

There are different kind of tools that can contribute to analyze the OWC problem without such investments. Small-scale experimental testing brings the opportunity to observe and comprehend the dynamics involved in the studied problem, and numerical modelling is able to reproduce them saving time and cost. However, every numerical tool needs to be experimentally calibrated and validated before it is used reliably and experimental testing of OWC devices is not simple (Cruz, 2008), since the hydrodynamics and pneumatic effects need to be considered. Weber (2007) and Lopes *et al.* (2009) stated the impossibility to model air compressibility by means of a geometric scaling of the problem. For this reason, a hybrid experimental-numerical methodology for OWC modelling is developed in this work.

Some experimental works and several numerical approaches to the problem were found in the bibliography. The experimental databases are not normally available for research uses and, in addition, they normally do not include simultaneous measurements of the variables of interest of the problem: free surface oscillation outside and inside the chamber, chamber interior air pressure oscillation and air

0. SUMMARY

circulation between the chamber and the atmosphere. For this reason, an experimental testing campaign was carried out in the framework of this PhD Thesis.

Regarding the numerical models, very different complexity models were found in the bibliography. It is widely accepted that the Computational Fluid Dynamics (CFD) models that solve the Navier-Stokes equations are the most accurate way of analyzing the dynamics involved in a WEC (De Backer, 2007). These models are capable of dealing with complex phenomena such as viscous effects (Alves & Sarmiento, 2006), turbulence, wave breaking and multi-phase flows (Higuera *et al.*, 2013b). However, their extremely high computational cost make simpler alternatives necessary. Indeed, research on OWC has been strongly based on simplified analytical models (Evans, 1978, 1982; Sarmiento & Falcão, 1985; Evans & Porter, 1995). Many simplified numerical models are based on Newton's Second Law, applied to a floating body. The forces to take into account in the case of a floating body can be divided in two groups: the hydrodynamic forces and the external forces. The hydrodynamic forces are the result of the interaction between the device and the ocean, and they include the excitation force induced by the incident waves on the static floater, the radiation force induced by the water motion due to the body oscillation, the hydrostatic force due to the variation of the submergence of the body and friction forces due to viscous effects. The external forces include usually mooring forces and forces applied by the Power Take Off (PTO) system. The problem of a floating WEC can be solved in the frequency-domain or in the time-domain. All the forces should be expressed as functions of the body motion, velocity or acceleration using different coefficients (that characterize hydrodynamics, PTO etc.). Frequency-domain modelling requires that all forces can be expressed as linear functions of the body motion or its derivatives, and that linear superposition principle is applicable. Time-domain modelling is an alternative capable of considering the non-linearities due to extreme waves, mooring and viscous drag forces or PTO systems.

In the frequency-domain, all the forces acting on the WEC due to an incident regular wave train of frequency ω are considered linear, including the external forces (PTO and mooring). Considering only one degree of freedom (heave) and

assuming wave amplitude and body motion small enough with respect to the sinusoidal incident wave length, body motion can be expressed as a sinusoidal function of frequency ω . Expressing all the forces in function of this motion or its derivatives (velocity and acceleration), the complex amplitude of the body motion can be calculated. This amplitude will be a function of the hydrodynamic coefficients of the body, PTO system characteristics and other coefficients defined in the problem.

In the time-domain, [Cummins \(1962\)](#) equation expresses the motion of a floating body excited by a wave train. This equation contains a convolution integral between the impulse response function ($K(t)$) and the WEC velocity, which comes from the expression of the radiation force in the time-domain and represents the memory of the fluid. Solving this integral is the hardest part of this kind of models in the time-domain. Its direct calculation is possible but tough. [Taghipour et al. \(2008\)](#) stated that its direct resolution is much slower than other methods. The $K(t)$ function can be calculated using Boundary Element Methods (BEM) in the time-domain, but involving high computational costs. However, impulse response function ($K(t)$) can be expressed in the frequency-domain ($K(\omega)$, transfer function) by means of the Fourier Transform. $K(\omega)$ can be expressed in terms of the hydrodynamic coefficients of added mass ($A(\omega)$), added mass at infinite frequency (A_∞) and hydrodynamic damping coefficients ($B(\omega)$). This coefficients can be obtained by means of BEM models in the frequency-domain like WAMIT ([WAMIT, 2012](#)). However, these models require refined meshing of the wet surface and have high computational costs. $K(t)$ can also be calculated in function of the hydrodynamic damping coefficient in the frequency domain by means of the inverse Fourier transform, but the computational cost and operational error would be high. For all these reasons, there is a need of an alternative method to approximate the convolution integral.

There are many ways to approximate the radiation convolution integral in the bibliography, and all of them replace the convolution integral by a system of ordinary differential equations to avoid its direct resolution. Among them, the most used are [Prony \(1795\)](#) method and the State-Space method ([Schmiechen, 1973](#); [Yu & Falnes, 1995](#); [Taghipour et al., 2008](#)). In order to determine the coefficients

0. SUMMARY

of the State-Space system, Pérez & Fossen (2008) analyzed different identification methods in the frequency and time-domains.

Regarding the modelling of the PTO force in OWC devices, the air mass inside the chamber imposes a damping force to the water column motion. In general, the air in the chamber is considered an ideal gas. Different authors stated the importance of modelling air compressibility in full-scale, since its effect increases with chamber height (Sarmiento & Falcão, 1985) and helps to optimize power production efficiency (Martin-rivas & Mei, 2009a). Several authors consider the outflow and inflow processes adiabatic, since heat exchange with the environment is very low (Falcão & Justino, 1999). To simplify the modelling, both outflow and inflow processes are considered isentropic by many authors (Falcão & Justino, 1999; Nunes *et al.*, 2011). However, in the inflow process air specific entropy changes due to viscous losses through the entrance (Falcão & Justino, 1999).

To conclude this section, it must be remarked that a wide variety of numerical tools were found in the bibliography, but a methodological gap was identified with regards to an optimized use of each model for specific needs in the development of an OWC device. In order to fill this gap, an optimized hybrid numerical modelling methodology for OWC devices development is presented in this work.

0.3 Objectives and proposed methodology

From the review of the bibliography it was detected a lack of methodology regarding the use of different numerical models for the specific needs of each stage of a device development. For this reason, the **general objective** of this work is to present a methodology for the optimized modelling of the OWC, proposing the use of different numerical tools to face specific tasks. To achieve this general aim, the following **partial objectives** were defined:

- Identification of the specific needs of each stage of the OWC device development.
- Based on the state of the art, selection of the most suitable tools to satisfy these needs, hence, reaching an equilibrium between computational cost

and required results accuracy.

- Definition of the methodology proposal.
- Verification of the proposed methodology. For this aim:
 - Development, calibration and validation of the numerical tools.
 - Application of the proposed methodology.
- Assessment of the results obtained and discussion about the adequacy of the methodology proposed.

The **methodology proposed** consists on an **hybrid modelling** of an OWC device, combining experimental and numerical tools. The problem is modelled by means of different numerical models, which are experimentally calibrated and validated. The experimental database is obtained from the physical testing campaign carried out in the scope of this work. The different numerical tools of the methodology proposed are represented in Figure 3.1 of Chapter 3. The methodology can be organized in three blocks and can be summarized as follows:

- **Frequency-domain approximations. Predesign and initial characterization of the OWC:** It is the simplest model, proposed for the early stages of the development, when calculation efficiency is much more important than results accuracy. The problem is assumed linear.
- **Time-domain approximations. Design and power production estimation:** It can be used once some initial decisions have been made (geometry and dimensions). It is capable of considering non-linear aspects of the problem (PTO, friction), increasing the computational cost.
- **CFD modelling. Optimization and detailed analysis:** For the detailed analysis in advanced stages CFD models are proposed (OpenFOAM in this work). These models are extremely demanding in computational terms, but are capable of analyzing detailed aspects such as turbulence, vorticity or water drops, which affect the final power production.

Figure 3.2 of Chapter 3 shows the time-scale of the methodology proposed. The use of resources increase as the development process advances. However, this

0. SUMMARY

design line can be repeated as many times as necessary until the desired design is reached and enough comprehension on its behaviour is obtained in order to face prototype construction.

In order to verify the methodology proposed, it was applied for usual tasks in a device development process. Following the methodology proposed, each model, experimentally calibrated and validated, was used to solve specific needs of their corresponding stages. Finally, the validity of the methodology proposed was discussed.

0.4 Experimental testing description

The experimental testing was carried out in the IH Cantabria facilities of the Civil Engineering School of the University of Cantabria. The experimental campaign was motivated by the lack of accessible data within the literature and the need of having simultaneous data of free surface elevation, pressure in the chamber and air flow between the chamber and the atmosphere, in order to calibrate and validate the numerical models. Experiments took place in a bidimensional flume (20.60 m long x 0.68 m wide x 0.75 m high). The problem was modelled in a bidimensional flume for two main reasons. On the one hand, because it was considered the simplest first approximation to the problem, and on the other, because the CFD model IH-2VOF was previously widely validated for coastal engineering problems in this flume. Therefore, IH-2VOF could be used to extend the validation database. The piston-type wave-makers had an integrated active wave absorption system (AWASYS).

The water depth for all tests was 0.60 meters and an impermeable dissipative beach was placed at the end of the flume (see Figure 4.8 of Chapter 4). Thanks to the dissipative structure, wave reflection in the flume in absence of the OWC model was proved to be lower than 10 % in all cases. Afterwards, a methacrylate made OWC caisson model was placed in the flume. The model was a fixed detached caisson, bottom-opened, that occupied the whole width of the flume. For detailed dimensions see Figures 4.1, 4.2 and 4.3. As it can be observed in Figure

4.3 the PTO system was experimentally conceptualized by means of a variable rectangular top slot on the top of the chamber. Varying the slot width, different air circulation resistances were imposed, changing the air damping force acting upon the OWC oscillation.

Regarding instrumentation, free surface gauges were placed along the flume to analyze wave propagation and reflection. Table 4.1 shows the position of these gauges in function of the wave periods in order to carry out the incident-reflected analysis according to Mansard & Funke (1980). For the characterization of the spatially averaged free surface elevation inside the OWC chamber, three long capacitive wires coiled over a steel framework were used, see Figure 4.5. For the measurement of the air pressure inside the chamber two pressure gauges were placed at each side of the top slot, see Figure 4.6. An ultrasonic anemometer was used to measure air velocity through the top slot, see Figure 4.7. Thanks to the transparent chamber walls, incident and transmitted waves and OWC oscillations were video-recorded.

Regular and irregular waves were tested. First of all, to calibrate incident waves and beach dissipation, wave reflection was analyzed in absence of the chamber model in the flume (Table 4.2). Afterwards, chamber sealing was tested in order to verify the absence of undesired air losses through the chamber model joints. For this aim, an air compressor was used, see Figure 4.10. Once this point was verified, the regular wave cases indicated in Table 4.3 were tested with the maximum top slot aperture. The aim of this tests was to study the OWC motion in absence of air damping (it was experimentally proved that air pressure oscillation was negligible during these tests). Using OWC resonant wave frequency, different top slot apertures were tested, in order to select the different slot apertures to use onwards, see Figure 4.11. Three top slot apertures were selected (Table 4.4) and the regular tests shown in Table 4.3 were conducted for them. Finally, based on the previous results, the irregular wave tests presented in Tables 4.5 and 4.6 were selected for carrying them out.

In Chapter 4 a summary of the experimental results is included. Figures 4.13

and 4.14 show chamber interior free surface oscillation results, Figures 4.15 and 4.16 show chamber air pressure results and Figures 4.17 and 4.18 show air velocity results. All these experimental results integrated the calibration and validation database for the numerical models.

0.5 Description of the numerical models

The numerical models included in the methodology proposed in Chapter 3 are here described. The three model types proposed have very different characteristics and they need to be understood for the correct interpretation of their results.

- **Simplified frequency-domain model:**

The most important assumptions of frequency-domain models were stated when reviewing the state of the art. Assuming linear theory, once the motion of a body under a regular wave train is solved, the motion of a body induced by an irregular sea state can be estimated by superposition. In this work a piston-like OWC motion was modelled. In order to determine the hydrodynamic coefficients of the frequency-domain equation, the Boundary Element Method (BEM) WADAM (DNV, 2008) was used. WADAM is a limited version of the commercial code WAMIT (WAMIT, 2012), which solves the radiation and diffraction problems in the frequency-domain assuming linear theory and potential flow. A rigid piston with mass and geometry corresponding to the body of water trapped between the lower chamber wall lips and the still water level (SWL) was modelled using WADAM, and the added mass ($A(\omega)$) and hydrodynamic damping coefficients ($B(\omega)$) were calculated for a range of frequencies, as well as, the complex amplitude of the excitation force ($\hat{f}_{exc}(\omega)$), see Figure 5.1 of Chapter 5.

In order to estimate the power production, the force due to the PTO system was modelled as a function of OWC velocity following Alves (2012). The PTO damping coefficient was optimized for each frequency considered, selecting the value that maximized energy production for a regular wave train of each frequency, see Figure 5.2. In Chapter 7, in order to estimate the power production of different sea-states, OWC motion was damped with the

optimal value corresponding to the peak period.

- **Simplified time-domain model:**

The time-domain model developed in this work is based on [Cummins \(1962\)](#) equation. The model resolution diagram is represented in [Figure 5.4](#). The radiation convolution integral of the equation was approximated by a State-Space system ([Yu & Falnes, 1995](#)), and in order to define the coefficients of the system, the frequency-domain identification method of [Pérez & Fossen \(2011\)](#) was used, which consists on approximating a parametric function to known values of the transfer function ($K(\omega)$). This known values of the transfer function were obtained in function of the hydrodynamic coefficients calculated in WADAM and using the expression in [Taghipour *et al.* \(2008\)](#).

Once the convolution integral is approximated by means of a State-Space system, several authors ([Yu & Falnes, 1995](#); [Alves *et al.*, 2011](#); [Alves, 2012](#)) have extended this system in order to contain all the terms in [Cummins \(1962\)](#) equation and solve the general equation building a global State-Space system. This method was used in this work.

Regarding the modelling of the air in the chamber, based on the bibliography, it was considered an ideal gas, the inflow and the outflow were considered isentropic and air compression was considered adiabatic. In order to model viscous losses through the top opening, a discharge coefficient was experimentally calibrated, as it is explained in the next section. One of the advantages of the time-domain model is that non-linear forces such as friction forces caused by flow separation in lower wall lips can be considered. Some authors considered this force as a quadratic function of the velocity ([Babarit *et al.*, 2012](#)), but in this work it was modelled as the sum of a linear and a non-linear function of the velocity ([Iturrioz *et al.*, 2013b, 2014a](#)). The friction coefficients were experimentally calibrated.

The excitation force due to a sea state can be obtained by means of the

0. SUMMARY

superposition of the excitation forces of its regular components. The excitation forces due to regular components can be obtained from WADAM or from CFD (IH-2VOF in this work) simulations, see Figure 5.3. In order to obtain the excitation force by IH-2VOF simulations a plate closing the chamber bottom is placed and pressure over the plate is integrated for each time step. Without assuming linear theory, excitation force time-series can be obtained by means of irregular wave simulations integrating the pressure acting on the obstacle in each time step.

The simplified time-domain model was built in Matlab and solved by means of the solver Ode15s.

In order to compute power production, pneumatic power was calculated (Equation (5.32)). This model considered air compressibility and the production estimation accounted for it. The PTO optimization was also carried out with this model. The PTO was conceptualized in this model as a chamber top slot, so the optimal top slot opening was determined for each sea state, taking into account the wave height. This optimal top slot size was selected to maximize each sea state mean production (Figure 5.5).

- **CFD models:**

In the scope of this Thesis two different CFD models were used: IH-2VOF and OpenFOAM.

- **IH-2VOF (Lara *et al.*, 2011):** It is a bidimensional model and it was used in its monophasic (only water) version. This model was previously validated for coastal engineering applications using experiments in the same wave flume used for this Thesis. For that reason, it offers the possibility to complete the calibration database by means of CFD simulations that are complicated to reproduce in laboratory, such as decay tests. The model solves the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations. In order to solve the RANS equations, it uses finite differences discretization. Turbulence is considered by

means of a $k - \varepsilon$ model. The VOF (Hirt & Nichols, 1981) technique is used to track the free surface.

- **OpenFOAM (OpenCFD Ltd, 2014):** The three-dimensionality of the model and its capacity to consider two different phases (water and air) were the main reasons for using this model. RANS equations for two incompressible phases (water and air) are solved using a finite volumes discretization. It uses the VOF technique (Hirt & Nichols, 1981) for free surface tracking. The turbulence model used was a $k - \omega$ SST model. Specific boundary conditions for wave generation and absorption were implemented by Higuera *et al.* (2013a) and validated for coastal processes (Higuera *et al.*, 2013b) and coastal structures (Higuera *et al.*, 2014a,b). These boundary conditions were used in this work.

0.6 Calibration and validation of the numerical models

The numerical models described above need to be calibrated and validated in order to be used reliably. Each model characteristics are very different, and so are their calibration and validation processes too. By means of the previously described numerical models, the experimentally tested geometry was reproduced.

- **Simplified numerical model in the frequency-domain:**

The only external force considered in this model is the PTO force. For a first verification of the model, PTO force was not considered (chamber open to the atmosphere) and the Response Amplitude Operator (RAO) calculated with the frequency-domain model and the one resulting directly from WADAM were successfully compared. For that aim, regular wave series were simulated by means of the simplified model and the amplitude of the OWC motion was calculated. In WADAM, the OWC oscillation was calculated using the rigid piston approach for a range of frequencies. Afterwards, the motion in the frequency-domain model was damped with the optimal PTO, see Figure 6.1 of Chapter 6. Calibration of a linear friction force using the experimental data was attempted. Since friction is an intrinsically non-linear force, the objective was not achieved for most of the cases, see Figure

6.2.

- **Simplified numerical model in the time-domain:**

As a first verification of the model, the time-domain model built was compared with the frequency-domain model WADAM. The OWC motion with the maximum top opening was simulated by means of the time-domain model and without considering the friction losses in the submerged entrance. Figure 6.3 represents the comparison between WADAM and time-domain model RAOs. In general, the agreement is very good. The most important differences happen around the resonance period, due to the order of the polynomial chosen in Pérez & Fossen (2009).

After this first verification, a submerged friction force was calibrated based on experimental data of regular tests. The tests used were carried out with the maximum top opening, since damping due to chamber air was negligible. A linear (k_l) and a non-linear (k_{nl}) friction coefficient were determined in function of the wave steepness. A linear, non-linear and mixed range were defined (see Figure 6.4). The differences between the time-domain model and the experimental data significantly decreased after this calibration.

The other term experimentally calibrated was the discharge coefficient (c_d) through the top slot, which was also adjusted as a function of the wave steepness, see Figure 6.5. For this aim, the experimental tests with a 9 mm top opening were used. Using these calibrations the differences between the numerical model and the experimental results were less than 10 % for all the cases considered.

Afterwards, the validation process started. First of all, the simplified time-domain model was compared with IH-2VOF data. IH-2VOF was used to simulate a decay-test, and the same experiment was reproduced by means of the time-domain model. The Figure 6.6 shows a very good agreement between them. Secondly, experimental OWC motion was reproduced during regular wave tests, first with the maximum top slot opening. For these cases chamber air pressure oscillation was negligible. Figure 6.7 shows a good agreement between experimental and numerical results. Later on, the

discharge coefficient calibration validity for smaller top slots was verified. With this aim, numerical OWC oscillation and chamber interior air pressure results were compared with experimental data for 4.5 mm top opening cases. Figure 6.8 shows the comparison for chamber pressure and free surface oscillation. Overall, the model was able to reproduce the experimentally recorded phenomena, although the error increases as the top opening decreases. Friction and discharge coefficient calibration were also validated for irregular waves based on IH-2VOF and experimental results, see Figures 6.9 and 6.10.

An important aspect to highlight about this validation process is that, although the model considers air compressibility, it did not affect the results, since air behaves as an incompressible fluid in such a small scale.

- **CFD models:**

Both CFD models used were experimentally validated based on regular waves.

- **IH-2VOF:** This model has been widely validated for coastal engineering problems, where air effects are in general not considered. For this reason, the monophasic version of the model was here used and validated for the experimental results with the maximum top opening, see Figure 6.11. This model has been used to extend the validation database for the time-domain simplified model (Figures 6.6 and 6.9).
- **OpenFOAM:** Water and air were simulated by means of OpenFOAM. The three-dimensional domain of the experimental wave flume was modelled. However, in order to reduce computational costs, the length of the flume was reduced. Wave reflection from the back wall was experimentally proved to be very low. For that reason, the numerical domain could be reduced, see Figure 6.13. In order to verify that the numerical result were not affected by this decision, simulations carried out considering the whole flume and the reduced domain were compared, see Figure 6.12.

0. SUMMARY

Regular wave cases in Table 6.1 were simulated and compared with experimental data. For the smallest top opening cases (9 mm) successive mesh refinements were done in order to reach the needed mesh resolution around the top opening. Table 6.2 shows the mean speeds of the simulations. To verify the correct wave generation and propagation of the model, free surface time-series before and after the chamber were compared with experimental data, see Figures 6.14 and 6.15. Afterwards, free surface oscillation inside the chamber was validated, both with maximum top opening (Figure 6.16) and 9 mm top opening (Figure 6.17). The agreement between the experimental and numerical data was very good, and the OWC oscillation amplitude was observed to reduce when the top slot was closed. In addition, OpenFOAM results showed the flow bidimensionality already observed in the experiments.

Afterwards, air pressure oscillation inside the chamber was validated for the different patterns it shows depending on the periods, see Figures 6.18, 6.19 and 6.20. All the result shown for air pressure corresponded to 9 mm top slot cases, since with the maximum top (50 mm) slot the pressure oscillation was negligible.

To finish with, air velocity through the top slot was validated for different top openings and periods (Figures 6.21, 6.22, 6.24 and 6.25). As expected, vertical air velocity was dominant in all the cases. Another thing to highlight is that the order of magnitude of the experimentally recorded air vertical velocity did not significantly change when closing the top slot. This fact can be explained because of the position of the anemometer in the laboratory (see Figure 6.23), which was too far from the slot. Additionally, the measuring volume of the anemometer was also too big, underestimating by spatial integration the velocity values. Figure 6.23 shows also that the outflow is much more directional than the inflow around the anemometer position, which justifies the higher outwards velocities recorded.

Overall, the three variables (inner free surface vertical displacement, air chamber pressure and air velocity) were successfully validated,

showing the high capabilities of the model. Regarding air compressibility, it must be said that model results were realistic without considering it because of the small scale of the experiments.

0.7 Application of the methodology proposed and discussion

In Chapter 7 the methodology proposed in Chapter 3 is applied. The different numerical tools that are considered in the methodology proposed were previously described (Chapter 5) and calibrated and validated (Chapter 6). In Chapter 7 they were applied to solve usual tasks of the different phases of OWC development. From the beginning of a device development to the advanced stages, the complexity of proposed tools increases, since the accuracy needed is also higher. The application of each tool for its specific aim is described in the following, to finish with a discussion about the methodology proposed:

- **Selection of the most suitable location for a device using the simplified model in the frequency-domain:**

In order to analyze the suitability of different locations during the initial stages of a device development a simple and efficient numerical tool is needed. For that reason, the simplified model in the frequency-domain was used to compute a first power production estimation in different possible locations. This task was developed for an equivalent device to the one tested in laboratory, but in prototype-scale (longitudinal scale=30). All the simplifications mentioned in the previous chapters were assumed. In addition, if the water depth in the location considered requested a floating structure, it was assumed stable enough not to affect OWC motion. In Figure 7.1 the PTO damping coefficients obtained for each frequency are represented. In order to compute the power production of a sea state, all the components of the irregular wave train were damped with the optimal coefficient corresponding to the peak period.

The locations considered can be observed in Figure 7.2. The climate conditions of each location can be represented by its occurrence matrix, see

0. SUMMARY

Figure 7.3. Figure 7.4 shows the power matrix calculated in the frequency-domain for the sea-states considered. Combining the occurrence matrix and the power matrix for each location the production matrices were calculated, see Figure 7.5. Table 7.1 contains the estimated annual productions for each location. Based on it, Belmullet was selected as the best option to locate the device.

- **Power production estimation at the selected location by means of the simplified model in the time-domain:**

Once the most suitable location for the device was selected (Belmullet), the power production was estimated in that location in a more realistic way by means of the simplified time-domain model. The computational cost of this model was higher than the frequency-domain model, but still much lower than the CFD tools. As it was said before, PTO system was conceptualized in this model by means of a top slot in the chamber. In order to optimize the PTO damping for each sea state, the top slot size that maximized each sea state mean power production was selected. Figure 7.6 shows this top opening selection for the sea-states considered. Since friction force was experimentally calibrated, the validity range of this calibration is also indicated in the figure. Figure 7.7 shows the influence of the friction force in the optimal opening selection for different wave steepness cases. Figure 7.8 shows the power matrix calculated with the simplified time-domain model and the production matrix in Belmullet. The most important differences between the power matrices in the frequency and time-domain are the big influence of the friction forces in the biggest steepness cases, leading to smaller production, and the influence of the limits of the experimental calibration validity that can be observed in the time-domain matrix. Figure 7.9 illustrates the differences between the production matrices obtained using both models. As expected, frequency-domain model predicted higher productions, see Table 7.2, mainly because it does not take into account the friction forces in the submerged entrance of the chamber.

- **Detailed analysis of the dynamics around the chamber with OpenFOAM:**
The detailed analysis needed during the advanced stages of the device de-

0.7 Application of the methodology proposed and discussion

velopment is the only reason that justifies the high computational cost of CFD modelling.

As it was said before, the OpenFOAM simulations developed in the scope of this work did not consider air compressibility, so scale effects obtained using this model should be related to the inequality of Reynolds numbers in water and air in model and prototype.

In order to analyze these scale effects without air compressibility influence, a laboratory scale case and the equivalent case in prototype scale were simulated, see Table 7.3. It was expected that Froude's number would remain constant between the two cases and that the simulation results would satisfy the scaling in Table 7.4. Results of the simulations are represented in Figure 7.10. Overall, regarding the amplitude of the variables it can be observed that Froude's scaling was fulfilled, but there are some remarkable differences between time-series patterns, which become very important when power production is computed.

After calculating Reynolds number of the flow through the top slot, it was observed that the air flow in the small-scale model was laminar during an important part of the time-series, while it was turbulent most of the time in prototype-scale. That means that the discharge coefficient should be different in model and prototype. Similarly occurs with the flow around the lower chamber lips, where the linear and non-linear terms of the friction coefficients are different in model and prototype. In addition, the turbulence model used is recommended for totally developed turbulent flows. To finish with, the scaling of the vortices in the air chamber is a complex problem that would need a deep analysis itself. It can be concluded that air compressibility and appropriate turbulent models should be applied in the CFD analysis if good prototype predictions are expected.

Bearing in mind the uncertainties mentioned and that air compressibility is negligible in small-scale, in this section the detailed dynamics around the OWC chamber are studied in small-scale. For this aim, an air chamber pressurizing-depressurizing cycle was analyzed by means of snapshots corresponding to significant instants represented in Figure 7.11. Dynamic

0. SUMMARY

pressure along the flume (Figure 7.12), chamber air pressure oscillation (Figure 7.13), air velocity through the top slot (Figure 7.14) and vorticity fields in water (Figure 7.15) and air (Figure 7.16) were represented thanks to the high resolution and accuracy of the model.

- **Discussion of the methodology proposed:**

Due to the fact that air compressibility was not considered by the CFD model used for the detailed analysis of the problem (OpenFOAM), the importance of air compressibility in prototype scale was studied by means of the simplified model in the time-domain. This model takes into account air compressibility and two regular wave cases at laboratory and prototype scale were simulated (Table 7.5) in order to observe its influence. Figure 7.17 shows the results for both cases, where an important difference in pneumatic power production can be observed, see Table 7.6. Looking at the air density variation time-series (Figure 7.18), it can be observed that this variation is much more important in prototype scale, which has a direct influence on the computation of the pneumatic production. Consequently, power production is 50 % increased by considering air compressibility, which highlights the importance of modelling air compressibility.

Regarding the general validity of the methodology proposed, an important fact to take into account is the computational cost of the models. All the models have demonstrated to be capable of facing the tasks assigned, but the resources they consume are a key aspect in order to discuss the adequacy of the methodology proposed. Table 7.7 includes the computational speeds for each model. The speed differences of several orders of magnitude between them demonstrate the need to combine all of them during an efficient development process of an OWC device. The simplified model in the frequency-domain is extremely efficient thanks to all its simplifications (linearization the problem, simplification of the PTO damping). The simplified time-domain tool models the problem in a more realistic way (friction and discharge coefficients calibrated, air modelling, wave height influence in optimal PTO selection for a sea state), in spite of the assumptions (piston-like motion, isentropic air inflow). Additionally, air compressibi-

lity consideration must be highlighted, since it is an important aspect in real-scale study. The difference between frequency and time-domain annual mean production estimations in Belmullet was of 25 %. To finish with, OpenFOAM demonstrated to be a very powerful tool for detailed analysis of the dynamics both in water and air. However, the modelling of air compressibility with CFD tools is considered a priority after this work.

0.8 Conclusions

This PhD Thesis deals with the numerical modelling of OWCs. As a first step, in order to know the current state of the technology, the most important contributions to its development up to date were identified. It was concluded that the OWC is one of the most studied WEC technologies for many decades. What is more, it seems to be one of the most promising current technologies, since several research is currently being conducted on it.

Different prototypes were tested in real sea conditions during the past decades, but most of them did not show the expected behaviour. This fact shows the strong need to improve the knowledge of the problem. This improvement can be obtained by means of physical model testing and numerical tools. As in all coastal and offshore engineering problems, both tools must be complementary in order to face the problem in a reliable way.

Regarding the numerical modelling of OWCs hydro- and aero-dynamics, several numerical approaches to the problem were found in the bibliography, having different ways of modelling the problem and different levels of complexity. From the beginning of a device development to the final stages, the tasks to solve are very different in terms of needed accuracy and assumable resources (economic and temporal). In that sense, a methodological gap was identified in the bibliography, related to the lack of recommendations for the appropriate model to be used for each specific level of device development, in order to be able to face them in an efficient way. For that reason, in this PhD Thesis a methodology was proposed for the optimized numerical modelling of the OWC, looking for the

0. SUMMARY

equilibrium between desired results accuracy and assumable computational costs in every development stage. Once the methodology proposal was defined, the considered numerical models were developed and described. Afterwards, they were used to solve specific tasks of an OWC device development in order to verify the validity of the methodology proposed.

As it was said before, every numerical tool needs to be experimentally calibrated and validated to be used in a reliable way. However, physical testing involves high economic and time costs that make numerical modelling necessary. For these reasons, the problem must be faced by means of a hybrid experimental-numerical methodology. In the revision of the state of the art the most important small and full-scale model tests were mentioned. In general, experimental databases are not available to users, and additionally, they rarely include simultaneous measurements of all the variables of interest (free surface elevation, air pressure, air flow between the chamber and the atmosphere). For that reason, in the scope of this Thesis, an experimental testing campaign was carried out. The experimental database collected was used to calibrate and validate the numerical tools of the proposed methodology. During this campaign, a fixed detached small-scale OWC model was tested in a bidimensional flume. Regular and irregular wave tests were performed and the three aforementioned variables were measured. The resistance imposed by the turbine to the air circulation between the chamber and the atmosphere was conceptualized by means of a top slot in the chamber ceiling. This allowed the variation of the resistance by changing the slot size.

The methodology proposed in this work combines simplified modelling in the frequency and time-domains and CFD tools. The final remarks regarding the adequacy of each of these tools to their purpose are the following:

- The **frequency-domain approximation** is proposed as a simple and fast tool suitable to face **early stages** of an OWC device development. The linearity of all the forces assumed and the PTO modelling in the frequency-domain are its main simplifications, but they are also responsible for its simulation efficiency. In order to determine the PTO damping force imposed to the OWC motion, for each frequency considered it was chosen the

PTO damping that maximized the production of a regular wave train of this frequency. For computing the production due to an irregular sea state, the OWC motion was damped with the optimal PTO value obtained for its peak period.

The friction forces in the submerged entrance of the chamber are intrinsically non-linear and for that reason they are not considered in this modelling. An attempt to linearize and experimentally calibrate them was done without success.

This model was proposed to be used during the earliest (pre-design) stages of the development, for instance to compare the convenience of alternative locations, to make a first production estimation or to optimize the WEC geometry in a given location. In the present work this model was used to select the most convenient location for a determined device with minimum computational cost.

- For the **next steps (design)** of the development, when the location is already determined or the possible alternatives are limited, the developed methodology recommends the use of the **simplified numerical model in the time-domain**. Despite its simplifications, this model reproduces the complex phenomena taking place in a much realistic way than the frequency-domain model. On the one hand, it considers the non-linear forces such as the submerged friction force, that was experimentally calibrated and validated for irregular waves for a range of wave steepness. On the other hand, the air inside the chamber is modelled as a fluid that interacts with the water column motion, which is a key aspect for the global comprehension of the problem. Air is considered an ideal and compressible gas, which is an important property that contributes to optimize the energy production in full-scale. Chamber outflow and inflow processes were considered isentropic, which is a questionable assumption when air flow enters into the chamber, since air entropy changes due to losses through the entrance. However, based on other researchers' works, it was considered that this assumption led to an equilibrium between model accuracy and computational costs at this stage. Another simplification to highlight is the piston-like motion of

0. SUMMARY

the chamber interior water mass. The discharge coefficient through the top slot was also experimentally calibrated and validated for a range of wave steepness.

In a real OWC device, the resistance imposed to the air circulation between the chamber and the atmosphere is due to a control system of the PTO force in time, with the purpose of optimizing the energy production. Therefore, in this time-domain simplified model, the optimal PTO damping was selected optimizing the power production of each simulated sea state (H_s, T_p), instead of using the optimal damping corresponding to its peak period, as it was done in the frequency-domain model. Following the methodology proposed, this model was used for power production estimation in the location that was previously selected with the frequency-domain model. The production estimated in the time-domain was 20 % less than the estimation in the frequency-domain for the most productive sea-states. Based on these results, it can be concluded that the effect of the calibrated friction losses is stronger than the production benefits due to air compressibility in full-scale. Although the time-domain power production estimation is more realistic than the one in the frequency-domain, the computational costs raise to a level that is not assumable in the previous stages (see Table 7.7 of the Chapter 7).

- To finish with, for the **most advanced stages** of the development, in which the **detailed analysis** of the devices is faced, the use of **CFD tools** is proposed. These kind of numerical tools have very high computational requirements, which are only justified when a very high detailed analysis is needed. This level of detail cannot be reached by means of the simplified models previously mentioned. This is the case of the analysis of turbulent phenomena and vorticity, which are important when designing the final geometry of the devices. CFD tools are indispensable to determine, for instance, the thickness of the walls, the shape of the submerged lip or the geometry of the air chamber. In the present work the model **OpenFOAM** was used, which solves RANS equations for two incompressible fluids (water and air). Since the experimental testing was carried out in small-scale (where air compres-

sibility is negligible), the numerical model could be validated. Pressure, velocity and vorticity fields were analyzed both in the air and in the water by means of OpenFOAM simulations. The high capabilities of the model were demonstrated, linked to its high computational costs (see Table 7.7 of the Chapter 7). However, analyzing the problem in prototype scale in detail by means of CFD tools considering air compressibility is a priority for future works. The influence of air compressibility was demonstrated in this work by means of full-scale simulations with the simplified model in the time-domain. In these simulations, production increased approximately 50 % when air compressibility was taken into account.

In this PhD Thesis, an application of the methodology proposed in the Figures 3.1 and 3.2 of Chapter 3 was developed. In order to develop a concept up to the pre-commercial stage, the design line described by Figure 3.2 needs to be repeated as many times as necessary. This process will be repeated until the required level of detail in the design and behaviour knowledge is reached, in order to address the prototype construction stage. In general, it is concluded that the work developed fulfils the pursued objectives, since the methodology proposed in Chapter 3 was validated for each of the task defined. However, the development of this PhD Thesis brought the opportunity to identify some interesting points, which were let out the scope of this work. These aspects can be considered as future research topics, which include:

- Air compressibility analysis in full-scale:
 - With CFD tools.
 - With experimental techniques to analyze it in small-scale.
- Improvements in the simplified model in the time-domain:
 - Alternatives to approximate or calculate the convolution integral and the added mass at infinite frequency.
 - Non isentropic inflow modelling.
 - Consideration of the deformations of the chamber interior free-surface.
- Transformation of the problem for a multi-chamber device:

0. SUMMARY

- Experimental testing of a multi-chamber device.
- Extension of the simplified time-domain model to a multi-chamber device. Experimental validation.
- CFD modelling of multi-chamber devices. Experimental validation.
- Floating OWC devices:
 - Experimental modelling of floating devices.
 - Development of the simplified time-domain model to consider floating body effects. Experimental validation.
 - Floating devices in CFD. Experimental validation.
- Air turbine consideration in the numerical modelling.
- Numerical modelling of control strategies for optimization of the production.

CAPÍTULO

1

Introducción

La producción energética mundial trata de responder al aumento exponencial que la demanda energética presenta desde hace varias décadas, cuyas principales protagonistas son las economías emergentes como China e India. De hecho, a día de hoy el país con mayor demanda energética es China (www.funcas.es) seguido de EEUU. Aunque la proliferación de las energías renovables y limpias es hoy en día una realidad, actualmente las energías fósiles dominan el panorama energético internacional. En consecuencia, el aumento de la demanda global está unívocamente asociado al crecimiento de las emisiones de CO_2 a la atmósfera, y por tanto, al calentamiento global del planeta.

El sector energético es responsable de las dos terceras partes de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, constituyendo un sector clave para la consecución de los objetivos climáticos internacionales. Pero no son solo climáticas las razones que motivan el desarrollo de las energías renovables. Las fuentes de energía fósiles tienen un tiempo de vida limitado, y Europa en general, y España en particular, no prevén un aumento de su producción energética fósil. En consecuencia, es necesaria una transición progresiva a las fuentes de energía renovables, y planificarla de acuerdo con el incremento de demanda energética

1. INTRODUCCIÓN

prevista. Por todo ello, entre los retos establecidos en el Horizonte 2020 de la Comisión Europea, se ha incluido una línea estratégica en este sentido.

Según un informe publicado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2013), actualmente se está consiguiendo demostrar que una correcta combinación de políticas y tecnologías puede debilitar la conexión existente entre el crecimiento económico, la demanda energética y las emisiones de CO_2 relacionadas con la energía. El auge de las energías renovables es uno de los factores más importantes que está modificando la concepción de la distribución de los recursos energéticos mundiales, cambiando los cimientos del sector energético tradicional. Entre todos los recursos renovables disponibles, las energías renovables marinas son de las más prometedoras. De hecho, la Comisión Europea mantiene una firme apuesta por las energías renovables marinas en su estrategia de descarbonización, tal y como lo demuestra el reciente plan de acción Energía Azul. Entre las energías renovables marinas, la energía undimotriz o del oleaje está siendo intensamente investigada en todo el mundo y la presente Tesis se sitúa en dicho marco.

En origen, la energía undimotriz no es más que una forma de energía solar. La radiación solar que incide sobre el planeta calienta la superficie de la tierra así como la masa de aire que la rodea. Las diferencias de temperatura en el aire conllevan diferencias de presión que originan el viento. La fricción de dicho viento sobre la superficie del mar es la que genera el oleaje. El aprovechamiento de la energía undimotriz consiste en transformar la enorme cantidad de energía que transportan las olas en electricidad. Los dispositivos mediante los cuales se consigue dicha transformación se conocen como Convertidores de Energía del Oleaje o WEC (Wave Energy Converters).

Son varias las razones que respaldan la conveniencia del desarrollo de la energía undimotriz. Una de las más importantes es que la energía del oleaje es un recurso altamente predecible. Asimismo, en la costa Oeste de Europa, y específicamente en España, en las costas gallegas y en todo el Cantábrico, la disponibilidad del recurso es muy elevada. Los aspectos ambientales también juegan a favor de este tipo de energía, ya que los impactos ambientales inherentes a ella

se perfilan mucho menores que en otro tipo de energías, y más importante que eso, dichos impactos están siendo estudiados y considerados desde la etapa más temprana del desarrollo de las tecnologías. Además, los posibles emplazamientos de los dispositivos de aprovechamiento de energía del oleaje son muy extensos en todos los océanos. Por último, se prevé que, gracias a las economías de escala, los costes actuales de la energía undimotriz se reduzcan considerablemente al alcanzar la fase comercial, especialmente en el caso de parques formados por varios captadores.

La idea de aprovechar la energía del oleaje no es nueva (Falcão, 2010), dado que la primera patente de WEC data de 1799, registrada en París por Girards padre e hijo (Ross, 1979). Hoy en día se están experimentando a escala de prototipo muchos conceptos ideados hace más de dos siglos. A grandes rasgos, los WEC aprovechan tres fenómenos básicos asociados al oleaje para generar electricidad, los cuales se indican en la Figura 1.1. En primer lugar, existen convertidores que se valen del empuje que la ola ejerce en su dirección de propagación. En segundo lugar, se cuenta también con convertidores que aprovechan la variación de la superficie libre que la ola provoca a su paso. En tercer lugar, existen convertidores que se basan en la variación de la presión bajo la superficie libre provocada por el paso del oleaje para generar energía.

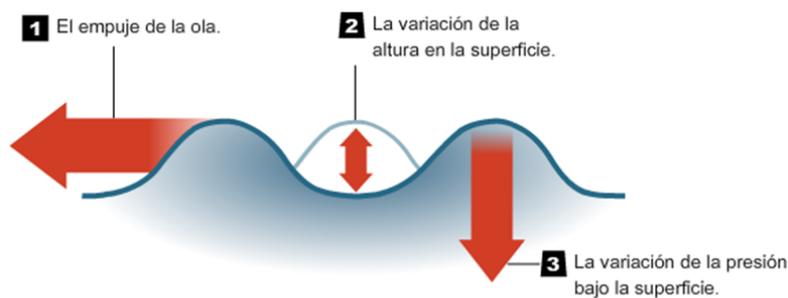


Figura 1.1: Fenómenos asociados al oleaje aprovechados por los convertidores de energía undimotriz (WEC).

1. INTRODUCCIÓN

Los tipos de convertidores de energía undimotriz se pueden clasificar de muchas formas, pero en general puede decirse que se basan en tres tipos de tecnologías:

- **Cuerpos oscilantes:** Son dispositivos que aprovechan el movimiento relativo entre dos cuerpos. Dichos movimientos pueden ser de traslación o rotación, y los cuerpos, tanto flotantes como sumergidos.
- **Dispositivos de rebase:** Se trata de tanques diseñados para ser rebasados por el oleaje. En cada evento de rebase almacenan agua en su interior, que evacuan a través de un conducto en el fondo, donde se alberga una turbina. Estos dispositivos pueden ser flotantes o fijos.
- **Columna de Agua Oscilante (OWC):** Son dispositivos que consisten en una cámara semisumergida y que se valen de la oscilación de la superficie libre interior provocada por el oleaje incidente para generar energía. Dado que la presente Tesis se centra en esta tecnología, estos dispositivos se describen con mayor detalle en el [Capítulo 2](#).

En cuanto a la estructura de la Tesis, el [Capítulo 2](#) describe la tecnología de Columna de Agua Oscilante (OWC) y las herramientas más importantes utilizadas en su desarrollo hasta el presente. Asimismo se recogen los avances más significativos realizados en la tecnología hasta el momento y el conocimiento preexistente a partir del cual se ha podido desarrollar la presente Tesis.

En el [Capítulo 3](#) presenta el objetivo general de este trabajo, que en esencia consiste en la creación de una metodología destinada al uso optimizado de las distintas herramientas en el desarrollo de un dispositivo de OWC. En dicho capítulo se realiza una propuesta metodológica inicial y se describe la estructura del trabajo realizado para valorar su adecuación al objetivo perseguido.

En este trabajo se han combinado tanto el modelado físico como el numérico. Por un lado, en el [Capítulo 4](#) se describe la campaña de ensayos en modelo físico desarrollada en las instalaciones del IH Cantabria en el marco de la presente Tesis. Por otro, en el [Capítulo 5](#) se recogen las herramientas numéricas empleadas

en este trabajo, desde las más simplificadas y computacionalmente eficientes, a las más complejas y computacionalmente costosas.

El Capítulo 6 recoge el trabajo de calibración y validación de cada una de las herramientas numéricas utilizadas, para poder emplearlas después como herramientas fiables en aplicaciones reales. Dicha labor de calibración y validación se desarrolla mediante la comparación con otros modelos numéricos anteriormente validados, así como con resultados experimentales.

Una vez validadas las herramientas numéricas, con el objetivo de probar y valorar la metodología propuesta, en el Capítulo 7 se presentan aplicaciones para cada modelo numérico de acuerdo con dicha metodología, y se discuten los resultados obtenidos y la validez de la propuesta metodológica inicial para la consecución del objetivo descrito.

El Capítulo 8 recopila las principales conclusiones extraídas del presente trabajo. Por último, como en todo trabajo de investigación, en el desarrollo de la presente Tesis también se han planteado cuestiones de gran interés que por diversos motivos han quedado al margen del trabajo, y no por ello son de menor importancia. En consecuencia, el Capítulo 9 trata de recoger todas estas cuestiones, entendidas como futuras líneas de investigación identificadas durante la realización de la presente Tesis Doctoral.

Estado del arte

A lo largo de este capítulo se describen las aportaciones científico-técnicas más significativas que hasta el momento se han realizado al estudio de la Columna de Agua Oscilante (OWC). La presente Tesis se ha desarrollado a partir de un gran conocimiento preexistente desarrollado por diversos autores, del cual se ha tratado de recopilar lo más importante. Concretamente, se ha tratado de identificar las carencias existentes en el estado de la técnica actual y que han motivado el desarrollo de este trabajo.

Los contenidos del capítulo se organizan de la siguiente forma:

- Breve reseña del principio de OWC.
- Revisión de prototipos existentes.
- Revisión del modelado experimental.
- Modelos numéricos para la simulación de dispositivos OWC.
- Conclusiones del capítulo.

2.1 Breve reseña del principio de 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 2.1. 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.

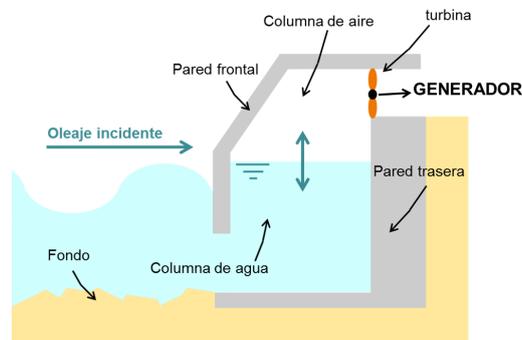


Figura 2.1: Esquema general de la Columna de Agua Oscilante (OWC).

El proceso de transformación de la energía del oleaje en energía eléctrica consta de tres pasos:

- **Conversión primaria:** El movimiento de las olas se transforma en un movimiento de un fluido de trabajo, en este caso el aire. Esta conversión primaria es por lo tanto, hidroneumática.
- **Conversión secundaria:** La energía del fluido de trabajo (aire) se transforma en energía mecánica, mediante una turbina de aire. Esto permite convertir las bajas velocidades de la columna de agua en rotación a alta velocidad, apta para el rendimiento óptimo del grupo turbina-generador.
- **Conversión terciaria:** Convierte la energía mecánica de rotación en energía eléctrica mediante un generador eléctrico. En esta etapa se suele incluir asi-

2.1 Breve reseña del principio de OWC

mismo la electrónica de potencia necesaria para acomodar la energía producida a las condiciones de la red.

Por lo tanto, las únicas partes móviles de un dispositivo OWC son el grupo turbina-alternador y las válvulas de control del flujo de aire, que sirven para proteger el dispositivo de sufrir peligrosas sobrepresiones. La principal ventaja de un dispositivo OWC frente a otro tipo de convertidores de energía del oleaje (WEC) es que dichas partes móviles, además de ser pocas, se encuentran emergidas en todo momento, simplificando de forma significativa las tareas de mantenimiento.

2.2 Revisión de prototipos existentes

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. 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, este capítulo se organiza 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.

2.2.1 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.

Bochaux-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 asimismo vertical, con una potencia media de 1kW.

Otro de los primeros dispositivos que se conocen es el **Kvaener (Toftestallen-Noruega)**, situado también sobre la línea de costa ([Bonke & Ambli, 1986](#)). Se trataba de una columna de agua multiresonante que entró en funcionamiento en 1985 y fue destruida por un temporal en 1988. Su potencia instalada era de 600 kW. La sección de la cámara en forma de media *U* construida en hormigón, fue optimizada para que la columna de agua oscilara con una frecuencia natural igual a la predominante en esa área. Sobre dicha tubería se levantaba una torre de acero de 10 metros de alto, ver Figura 2.2a. Utilizaba una turbina de tipo Wells ([Wells, 1976](#)) de 9 toneladas. Entre la cámara de hormigón y la torre de acero se situaba una especie de válvula con la intención de proteger la turbina de las salpicaduras de agua en los eventos de resonancia, pero permitiendo únicamente la circulación del aire.

La planta de **Sakata Port (Sakata - Japón)** está instalada en un dique de cajones verticales de hormigón, ver Figura 2.2b ([Ohneda et al., 1991](#)). En funcionamiento desde 1988, cuenta con cuatro cámaras y una potencia instalada total de 240 kW. Hoy en día se utiliza como campo de pruebas para el desarrollo de turbinas para OWC.

Otro de los prototipos más significativos es la planta de **Limpet (Isla de Islay-**

2. ESTADO DEL ARTE

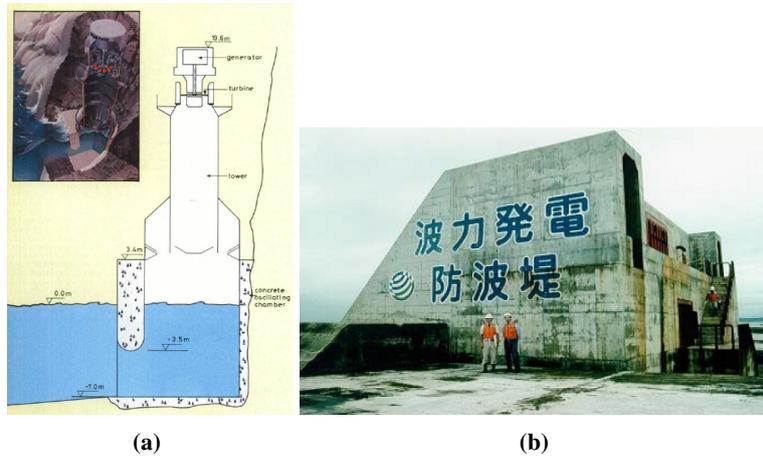


Figura 2.2: (a) Esquema de los prototipos Kvaener (Noruega) y (b) Sakata Port (Japón).

Escocia) (Heath *et al.*, 2000), desarrollado por Wavegen Ltd (Irlanda) y Queen's University of Belfast (Whittaker *et al.*, 1993). En 1989 la Queen's University of Belfast desarrolló un primer prototipo de 75 kW de potencia instalada, manteniéndolo operativo durante diez años a partir de 1991, pero produjo menos energía de lo esperado. El sucesor del mencionado prototipo fue el Limpet 500, ver Figura 2.3a. Limpet 500 fue el primer WEC del mundo a escala comercial conectado a la red y lleva en funcionamiento desde el año 2000 hasta hoy en día. Se trata de un sistema de OWC inclinada que alimenta a dos turbinas Wells (Wells, 1976), con una potencia instalada total de 500 kW, y además, se está utilizando como centro de pruebas para pequeñas turbinas. (www.wavegen.co.uk)

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, ver Figura 2.3b. 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. La turbina instalada es de tipo



Figura 2.3: (a) Esquemas de Limpet plant (Escocia) y (b) Pico plant (Azores, Portugal).

Wells (Wells, 1976) de álabes simétricos, la cual ha sufrido diversos problemas desde la puesta en funcionamiento de la planta debido a las severas condiciones de oleaje a las que el dispositivo está sometido.

The Indian Wave Energy Plant - IIT Madras (Trivandrum - India) es un dispositivo de línea de costa que supuso un paso adelante en el camino hacia la modularidad de las OWC fijas, ya que desde 1991 está instalada en un cajón de gravedad de hormigón (Ravindram & Koola, 1991). Dos paredes de hormigón situadas en frente del dispositivo concentran la energía del oleaje de periodo de diseño de la OWC hacia la cámara. Además, dichas paredes laterales modifican los modos principales de oscilación de la OWC añadiendo más picos, convirtiéndola en multiresonante. La potencia instalada es de 150 kW. Se utilizó el mismo cajón para probar dispositivos de extracción de energía conceptualmente diferentes.

En cuanto a dispositivos OWC de aguas someras (profundidades inferiores a 20 metros), Wavegen (Reino Unido) trabaja en un proyecto significativo: el **Osprey** (Falcão, 2010). La principal ventaja de los dispositivos de aguas someras es que gracias a su ubicación disponen de oleaje más energético que en línea de costa, pero a su vez, experimentan condiciones más extremas en temporales, suponiendo su instalación un reto mucho mayor. Como consecuencia, el primer diseño del proyecto, el Osprey I, el más grande de los prototipos hasta el momento e idea-

2. ESTADO DEL ARTE

do en acero, nunca llegó a ser operativo debido a que sufrió daños irreversibles durante su arrastre e instalación. Hoy en día se está trabajando en el diseño del Osprey 2, esta vez de hormigón. (www.wavegen.co.uk)

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, ver Figura 2.4 (Torre-Enciso *et al.*, 2009). 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.



Figura 2.4: Planta de OWC de Mutriku.

2.2.2 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. 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 ésta una de las fortalezas más importantes de los dispositivos OWC flotantes (Gomes *et al.*, 2011).

Desde que en 1940 Yoshio Masuda desarrollara una boya de navegación alimentada mediante la tecnología de OWC (Masuda, 1971), se han diseñado muy distintos dispositivos de OWC flotantes. Se puede afirmar que en líneas generales la experiencia ha llevado a los desarrolladores a dirigir sus pasos más recientes hacia pequeños dispositivos modulares que explotados en conjuntos son capaces de extraer importantes sumas de energía.

Japón ha sido un país pionero en cuanto a prototipos de OWC flotantes. El dispositivo de tipo atenuador **Kaimei (Jamstec - Japón)**, desarrollado por Japan Marine Science & Technology Center (Jamstec) y promovido por Yoshio Masuda (Masuda, 1979), fue el primer prototipo de OWC de gran tamaño flotante y fue probado en el Mar de Japón entre agosto de 1978 y marzo de 1986. Se trataba de un barco de 80 metros de eslora, 12 metros de manga y 2.15 metros de calado, albergando en su casco 10 cámaras de OWC que permitieron ensayar diferentes tecnologías de turbo-alternadores, ver Figura 2.5a. Contaba con una potencia instalada de 2 MW. Sin embargo, produjo menos de lo esperado. (www.jamstec.go.jp)

El dispositivo de tipo terminador **Mighty Whale (Jamstec - Japón)** (Washio *et al.*, 2000) también fue desarrollado por Jamstec y se instalaba en un cajón de acero flotante de 50 metros de largo, 30 metros de ancho y 12 metros de alto, ver Figura 2.5b. Se ensayó en mar abierto entre los años 1998 y 2000. Conta-

2. ESTADO DEL ARTE

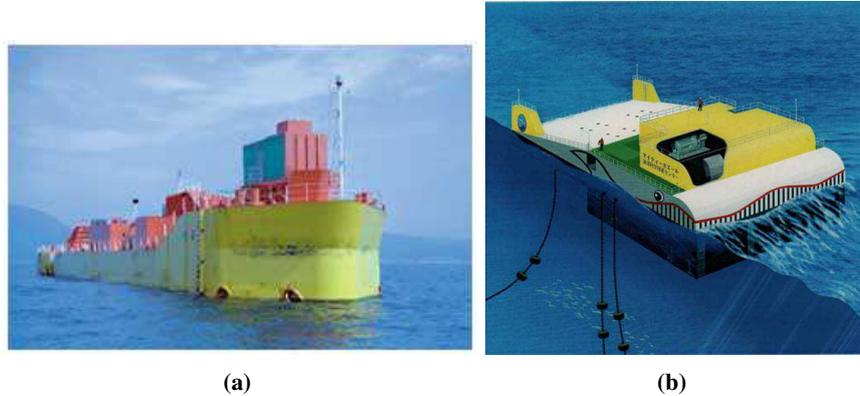


Figura 2.5: (a) Kaimei-Jamstec (Japón) y (b) Mighty Whale (Japón).

ba con 3 cámaras OWC y consiguió una eficiencia de extracción energética mucho mayor que en el caso de Kaimei. La potencia total instalada era de 120 kW. (<http://www.jamstec.go.jp/>)

Hoy en día la compañía australiana OceanLinx (<http://www.oceanlinx.com/>) está tratando de alcanzar un estado comercial de diversos conceptos de OWC flotantes. Desde 1997, dentro de proyecto de **Port Kembla Operations - OceanLinx (New South Wales - Australia)** (Alcorn *et al.*, 2005), se han estudiado diferentes dispositivos: Mk1 (1997-2009, en el mar entre 2005-2009), Mk2 (2007-2008) y Mk3-precommercial (2009-2010). Actualmente siguen trabajando en el desarrollo de nuevos dispositivos que pretenden comercializar (greenWAVE, blueWAVE y ogWAVE).

Existen también diseños que difieren conceptualmente de los anteriores, como por ejemplo el **BBDB - Backward Bent Duct Buoy** (Masuda & McCormick, 1987; Nagata *et al.*, 2011). A la vista de que la eficiencia del Kaimei no resultó ser la deseada, Yoshio Masuda ideó una nueva geometría. El concepto se caracteriza por su alta eficiencia de conversión primaria con bajos costos de anclaje. Esto se consigue gracias al lento movimiento hacia delante del dispositivo, en sentido contrario al del oleaje incidente, que sucede para rangos de frecuencia específicos.

La característica principal de los dispositivos BBDB es la apertura de la cámara horizontal en sentido contrario al del oleaje incidente, ver Figura 2.6. El sistema fue utilizado para alimentar alrededor de mil boyas de navegación en Japón y China (Masuda *et al.*, 1993, 1995). Dado su potencial, este sistema se está investigando en Japón, China, Irlanda y Corea, incluyendo campañas de campo como es el caso del dispositivo **OE Buoy** en la bahía de Galway (Irlanda) desde el año 2006 (<http://www.oceanenergy.ie/>).

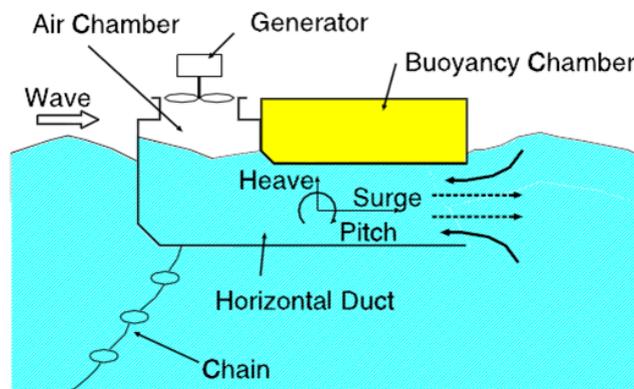


Figura 2.6: Esquema general del concepto BBDB.

El concepto de absorbedor puntual oscilando en alzada (Spar Buoy) es posiblemente el diseño más simple de OWC flotante (Falcão, 2010), el cual también ha sido considerado para componer parques de producción energética a gran escala. El conocido como Sloped Buoy se basa en un concepto muy similar al de la Spar Buoy pero su oscilación se fuerza a un ángulo medio entre las direcciones de alzada y largada. Un informe del Departamento Británico de Comercio e Industria compara las boyas de tipo BBDB, Spar Buoy y Sloped Buoy para la generación eléctrica en el Atlántico (DTI, 2005).

2.2.3 Conclusiones

Tal y como ha quedado de manifiesto en este apartado, el desarrollo de las tecnologías de Columna de Agua Oscilante (OWC) se encuentra hoy en una etapa en la

2. ESTADO DEL ARTE

que ningún concepto ha mostrado su superioridad frente al resto, lo cual se refleja en la gran dispersión de las tecnologías en desarrollo. En consecuencia, existen muy diferentes líneas de investigación activas. En este capítulo se han repasado prototipos en fase de experimentación de una o varias cámaras, fijos o flotantes. Sin embargo, la construcción de prototipos a gran escala y su ensayo en el mar implica grandes inversiones que solo tienen sentido en fases avanzadas del desarrollo de un dispositivo. El hecho de que la gran mayoría de los prototipos instalados en campo hayan fallado antes de la finalización de su vida prevista pone de manifiesto las carencias en el conocimiento del problema a abordar. Por un lado, existe la necesidad de profundizar en el análisis de las dinámicas principales implicadas en el problema y en como aprovecharlas correctamente para obtener un máximo beneficio. Por otro, el estudio de la respuesta de los dispositivos frente a condiciones extremas sigue suponiendo un reto, así como el desarrollo de los materiales y métodos constructivos capaces de afrontar dichas condiciones con garantías. Por último, las actividades de operación y mantenimiento también constituyen un importante campo de estudio en el desarrollo de la energía undimotriz, ya que suponen un aspecto clave para garantizar una explotación eficiente de los dispositivos en funcionamiento y fundamental para la exitosa instalación de los nuevos.

Existen distintas herramientas para profundizar en los aspectos identificados en el párrafo anterior, que contribuirán a abordar con mayor garantía la fase de ensayos en prototipo. Dichas herramientas son los ensayos a escala reducida y el modelado numérico, que sirven para estimar el comportamiento y validar cada etapa del desarrollo de un dispositivo OWC. En los siguientes apartados se describen dichas herramientas y se repasan las contribuciones más significativas en el marco de cada una de ellas.

2.3 Revisión del modelado experimental

En el apartado anterior se han repasado los prototipos de OWC a escala real más significativos. Sin embargo, el modelado experimental también se puede desarrollar en el laboratorio, generalmente a escala reducida. No obstante, el problema fundamental del modelado experimental de dispositivos OWC es la imposibilidad de modelar conjuntamente los efectos hidrodinámicos y de compresibilidad del aire en ensayos a pequeña escala utilizando métodos convencionales. [Weber \(2007\)](#) y [Lopes *et al.* \(2009\)](#) advierten de que la compresibilidad del aire no puede ser correctamente representada por medio de un escalado geométrico del dispositivo. Por esta razón, muchos de los prototipos a escala real existentes sirven de campo de ensayo para turbinas en desarrollo, como por ejemplo el dispositivo instalado en Limpet (Escocia).

A pesar de ello, varios autores han desarrollado trabajos experimentales sobre la OWC, destinados en su mayor parte al análisis de aspectos hidrodinámicos del problema. [Vidal \(1984, 1987\)](#) realizó una campaña de ensayos en modelo físico de un Resonador Hidroneumático Fijo Colector (RHFC), que contaba con varias cámaras y se basaba en conectar el flujo de aire entre las cámaras con el objetivo de suavizar las oscilaciones de los flujos de aire y mejorar la eficiencia mediante el control del amortiguamiento de las cámaras utilizando válvulas. [Whittaker & McPeake \(1986\)](#) presentaron la primera campaña experimental de un dispositivo OWC flotante y axisimétrico basado en la geometría de una boya de navegación. [Sarmiento \(1992\)](#) ensayó experimentalmente un dispositivo bidimensional apoyado en el fondo. Existen también estudios posteriores que analizaron aspectos más específicos como la influencia de la forma de la entrada sumergida sobre el flujo de agua entrante ([Morris-Thomas *et al.*, 2007](#)) o el flujo de aire producido en la cámara ([Ram *et al.*, 2010](#)). [Sheng *et al.* \(2012\)](#), [Sykes *et al.* \(2011\)](#) y [Gomes *et al.* \(2012\)](#) desarrollaron campañas experimentales de modelos OWC cilíndricos flotantes. Existen también trabajos combinados de modelado experimental y numérico, como por ejemplo recientemente ([Sykes *et al.*, 2011](#)), que se basaron en el modelado experimental de una OWC cilíndrica fija para validar modelos hidrodinámicos.

2. ESTADO DEL ARTE

Muy pocos trabajos experimentales descritos en la literatura estudian el comportamiento de modelos OWC en términos de energía y [Baudry *et al.* \(2013\)](#) resumen los más significativos. Por ejemplo, [Torre-Enciso *et al.* \(2009\)](#) utilizaron el modelado experimental para estudiar la eficiencia de la planta de Mutriku. Además, [Ikoma & Osawa \(2011\)](#) estudiaron la eficiencia de un dispositivo OWC flotante con el objetivo de probar los beneficios de emplazarlo tras un muro protector, tal y como predijeron teóricamente [Malmo & Reitan \(1986\)](#).

En términos generales, el modelado experimental sirve para analizar aspectos tan importantes como complejos que los modelos numéricos simplificados no son capaces de reproducir. Por otro lado, los modelos más complejos como los CFD no constituyen una herramienta fiable hasta ser experimentalmente validados. Por ello, muchos estudios experimentales se centran en cuantificar pérdidas hidráulicas en OWCs, tanto por efectos viscosos ([Mendes & Monteiro, 2007](#)) como para calcular coeficientes de amortiguamiento viscoso para utilizarlos después en modelos numéricos ([Lopes *et al.*, 2007](#)). En cuanto a efectos no lineales en aguas someras, su influencia sobre una OWC fue experimentalmente estudiado por [Folley & Whittaker \(2002\)](#).

2.3.1 Conclusión del modelado experimental

En general, puede afirmarse que no existen suficientes bases de datos experimentales, ni de laboratorio ni de campo. Además, los existentes son generalmente inaccesibles ([Alves *et al.*, 2011](#)). Por otro lado, son muy escasas las campañas experimentales que han estudiado de manera conjunta la variación de la superficie libre en la cámara, las oscilaciones de presión que ello provoca en la masa de aire interior de la cámara y el flujo de aire entre la cámara y la atmósfera abierta. Estos tres fenómenos están estrechamente interrelacionados y resulta imprescindible comprenderlos de forma global para analizar con garantías el problema de la Columna de Agua Oscilante.

2.4 Modelos numéricos para la simulación de dispositivos de OWC

Tal y como se ha indicado en los apartados anteriores, el análisis del comportamiento de un sistema de extracción de energía del oleaje frente a posibles condiciones de oleaje, las características del sistema de conversión neumático-eléctrico y las estrategias de control, pueden ser abordados mediante ensayos de laboratorio, pero la simulación experimental de la Columna de Agua Oscilante (OWC) a escala de laboratorio comprende especiales dificultades, entre las que se pueden mencionar las siguientes (Cruz, 2008):

- El estudio de los flujos hidrodinámico y neumático requieren modelos a diferentes escalas y la influencia de los efectos viscosos es difícil de identificar a pequeña escala.
- La reproducción a escala reducida de la forma y espesor de la pared frontal de la cámara, que debe garantizar la supervivencia de la OWC bajo condiciones de oleaje extremo, a la vez que influye sobre el flujo que llega a la cámara.
- Los fenómenos turbulentos que sufre el flujo de agua a su paso por la apertura de la cámara y los efectos de escala asociados.
- Principalmente en el caso de los dispositivos cercanos a la costa, la no-linealidad del oleaje incidente inducirá un campo no lineal de presiones en el interior de la cámara.
- El flujo de aire en la cámara es complejo, ya que no es laminar y puede contener gotas de agua en suspensión que se desprendan de la superficie libre interior.
- Efectos termodinámicos debidos a las condensaciones o formación de niebla en la cámara.

Además de dificultar el análisis experimental, estos factores ponen de manifiesto que el desarrollo del modelado numérico capaz de simular correctamente el

2. ESTADO DEL ARTE

funcionamiento completo de la tecnología OWC es tan necesario como complejo. El desarrollo de tales modelos numéricos permite la simulación de las diferentes condiciones y geometrías sin el coste económico y temporal del modelado físico. El modelado numérico puede servir de complemento al modelado físico, tanto en la fase de prediseño como de optimización de un dispositivo, aportando información para un correcto diseño de la campaña experimental. De hecho, la investigación y desarrollo de los WEC de tipo OWC se ha basado en gran medida en modelos analíticos simplificados. Un modelo teórico bidimensional de la hidrodinámica de una OWC fija fue desarrollado por [Evans \(1978\)](#), quien consideraba la superficie libre interna de la cámara como un pistón rígido de masa despreciable que permitía la aplicación de la teoría de cuerpos oscilantes. [Evans \(1982\)](#), [Sarmiento & Falcão \(1985\)](#) y [Evans & Porter \(1995\)](#) aportaron un modelo 2D capaz de considerar la variación espacial de la forma de la superficie libre interna de la cámara a través de la aplicación de una condición de distribución de presión oscilante en la superficie, mejorando sustancialmente el modelado de la OWC, especialmente en los casos en los que el ancho de la cámara no es despreciable frente a la longitud de onda.

En términos generales, los modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes son las herramientas más precisas para el análisis de la hidrodinámica implicada en el problema de cualquier WEC ([De Backer, 2007](#)). Dichos modelos son capaces de lidiar con efectos viscosos, turbulencia y rotura del oleaje. Sin embargo, implican una gran carga computacional, que incluso hoy en día es difícil de asumir en las primeras fases del desarrollo de un WEC. Por dicha razón, el desarrollo numérico de la Columna de Agua Oscilante se ha basado mayoritariamente en modelos simplificados. En general, muchos de estos modelos numéricos simplificados se basan en la segunda Ley de Newton. Dicha ley establece que la aceleración ($\ddot{z}(t)$) de un absorbedor puntual por su masa (m) será igual a la suma de las fuerzas ($F(t)$) actuantes sobre él:

$$m\ddot{z}(t) = F(t) \tag{2.1}$$

2.4 Modelos numéricos para la simulación de dispositivos de OWC

El conjunto de fuerzas actuantes sobre el cuerpo se puede descomponer en dos grupos: las fuerzas hidrodinámicas ($F_{hidrodin}(t)$) y las fuerzas externas ($F_{ext}(t)$).

$$F(t) = F_{hidrodin}(t) + F_{ext}(t) = [F_{exc}(t) + F_{rad}(t) + F_{hidrost}(t) + F_{fricc}(t)] + [F_{pto}(t) + F_{moor}(t)] \quad (2.2)$$

- Las **fuerzas hidrodinámicas**, $F_{hidrodin}(t)$, son resultantes de la interacción del WEC y el océano y engloban:

- $F_{exc}(t)$: Fuerza de excitación inducida por el oleaje incidente sobre el captador.
- $F_{rad}(t)$: Fuerza de radiación ejercida sobre el cuerpo por el fluido puesto en movimiento debido a la oscilación del dispositivo en ausencia de oleaje incidente. Puede modelarse formada por dos sumandos, uno proporcional a la aceleración ($\ddot{z}(t)$) del dispositivo y otro proporcional su velocidad ($\dot{z}(t)$).

$$F_{rad}(t) = -A\ddot{z}(t) - B\dot{z}(t) \quad (2.3)$$

donde A y B son los coeficientes hidrodinámicos de masa añadida y de amortiguación respectivamente.

- $F_{hidrost}(t)$: Fuerza hidrostática tendente a devolver el dispositivo a su posición inicial. Durante el movimiento oscilatorio de un WEC es debida a la variación de la sumergencia del dispositivo. En teoría lineal puede modelarse como proporcional al desplazamiento.

$$F_{hidrost}(t) = -Gz(t) \quad (2.4)$$

donde G es el coeficiente hidrostático, que en teoría lineal se asume como $\rho g S$, donde S es el área de la sección transversal de dispositivo a nivel de reposo, g la aceleración de la gravedad y ρ la densidad del agua.

- $F_{fricc}(t)$: Fuerza de fricción debida a los efectos viscosos. En el caso de un dispositivo de OWC, representa las pérdidas por fricción hidrodinámica en la entrada sumergida de la cámara. Puede expresarse

como función de la velocidad del movimiento ($\dot{z}(t)$):

$$F_{fricc}(t) = (k_l + k_{nl}|\dot{z}(t)|)\dot{z}(t) \quad (2.5)$$

siendo k_l el coeficiente de fricción lineal y k_{nl} el coeficiente de fricción no lineal (Iturrioz *et al.*, 2014a). Otros autores han considerado solamente el coeficiente no lineal (Babarit *et al.*, 2012).

- Las **fuerzas externas**, $F_{ext}(t)$, a su vez comprenden:

- $F_{pto}(t)$: Es la fuerza debida al sistema de extracción de energía del sistema (PTO). Se caracteriza por englobar grandes no linealidades, por ejemplo, en el caso de un dispositivo de OWC, debidas a las dinámicas de la turbina. En un WEC cualquiera se puede modelar como un sistema compuesto por un muelle y un amortiguador entre un captor y un reactor, que es el propio WEC. Así, tendrá un sumando proporcional al desplazamiento ($z(t)$) del WEC y otro proporcional a su velocidad ($\dot{z}(t)$).

$$F_{pto}(t) = -Kz(t) - D\dot{z}(t) \quad (2.6)$$

donde K y D representan el coeficiente reactivo y resistivo del sistema respectivamente.

- $F_{moor}(t)$: Es la fuerza ejercida por el sistema de fondeo o anclaje sobre el dispositivo, que en términos generales puede expresarse como función del desplazamiento ($z(t)$) y la velocidad ($\dot{z}(t)$) del cuerpo.

$$F_{moor}(t) = f(z(t), \dot{z}(t)) \quad (2.7)$$

2.4.1 Modelado en el dominio de la frecuencia

Tradicionalmente, el dominio de la frecuencia se ha utilizado para oleaje monocromático y armónico, es decir, para problemas lineales donde el principio de superposición es aplicable. El modelado en el dominio del tiempo supone la alternativa para considerar las no linealidades, por ejemplo las originadas por oleaje extremo o por el sistema de extracción de energía (Power Take Off, PTO). Para modelar el movimiento de un WEC de tipo absorbedor puntual en el dominio de

2.4 Modelos numéricos para la simulación de dispositivos de OWC

la frecuencia, se asumen ciertas simplificaciones. Si se asume oleaje incidente sinusoidal, la superficie libre del agua podrá ser expresada en notación compleja como:

$$\eta(t) = Oe^{i\omega t} \quad (2.8)$$

siendo O la amplitud del oleaje incidente y ω la frecuencia de la oscilación.

Se asume también teoría lineal de ondas y se acepta que la amplitud del oleaje y del movimiento del dispositivo son pequeñas respecto a la longitud de onda. Se suponen lineales todas las fuerzas actuantes en el WEC, inclusive las fuerzas externas debidas a los sistemas de PTO y de fondeo. Si se asume un movimiento de un único grado de libertad (desplazamiento vertical, alteada o heave, $z(t)$) y a la frecuencia del oleaje incidente, se puede expresar el movimiento de dicho dispositivo como:

$$z(t) = \hat{z}(\omega)e^{i\omega t} \quad (2.9)$$

donde $\hat{z}(\omega)$ es la amplitud compleja definida por: $\hat{z}(\omega) = |\hat{z}|e^{i\phi}$, con ϕ la fase del movimiento.

Basándose en la Ecuación (2.9), los términos de la Ecuación (2.2) se expresan de la siguiente manera:

- Fuerza de radiación:

$$F_{rad}(t) = \omega^2 A \hat{z}(\omega) e^{i\omega t} - i\omega B \hat{z}(\omega) e^{i\omega t} \quad (2.10)$$

- Fuerza hidrostática:

$$F_{hidrost}(t) = -G \hat{z}(\omega) e^{i\omega t} \quad (2.11)$$

- Fuerza de fricción: Se modelaría como una función lineal de la velocidad, es decir, $k_{nl} = 0$.

$$F_{fricc}(t) = i\omega k_l \hat{z}(\omega) e^{i\omega t} \quad (2.12)$$

- Fuerza debida al PTO:

$$F_{pto}(t) = -K \hat{z}(\omega) e^{i\omega t} - i\omega D \hat{z}(\omega) e^{i\omega t} \quad (2.13)$$

2. ESTADO DEL ARTE

- Fuerza de excitación:

$$F_{exc}(t) = O\hat{f}_{exc}(\omega)e^{i\omega t} \quad (2.14)$$

donde $\hat{f}_{exc}(\omega)$ es la amplitud compleja de la fuerza de excitación debida a un tren regular de amplitud unidad.

Si no se consideran los efectos viscosos ni ningún tipo de anclaje, la ecuación del movimiento será:

$$F(t) = m\ddot{z}(t) = F_{exc}(t) + F_{rad}(t) + F_{hidrost}(t) + F_{pto}(t) \quad (2.15)$$

Bajo oleaje sinusoidal se puede expresar de la forma:

$$-\omega^2 m\hat{z}(\omega)e^{i\omega t} = O\hat{f}_{exc}(\omega)e^{i\omega t} + \omega^2 A\hat{z}(\omega)e^{i\omega t} - i\omega B\hat{z}(\omega)e^{i\omega t} - G\hat{z}(\omega)e^{i\omega t} - i\omega D\hat{z}(\omega)e^{i\omega t} - K\hat{z}(\omega)e^{i\omega t} \quad (2.16)$$

Simplificando el término dependiente del tiempo ($e^{i\omega t}$) se llega a la ecuación del movimiento en el dominio de la frecuencia:

$$-\omega^2 m\hat{z}(\omega) = O\hat{f}_{exc}(\omega) + \omega^2 A\hat{z}(\omega) - i\omega B\hat{z}(\omega) - G\hat{z}(\omega) - i\omega D\hat{z}(\omega) - K\hat{z}(\omega) \quad (2.17)$$

La amplitud compleja de la fuerza de excitación (\hat{f}_{exc}) y los coeficientes hidrodinámicos de masa añadida (A) y amortiguación (B) se pueden obtener numéricamente mediante códigos BEM como por ejemplo WAMIT (WAMIT, 2012). WAMIT es un BEM (Boundary Element Method, método de paneles de contorno) comercial 3D que resuelve la radiación y la difracción asumiendo teoría de ondas lineal y flujo potencial en el dominio de la frecuencia. De la Ecuación (2.17) se podrá despejar la amplitud compleja del movimiento ($\hat{z}(\omega)$) y obtener la velocidad ($\hat{u}(\omega)$) del WEC:

$$\hat{z}(\omega) = \frac{O\hat{f}_{exc}}{(-\omega^2(A + m) + G + K) + i\omega(B + D)} \quad (2.18)$$

$$\hat{u}(\omega) = i\omega\hat{z}(\omega) = \frac{O\hat{f}_{exc}}{i\left(\omega(A + m) - \frac{G + K}{\omega}\right) + (B + D)} \quad (2.19)$$

2.4 Modelos numéricos para la simulación de dispositivos de OWC

La potencia media absorbida, estimada a partir de la hidrodinámica, será:

$$\bar{P} = \int_0^T F_{pto}(t)\dot{z}(t)dT = \int_0^T [D\dot{z}(t) + Kz(t)]\dot{z}(t)dT \quad (2.20)$$

Dado que el término correspondiente al muelle del PTO se anula en un ciclo de ola:

$$\bar{P} = \frac{1}{2}\omega^2 D|\hat{z}|^2 \quad (2.21)$$

A pesar de que la teoría lineal no es válida para modelar OWCs próximos a la costa, muchos modelos que consideran el sistema de extracción de energía (PTO) la asumen como una primera aproximación. Así, algunos modelos en el dominio de la frecuencia utilizan una aproximación que parte de la hidrodinámica y los movimientos del dispositivo, y calculan la extracción mecánica media de energía por medio de la inclusión de la aerodinámica. En este sentido, [Evans \(1982\)](#) introdujo el concepto de un área de presión oscilante sobre la superficie libre interior de la OWC. La presión en el aire fuera de la cámara será la atmosférica (p_a), mientras que la presión en la superficie libre interior a la cámara ($p_c(t)$) variará con las condiciones internas de la OWC. Considerando dependencia armónica con el tiempo, la presión del aire en la cámara será:

$$p_c(t) = p_a + p(t) \quad (2.22)$$

con $p(t) = Re\{pe^{-i\omega t}\}$ y donde $p(t)$ será la diferencia entre la presión en la cámara y la presión atmosférica en cada instante de tiempo.

El cambio de volumen en la cámara es provocado por la variación de la superficie libre interior, que puede representarse como un flujo de volumen, $Q(t)$. Asumiendo teoría lineal, se puede expresar dicho flujo de una manera análoga a las fuerzas actuantes sobre un cuerpo flotante:

$$Q(t) = Q_S(t) + Q_R(t) = Re\{(Q_S + Q_R)e^{-i\omega t}\} \quad (2.23)$$

donde Q_S será el flujo debido al oleaje difractado y Q_R al radiado. Se puede expresar el flujo radiado como:

$$Q_R(t) = -\{A(\omega)\dot{p}(t) + B(\omega)p(t)\} \quad (2.24)$$

2. ESTADO DEL ARTE

donde $A(\omega)$ y $B(\omega)$ son la masa añadida y el coeficiente de amortiguación respectivamente. $A(\omega)$ y $B(\omega)$ dependerán de la geometría de la cámara y normalmente se calculan mediante métodos numéricos de tipo BEM. Por continuidad, y asumiendo el aire incompresible, será ese mismo flujo el que circule a través de la turbina. [Evans \(1982\)](#) asumía el flujo de volumen de aire a través de la turbina proporcional mediante una constante α a la presión dentro de la cámara:

$$Q_S + Q_R = \alpha p_c(t) \quad (2.25)$$

Muchos autores asumen que α ha de ser una constante real. [Smith \(1983\)](#), [Lee et al. \(1996\)](#) y [Brito-Melo et al. \(1999\)](#) desarrollaron trabajos con este tipo de aproximación.

2.4.1.1 Revisión del modelado en el dominio de la frecuencia

Los modelos en el dominio de la frecuencia aportan una idea rápida del efecto de los cambios en la geometría sobre la potencia media absorbida y por eso son una valiosa herramienta para la optimización geométrica de los dispositivos ([Ricci & Alves, 2006](#)). En este apartado se recogen algunos de los trabajos más significativos de modelado de la OWC en el dominio de la frecuencia.

Por ejemplo, [Martin-rivas & Mei \(2009a\)](#) desarrollaron un estudio teórico de una OWC instalada en el extremo de un dique hueco y estrecho. El objetivo de este tipo de dispositivo sería conseguir la omnidireccionalidad de mar abierto, pero de forma más económica y técnicamente sencilla. El modelo consideraba una cámara vertical cilíndrica con una turbina Wells ([Wells, 1976](#)). Imponiendo algunas condiciones al diseño de la cámara, dedujeron que la compresibilidad del aire podía ayudar a optimizar la eficiencia de la extracción energética. Comprobaron que la dirección de incidencia del oleaje afectaba en gran medida al oleaje exterior al dispositivo, pero no así a la respuesta media interna de la cámara ni al ancho de captura.

Con el objetivo de estudiar los efectos de la línea de costa en la extracción de energía de una OWC, [Martin-rivas & Mei \(2009b\)](#) describieron una teoría lineali-

2.4 Modelos numéricos para la simulación de dispositivos de OWC

zada para una OWC emplazada en una línea de costa recta y vertical. Compararon los resultados con estudios de OWC instalados lejos de la costa o en el extremo de diques huecos (Martin-rivas & Mei, 2009a). Asumieron una turbina Wells (Wells, 1976), relacionando la superficie interior con la presión en la cámara según Falcão & Sarmiento (1980) y Sarmiento & Falcão (1985), y resolvieron los problemas potenciales externo e interno por separado, imponiendo continuidad de potenciales en el dominio compartido. Concluyeron que en el caso de una OWC anclada a un acantilado recto y vertical la dirección de incidencia influye notablemente a la extracción energética.

En el marco del prediseño, Alves (2012) presentó una metodología en el dominio de la frecuencia para definir la geometría de una OWC desde el punto de vista hidrodinámico. Asumiendo teoría lineal y flujo potencial considera el caso de una OWC flotando en alteada conectada a un lastre. Se utilizó el código hidrodinámico WAMIT para calcular la fuerza de excitación y los coeficientes hidrodinámicos (masa añadida y amortiguación). Gomes *et al.* (2011) también desarrollaron un proceso de optimización de una geometría análoga en el dominio de la frecuencia. En dicho trabajo, asumiendo la masa de agua interior como un pistón y teoría lineal de ondas, utilizaron WAMIT para calcular los coeficientes hidrodinámicos. Al igual que Alves (2012), el aire se consideró un gas ideal y la compresibilidad adiabática. Como PTO se modeló una turbina Wells (Wells, 1976) y se simuló la producción con un modelo estocástico para el clima marítimo de la costa oeste de Portugal.

Zhu & Mitchell (2009) y Zhu & Mitchell (2011), basándose en Garrett (1970), estudiaron analíticamente la difracción y la radiación alrededor de una estructura cilíndrica de fondo hueco. La solución analítica presentada supone una base para la comprensión del fenómeno físico objeto de estudio y una referencia para trabajar con aproximaciones numéricas.

En cuanto al estudio del PTO, Alves *et al.* (2010) caracterizaron el efecto del grupo turbina-alternador sobre el conjunto OWC-boya mediante un término proporcional a la velocidad relativa (boya-OWC) y otro proporcional al desplaza-

2. ESTADO DEL ARTE

miento relativo. Concluyeron que este tipo de captador puede ser sintonizado para conseguir la frecuencia de resonancia deseada para un clima determinado, aprovechando las condiciones de radiación de la boya y de la OWC, y la inercia del lastre.

Hong (1991) resolvió el potencial interno y el externo simultáneamente para el caso de una OWC flotante bidimensional, pero sin considerar el flujo de aire a través del orificio superior de la cámara. En un trabajo posterior, Hong *et al.* (2004) también utilizaron el dominio de la frecuencia para analizar un dispositivo flotante. Estudiaron los movimientos y la fuerza de deriva de un dispositivo OWC flotante ante incidencia de oleaje regular imponiendo una condición de contorno de presión en la superficie libre interior debida a la circulación del aire a través de un orificio superior de la cámara, y estudiando los seis grados de libertad, vitales para el diseño de anclajes. Resolvieron los problemas potenciales interior y exterior por separado e impusieron continuidad en el dominio compartido.

2.4.2 Modelado en el dominio del tiempo

Según diversos autores los modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) que aproximan las ecuaciones de Navier-Stokes suponen el modelado más completo en el dominio del tiempo a las dinámicas objeto de interés en el análisis y desarrollo de un WEC (De Backer, 2007). Alves & Sarmiento (2006) desarrollaron un estudio numérico de efectos no lineales y viscosos en un OWC fijo en línea de costa utilizando el modelo numérico CFD bidimensional COBRAS (Cornell Breaking Wave and Structures) (Liu *et al.*, 1999), que resuelve las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) con un modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ y emplea la técnica VOF (Volume Of Fluid) para describir la posición de la superficie libre. Estudiaron diferentes geometrías y hallaron que el factor dominante de las no linealidades era el peralte del oleaje incidente. Posteriormente Liu *et al.* (2008) también simularon un dispositivo OWC fijo mediante un código VOF bifase comercial (FLUENT) y mostraron comparaciones entre resultados numéricos y experimentales. El Marjani *et al.* (2008) también utilizaron FLUENT para predecir la energía neumática en la cámara del dispositivo OWC.

2.4 Modelos numéricos para la simulación de dispositivos de OWC

Sin embargo, dada la complejidad de los modelos CFD y la alta carga computacional que conllevan, es práctica común la resolución de las ecuaciones de conservación de la cantidad del movimiento del WEC en el dominio del tiempo utilizando métodos BEM combinados con la teoría potencial para la caracterización de las fuerzas hidrodinámicas de excitación y de radiación del WEC.

Partiendo de las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento del cuerpo flotante (Ecuaciones (2.1) y (2.2)), la representación de la fuerza de radiación en teoría lineal en el dominio del tiempo puede expresarse como la suma de un término dependiente de la masa añadida cuando la frecuencia tiende a infinito (A_∞) y un producto de convolución entre $K_r(t)$ y la velocidad del cuerpo ($\dot{z}(\tau)$):

$$\vec{F}_{rad}(t) = A_\infty \ddot{z}(t) - \int_0^t K_r(t - \tau) \dot{z}(\tau) d\tau \quad (2.26)$$

donde el primer sumando representa la fuerza inercial asociada a la masa añadida cuando la frecuencia tiende a infinito ($A_\infty = \lim_{\omega \rightarrow \infty} A(\omega)$) y el segundo sumando es una integral de convolución entre la velocidad del WEC y la función de respuesta al impulso ($K_r(t)$), que representa la memoria del fluido. $K_r(t)$ es también conocida como fuerza de radiación Kernel, función de retardo o función de memoria. Incorporando la Ecuación (2.26) a la ecuación del movimiento, se obtiene la expresión integro-diferencial de Cummins (1962) (Ecuación (2.27)), que expresa el movimiento en el dominio del tiempo de un cuerpo flotante restringido a oscilar en alzada, $z(t)$.

$$(m + A_\infty) \ddot{z}(t) = - \int_0^t K_r(t - \tau) \dot{z}(\tau) d\tau - Gz(t) + F_{exc}(t) - F_{pto}(z(t), \dot{z}(t)) - F_{moor}(z(t), \dot{z}(t)) - F_{fricc}(\dot{z}(t)) \quad (2.27)$$

correspondiéndose los términos de la ecuación con los ya descritos en las Ecuaciones (2.1) y (2.2). El cálculo de la integral de convolución (Ecuación (2.26)) es la parte más compleja de este tipo de modelos en el dominio del tiempo.

2.4.2.1 Cálculo de la integral de convolución de la fuerza de radiación

La resolución directa de la integral de la Ecuación (2.26) es posible pero costosa, ya que para resolverla en cada instante de tiempo es necesario recorrer la histo-

2. ESTADO DEL ARTE

ría previa del movimiento del dispositivo. [Taghipour et al. \(2008\)](#) afirman que dicha resolución directa llega a ser entre 8 y 80 veces más lenta que otros métodos aproximados como el Espacio de Estados, que se describirá a continuación. La función de Kernel puede ser calculada directamente en el dominio del tiempo mediante métodos BEM como ACHIL3D ([Clément, 1999](#)) y TiMIT ([Korsmeyer et al., 1999](#)), pero dichos modelos son computacionalmente muy costosos.

Existen alternativas al cálculo directo de la integral de convolución. La función de memoria puede representarse en el dominio de la frecuencia (función de transferencia, $K_r(\omega)$) o en el dominio del tiempo (función de respuesta al impulso, $K_r(t)$). Dichas expresiones se relacionan mediante la transformada de Fourier:

$$K_r(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} K_r(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.28)$$

Como primera alternativa, en el dominio de la frecuencia, la función de transferencia puede descomponerse en una parte real y otra imaginaria:

$$K_r(\omega) = B(\omega) + i\omega[A(\omega) - A_{\infty}] \quad (2.29)$$

donde $B(\omega)$ será el coeficiente de amortiguación, $A(\omega)$ el coeficiente de masa añadida y A_{∞} la masa añadida cuando la frecuencia tiende a infinito ($\lim_{\omega \rightarrow \infty} A(\omega)$). Estos coeficientes pueden calcularse mediante el modelo de paneles (BEM) de radiación-difracción WAMIT ([WAMIT, 2012](#)), que como se ha dicho anteriormente resuelve los coeficientes hidrodinámicos $B(\omega)$, $A(\omega)$ y A_{∞} en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, estos modelos de radiación-difracción requieren un malla muy fino de la superficie mojada para obtener resultados precisos, sobre todo para frecuencias altas, aumentando considerablemente la carga computacional. En consecuencia, la obtención de las funciones de memoria mediante códigos BEM en el dominio del tiempo o de la frecuencia para todo el rango de tiempo o frecuencias estudiado no se perfila como una alternativa eficiente.

Como segunda alternativa, en el dominio del tiempo, conociendo los coeficientes $B(\omega)$ en el dominio de la frecuencia, se puede expresar la función de

respuesta al impulso a partir de ello a través de la transformada inversa de Fourier:

$$K_r(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2.30)$$

Sin embargo, se sigue acarreado la necesidad de un mallado muy fino de la superficie mojada del cuerpo para obtener resultados con precisión y la gran carga computacional que ello conlleva. Además, el cálculo de la transformada inversa de Fourier acarrea un error que puede evitarse trabajando directamente en el dominio de la frecuencia. Así surge la necesidad de un método alternativo para el cálculo de la integral de convolución. Existen muchas técnicas para aproximar la integral de convolución y todas buscan sustituir dicha integral por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias para evitar así su resolución directa. En la bibliografía destacan el método de [Prony \(1795\)](#) y el método de Espacio de Estados.

- **Método de Prony:**

Mediante el método de [Prony \(1795\)](#), la función de respuesta al impulso ($K_{ij}(t)$, equivalente a $K_r(t)$ para los grados de libertad i y j) puede ser aproximada por el sumatorio de un conjunto de funciones exponenciales complejas. [Duclos et al. \(2001\)](#) utilizaron este método, y a su vez, transformaron la ecuación integro-diferencial en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE). [Ricci et al. \(2008\)](#) comprobaron la rapidez y eficiencia de este método. Según el método de [Prony \(1795\)](#) la función $K_{ij}(t)$ se puede expresar como:

$$K_{ij}(t) = \sum_{i=1}^{N_e} \alpha_i e^{\beta_i t} \quad (2.31)$$

siendo N_e el número de funciones exponenciales y α_i y β_i unas constantes a definir. Se llama $I(t)$ a la integral de convolución:

$$I(t) = \int_0^t K_{ij}(t - \tau) \dot{\xi}_j(\tau) d\tau \quad (2.32)$$

siendo $\dot{\xi}_j(\tau)$ la velocidad en el grado de libertad j . Combinando las Ecuaciones

2. ESTADO DEL ARTE

ciones (2.31) y (2.31):

$$I(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^{N_e} \alpha_i e^{\beta_i(t-\tau)} \dot{\xi}_j(t) d\tau = \sum_{i=1}^{N_e} \int_0^t \alpha_i e^{\beta_i(t-\tau)} \frac{d\xi_j(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.33)$$

Se define:

$$I_i(t) = \int_0^t \alpha_i e^{\beta_i(t-\tau)} \frac{d\xi_j(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.34)$$

Es decir:

$$I(t) = \sum_{i=1}^{N_e} I_i(t) \quad (2.35)$$

Derivando la expresión de $I_i(t)$ en el tiempo y aplicando la regla de Leibnitz:

$$\dot{I}_i(t) = \beta_i I_i + \alpha_i \frac{d\xi_j(t)}{dt} \quad (2.36)$$

Volviendo al caso del cuerpo oscilando en alteada, la integral de convolución puede ser sustituida por una suma de ecuaciones diferenciales de primer orden de coeficientes constantes:

$$\begin{cases} I = \sum_{i=1}^{N_e} I_i \\ \dot{I}_i(t) = \beta_i I_i + \alpha_i \frac{dz(t)}{dt} \\ I_i(0) = 0 \end{cases} \quad (2.37)$$

Si $y_1 = z(t)$ y $y_2 = \frac{dz(t)}{dt}$, el sistema de ecuaciones diferenciales a resolver será:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = \frac{F_{exc}(t) - Gy_1 - \sum_{i=1}^{N_e} I_i - F_{pto}(y_1, y_2) - F_{moor}(y_1, y_2) - F_{fricc}(y_2)}{m + A_\infty} \\ \dot{I}_1 = \beta_1 I_1 + \alpha_1 y_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dot{I}_{N_e} = \beta_{N_e} I_{N_e} + \alpha_{N_e} y_2 \end{cases} \quad (2.38)$$

Llegados a este punto, faltará la definición de los coeficientes (α_i, β_i) y el número de funciones exponenciales (N_e). Para ello se minimiza una función que cuantifique el error entre la aproximación de la función de respuesta al impulso mediante la aproximación de Prony (1795) y algunos valores conocidos de dicha función obtenidos, por ejemplo, mediante códigos BEM. En cuanto al número de funciones exponenciales necesario, De Backer (2007) propuso calcular primero 100 o 200 funciones exponenciales y después seleccionar las parejas (α_i, β_i) de mayor contribución.

- **Método de Espacio de Estados:**

El método de Espacio de Estados, aunque proveniente de la ingeniería de control, ha sido utilizado también en hidrodinámica y concretamente en el análisis de WECs (Schmiechen, 1973; Yu & Falnes, 1995). Este método aproxima la integral de convolución mediante un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de primer orden y coeficientes constantes. Existen diferentes formas para determinar los coeficientes de dichas ecuaciones, tanto a partir de la función de respuesta al impulso en el dominio del tiempo ($K(t)$) como a partir de la función de transferencia en el dominio de la frecuencia ($K(\omega)$). Taghipour *et al.* (2008) revisan las distintas formas que existen para expresar los sistemas de ecuaciones lineales, entre ellas la equivalencia general entre una integral de convolución y una representación de EE (Espacio de Estados):

$$y(t) = \int_0^t h(t - \tau)u(\tau)d\tau \approx \left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{array} \right. \quad (2.39)$$

Por ello, la integral de convolución de la fuerza de radiación se podrá expresar como un subsistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden de coeficientes constantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c u_c(t) \\ y_c(t) = C_c x_c(t) \end{array} \right. \quad (2.40)$$

La primera expresión es la ecuación de estado y la segunda la ecuación de salida. $x_c(t)$ es el vector de estados de dimensiones $(n \times 1)$, siendo n el

2. ESTADO DEL ARTE

número de estados o la dimensión del espacio de estados. A_c es la matriz de estado de $(n \times n)$, B_c la matriz de entrada de $(n \times 1)$ y C_c la matriz de salida de $(1 \times n)$. La entrada del subsistema será la velocidad del cuerpo ($u_c(t) = \dot{z}(t)$), y la salida, la aproximación de la integral de convolución ($y_c(t) \approx I_c(t)$).

El sistema se define mediante una identificación paramétrica de la función de transferencia ($K(\omega)$), mediante la cual se determinará la estructura y el orden del modelo. Después se estimarán los parámetros y se validará el modelo. El problema de identificación se puede plantear en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. Pérez & Fossen (2008) estudiaron la aplicación de métodos de identificación en el dominio del tiempo y de la frecuencia para obtener modelos paramétricos de las funciones de memoria con el objetivo de describir la fuerza de radiación en estructuras marinas. Aunque en la presente Tesis se haya optado por un método de identificación en el dominio de la frecuencia, evitando así el error derivado del cálculo de la transformada inversa de Fourier, a continuación se describen brevemente ambas vías.

– Identificación en el dominio del tiempo

Partiendo de coeficientes hidrodinámicos en el dominio de la frecuencia provenientes de, por ejemplo, WAMIT, se pueden calcular valores de la función de respuesta al impulso, $K(t)$, ver Ecuación (2.30). Sin embargo, con este método se introducirá un error adicional derivado de la aplicación de la transformada inversa de Fourier en el cálculo de dichos valores de la función de respuesta al impulso. La técnica llamada Ajuste por Mínimos Cuadrados de la de la Respuesta al Impulso es la técnica más conocida de identificación en el dominio del tiempo (Yu & Falnes, 1995; Yu, 1998). Con esta técnica se aproxima cada función $K_{ij}(t)$ de la matriz de respuesta al impulso ($K(t)$) mediante un modelo de Espacio de Estados (Pérez & Fossen, 2008):

$$\begin{cases} \dot{x}_{ij}(t) = A_{ij}x_{ij}(t) + B_{ij}\dot{\xi}_{ij}(t) \\ y_{ij}(t) = C_{ij}x_{ij}(t) \end{cases} \quad (2.41)$$

donde la aproximación de la función de respuesta al impulso ($\hat{K}_{ij}(t)$) será:

$$K_{ij}(t) \approx [\hat{K}_{ij}(t) = C_{ij} \exp(A_{ij}t)B_{ij}] \quad (2.42)$$

La estimación de los parámetros se hace mediante el método de mínimos cuadrados:

$$\theta_{ij}(t) = \arg \min \sum_1^n (K_{ij}(t_n) - \hat{K}_{ij}(t_n))^2 \quad (2.43)$$

– Identificación en el dominio de la frecuencia

Partiendo de coeficientes hidrodinámicos en el dominio de la frecuencia provenientes de WAMIT, se pueden calcular directamente valores de la función de transferencia, $K(\omega)$ (Ecuación (2.29)), sin necesidad de la aplicación de la transformada inversa de Fourier, evitando así el error que esto acarrea. Por dicha razón se ha elegido esta vía para aproximar la función de respuesta al impulso en el presente trabajo.

En el método de identificación en el dominio de la frecuencia basado en Taghipour *et al.* (2008) y Pérez & Fossen (2011) la función de transferencia se aproxima por el siguiente modelo paramétrico:

$$K(s) \approx \left[\hat{K}(s) = \frac{P(s, \theta)}{Q(s, \theta)} = \frac{p_m s^m + p_{m-1} s^{m-1} + \dots + p_0}{s^n + q_{n-1} s^{n-1} + \dots + q_0} \right] \quad (2.44)$$

donde θ es el vector de variables ($\theta = [p_m, \dots, p_0, q_{n-1}, \dots, q_0]$) y s la variable compleja de Laplace ($s = i\omega$).

Para determinar los polinomios $P(s, \theta)$ y $Q(s, \theta)$ se aplica un ajuste de mínimos cuadrados entre dicha función aproximada ($\hat{K}(s)$) y valores conocidos de la función de transferencia $K_{wamit}(\omega)$. Dichos valores conocidos de la función de transferencia se obtienen de la aplicación del código hidrodinámico WAMIT para un barrido de frecuencias. WAMIT resolverá los coeficientes de amortiguación (damping) ($B(\omega)$), masa añadida ($A(\omega)$) y masa añadida en el infinito (A_∞) y

2. ESTADO DEL ARTE

$K_{wamit}(\omega)$ será:

$$K_{wamit}(\omega) = B(\omega) + i\omega[A(\omega) + A_\infty] \quad (2.45)$$

Así, por medio del ajuste de mínimos cuadrados se determinará el orden de los polinomios $P(s, \theta)$ y $Q(s, \theta)$ así como sus coeficientes:

$$\theta_{ij} = \arg \min \sum_l \omega_l (K_{wamit}(i\omega_l) - \hat{K}_{ij}(i\omega_l, \theta))^2 \quad (2.46)$$

2.4.2.2 Modelado de la fuerza debida al sistema de extracción de energía

En el caso concreto de una Columna de Agua Oscilante la fuerza debida al sistema de extracción de energía se traduce en última instancia en la fuerza que el aire de la cámara ejerce sobre la superficie libre interior de la cámara, y puede expresarse de la siguiente forma:

$$F_{pto} = \Delta p(t)S \quad (2.47)$$

donde S es el área transversal de la cámara, $\Delta p(t)$ representa la diferencia entre la presión del aire de la cámara en cada instante ($p(t)$) y la presión atmosférica (p_a), es decir, $\Delta p(t) = p(t) - p_a$.

Para definir una ecuación que rijan la variación de la presión del aire de la cámara, se relacionan el cambio de volumen de aire de la cámara producida por la oscilación de la superficie libre y el flujo de aire en la salida de la cámara (turbina y válvula de alivio) por medio de las leyes de la termodinámica, pudiéndose asumir para ello ciertas hipótesis que se explican a continuación.

- **Variación de la masa de aire en la cámara:**

Por continuidad, el flujo de masa de aire que sale y entra en la cámara coincide con la variación de masa de aire en la cámara:

$$\dot{m}_{air}(t) = -\frac{d}{dt}[\rho_{air}(t)V_{air}(t)] \quad (2.48)$$

siendo $\dot{m}_{air}(t)$ el flujo de masa de aire entre la cámara y la atmósfera, $\rho_{air}(t)$ la densidad del aire y $V_{air}(t)$ el volumen de aire en la cámara. La

variación del volumen en la cámara puede relacionarse con la posición de la superficie libre en cada momento:

$$V_{air}(t) = V_0 - Sz(t) = S(L_0 - z(t)) \quad (2.49)$$

siendo V_0 el volumen de aire en la cámara en reposo, S el área interior horizontal de la cámara, L_0 la distancia vertical entre la superficie libre en reposo y el techo de la cámara y $z(t)$ la elevación de la superficie libre interna en cada instante.

- **Relación entre la presión y la densidad del aire en la cámara:**

En general se considera el aire como un gas ideal, ya que está principalmente compuesto de gases que en el rango de condiciones de presión y temperatura que se estudia son gases ideales: 80 % Nitrógeno, 20 % Oxígeno. Un gas ideal está compuesto por partículas puntuales que no interactúan entre sí. Así, cuando la temperatura es suficientemente alta para que la energía cinética de las partículas sea mayor que el trabajo de las fuerzas intermoleculares, y la presión suficientemente baja para que la distancia entre las partículas sea mayor que el tamaño de éstas, se puede considerar que el aire es un gas ideal.

La compresibilidad del aire es muy importante a escala real, ya que su efecto muelle aumenta con la altura de la cámara sobre el nivel del agua (Sarmiento & Falcão, 1985). De hecho, Martin-rivas & Mei (2009a) observaron que la compresibilidad del aire podía ayudar a optimizar la eficiencia de la extracción energética. Por ello, es imprescindible considerar la variación de la densidad del aire para estudiar el problema de la OWC a escala de prototipo.

Los ciclos de llenado y vaciado del aire de la cámara se suceden durante el movimiento de la OWC y su correcto modelado es vital para conseguir simular satisfactoriamente el comportamiento de la Columna de Agua Oscilante. Diversos autores consideran ambos procesos adiabáticos, ya que el intercambio de calor con el entorno es muy pequeño. Esto se debe a que la

2. ESTADO DEL ARTE

duración de los ciclos de vaciado y llenado es mucho más corta que el tiempo que haría falta para mantener el aire a temperatura constante (Falcão & Justino, 1999). Esta hipótesis es común cuando se estudia el calentamiento o enfriamiento de un gas por causa de variaciones de presión.

Sin embargo, los procesos de llenado y vaciado son sustancialmente distintos: el llenado se produce desde la atmósfera abierta a un espacio confinado, mientras que el vaciado se produce a la inversa. Por lo tanto, las hipótesis y asunciones que harán posible su modelado deberían ser también diferentes.

Durante el proceso de vaciado se produce la descarga del aire de la cámara a una atmósfera a presión inferior, la atmosférica. El cambio de estado termodinámico de las partículas que permanecen en la cámara será un proceso reversible y por tanto isoentrópico (Kestin, 1966; Falcão & Justino, 1999). Es decir, la entropía, o parte de energía del sistema que no puede convertirse en trabajo, se mantendrá constante durante el proceso. La entropía describe lo irreversible de los sistemas termodinámicos y, al contrario que en este caso de estudio, en un sistema aislado crece en el transcurso de un proceso que se da de forma natural. Basándose en ello la presión del aire en la cámara y la densidad del aire se relacionan de la siguiente forma:

$$\rho_{air}(t)(p_a + \Delta p(t))^{(-1/\gamma)} = cte \quad (2.50)$$

siendo p_a la presión atmosférica, $\Delta p(t)$ la presión dinámica interior a la cámara ($\Delta p(t) = p(t) - p_a$) y γ el coeficiente de dilatación adiabática ($\gamma = 1,4$ en el caso del aire seco en el rango de temperaturas estudiado).

El proceso de llenado es más complejo que el de vaciado, ya que la entropía específica del aire varía al entrar desde la atmósfera a la cámara debido a las pérdidas viscosas en la válvula (Falcão & Justino, 1999). Sin embargo, muchos autores han modelado este proceso también como isoentrópico (Falcão & Justino, 1999; Nunes *et al.*, 2011).

- **Flujo de masa a través de una válvula:**

Los dispositivos de columna de agua oscilante suelen contar con una válvula de alivio con el fin de evitar grandes golpes de presión en la cámara que podrían provocar el fallo de la turbina. En el presente trabajo se modela la columna de agua oscilante como una cámara que no cuenta con ninguna turbina, pero sí con una salida a la atmósfera cuyo funcionamiento se asemejará a una válvula de alivio. El flujo de masa de aire a través de una apertura se puede modelar mediante la Ecuación (2.51) (Alves, 2012):

$$\dot{m}_{valve}(t) = k_v c_d A_v \operatorname{sgn}(p(t) - p_a) \left[\frac{2m_{air} |p(t) - p_a|}{V_{air}(t)} \right]^{1/2} \quad (2.51)$$

siendo $\dot{m}_{valve}(t)$ el flujo de masa de aire a través de la válvula, k_v el estado de apertura de la válvula (1: abierta, 0: cerrada), c_d el coeficiente de descarga, A_v el área de la válvula y sgn el signo de lo que lleva entre paréntesis.

2.4.2.3 Revisión del modelado en el dominio del tiempo

Tradicionalmente, el modelado en el dominio del tiempo de la Columna de Agua Oscilante asume que el problema hidrodinámico ha sido estudiado anteriormente y que el dispositivo está en la fase de diseño o que ya ha sido construido. Por ello, muchos de los modelos desarrollados en el dominio del tiempo se centran en el control del dispositivo para obtener el máximo beneficio en las condiciones de operación y rangos de estados de mar a los que el WEC estará sometido (Cruz, 2008).

Como se ha indicado en este capítulo el comportamiento de los WEC puede también evaluarse estocásticamente o con modelos en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, las fuerzas ejercidas por el sistema de PTO, los anclajes y las fuerzas viscosas, son intrínsecamente no lineales y hacen necesario un modelado en el dominio del tiempo. Así, el modelado en el dominio del tiempo es necesario no solo por el carácter no lineal de las fuerzas actuantes, sino también para conseguir un sistema realista de regulación de PTO (Evans & Porter, 1995).

Diversos autores han trabajado en el dominio del tiempo con el objetivo de desarrollar los sistemas de PTO. Sarmiento *et al.* (1990) y Falcão & Justino (1999)

2. ESTADO DEL ARTE

publicaron modelos de control de PTO para simular condiciones reales y estudiar la conveniencia o no de una válvula de alivio para prevenir altas presiones en la cámara OWC. [Falcão & Justino \(1999\)](#) simularon la conversión de energía de las olas a través de una turbina Wells ([Wells, 1976](#)) y válvula en serie o en paralelo en una OWC fija. El modelo estaba destinado al control del flujo de aire en la turbina. Asumía teoría de ondas lineal y presión uniforme dentro de la cámara. Consideraron la compresibilidad del aire en la cámara mediante la inclusión de un efecto muelle. [Perdigão & Sarmiento \(2003\)](#) estudiaron el control de una turbina de paso variable (el ángulo de las palas puede variar) y demostraron una mejora notable de la eficiencia en comparación con las turbinas de paso fijo.

En cuanto a cuestiones hidrodinámicas, existen modelos que asumen la superficie libre interior de la cámara indeformable. [Evans \(1978\)](#) afirmó que en el caso de ondas largas el fluido de una OWC podía ser considerado como una masa sólida con su superficie libre actuando como un pistón rígido ligero. Esta asunción requiere la atribución de un coeficiente de masa añadida para el cuerpo de fluido definido. [Sarmiento & Falcão \(1985\)](#) mejoraron este modelo permitiendo considerar una presión variable sobre una superficie libre interior no plana.

[Brito-Melo *et al.* \(2002\)](#) investigaron la influencia del diseño aerodinámico de la turbina Wells ([Wells, 1976](#)) en el comportamiento general de una planta OWC (Pico Plant - Azores, Portugal) mediante un modelo numérico en el dominio del tiempo. Hidrodinámicamente el modelo se basaba en el modelo de presiones de [Sarmiento & Falcão \(1985\)](#).

[Josset & Clément \(2007\)](#) dividieron el problema general de simular el movimiento de la superficie libre interior en dos subproblemas. Por un lado, el problema exterior con oleaje incidente difractado y radiado, y por el otro, el de conocer el comportamiento del volumen de agua interior a la cámara. Resolvían primero el problema externo, cuya solución es un potencial de velocidades, y después el interno, a través de la superficie de agua sumergida que comparten ambos dominios. [Josset & Clément \(2007\)](#) utilizaron un modelo numérico híbrido ([Josset *et al.* \(2002\)](#)) para acoplar los dos problemas, considerando el interior como un

2.4 Modelos numéricos para la simulación de dispositivos de OWC

potencial no lineal y el exterior como lineal. El modelo fue aplicado a la planta de Pico para la estimación de su comportamiento y optimización de la configuración.

Nunes *et al.* (2010) describieron el modelado de un dispositivo OWC puntual, restringido a moverse en alteada y alejado de la costa. Se centraron en estudiar las técnicas de control para mejorar la extracción de energía. Asumieron que el aire del interior de la cámara es un gas ideal y los procesos de llenado y vaciado isoentrópicos (Falcão & Justino, 1999). El dispositivo y la masa de agua variable interior se consideran dos cuerpos acoplados por la presión interior a la cámara, que es controlada por la turbina de aire de tipo Wells (Wells, 1976). Las fuerzas hidrodinámicas consideradas por Nunes *et al.* (2010) son la fuerza de radiación y la fuerza de excitación, y se calcularon mediante el software hidrodinámico Aquadyn en el dominio de la frecuencia, originalmente desarrollado por la École Centrale de Nantes y modificado en trabajos posteriores (Brito-Melo *et al.*, 1998, 2001). Al tratarse de una turbina Wells (Wells, 1976) se plantea una relación lineal entre la presión en la turbina y el flujo de aire a través de ella. Para el modelado del aire del interior de la cámara, consideraron la compresibilidad del aire.

Koo & Kim (2010) desarrollaron un modelado basado en teoría potencial no-lineal en el dominio del tiempo de un dispositivo OWC fijo al fondo. Resolvieron la interacción entre el aire comprimido y el movimiento de la columna de agua en el dominio del tiempo mediante la ecuación de la continuidad asumiendo incompresibilidad del aire, y validaron sus resultados con datos experimentales y numéricos (Liu *et al.*, 2008).

2.5 Conclusiones

La presente Tesis se ha desarrollado basándose en las importantes aportaciones previas de varios autores al estudio de la tecnología de la OWC, las cuales se han tratado de recopilar a lo largo de este capítulo. Para comenzar se ha descrito brevemente el fundamento que rige la tecnología de la OWC y se ha pretendido recorrer los prototipos en campo más importantes que existen hoy en día o han existido en el pasado. Dada la elevada inversión que implica la construcción de un prototipo a gran escala, diversos autores han desarrollado trabajos experimentales a escala reducida a lo largo de las últimas décadas, de los cuales se han repasado los más destacables.

Una vez justificada la necesidad de complementar el trabajo experimental con el numérico, se han descrito las aproximaciones numéricas más importantes de la bibliografía, con sus hipótesis y asunciones. Así, se ha constatado el uso de modelos en el dominio de la frecuencia para el análisis preliminar de los dispositivos con importantes hipótesis simplificadoras o geometrías sencillas. Dichos trabajos, en general, desprecian o linealizan las fuerzas no lineales, como por ejemplo el amortiguamiento debido al sistema de extracción de energía (PTO). Posteriormente, se han recorrido las aproximaciones numéricas en el dominio del tiempo. Por un lado, se cuenta con los modelos simplificados que tienen la capacidad de considerar las fuerzas intrínsecamente no lineales. El objetivo generalizado de muchas de estas aproximaciones es el de simular de forma más realista la regulación y variabilidad del efecto del PTO. Otro tipo de modelos numéricos en el dominio del tiempo son los modelos CFD, los cuales destacan por su alta carga computacional y el gran nivel de detalle que alcanzan, de otra manera inconcebible.

Como conclusión general del capítulo, puede afirmarse que aunque exista una gran diversidad de herramientas para abordar el problema de la OWC, no existe en la bibliografía una metodología de modelado numérico optimizado de la Columna de Agua Oscilante, es decir, un uso recomendado de cada tipo de modelo para resolver las distintas tareas a abordar en el desarrollo de un dispositivo OWC. Dicha metodología de modelado optimizado debería buscar el equilibrio entre es-

fuerzo de cálculo y exigencias de precisión de cada fase del desarrollo, utilizando racionalmente los recursos correspondientes a cada etapa del desarrollo. En consecuencia, el presente trabajo pretende dar respuesta a esa carencia metodológica identificada en el estado del arte. En el Capítulo 3 se ahonda en los objetivos de esta Tesis.

Objetivos, metodología propuesta y organización de la Tesis

En este capítulo se describe el objetivo general de la presente Tesis, que consiste en proponer una metodología optimizada de modelado numérico de la Columna de Agua Oscilante (OWC). Para la consecución de dicho objetivo, se parte de una primera propuesta definida a la vista del estado del arte. En este capítulo se describe dicha propuesta metodológica, así como el procedimiento empleado para su desarrollo y verificación. Por último, se describe la organización del presente documento.

3. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA PROPUESTA

3.1 Objetivos del trabajo

En el Capítulo 2 se han presentado y clasificado las distintas formas de abordar el problema de la Columna de Agua Oscilante (OWC), tanto experimental como numéricamente. Al final de dicho capítulo se resumen las utilidades más generalizadas y limitaciones de las diferentes herramientas numéricas. Sin embargo, en la revisión del estado del arte se ha detectado un vacío metodológico enfocado a combinar diferentes herramientas numéricas para responder a las distintas necesidades de cada fase del desarrollo de una OWC. Para un uso óptimo de los recursos disponibles para el modelado, es necesario establecer una metodología que determine qué modelos deben aplicarse en cada fase del análisis y diseño de dispositivos OWC.

El objetivo general de esta Tesis es por tanto presentar una metodología para un modelado optimizado de la OWC, es decir, para el uso de las herramientas más adecuadas para cada fase del desarrollo de un dispositivo OWC, definiendo para ello los siguientes objetivos parciales:

- Identificación de las necesidades específicas de cada una de las etapas del desarrollo de un dispositivo de OWC.
- A partir del estado del arte, selección de las herramientas que satisfagan de manera óptima dichas necesidades, es decir, alcanzando el equilibrio entre esfuerzo de cálculo y calidad de resultados necesaria en cada fase.
- Basándose en lo anterior, definición de una propuesta metodológica de partida.
- Verificación de la metodología propuesta. Para ello:
 - Desarrollo, calibración y validación de las herramientas necesarias.
 - Aplicación de la metodología propuesta.
- Valoración de los resultados obtenidos y discusión de la validez de la metodología propuesta.

3.2 Metodología propuesta - Modelado híbrido de la OWC

En primer lugar, basándose en los conocimientos del estado del arte y de las ventajas e inconvenientes de cada herramienta que a priori se conocen, se ha elaborado una propuesta metodológica de partida, que consiste en un modelado híbrido (numérico y experimental) de la OWC. Dicha propuesta se describe en este apartado. En la Figura 3.1 se representa un esquema general donde se identifica, en el centro, el objetivo general de esta Tesis en relación con el estado del arte. A su vez, se recogen las distintas herramientas utilizadas para la consecución de dicho objetivo, recalcando en la combinación y retroalimentación entre ellas. Tal y como se observa en la Figura 3.1, en este trabajo se analiza el problema la OWC mediante distintas aproximaciones numéricas, validadas todas ellas con datos experimentales. La calibración y validación de cualquier modelo numérico es absolutamente necesaria para poder utilizarlo como herramienta fiable y para ello se ha desarrollado la campaña de ensayos en modelo físico que se describe en el Capítulo 4. El modelado físico ofrece la oportunidad de observar y comprender de la forma más directa los fenómenos que se producen en cualquier problema a estudiar. Sin embargo, el principal inconveniente del modelado físico es su alto coste económico y temporal, factor que se agrava irremediablemente en los ensayos en campo de prototipos a escala real. En consecuencia, el modelado numérico combinado con el experimental es absolutamente necesario durante cualquier fase de un desarrollo eficiente de un dispositivo WEC.

A continuación se describe la metodología propuesta en la presente Tesis para el modelado numérico optimizado de la OWC. Como se observa en la Figura 3.1, se divide en tres grandes bloques:

- **Aproximaciones en el dominio de la frecuencia: Prediseño y caracterización inicial de la OWC**

Se considera adecuado el uso de aproximaciones en el dominio de la frecuencia para las primeras fases del desarrollo, como el prediseño, de un dispositivo de OWC. Durante esta fase se desarrolla el primer estudio de optimización de la geometría del dispositivo, partiendo de considerar una amplia variedad de conceptos de los que se seleccionan las geometrías que

3. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA PROPUESTA

seguirán desarrollándose en las fases siguientes. En esta fase, más que un estudio minucioso de las dinámicas, es necesario el modelado eficiente de las diferentes variantes ideadas para poder comparar su comportamiento e incluso tener una primera estimación de la producción. Por ello, se considera adecuado asumir las hipótesis de linealidad y otras limitaciones propias del modelado en el dominio de la frecuencia a favor de una primera y eficiente evaluación de las distintas opciones.

- **Aproximaciones en el dominio del tiempo: Diseño y estimación de la producción**

En la fase de diseño, una vez que la geometría y dimensiones del dispositivo estén perfilados a rasgos generales o se barajen un número limitado de posibilidades, pueden utilizarse los modelos en el dominio del tiempo, ya que son capaces de considerar aspectos no lineales del problema como pueden ser las pérdidas por fricción en la entrada sumergida de la cámara o el efecto debido al sistema de extracción de energía (Power Take Off, PTO). Dichas capacidades implican también un incremento sustancial del esfuerzo computacional, que se considera asumible en esta fase pero innecesario en la fase de prediseño.

- **Modelado con CFD: Optimización y análisis de detalle**

Por último, para un estudio detallado de la hidrodinámica del problema, en esta propuesta metodológica se considera necesario el uso de modelos CFD (Computational Fluid Dynamics), porque a pesar de su alta carga computacional, facilitan detalles de la hidrodinámica (separación de capa límite en el labio sumergido, turbulencia, deformación de la superficie libre interior, flujo de aire) prácticamente imposibles de alcanzar con ningún otro modelo, tanto físico como numérico. La influencia en el rendimiento final del dispositivo debido a pequeñas variaciones de la geometría (como la forma del labio de entrada), la turbulencia o las posibles gotas de agua en suspensión en el aire, son aspectos a estudiar en profundidad antes de proceder a la construcción de un prototipo, con la importante inversión económica que esto implica.

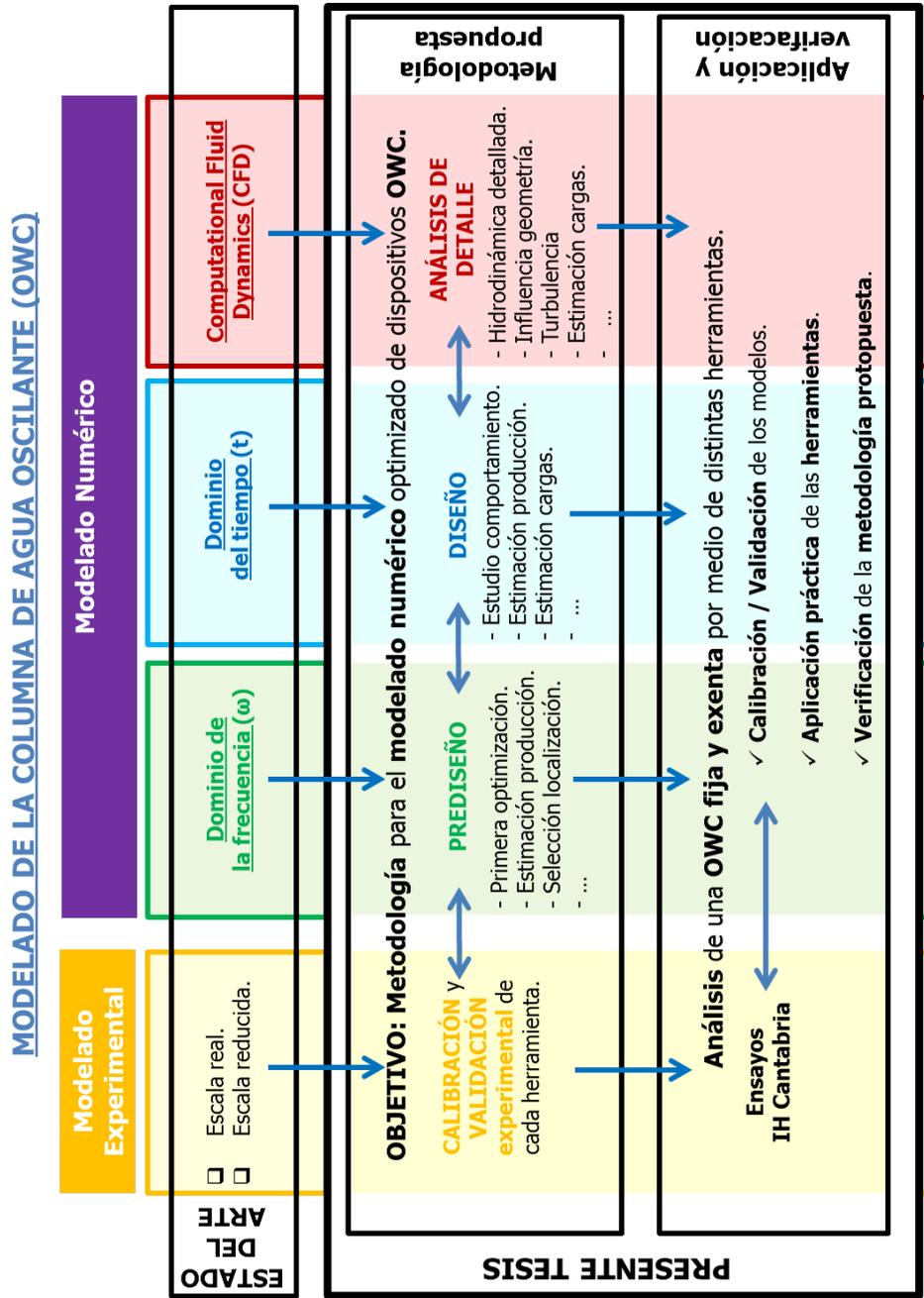


Figura 3.1: Esquema de la estructura de la tesis.

3. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA PROPUESTA

En cuanto a la escala temporal de la metodología propuesta, la precisión necesaria en las tareas del desarrollo de un dispositivo OWC crece conforme se progresa hacia fases avanzadas. Así, en las etapas iniciales, el modelo óptimo a utilizar será sencillo y muy eficiente (modelo simplificado en el dominio de la frecuencia), hasta llegar a modelos computacionalmente costosos y muy precisos en las fases finales del análisis (modelos de CFD). La Figura 3.2 muestra las herramientas incluidas en la propuesta metodológica sobre una escala temporal, lo que se denomina como línea de diseño. En la figura se observa la progresión en el desarrollo de un dispositivo utilizando diferentes herramientas que se apoyan entre ellas para resolver tareas específicas. Así, partiendo de una idea, se abordaría la fase de prediseño con el modelo simplificado en el dominio de la frecuencia, para seguir después en la fase de diseño con el modelo simplificado en el dominio de tiempo. Una vez alcanzada esta fase, los ensayos de laboratorio permiten calibrar y validar las herramientas anteriores. Cumplidas estas tareas con éxito, podrá estudiarse el problema en detalle utilizando modelos CFD. En esta etapa se valorará si se ha alcanzado el diseño final deseado y su completa comprensión para abordar la etapa precomercial. Este proceso se repetirá tantas veces como sea necesario hasta acabar por definir el diseño perseguido. En la figura se observa también que después del diseño detallado del dispositivo se utiliza el modelo simplificado en el dominio del tiempo para implementar estrategias de control. De hecho, dichos modelos son los más adecuados para optimizar el rendimiento del dispositivo mediante sistemas de control del PTO una vez que esté instalado.

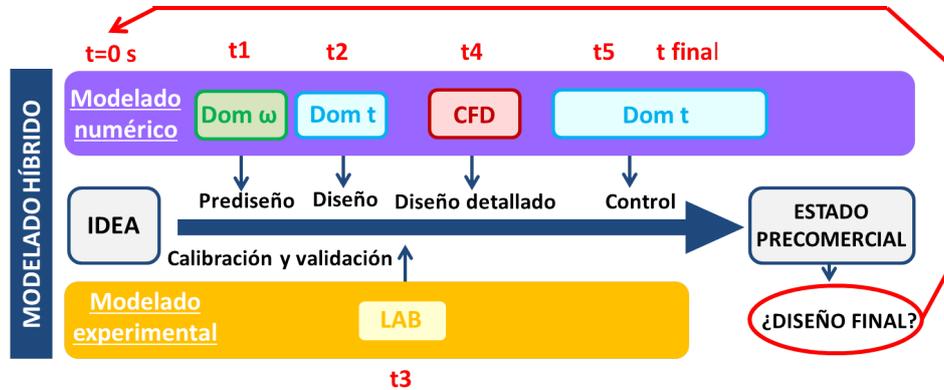


Figura 3.2: Línea de diseño en el tiempo.

3.3 Verificación de la metodología propuesta

Con el objetivo de verificar la validez de la propuesta metodológica presentada, se analiza en la presente Tesis el problema de un dispositivo de OWC mediante distintas herramientas. Para ello, se desarrollan y utilizan los distintos recursos que se han descrito:

- En primer lugar, con el objetivo de calibrar y validar las herramientas numéricas posteriores, se desarrolló una campaña experimental en las instalaciones del IH Cantabria, la cual se describe en el Capítulo 4.
- A continuación, se desarrollaron diferentes herramientas numéricas simplificadas (en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, Capítulo 5) con las que se simuló el problema ensayado en el laboratorio y se procedió a su calibración y validación basándose en datos experimentales (Capítulo 6).
- En cuanto a modelos numéricos de mayor complejidad, se reprodujo también el problema del laboratorio con el modelo numérico OpenFOAM (CFD) y se validaron sus resultados con datos experimentales (Capítulo 6).

Una vez calibradas y validadas las diferentes herramientas numéricas que forman parte de la metodología propuesta, con el objetivo de verificar su validez, se

3. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA PROPUESTA

desarrolla una aplicación de dicha metodología en el Capítulo 7. Posteriormente, se procede a la valoración de los resultados obtenidos y los esfuerzos de cálculo, con el objetivo de evaluar la adecuación de la metodología propuesta al problema afrontado.

3.4 Organización de la tesis

En cuanto a la estructura del presente documento, los contenidos se organizan en capítulos de la siguiente forma:

- Capítulo 0: Summary.
- Capítulo 1: Introducción.
- Capítulo 2: Estado del arte.
- Capítulo 3: Objetivos, metodología propuesta y organización de la Tesis.
- Capítulo 4: Experimentación en modelo físico.
- Capítulo 5: Descripción de los modelos numéricos empleados.
- Capítulo 6: Calibración y validación de los modelos numéricos.
- Capítulo 7: Aplicación de la metodología propuesta y discusión.
- Capítulo 8: Conclusiones.
- Capítulo 9: Futuras líneas de trabajo.
- Referencias.

Experimentación en modelo físico

En este capítulo se describe la campaña de experimentación en modelo físico desarrollada en el marco de la presente Tesis. En dicha campaña, llevada a cabo en las instalaciones del IH Cantabria de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, se analizó un modelo a escala reducida de un dispositivo de Columna de Agua Oscilante (OWC) fijo y exento en un canal bidimensional de oleaje. Como se ha explicado en el Capítulo 3, donde se recogen los objetivos y la estructura de trabajo seguida en la presente Tesis, los resultados de dichos ensayos están destinados a calibrar y validar las herramientas numéricas utilizadas a lo largo del trabajo. En este capítulo se recoge:

- La justificación de la campaña experimental.
- Los objetivos perseguidos por ella.
- La descripción de la disposición experimental de los ensayos y del modelo de cámara OWC utilizado.
- Las variables medidas y la instrumentación utilizada para ello.

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

- Los ensayos realizados.
- Los principales resultados obtenidos.
- Conclusión general de la campaña experimental.

4.1 Justificación de la campaña experimental en modelo físico

Tal y como se ha explicado en el Apartado 2.3 del capítulo correspondiente al estado del arte, las campañas experimentales en modelo físico destinadas al estudio de la tecnología de la Columna de Agua Oscilante no han sido numerosas y las bases de datos resultantes son en general inaccesibles para la comunidad investigadora. Esta escasez de datos es más notoria en el caso de prototipos ensayados en el mar, ya que las empresas promotoras guardan celosamente los resultados de sus ensayos. Además, se considera de vital importancia el análisis conjunto de las magnitudes de interés, que escasas campañas preexistentes han contemplado, como son: la superficie libre interior, la presión del aire en la cámara y el flujo de aire entre la cámara y la atmósfera. Por todo ello, en el marco de esta Tesis se ha desarrollado una campaña experimental en la que se han registrado las tres magnitudes mencionadas, proporcionando una base de datos que respalda el trabajo numérico desarrollado a posteriori.

4.2 Objetivo general de los ensayos

En general, el modelado experimental ofrece la oportunidad de observar y comprender las dinámicas implicadas en el problema estudiado. Sin embargo, suele implicar grandes costes en términos económicos y de tiempo que hacen del modelo numérico una herramienta imprescindible en el diseño eficiente de un WEC. Sin embargo, ambos modelados deben complementarse continuamente. Así, una herramienta numérica no podrá ser empleada de manera fiable hasta que no haya sido calibrada y validada mediante datos experimentales. Por lo tanto, el objetivo último de la campaña experimental desarrollada en el marco de la presente Tesis no era otro que recopilar una base de datos de laboratorio con la que calibrar y validar los distintos modelos numéricos que forman parte de la metodología propuesta.

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

4.3 Disposición general de los ensayos

La campaña experimental se llevó a cabo en las instalaciones del IH Cantabria de la Escuela Superior Técnica de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria. El canal de oleaje en el que se desarrolló la campaña experimental mide 20.60 metros de largo, 0.75 metros de alto y 0.68 metros de ancho, ver Figuras 4.1 y 4.2.

La decisión de desarrollar el modelado físico en un canal bidimensional se debe, primero, a la búsqueda de la simplificación del problema como primera aproximación, y segundo, a la intención de modelar numéricamente el problema también con herramientas 2D. Concretamente, el modelo numérico IH-2VOF (CFD) ha sido ampliamente validado para dicho canal en ensayos de ingeniería costera. Por ello, se ha querido utilizar dicho modelo para la reproducción numérica de los ensayos.

En la Figura 4.1 se muestra una sección longitudinal del canal de oleaje, con la disposición del modelo de cámara OWC y algunos de los sensores de medida. El canal de oleaje está dotado de una pala generadora con movimiento de pistón, que cuenta con un sistema de absorción de reflexiones integrado en el software de generación (AWASYs). La profundidad del agua sobre el fondo plano del canal durante todos los ensayos fue de 0.6 metros. Se considera que esta disposición experimental equivale a un escenario hipotético real a escala 1:30, es decir, a un emplazamiento a 18 metros de profundidad. Tras el modelo se dispuso una rampa disipadora impermeable con pendiente 1/20 en el tramo final del canal. La estructura disipadora comenzaba a 10 metros de la pala y se extendía hasta la pared trasera del canal. Se midió la elevación de la superficie libre a lo largo del canal y se analizó la reflexión en ausencia de cámara, demostrando que era menor del 10 % en todos los casos utilizando la técnica de [Mansard & Funke \(1980\)](#).

Se colocó un modelo fijo y exento de cámara de OWC de metacrilato a 5.40 metros de la pala. El interior de la cámara medía 0.30 metros de largo en dirección de propagación del oleaje y ocupaba todo el ancho del canal. El calado de las

4.3 Disposición general de los ensayos

aperturas sumergidas frontal y trasera de la cámara era de 0.20 metros, ver Figuras 4.1 y 4.3.

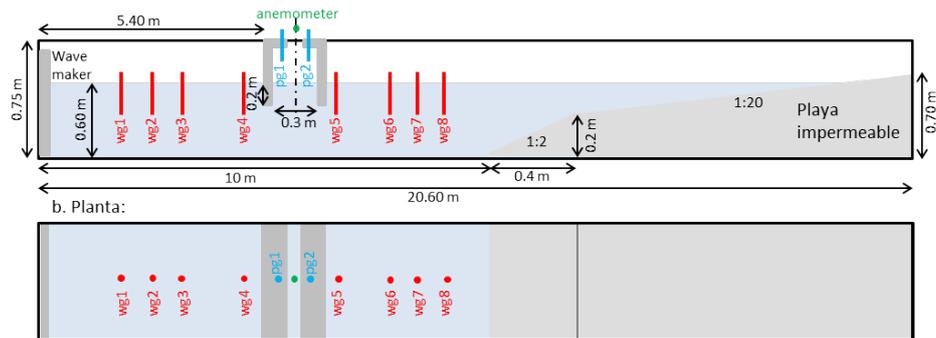


Figura 4.1: Esquema del canal.

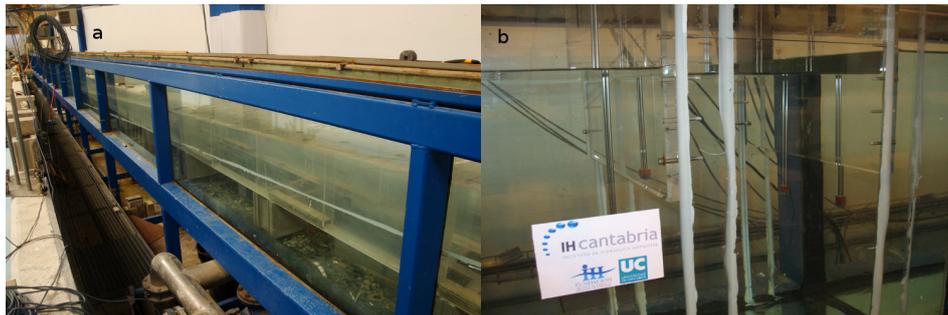


Figura 4.2: Canal y modelo de cámara OWC.

En el caso de un dispositivo de OWC real el flujo de aire entre la cámara y la atmósfera activaría el movimiento de la turbina. En general, suelen ser turbinas autorectificadoras, es decir, que giran en el mismo sentido independientemente del sentido del flujo de aire. El estudio de las turbinas de aire para dispositivos OWC es un tema tan amplio como complejo, que ha quedado fuera de los límites de este trabajo (Falcão & Gato, 2012). El sistema de extracción de energía se conceptualizó mediante una ranura de anchura variable que permitió imponer diferentes resistencias al flujo de aire a través de la misma. El techo de la cámara contaba

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

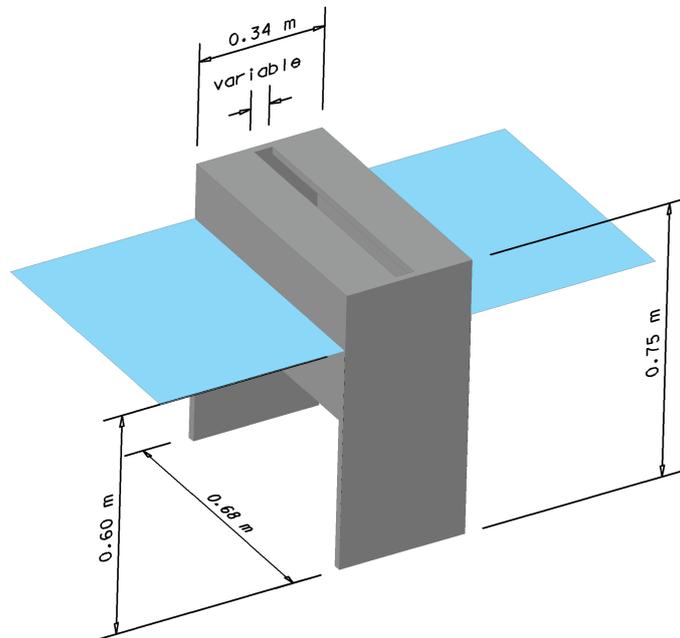


Figura 4.3: Geometría del modelo de OWC.

con dos placas móviles que permitían variar la apertura superior del modelo de OWC. 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 diseñado para optimizar la producción energética. Con el objetivo de conocer el comportamiento de la cámara para distintos niveles de amortiguamiento impuesto se realizaron ensayos con diferentes anchuras de la ranura superior.

4.4 Instrumentación

Tal y como se ha mencionado, se colocaron sensores de nivel a lo largo del canal para el análisis de la reflexión y la transmisión del oleaje. Se colocaron cuatro sensores de nivel entre la pala y la cámara de OWC, tres para analizar la reflexión (Figura 4.4; X1, X2 y X3 de la Tabla 4.1) y otro a 5 centímetros de la pared frontal de la cámara. Análogamente, otros cuatro sensores de nivel se colocaron entre la cámara y la playa disipativa, uno a 5 centímetros de la pared trasera de la cámara y los otros tres para analizar la transmisión a la parte del canal al abrigo de la cámara, así como la reflexión de la playa (X9, X10 y X11 de la Tabla 4.1). En los ensayos de canal vacío se colocaron tres sensores para el análisis de incidente y reflejada (X1, X2 y X3 de la Tabla 4.1) y dos sensores para el análisis de la onda transversal, en caso de que la hubiera, alineados con el primero, ver Figura 4.8.

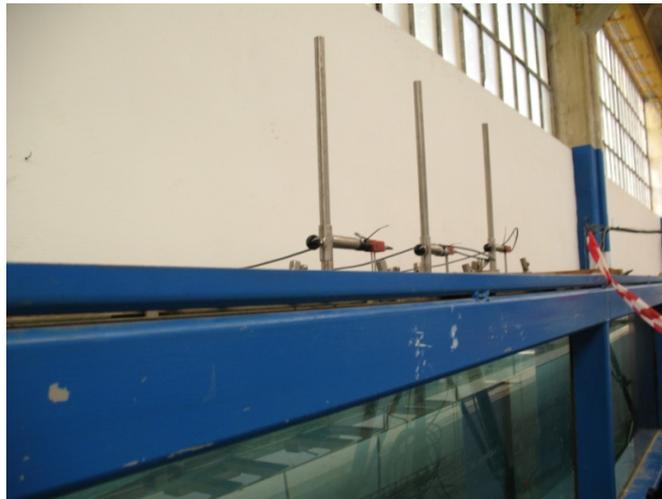


Figura 4.4: Sensores de nivel para el análisis de incidente y reflejada.

Dada la posible complejidad de las oscilaciones de la la superficie libre interna de la cámara, y con el objetivo añadido de corroborar la bidimensionalidad de los ensayos, la superficie libre interior se midió en tres secciones paralelas a la dirección de propagación del oleaje. Para ello, tres largos hilos capacitivos se dispusieron en forma de zig-zag sobre un bastidor de acero. Cada uno de los tres hilos

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

T(s)	X1(m)	X2(s)	X3(m)	X9(m)	X10(m)	X11(m)
1.10	3.50	3.68	3.90	7.34	7.52	7.74
1.20	3.50	3.71	3.90	7.34	7.55	7.74
1.30	3.50	3.73	4.01	7.34	7.57	7.85
1.50	3.50	3.80	4.20	7.34	7.64	8.04
1.70	3.50	3.85	4.50	7.34	7.69	8.34
2.20	3.50	3.99	4.60	7.34	7.83	8.44
3.20	3.50	4.25	4.77	7.34	8.09	8.61

Tabla 4.1: Posición de los sensores de superficie libre según el periodo (Mansard & Funke, 1980).

proporcionaba una serie temporal promediada espacialmente en su sección de medida, ver Figura 4.5. Tal y como se esperaba, las tres series registradas mostraron una gran similitud en todos los ensayos, confirmando así la bidimensionalidad de los ensayos.

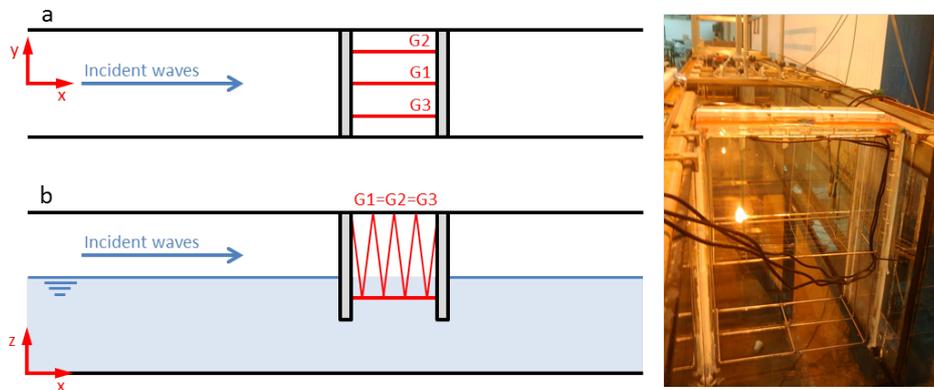


Figura 4.5: Esquema de los sensores capacitivos en el interior de la cámara (a: planta, b: alzado) y foto.

La caracterización de la oscilación de la superficie libre interior es crucial para el análisis de un dispositivo OWC real, ya que es la causa primaria que activa

el funcionamiento del dispositivo. El movimiento de la superficie libre se transfiere al aire dentro de la cámara originando su compresión y descompresión, y provocando su circulación a través de la turbina (apertura superior en el caso de este trabajo). Para el análisis neumático de la OWC, se emplearon dos sensores de presión para registrar la oscilación de la presión del aire interior de la cámara. Se colocaron uno a cada lado de la apertura superior del modelo, ver Figura 4.6.

El flujo de aire desde la cámara a la atmósfera o viceversa hace girar la turbina en un dispositivo OWC real. Se utilizó un anemómetro ultrasónico para registrar la velocidad del aire a través de la apertura superior de la cámara, ver Figura 4.7. El anemómetro medía las tres componentes de la velocidad del aire y se colocó sobre la cámara de forma que alterara lo mínimo posible el flujo de entrada y salida del aire.

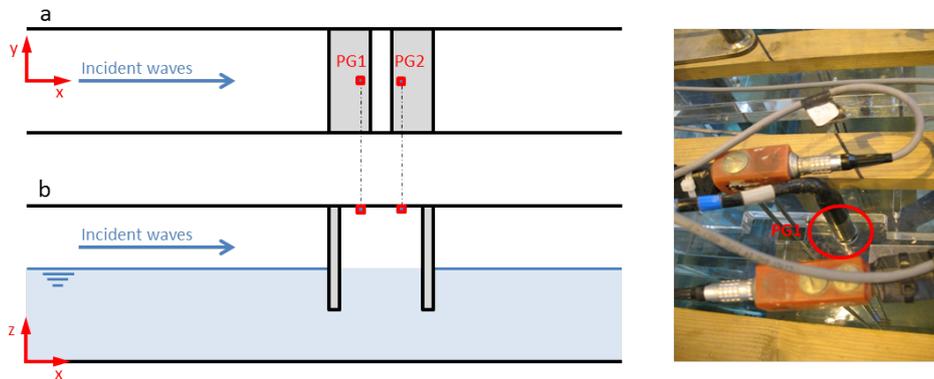


Figura 4.6: Esquema de la localización de los sensores de presión (a: planta, b: alzado) y foto.

Dada la intención de reproducir numéricamente los ensayos, se registró la posición de la pala durante los ensayos. Además, el hecho de que las paredes de la cámara fueran transparentes permitió la grabación en vídeo y la observación en tiempo real de la superficie libre interior de la cámara, ver Figura 4.5.

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

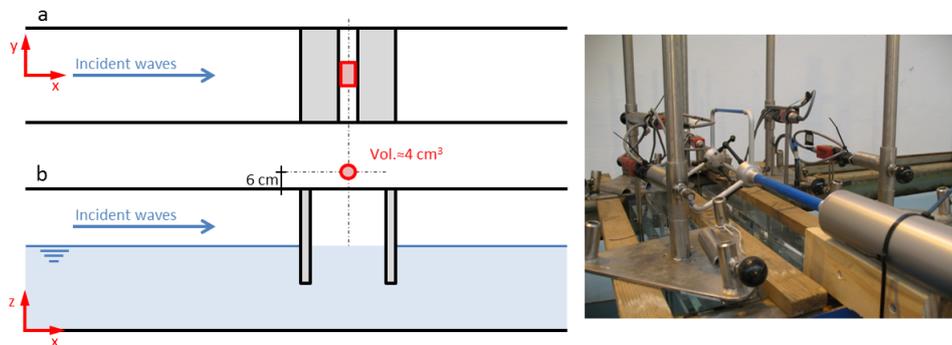


Figura 4.7: Esquema de la localización del anemómetro ultrasónico (a: planta, b: alzado) y foto.

4.5 Ensayos realizados

La secuencia de ensayos realizados se puede resumir de la siguiente forma:

- Ensayos de calidad y análisis de la reflexión de la playa disipadora.
- Ensayos con la apertura de la cámara cerrada.
- Ensayos con la cámara abierta.
- Ensayos para selección de aperturas.
- Ensayos de oleaje regular para las aperturas seleccionadas.
- Ensayos de oleaje irregular de los casos y aperturas seleccionados.

A continuación se describe con más detalle cada fase de los ensayos.

4.5.1 Ensayos de calidad y análisis de la reflexión

Al inicio de la campaña de ensayos se realizó una serie de ensayos en ausencia del modelo de OWC en el canal. La Figura 4.8 muestra el esquema de la disposición experimental para dichos ensayos. Por un lado, se realizaron ensayos iniciales para comprobar la estabilización del oleaje, disipación de la onda larga inicial y la

repetitividad de los ensayos. A la vista de ellos se seleccionó una duración de 200 segundos para los ensayos posteriores.

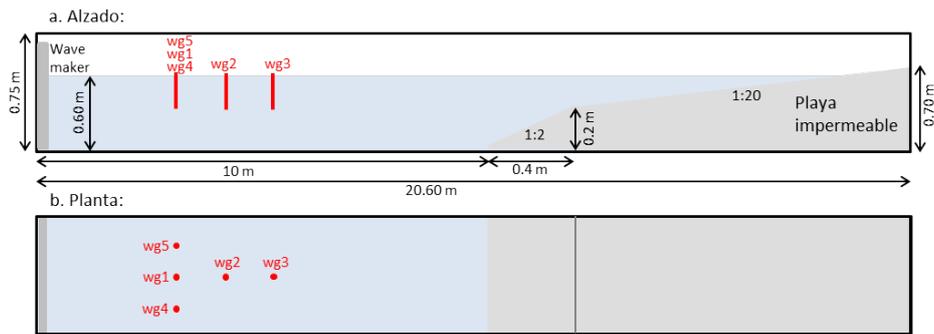


Figura 4.8: Esquema del canal en ausencia del modelo de OWC.

A continuación, con el fin de analizar la tasa de reflexión de la playa, y la necesidad o no de colocar disipadores adicionales, se realizaron ensayos en ausencia del modelo en el canal. La playa disipativa construida en el canal puede observarse en la Figura 4.8. En ausencia del modelo de OWC el oleaje alcanza la playa sin la interferencia de la estructura. Se estableció la reflexión máxima aceptable en un 10 %. En los ensayos en presencia de la cámara la energía transmitida a la parte posterior de la cámara será en general pequeña. Si el coeficiente de transmisión de la estructura es, por ejemplo, del 50 %, un 10 % de reflexión significaría que las olas reflejadas hacia la estructura son menores que el 5 % de las incidentes. Se realizaron ocho ensayos de oleaje regular (Tabla 4.2), obteniendo una tasa de reflexión aceptable de en torno al 10 %. La Figura 4.9 muestra la elevación de la superficie libre para el caso C8, ver la Tabla 4.2.

4.5.2 Ensayos con la apertura superior de la cámara cerrada

Después del análisis de la reflexión en el canal en ausencia de la cámara, se procedió a realizar los ensayos en presencia de la cámara en el canal, ver Figura 4.1. Se realizaron ensayos con la apertura superior de la cámara totalmente cerrada para comprobar la ausencia de pérdidas de aire no deseadas en la cámara, ensayos

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

Caso	T(s)	H(m)
C1	1.10	0.03
C3	1.30	0.03
C5	1.70	0.03
C7	3.20	0.03
C8	1.10	0.08
C10	1.30	0.08
C12	1.70	0.08
C14	3.20	0.08

Tabla 4.2: Casos de oleaje regular en ausencia del modelo de OWC en el canal.

conocidos como pruebas de estanqueidad. Para ello se cerró la apertura superior de la cámara desplazando las dos tapas superiores y se inyectó el máximo aire posible con un compresor introducido por debajo de la cámara, provocando un descenso del nivel de agua en el interior. Tras la retirada de la manguera del compresor, el nivel del agua vuelve a su posición inicial debido a pequeñas pérdidas de la cámara. En la Figura 4.10 se presenta la curva tiempo-nivel en la cámara. Como puede observarse, la introducción del aire en la cámara hace descender el nivel hasta que se compensa la entrada de aire con las pérdidas y el nivel se mantiene prácticamente constante. Tras la retirada de la manguera del compresor, el nivel asciende hasta la posición de equilibrio debido a las pérdidas de la cámara. A la vista de los resultados, se considera que la estanqueidad de la cámara es la adecuada, ya que el periodo de recuperación de la cámara es mucho mayor que el del oleaje a ensayar.

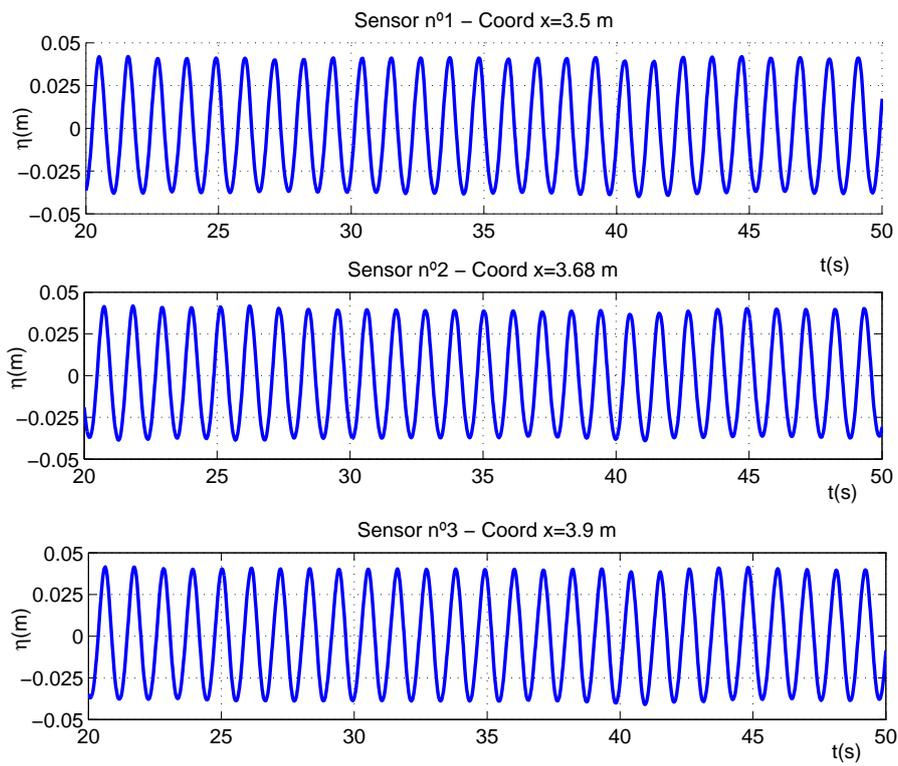


Figura 4.9: Series temporales de superficie libre durante los ensayos de calidad. Caso C8 ($H=0.08$ m, $T=1.1$ s).

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

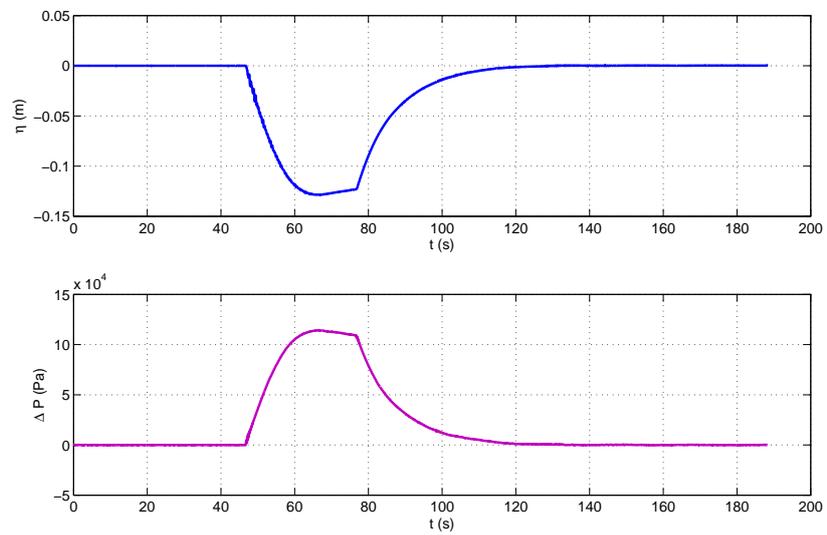


Figura 4.10: Resultados de un ensayo de estanqueidad. Series temporales de superficie libre y presión en la cámara.

4.5.3 Ensayos con cámara abierta

Una vez comprobada la estanqueidad del modelo, se realizaron ensayos con la apertura superior máxima que permitía el modelo construido (5 cm), apertura con la que se esperaba tener un comportamiento de la cámara muy similar al que tendría una cámara sin techo alguno. Los ensayos realizados se resumen en la Tabla 4.3.

Caso	$T(s)$	$H(m)$
C22	1.10	0.08
C23	1.20	0.08
C24	1.30	0.08
C25	1.50	0.08
C26	1.70	0.08
C27	2.20	0.08
C28	3.20	0.08
N57	1.10	0.03
N58	1.20	0.03
N59	1.30	0.03
N60	1.50	0.03
N61	1.70	0.03
N62	2.20	0.03
N63	3.20	0.03

Tabla 4.3: Casos de oleaje regular realizados con las aperturas seleccionadas.

En esta fase de los ensayos se pretende entender el comportamiento de la columna de agua interior de la cámara sin influencia de la presión del aire y estudiar aspectos como el periodo propio o de resonancia, el cual viene determinado por la geometría de la cámara. Por otro lado, en el desarrollo de los modelos simplificados, estos resultados servirán para validar la primera versión del modelo sin fuerza de PTO (en este caso la presión del aire) y poder calibrar la fuerza de fricción en la entrada sumergida de la cámara tal y como se verá en el Capítulo 6.

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

4.5.4 Ensayos para la selección de aperturas

Analizando los resultados de los ensayos realizados con la parte superior de la cámara con apertura máxima, se seleccionó el caso que presentó la máxima amplitud de oscilación en la cámara en relación con la amplitud de la ola incidente: N58 ($H=0.03$ m y $T=1.2$ s), coincidente con el periodo propio de la cámara. Se ensayó el caso seleccionado con una serie de aperturas (2 mm, 4.5 mm, 9 mm, 18 mm, ver Figura 4.3), repitiéndose cada ensayo tres veces. El objetivo de esta fase de selección de aperturas era observar la variación de la resistencia impuesta a la salida y entrada del aire, y seleccionar las aperturas más interesantes para realizar los siguientes ensayos. Se compararon los resultados de las distintas aperturas con los resultados de la cámara con apertura máxima y cámara cerrada y se seleccionaron tres aperturas para realizar el resto de los ensayos y recopilar una base de datos adecuada para la calibración y validación de los modelos numéricos, ver Figura 4.11 y Tabla 4.4.

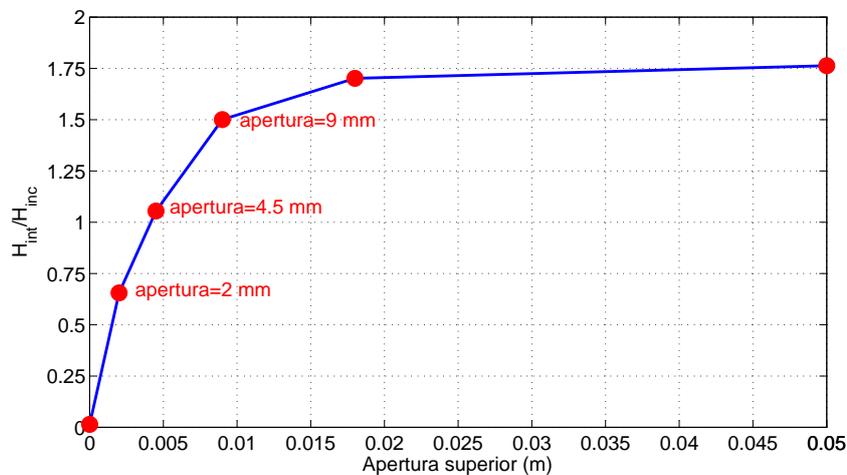


Figura 4.11: Resultados de la selección de aperturas con el caso N58 ($H=0.03$ m, $T=1.2$ s).

En la Figura 4.11 se representa la altura de ola de la oscilación de la OWC (H_{int}) adimensionalizada respecto a la altura de ola incidente (H_{inc}). En el eje

de abscisas se representan las distintas aperturas superiores ensayadas. Se observa que a partir de una apertura de 18 mm el comportamiento se asemeja al de una cámara abierta. Por tanto se han seleccionado las siguientes aperturas como las más interesantes:

Apertura 1	2 mm
Apertura 2	4.5 mm
Apertura 3	9 mm

Tabla 4.4: Aperturas ensayadas con oleaje regular.

4.5.5 Ensayos regulares con las aperturas seleccionadas

Una vez seleccionadas las aperturas, se ensayaron los casos recogidos en la Tabla 4.3 para cada una de ellas.

4.5.6 Ensayos irregulares

A la vista de los resultados de los ensayos de oleaje regular, se procedió a la selección de los casos de oleaje irregular a ensayar y a su realización. El espectro utilizado es un espectro de JONSWAP con factor de apuntamiento $\gamma = 3,3$, que se caracteriza por su altura de ola significativa (H_s) y periodo de pico (T_p). La duración aproximada de cada ensayo fue de unas 250 olas. Asimismo, se ensayaron dos aperturas distintas para estudiar la influencia de la resistencia a la entrada y salida del aire en la cámara: apertura de 4.5 mm, ver Tabla 4.5, y apertura de 9 mm, ver Tabla 4.6.

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

Caso	T_p (s)	H_s (m)
Ir1	1.10	0.03
Ir2	1.20	0.03
Ir3	1.30	0.03
Ir4	1.50	0.03
Ir5	1.70	0.03
Ir6	2.20	0.03
Ir7	3.20	0.03
Ir8	1.10	0.06
Ir9	1.20	0.06
Ir10	1.30	0.06
Ir11	1.50	0.06
Ir12	1.70	0.06
Ir13	2.20	0.06
Ir14	3.20	0.06

Tabla 4.5: Casos de oleaje irregular con apertura superior de 4.5 mm.

Caso	T_p (s)	H_s (m)
Ir2b	1.20	0.03
Ir4b	1.50	0.03
Ir5b	1.70	0.03
Ir9b	1.20	0.06
Ir11b	1.50	0.06
Ir12b	1.70	0.06

Tabla 4.6: Casos de oleaje irregular con apertura superior de 9 mm.

4.6 Resumen de los resultados obtenidos

En esta sección se resumen los resultados de superficie libre interior, presión del aire en la cámara y velocidad de aire entre la cámara y la atmósfera obtenidos en la campaña de ensayos.

4.6.1 Superficie libre interior

La variación de la superficie libre en la cámara es debida al oleaje incidente, del cual proviene la energía que se convertirá en última instancia en energía eléctrica. Sin embargo, esta variación de la superficie libre está altamente influenciada por la presión que ejerce sobre ella la masa de aire interior a la cámara, el cual varía dependiendo de la mayor o menor resistencia impuesta a la circulación del aire a través de la apertura superior de la cámara. Para cada ensayo se han registrado tres series temporales de superficie libre interior en la cámara mediante el bastidor de hilo capacitivo, de las cuáles se ha calculado su amplitud media para utilizarla como parámetro para poder comparar un ensayo con otro, una vez demostrada la bidimensionalidad de los ensayos, ver Figura 4.12. En dicha figura se constata la similitud de los registros de los tres sensores y por tanto la bidimensionalidad de los ensayos.

En las Figuras 4.13 y 4.14 se muestran los resultados de oleaje regular e irregular con distintas aperturas de la cámara. En dichas figuras se ha adimensionalizado la amplitud del movimiento en la cámara (H_{int}) con la amplitud del oleaje incidente (H_{si}). Dicha magnitud adimensionalizada se representa en el eje de ordenadas y los distintos periodos ensayados en el eje de abscisas.

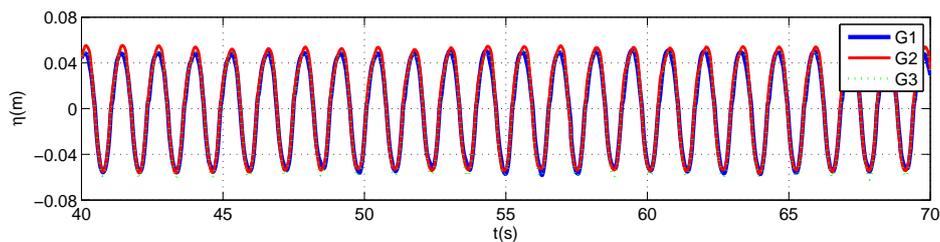


Figura 4.12: Oscilación de la superficie libre en el interior de la cámara registrada por los 3 sensores utilizados para un caso de oleaje regular. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 50 mm.

En las Figuras 4.13 y 4.14 se observa, en general, que la amplitud del movi-

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

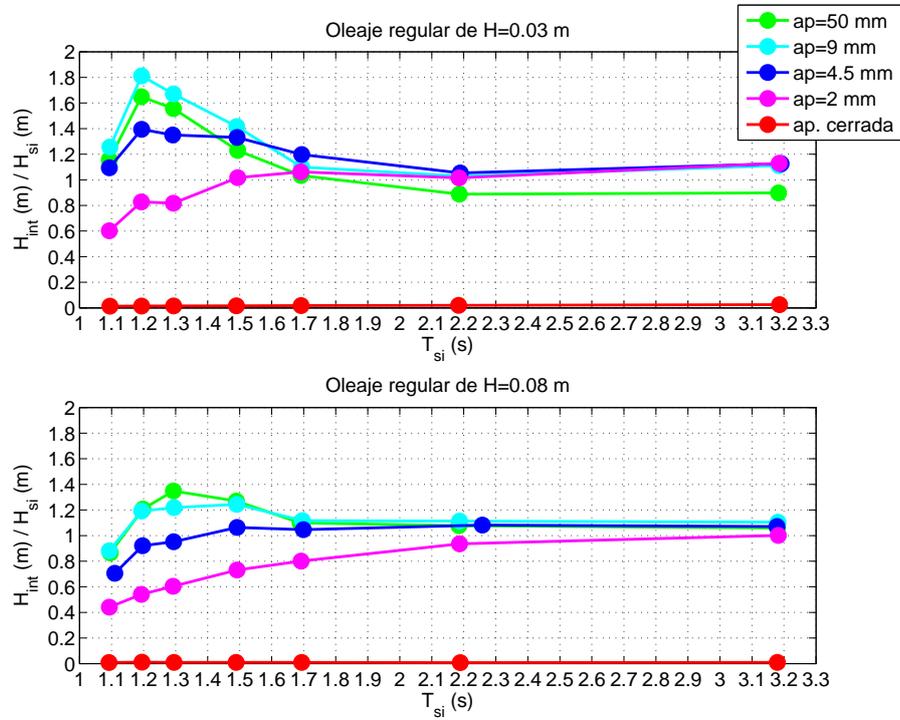


Figura 4.13: Oscilación de la superficie libre en los casos de oleaje regular ensayados.

miento interior a la cámara aumenta cuanto mayor sea la apertura superior de la cámara. Una mayor apertura supone menor resistencia a la circulación del aire a través de ella y menores presiones sobre la superficie libre de agua interna. En consecuencia, la oscilación interior registrada en los ensayos con cámara cerrada es prácticamente cero en comparación con el resto de los casos. En líneas generales, esto se cumple para ambas alturas de ola ensayadas ($H=0.08$ m y $H=0.03$ m). Sin embargo, para los casos regulares de $H=0.03$ m (parte superior de la Figura 4.13), el caso de cámara abierta presenta menor amplitud relativa de oscilación que el caso de apertura de 9 mm en resonancia, y menor que todas las aperturas ensayadas conforme el periodo va en aumento. En los casos en torno al pico de resonancia, dicho resultado podría deberse a que, a igualdad de periodos, las pérdi-

4.6 Resumen de los resultados obtenidos

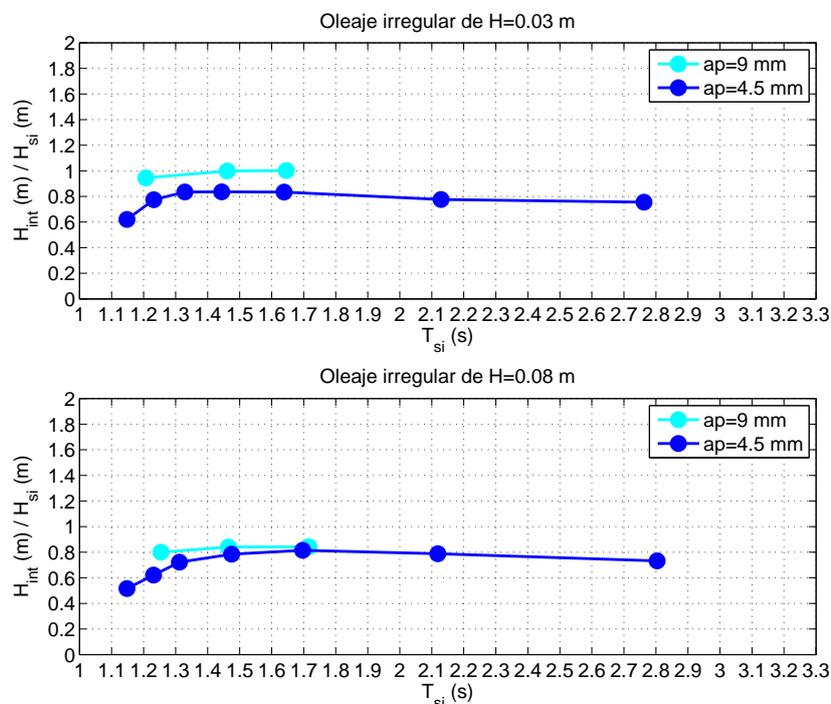


Figura 4.14: Oscilación de la superficie libre en los casos de oleaje irregular ensayados.

das turbulentas aumentan con la altura de ola incidente generada en el laboratorio y la oscilación absoluta en la cámara, que se ha comprobado que resultaron ser mayores para los ensayos de mayor apertura. En cuanto a los periodos más largos, aunque el oleaje incidente registrado fuera mayor en los casos de mayor apertura, se registró una oscilación de la cámara absoluta menor, lo cual respondería al aumento de las pérdidas turbulentas con el aumento de la altura de ola. Además, en los casos de menor altura de ola ensayados ($H=0.03 \text{ m}$), puede también existir mayor incertidumbre en las medidas de laboratorio. El periodo de resonancia de la cámara ensayada se encuentra según estos ensayos en torno a 1.2 segundos, habiéndose registrado grandes amplitudes de la superficie libre de la cámara para oleajes de periodos próximos a él. Volviendo a observar todos los casos regula-

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

res ($H=0.03\text{m}$ y $H=0.08\text{ m}$), puede apreciarse que el pico de resonancia es menos marcado en los casos de mayor altura ensayados ($H=0.08\text{ m}$), justificándose por unas mayores pérdidas de carga en esos casos. En general, es de señalar que para periodos grandes, la superficie libre interior tiende a oscilar igual que la superficie libre exterior, independientemente de la apertura. Otra conclusión que se extrae de la Figura 4.13 es que el máximo de oscilación relativa se desplaza hacia periodos mayores a medida que se cierra la apertura y la amortiguación neumática aumenta.

4.6.2 Presión del aire en la cámara

Al igual que para la oscilación de la superficie libre, se ha calculado la amplitud media de la oscilación de presión interior en la cámara de aire para poder comparar un ensayo con otro. Las Figuras 4.15 y 4.16 muestran dichos resultados para los casos de oleaje regular e irregular respectivamente. La oscilación de la presión, medida en metros de columna de agua, se ha adimensionalizado con la altura de ola incidente para representarla.

Análogamente a lo observado en el caso de la superficie libre interior, menores aperturas en la cámara imponen una mayor resistencia a la circulación del aire, y por tanto, mayores oscilaciones de la presión relativa del aire de la cámara. Así, las mayores oscilaciones de presión se producen para cámara cerrada. En el caso de cámara cerrada la amplitud de la presión aumenta también con el periodo. Para los periodos más largos la masa de agua interior de la cámara se mueve como un pistón, es decir, como una masa sólida que asciende y desciende comprimiendo y descomprimiendo uniformemente la columna de aire interior. Para el resto de las aperturas, se registró un máximo de amplitud de la presión en torno al periodo de resonancia, es decir, cuando la amplitud del movimiento de la superficie libre es máxima. Sin embargo, al igual que sucede con la oscilación de la superficie libre interior (Figura 4.13) dicho máximo se desplaza hacia periodos mayores a medida que se cierra la apertura. En general, para los ensayos con cámara no cerrada, las tendencias ascendentes y descendentes de las curvas de presión observadas en las figuras coinciden con las correspondientes a la superficie libre (Figura 4.13), menos para los casos de apertura más pequeña (2 mm), donde se observa que con

4.6 Resumen de los resultados obtenidos

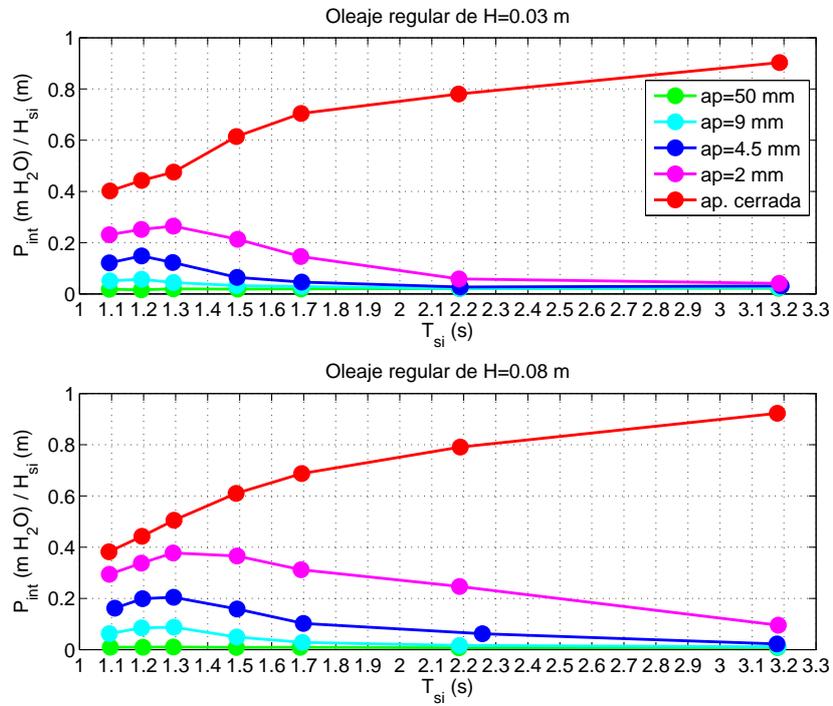


Figura 4.15: Oscilación de la presión del aire en los casos de oleaje regular ensayados.

el aumento del periodo la cámara tiene más tiempo para evacuar el aire poco a poco y no presenta mayores oscilaciones de presión.

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

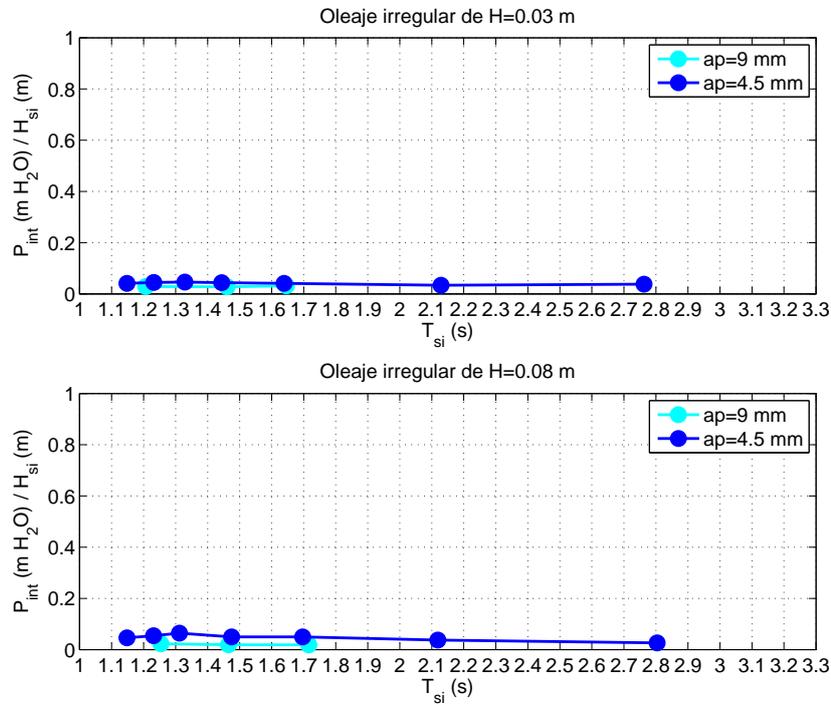


Figura 4.16: Oscilación de la presión del aire en los casos de oleaje irregular ensayados.

4.6.3 Velocidad vertical del aire entre la cámara y la atmósfera

En un dispositivo de OWC real la turbina gira debido a la circulación del aire entre la cámara y la atmósfera. Tal y como se ha explicado, durante los ensayos no se utilizó ninguna turbina, pero se simularon distintas resistencias a dicha circulación mediante la variación de la apertura superior de la cámara. El anemómetro empleado en los ensayos proporcionaba la velocidad del aire en las tres direcciones, pero al ser claramente dominante la velocidad vertical, se ha optado por incluir únicamente dichos resultados en este apartado. Como en el estudio de la amplitud de la oscilación de la superficie libre interior y de la presión del aire de la cámara, en el caso de la velocidad vertical del aire se ha calculado la amplitud media de cada registro temporal para poder comparar un ensayo con otro. Las

4.6 Resumen de los resultados obtenidos

Figuras 4.17 y 4.18 muestran dichos resultados para los casos de oleaje regular e irregular respectivamente. Al igual que con los resultados anteriores (superficie libre y presión del aire) se ha relativizado la velocidad del aire con respecto a la altura de ola incidente.

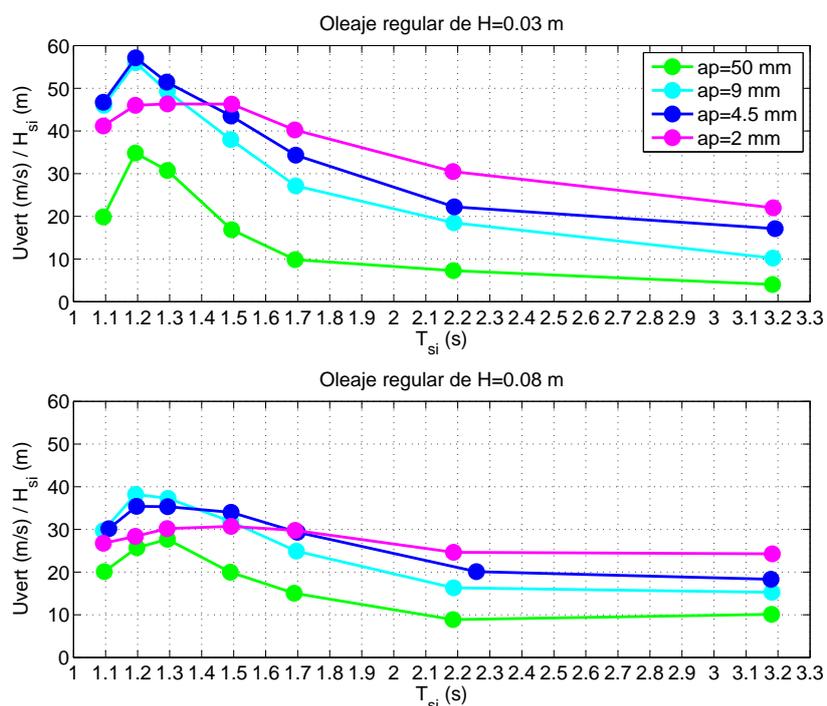


Figura 4.17: Oscilación de la velocidad vertical del aire a través de la apertura en los casos de oleaje regular ensayados.

Con grandes aperturas, las velocidades relativas máximas se encuentran alrededor del periodo resonante, aumentando en general la velocidad relativa máxima a medida que se cierra la apertura. Dado que para las aperturas menores, los máximos de amplitud relativa en la cámara se desplazan a periodos mayores, también las velocidades relativas desplazan su máximo hacia periodos mayores cuando la apertura se cierra. Para periodos largos, la velocidad relativa varía inversamente

4. EXPERIMENTACIÓN EN MODELO FÍSICO

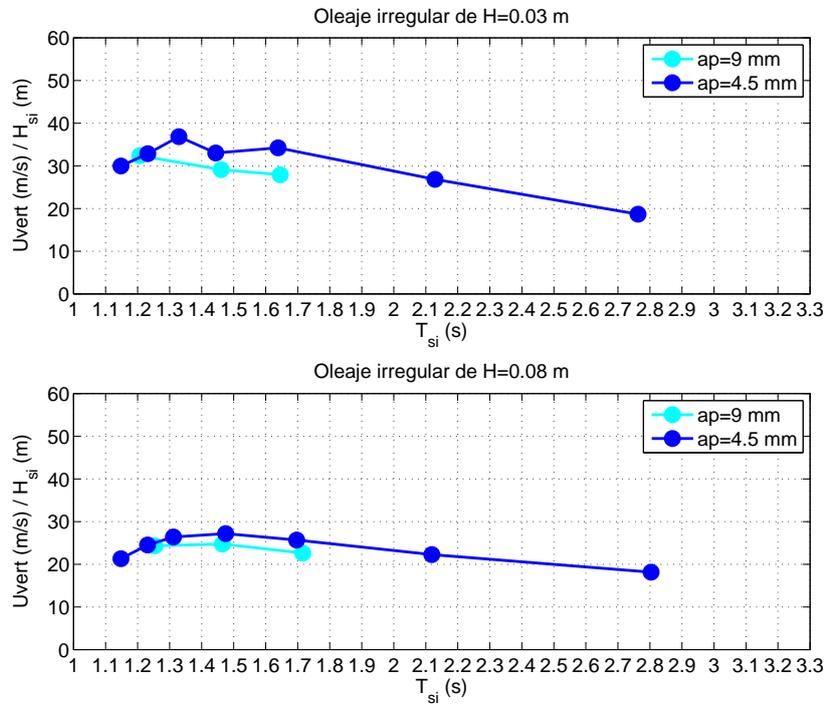


Figura 4.18: Oscilación de la velocidad vertical del aire a través de la apertura en los casos de oleaje irregular ensayados.

con la anchura de la apertura. En general, las curvas correspondientes a los ensayos de apertura de 2 mm son los de mayores velocidades de viento presentan, sin embargo esto no se cumple en periodos cercanos al de resonancia de cámara abierta, ya que el periodo de resonancia de la cámara con apertura pequeña se desplaza hacia periodos más largos.

A la vista de la pequeñas velocidades de aire registradas durante los ensayos, se considera que el método de medida elegido no fue el más adecuado. Por un lado, el hecho de que el anemómetro de medida estuviese demasiado alejado del orificio pudo hacer que en ocasiones el chorro de aire no atravesase por completo el volumen de control del anemómetro, y por otro, puede que las dimensiones del

4.7 Conclusiones de la campaña experimental

volumen de control fueran demasiado grandes para las aperturas ensayadas, sobre todo en el caso de las aperturas más pequeñas estudiadas. Todo ello desemboca en una infraestimación en las medidas registradas por el anemómetro ultrasónico, especialmente durante los eventos de entrada de aire. Este aspecto se trata en el Apartado 6.3, correspondiente a los modelos CFD, del capítulo de calibración y validación de los modelos numéricos.

4.7 Conclusiones de la campaña experimental

Los resultados recogidos en la campaña experimental descrita en el presente capítulo constituyen la base de datos creada para calibrar y validar, y en definitiva, respaldar, la labor numérica que se describe en los capítulos siguientes. Los ensayos experimentales llevados a cabo comprenden datos de superficie libre a lo largo del canal y dentro de la cámara, de presión del aire en la cámara y del flujo de aire a través del orificio superior. Además, el hecho de haber desarrollado una campaña experimental propia supone la ventaja de conocer con exactitud las circunstancias en las que el trabajo se ha desarrollado, las limitaciones de la instrumentación empleada y las consiguientes incertidumbres en las medidas tomadas, que podrán tenerse en cuenta en la calibración y validación del modelado numérico desarrollado a posteriori.

CAPÍTULO

5

Descripción de los modelos numéricos empleados

De entre todas las herramientas numéricas recogidas en el Capítulo 2, la propuesta metodológica presentada en el Capítulo 3 incluye las consideradas como las más adecuadas para el propósito del presente trabajo. Dichas herramientas se calibran y validan en el Capítulo 6, para después utilizarlas como herramientas fiables en la aplicación de la metodología presentada en el Capítulo 7. El objetivo del presente capítulo es describir concretamente los modelos numéricos desarrollados y utilizados en este trabajo de una forma más precisa, haciendo hincapié en los aspectos más determinantes de cada uno. Así, en lo que se refiere a los modelos numéricos simplificados en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, se describirán aspectos relacionados con el método de resolución, obtención de coeficientes hidrodinámicos y técnicas de aproximación utilizadas, así como los métodos de estimación de la producción empleados en el Capítulo 7. En cuanto a los modelos CFD, se describen los dos modelos utilizados en este trabajo:

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

IH-2VOF y OpenFOAM. El capítulo se organiza en tres secciones correspondientes a cada tipo de modelo utilizado:

- Modelado numérico en el dominio de la frecuencia.
- Modelado numérico simplificado en el dominio del tiempo.
- Modelado numérico con CFD.

5.1 Modelado numérico en el dominio de la frecuencia

En la Sección 2.4 del Capítulo 2 se han descrito las ecuaciones fundamentales que rigen el movimiento de un cuerpo flotante en el dominio de la frecuencia y las simplificaciones asumidas para ello. A pesar de estas simplificaciones, los modelos numéricos en el dominio de la frecuencia siguen siendo una opción muy eficiente y utilizada como primera aproximación al comportamiento o producción de un WEC. A partir de las ecuaciones presentadas puede conocerse el movimiento de un WEC ante la incidencia de un oleaje sinusoidal, y a partir de ahí, asumiendo el principio de superposición de la teoría lineal, se podrá estimar la producción del WEC bajo un estado de mar determinado. Dada la simplicidad del modelo, no hay aspectos de resolución a detallar en este capítulo. Por ello, este apartado se centra en describir el método de obtención de los coeficientes hidrodinámicos necesarios para la resolución del modelo y el procedimiento de estimación de la producción, cuya aplicación se muestra en el Capítulo 7.

5.1.1 Cálculo de los coeficientes hidrodinámicos

Los coeficientes hidrodinámicos necesarios para alimentar el modelo en el dominio de la frecuencia se obtuvieron en este trabajo por medio del método de paneles tridimensional WADAM (DNV, 2008). WADAM es un código comercial, concretamente una versión limitada de WAMIT (WAMIT, 2012), que resuelve los problemas de radiación y difracción asumiendo teoría lineal y flujo potencial en el dominio de la frecuencia. En la resolución de la ecuación del movimiento, se ha asumido que la columna de agua contenida entre el labio inferior y el nivel medio en reposo es un pistón rígido con la densidad del agua. Así, se ha modelado en WADAM la geometría de dicho cuerpo flotante, para el rango de frecuencias deseado en cada caso. De ese modelado se obtienen la masa añadida, $A(\omega)$, el coeficiente de amortiguamiento hidrodinámico, $B(\omega)$, y la amplitud compleja de la fuerza de excitación, $\hat{f}_{exc}(\omega)$, para un oleaje regular incidente de amplitud unidad para cada frecuencia del rango estudiado, ver Figura 5.1.

La asunción del movimiento de tipo pistón supone una de las simplificaciones más importantes del modelado desarrollado en el dominio de la frecuencia, y tal y

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

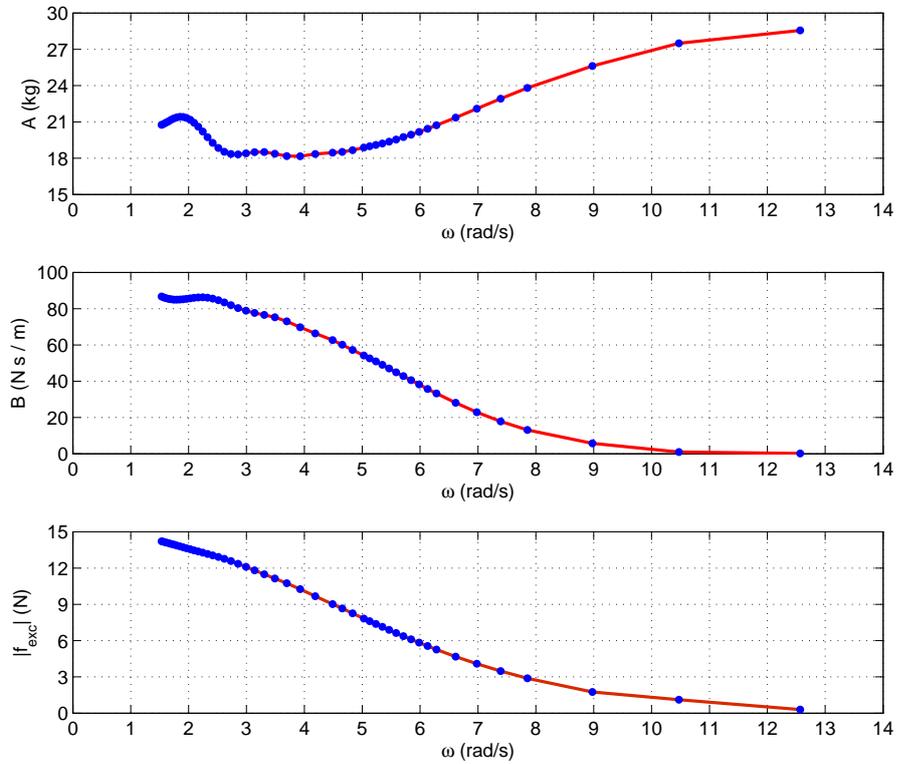


Figura 5.1: Resultados de WADAM para la masa añadida, A , el coeficiente de amortiguamiento hidrodinámico, B , y la amplitud de la fuerza de excitación, $|\hat{f}_{exc}|$ para la geometría de la cámara modelada experimentalmente.

como se verá en la Sección 5.2, se asume esa misma hipótesis en el modelado en el dominio del tiempo. Sin embargo, dicha hipótesis permite el modelado sencillo y eficaz del problema, tal y como se muestra en el Capítulo 7.

5.1.2 Procedimiento de cálculo de la producción media de un estado de mar

Por simplicidad y basándose en otros autores (Alves, 2012), se asumirá que el PTO (orificio de salida del aire en este caso) solo afecta a la columna de agua como una amortiguación proporcional a la velocidad vertical ($F_{pto}(t) = -D\dot{z}(t)$), de manera que la constante de muelle es nula ($K = 0$), ver Ecuación (2.6).

Una vez resuelta en el dominio de la frecuencia la amplitud compleja de la oscilación vertical ($\hat{a}_i(\omega_i)$, donde $\hat{a}_i(\omega_i) = \hat{z}(\omega)$, de la Ecuación (2.18) del Capítulo 2) para cada componente de oleaje incidente de amplitud unidad y frecuencia ω_i , se podrá reconstruir por superposición lineal la serie temporal de desplazamientos de la OWC para cualquier estado de mar definido por las amplitudes $O_i(\omega_i)$ de sus componentes espectrales, según la Ecuación (5.1).

$$z(t) = \sum_{i=1}^N O_i(\omega_i) a_i(\omega_i) \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (5.1)$$

donde en la Ecuación (5.1) a_i es el módulo de la amplitud compleja y φ_i la fase del movimiento de la componente i . N es el número de componentes espectrales del estado de mar. La serie temporal de velocidades será:

$$u(t) = \dot{z}(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i O_i(\omega_i) a_i(\omega_i) \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (5.2)$$

La fuerza instantánea generada por el sistema de PTO, suponiendo el coeficiente de amortiguación, D , constante para un estado de mar:

$$F_{pto}(t) = -Du(t) = -D \sum_{i=1}^N \omega_i O_i(\omega_i) a_i(\omega_i) \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (5.3)$$

Y la serie temporal de potencia absorbida (prescindiendo del signo negativo a partir de ahora):

$$P(t) = u(t)F_{pto}(t) = D \left[\sum_{i=1}^N \omega_i O_i(\omega_i) a_i(\omega_i) \cos(\omega_i t + \varphi_i) \right]^2 \quad (5.4)$$

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

La potencia media del estado de mar durante un tiempo S suficientemente largo ($S \gg \max(T_i)$) será:

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{S} \int_0^S P(t) dt = \frac{D}{S} \int_0^S \left[\sum_{i=1}^N \omega_i O_i(\omega_i) a_i(\omega_i) \cos(\omega_i t + \varphi_i) \right]^2 dt \quad (5.5)$$

Desarrollando:

$$\begin{aligned} \bar{P}(t) &= \frac{1}{S} \int_0^S P(t) dt = \frac{D}{S} \int_0^S \sum_{i=1}^N [\omega_i O_i(\omega_i) a_i(\omega_i) \cos(\omega_i t + \varphi_i)]^2 dt + \\ &\frac{D}{S} \int_0^S \sum_{i \neq j}^N 2\omega_i \omega_j O_i(\omega_i) O_j(\omega_j) a_i(\omega_i) a_j(\omega_j) \cos(\omega_i t + \varphi_i) \cos(\omega_j t + \varphi_j) dt \end{aligned} \quad (5.6)$$

Si S es suficientemente largo, el segundo sumando de la Ecuación (5.6) se puede considerar cero, y dado que el resultado de la integral del cuadrado del coseno comprendida en el primer sumando será $S/2$:

$$\bar{P}(t) = \frac{D}{2} \sum_{i=1}^N [\omega_i O_i(\omega_i) a_i(\omega_i)]^2 \quad (5.7)$$

Mediante el procedimiento mostrado se puede computar la matriz de producción de un dispositivo para determinados estados de mar. En este trabajo, se considerará una única constante de PTO (D) para cada estado de mar que componga la matriz. Dicha constante se definirá igual al valor óptimo obtenido para la frecuencia correspondiente al periodo de pico de cada estado de mar ($\omega_p = 2\pi/T_p$), tal y como se muestra en el Apartado 5.1.3.

5.1.3 Selección de la constante de PTO óptima (D_{opt})

Según Falnes (2002) y Alves (2012) (ver Ecuación (2.18)) para optimizar la producción de un WEC se tendrá que cumplir la siguiente condición:

$$[-\omega^2(A + m) + G + K] + i\omega[B + D] = 0 \quad (5.8)$$

5.1 Modelado numérico en el dominio de la frecuencia

Expresándose la condición de resonancia según la Ecuación (5.9):

$$-\omega^2(M + m) + G + K = 0 \quad (5.9)$$

En consecuencia, el amortiguamiento por PTO óptimo en resonancia (D) será igual al amortiguamiento hidrodinámico (B).

$$B = -D \quad (5.10)$$

Para calcular dicha constante óptima de PTO para una frecuencia cualquiera, puede realizarse un barrido de valores de D y calcular la potencia media generada durante un periodo según el modelo en el dominio de la frecuencia, seleccionando como constante de amortiguación óptima la que maximice la absorción energética. En el caso de un único grado de libertad, dichos valores de D óptima, pueden resolverse fácilmente de la Ecuación (5.8), obteniendo resultados equivalentes. La Figura 5.2 representa dicho análisis para una geometría equivalente a la modelada experimentalmente (Capítulo 4), pero a escala de prototipo (Escala de longitudes, E_L de 30).

Para calcular las matrices de producción (Capítulo 7) se utilizará para cada celda, es decir, cada estado de mar, el valor de D óptimo correspondiente a su periodo de pico (T_p).

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

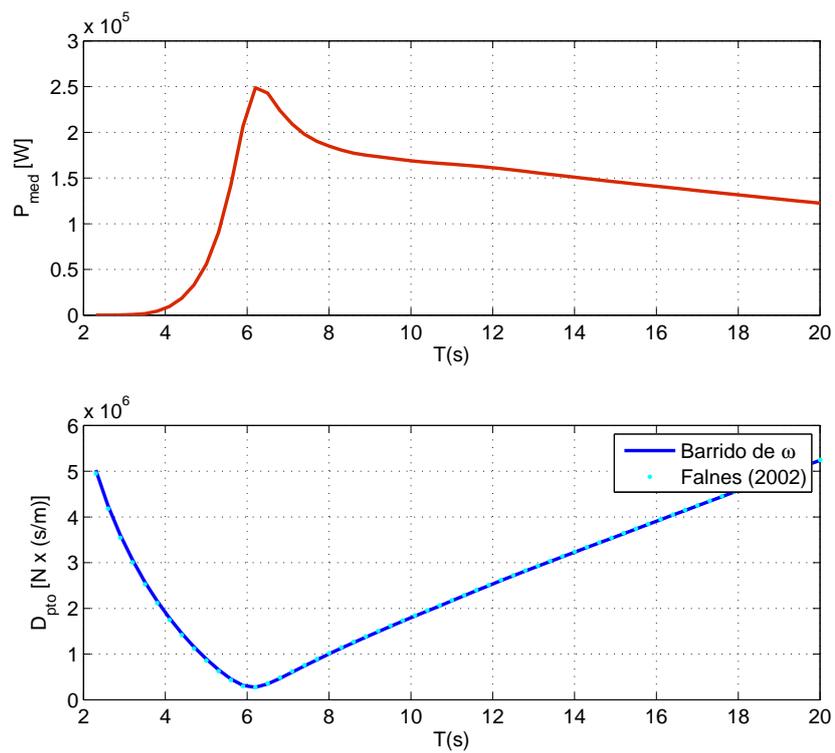


Figura 5.2: Selección del D_{opt} y producción media horaria correspondiente para un rango de frecuencias y altura de ola incidente de 1 m. Geometría equivalente a la modelada experimentalmente pero a escala de prototipo.

5.2 Modelado numérico en el dominio del tiempo

El modelado en el dominio del tiempo desarrollado se basa en la Ecuación de [Cummins \(1962\)](#) (ver Ecuación (2.27) del Capítulo 2). En dicho capítulo se han recogido diferentes formas de aproximar la integral de convolución de la fuerza de radiación y la función de Kernel presente en ella. En esta sección se describe el procedimiento seguido para la construcción del modelo en el dominio del tiempo desarrollado en este trabajo y las hipótesis asumidas para ello, así como el método de estimación de la producción y selección del amortiguamiento óptimo, cuyos resultados se muestran en el Capítulo 7.

5.2.1 Física modelada y asunciones

Si no se considera ninguna fuerza de anclaje o fondeo y traduciendo la fuerza debida al PTO a la fuerza ejercida por el aire interior a la cámara sobre la columna de agua, la Ecuación de [Cummins \(1962\)](#) puede representarse de la siguiente forma para describir el movimiento en alzada de la masa de agua interior a un dispositivo de OWC:

$$(m + A_{\infty})\ddot{z}(t) = \int_0^t K_r(t - \tau)\dot{z}(\tau)d\tau + F_{exc}(t) + F_{hidrost}(t) - F_{fricc}(t) - F_{air}(t) \quad (5.11)$$

donde los términos se corresponden con los nombrados en la Ecuación (2.27). A continuación se describe la forma en la que se ha modelado cada término de la Ecuación (5.11).

- La **fuerza hidrostática** se expresa como $F_{hidrost}(t) = \rho g S z(t)$, siendo ρ la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad y S el área interior de la OWC en reposo.
- La **fuerza de fricción** en la entrada sumergida de la cámara se ha modelado como una función de la velocidad en alzada de la masa de agua. [Babarit et al. \(2012\)](#) consideraron las pérdidas viscosas como una función

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

cuadrática de dicha velocidad. En este trabajo se propone una combinación de términos lineales y no lineales (Iturrioz *et al.*, 2013b, 2014a):

$$F_{friction}(t) = k\dot{z}(t) = (k_l + k_{nl}|\dot{z}(t)|)\dot{z}(t) \quad (5.12)$$

donde k_l es el coeficiente de fricción lineal y k_{nl} el coeficiente de fricción no lineal. Ambos fueron experimentalmente calibrados, tal y como se muestra en el Capítulo 6.

- En cuanto a la **fuerza debida al efecto del aire** de la cámara, ésta se ha modelado según lo descrito el Apartado 2.4.2.2 del Capítulo 2. Se resumen aquí las hipótesis más significativas:
 - Se considera el aire como un gas ideal.
 - Los procesos de llenado y vaciado de la cámara se consideran isoentrópicos.
 - Se considera que la compresión/descompresión del aire es adiabática.

Además, para modelar el flujo de aire a través de la ranura superior se utiliza la Ecuación (2.51). El coeficiente de descarga (c_d) de dicha ecuación se calibró experimentalmente (Iturrioz *et al.*, 2013b, 2014a).

- El modelo desarrollado considera la **fuerza de excitación** debida al oleaje incidente regular e irregular. En general, la superficie libre real del mar no podrá ser correctamente representada mediante un oleaje regular, pero el modelado bajo oleaje regular servirá para la calibración y validación parcial del modelo con ensayos de laboratorio, modelos CFD (IH-2VOF) y resultados de WADAM. Para calcular la fuerza de excitación debida a un estado de mar se han empleado varios métodos. Por un lado, se recogen los basados en la superposición de fuerzas de excitación regulares, y por otro, el que utiliza la fuerza de excitación proveniente de simulaciones de CFD de oleaje irregular.
 - **Fuerza de excitación basada en la superposición:**
Este método se basa en la superposición de las fuerzas de excitación

5.2 Modelado numérico en el dominio del tiempo

debidas a cada componente regular de un estado de mar. Dichas fuerzas de excitación pueden obtenerse mediante métodos BEM como WADAM (ver Apartado 5.1.1) o a partir de simulaciones CFD (en este trabajo IH-2VOF) de oleaje regular (Armesto *et al.*, 2014). En este último caso, se realizan dos simulaciones por cada periodo considerado, ver Figura 5.3. Por un lado, una simulación con un obstáculo de las dimensiones de la OWC a modelar, donde se integrarán las presiones registradas sobre el cuerpo en cada instante. Por otro, una simulación sin presencia del obstáculo donde se registrará en cada instante la altura de ola en el mismo emplazamiento. Con esa información se construirá la curva de fuerzas de excitación análoga a la resultante de WADAM.



Figura 5.3: Obtención de la fuerza de excitación mediante simulaciones CFD.

Una vez conocida la fuerza de excitación asociada a un oleaje regular de amplitud unidad y una frecuencia dada ($|\hat{f}_{exc}|$ la amplitud de la fuerza de excitación, y ϕ_{exc} la fase), se puede obtener linealmente la serie temporal de la fuerza de excitación que actúa sobre el cuerpo bajo la incidencia de un oleaje regular de dicho periodo y cualquier amplitud (O) de la siguiente forma:

$$F_{exc}(t) = O|\hat{f}_{exc}| \cos(\omega t - \phi_{exc}) \quad (5.13)$$

En la Ecuación (5.13) se basará la fuerza de excitación debida a oleaje irregular construida por superposición. Partiendo de un registro de oleaje real (medido en campo o en el laboratorio) o de una aproximación estocástica, mediante la aplicación de la transformada de Fourier

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

se obtendrán los parámetros de amplitud (O_i), frecuencia (ω_i) y fase (ϕ_i) de las componentes ($i = 1 \dots n$) de oleaje regular que por superposición y asumiendo teoría lineal conformarían dicho oleaje irregular ($\eta(t)$):

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n O_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \quad (5.14)$$

Análogamente, la fuerza de excitación sobre el WEC debida a oleaje irregular se conseguirá como superposición de las fuerzas de excitación correspondientes a las componentes regulares calculadas (mediante BEM o CFD):

$$F_{exc}(t) = \sum_{i=1}^n F_{exc_i}(t) = \sum_{i=1}^n (O_i |\hat{f}_{exc_i}| \cos(\omega_i t - \phi_{exc_i} - \phi_i)) \quad (5.15)$$

donde $|\hat{f}_{exc_i}|$ es la amplitud y ϕ_{exc_i} la fase de la fuerza de excitación debida a un oleaje regular de amplitud unidad y periodo de cada componente.

– Mediante series temporales de fuerza de excitación de simulaciones de CFD de oleaje irregular:

Este método consiste en obtener la serie temporal de fuerza de excitación que alcanza el cuerpo sin necesidad de aplicar el principio de superposición, y por tanto, sin hipótesis de linealidad (Iturrioz *et al.*, 2014a). Para ello se simula un caso de oleaje irregular con el modelo CFD, en este caso IH-2VOF (ver parte superior de la Figura 5.3). Análogamente a lo explicado para un tren de oleaje regular, mediante la integración de la presión sobre el obstáculo en cada instante se obtendrá la serie temporal de la fuerza de excitación. Dicha serie temporal de fuerza de excitación será la que alimentará al modelo simplificado en el dominio del tiempo.

- La **masa añadida en el infinito** se podrá aproximar identificándola como la masa añadida para la frecuencia más alta considerada en WADAM, utilizando la herramienta de Pérez & Fossen (2009) o calculándola a partir de la función de respuesta al impulso ($K(t)$) una vez ésta se haya calculado o

aproximado, utilizando la relación de [Ogilvie \(1964\)](#):

$$A(\omega) = A_\infty - \frac{1}{\omega} \int_0^\infty K(t) \sin(\omega\tau) d\tau \quad (5.16)$$

- La **integral de convolución** se trata en el apartado siguiente.

5.2.2 Resolución del modelo

Tal y como se explica en el Capítulo 2 una dificultad particular en el análisis en el dominio del tiempo de un WEC es la computación de de la fuerza de radiación, ya que implica la integral de convolución entre la velocidad y la función de respuesta al impulso, ver Apartado 2.4.2.1. En este trabajo se ha optado por aproximar dicha integral por el método de Espacio de Estados. El sistema de ecuaciones que aproxima la integral de convolución se extiende después para considerar todos los términos de la Ecuación de [Cummins \(1962\)](#), construyéndose así lo que se llamará el sistema de Espacio de Estados General. De la resolución de dicho sistema general se extraerá el movimiento de la OWC en el tiempo y la presión del aire en la cámara. En la Figura 5.4 se representa el diagrama de resolución del modelo.

La metodología seguida aproxima la integral de convolución, $I_c(t)$, con el output de un sistema de espacio de estados que recibe la velocidad de cuerpo ($\dot{z}(t)$) como input ([Yu & Falnes, 1995](#)):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_c(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{X}_c(t) + \mathbf{B}_c \dot{z}(t) \\ I_c(t) \approx y_c(t) = \mathbf{C}_c \mathbf{X}_c(t). \end{cases} \quad (5.17)$$

siendo $\mathbf{X}_c(t)$ el vector de estados de convolución.

El siguiente paso será calcular la matriz \mathbf{A}_c y los vectores \mathbf{B}_c y \mathbf{C}_c que aproximan la integral de convolución. En este trabajo se ha utilizado un método de identificación en el dominio de la frecuencia. Para ello se selecciona un rango de frecuencias, $\{\omega_n\}_{n=1}^N$, y se obtienen los coeficientes de amortiguación hidrodinámica, $\{B(\omega_n)\}_{n=1}^N$, de masa añadida, $\{A(\omega_n)\}_{n=1}^N$, y de masa añadida en el infinito, A_∞ , por medio de un método de paneles (en este caso WADAM). [Ogilvie \(1964\)](#) proporciona las relaciones entre la función de respuesta al impulso en el

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

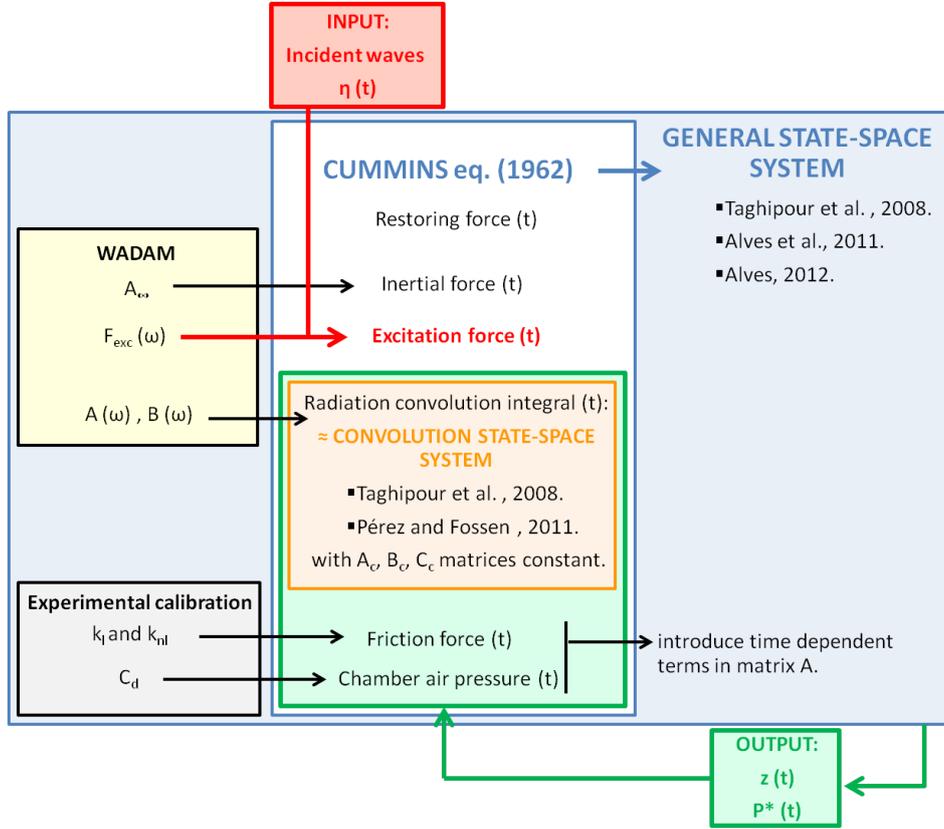


Figura 5.4: Diagrama de resolución del modelo en el dominio del tiempo (Iturrioz *et al.*, 2014a).

dominio del tiempo ($K(t)$), y la masa añadida ($A(\omega)$) y los coeficientes de amortiguamiento ($B(\omega)$) en el dominio de la frecuencia. Utilizando la transformada de Fourier, se puede expresar la función de transferencia en el dominio de la frecuencia, $K(\omega)$, en función de los coeficientes de masa añadida y amortiguación (Taghipour *et al.*, 2008):

$$K_{wadam}(i\omega_n) = B(\omega_n) + i\omega[A(\omega_n) + A_\infty], \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (5.18)$$

donde i es la unidad imaginaria. Se aplica la técnica de mínimos cuadrados para encontrar una función racional, \hat{K} , que aproxime K_{wadam} para un conjunto de frecuencias, $\{\omega_n\}_{n=1}^N$, siguiendo las restricciones de Pérez & Fossen (2011). La

5.2 Modelado numérico en el dominio del tiempo

aproximación está restringida a valores imaginarios, así que si $s = i\omega$ la función racional se definirá como:

$$\hat{K}(s, \theta) = \frac{P(s, \theta)}{Q(s, \theta)} = \frac{p_{n-1}s^{n-2} + p_{n-2}s^{n-2} + \dots + p_1s}{s^n + q_{n-1}s^{n-1} + \dots + q_0}. \quad (5.19)$$

Determinando los coeficientes $\theta = \{p_{n-1}, p_{n-2}, \dots, p_1, q_{n-1}, q_{n-2}, \dots, q_0\}$ mediante la técnica de mínimos cuadrados, la matriz y los vectores que forman el sistema de espacio de estados que aproxima la integral de convolución pueden construirse de la siguiente forma:

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -q_0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -q_1 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & -q_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -q_{n-1} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{n-1} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$\mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.22)$$

De esta manera, se conocen todos los coeficientes del Sistema (5.17). Sin embargo, la velocidad en alzada del cuerpo, $\dot{z}(t)$, que constituye la entrada (input) del sistema, se obtiene resolviendo la ecuación general del movimiento del cuerpo (Ecuación (5.11)) en cada paso de tiempo. Dicha ecuación general incluye la integral de convolución, además de todas las fuerzas consideradas. Dado que la ecuación general del movimiento incluye las matrices del espacio de estados de convolución ($I_c(t) = \mathbf{C}_c \mathbf{X}_c(t)$, Ecuación (5.17)), numerosos autores (Yu & Falnes, 1995; Alves *et al.*, 2011; Alves, 2012) han resuelto el movimiento del cuerpo extendiendo dichas matrices para considerar todos los términos de la Ecuación de

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

Cummins (1962). Este método se ha utilizado en el presente trabajo por considerarlo la forma más eficiente y cómoda de hacerlo.

Con el objetivo de extender el sistema de espacio de estados de convolución (Sistema (5.17)) al general (Sistema (5.25)), las ecuaciones y variables se disponen de la forma conveniente. Por un lado, el vector de estados general se construye incluyendo tres variables nuevas al vector de estados de convolución ($\mathbf{X}_c(t)$):

$$\mathbf{X}(t) = [\mathbf{X}_c(t) \ z(t) \ \dot{z}(t) \ p^*(t)]. \quad (5.23)$$

donde $p^*(t)$ es la presión relativa: $p^*(t) = p(t)/p_0 = (\Delta p(t) + p_0)/p_0$, con p_0 la presión atmosférica. Por otro lado, la ecuación que describe la variación de la presión del aire en la cámara, y que completa el sistema de espacio de estados general, se obtiene combinando las Ecuaciones (2.48), (2.49), (2.50) y (2.51):

$$\begin{aligned} \dot{p}^*(t) &= [s_1 + s_2] p^*(t) \\ s_1(t) &= -\frac{A_v c_d \gamma}{\rho_0 S} \operatorname{sgn}(p^*(t) - 1) \left(2p_0 \rho_0 p^*(t)^{-1/\gamma} |p^*(t) - 1| \right)^{1/2} \\ s_2(t) &= \gamma \dot{z}(t) \end{aligned} \quad (5.24)$$

donde ρ_0 es la densidad del aire a presión atmosférica, A_v el área de la apertura superior, c_d el coeficiente de descarga a través de la apertura, γ el coeficiente de dilatación adiabática del aire y S el área transversal de la cámara.

La Ecuación (5.25) muestra el sistema de espacio de estados general. Este sistema representa la ecuación general del movimiento teniendo en cuenta todas las fuerzas presentes en la Ecuación de Cummins (1962), incluyendo la integral de convolución, $I_c(t)$, por medio del sistema de espacio de estados de convolución (Ecuación (5.17)).

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}F_{excitation}(t) \\ z(t) \approx y(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) \end{cases} \quad (5.25)$$

donde el único input es la fuerza de excitación, $F_{exc}(t)$, y el output es el desplazamiento en alteada del cuerpo, $z(t)$. Teniendo en cuenta que $I_c(t) = C_c X_c(t)$ (Ecuación (5.17)), la matriz \mathbf{A} y los vectores \mathbf{B} y \mathbf{C} vienen dados por:

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

que la entropía específica del aire cambia desde su valor atmosférico debido a las pérdidas viscosas que se producen en la ranura superior (Falcão & Justino, 1999). Por último, también hay que tener presente la linealidad asumida en la fuerza de excitación (cuando se calcula mediante superposición) y en la interacción hidrodinámica entre el oleaje y el cuerpo.

5.2.3 Cálculo de la producción media de un estado de mar

A continuación se describen dos formas de estimar la producción de un dispositivo bajo un determinado estado de mar y la validez de uno u otro método depende de la influencia de la compresibilidad del aire en el comportamiento de la cámara de OWC.

5.2.3.1 Producción hidromecánica

El cálculo de la producción hidromecánica de un estado de mar puede ser un método adecuado para estimar la producción de un dispositivo de OWC siempre que la compresibilidad no influya en el comportamiento de la cámara. Esto sucede, por ejemplo, cuando se analiza el comportamiento de una cámara a escala pequeña o cuando el amortiguamiento debido al PTO no llega a comprimir el aire. Cuando el aire se comporta como un fluido incompresible, se produce un flujo de aire hacia la atmósfera cuando la superficie libre interior de la cámara asciende y la presión en la cámara es mayor que la atmosférica. Por el contrario, el aire entrará a la cámara cuando la superficie libre interior desciende y la presión del aire en la cámara es inferior a la atmosférica.

A partir del modelado mostrado en el dominio del tiempo de un dispositivo de OWC, la producción hidromecánica instantánea puede calcularse multiplicando la velocidad de la superficie libre interior, la presión de aire en la cámara y el área transversal de la cámara para cada instante de tiempo:

$$Power(t) = \dot{z}(t)\Delta p(t)S. \quad (5.29)$$

La energía generada durante el tiempo simulado puede calcularse integrando dicha serie:

$$Energy_{total} = \int Power(t)dt. \quad (5.30)$$

La producción media se obtiene como:

$$\overline{Power} = \frac{Energy_{total}}{t_{simulated}}. \quad (5.31)$$

5.2.3.2 Producción neumática

Cuando se estudia el problema de la OWC a escala real y al movimiento de la OWC se le impone una fuerza amortiguador debida al PTO, el aire se comporta como un fluido compresible. La densidad del aire de la cámara varía ($\rho_{air}(t)$), cambiando la manera de entender la dinámica conjunta de la cámara. Si el aire actúa como un fluido compresible el ascenso de la superficie libre interior no implica instantáneamente el flujo de aire hacia la atmósfera, y viceversa, el descenso de la superficie libre no implica de inmediato un flujo de aire hacia el interior de la cámara. Por lo tanto, pueden existir intervalos de tiempo donde el signo de la velocidad de la superficie libre interna (positivo cuando la superficie libre asciende) y el de la presión del aire interior (positivo cuando es superior a la atmosférica y por tanto cuando hay flujo de aire hacia la atmósfera para compensarlo) son contrarios. En consecuencia, la estimación hidromecánica de la producción carece de sentido. En estos casos, la estimación de la producción puede realizarse computando la potencia neumática, que se define como:

$$Power(t) = \frac{1}{2}\rho_{air}(t)Q_{air}(t)v_{air}(t)^2 \quad (5.32)$$

donde $\rho_{air}(t)$ es la densidad del aire en cada instante, $v_{air}(t)$ la velocidad del aire que circula a través de la apertura superior de la cámara y $Q_{air}(t)$ el caudal de aire a través de dicha apertura, es decir, $Q_{air}(t) = A_v v_{air}(t)$, siendo A_v el área de la apertura superior. La Ecuación (5.32) representa la potencia neumática instantánea y la potencia media puede calcularse mediante las Expresiones (5.30) y (5.31) del apartado anterior. Éste método de estimación de la producción se aplica en el Capítulo 7.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

5.2.4 Selección del amortiguamiento óptimo por PTO

Análogamente al Apartado 5.1.3, en el dominio del tiempo también puede calcularse el amortiguamiento óptimo para un determinado estado de mar. Sin embargo, en este caso se determinará un coeficiente diferente para cada estado de mar, teniendo también en cuenta la altura de ola y no únicamente la frecuencia. En este modelado dicho amortiguamiento se conceptualiza mediante el tamaño de la apertura superior de la cámara. En un dispositivo real dicho amortiguamiento por PTO variará en función del estado de mar incidente gracias a los sistemas de control del sistema de PTO. Para seleccionar la apertura que representa el amortiguamiento óptimo para cada estado de mar, se modela cada estado de mar con un barrido de aperturas y se calcula la producción neumática media para cada una, tal y como se indica en el Apartado 5.2.3. Así, se selecciona como apertura óptima la que maximiza la producción de cada estado de mar. La Figura 5.5 muestra el barrido realizado para la selección de la apertura que maximiza la producción neumática del dispositivo para un determinado estado de mar, indicando en abscisas la relación entre área de la apertura superior, A_{ap} , y el área interior de la cámara, A_{int} . En el eje de ordenadas se tiene la producción neumática media horaria. En el Capítulo 7, donde se desarrolla una aplicación práctica de la metodología propuesta en la presente Tesis, se muestran resultados de amortiguamiento óptimo obtenidos para distintos estados de mar con el modelo simplificado en el dominio del tiempo, ver Figura 7.6.

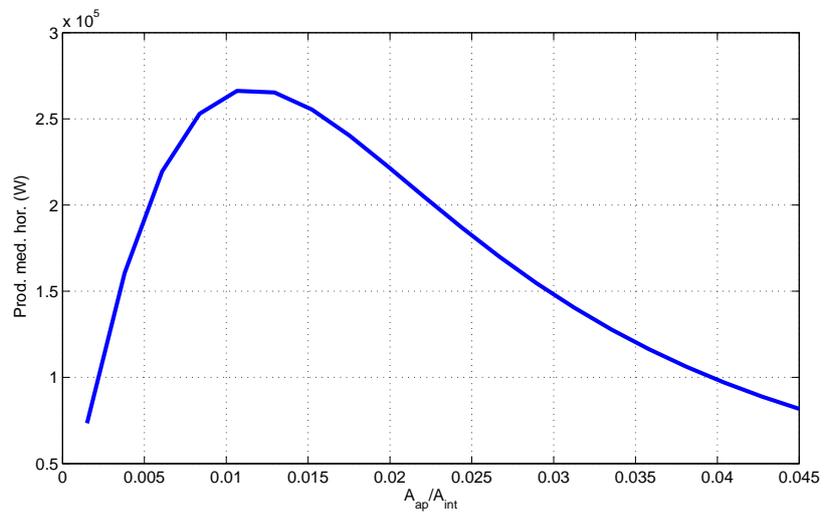


Figura 5.5: Selección de apertura óptima en el dominio del tiempo. Caso: $H_s=5.5$ m, $T_p=8.46$ s. Geometría equivalente a la ensayada en el laboratorio pero a escala de prototipo.

5.3 Modelado con CFD

Es comúnmente aceptado que los modelos CFD que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen la mejor forma de analizar en detalle las dinámicas presentes en el funcionamiento de cualquier WEC (De Backer, 2007). Los efectos viscosos de la capa límite, la turbulencia y la rotura del oleaje son importantes a la hora de analizar la hidrodinámica de los dispositivos. Sin embargo, es de señalar que su complejidad conlleva una gran carga computacional. Por ello, dependiendo de las necesidades específicas de cada fase del desarrollo de un WEC, no son siempre la mejor opción.

En el marco de la presente tesis, se han utilizado dos herramientas CFD: una bidimensional-monofase (IH-2VOF) y otra tridimensional-bifase (OpenFOAM). La principal razón para el uso del modelo IH-2VOF es que se trata de un modelo ampliamente utilizado y validado para reproducir ensayos realizados en el canal en el que se ha realizado la campaña experimental descrita en el Capítulo 4. Por tanto, ofrece la posibilidad de ampliar la base de datos de validación para el resto de los modelos de una forma sencilla. Además, permite llevar a cabo ensayos que experimentalmente serían muy complicados de ejecutar, como es el caso de los ensayos de decaimiento. Por otro lado, se ha querido validar experimentalmente el modelo OpenFOAM. El uso de dicho modelo supone un gran avance cualitativo hacia un estudio más realista y complejo de la OWC, considerando la tridimensionalidad de los fenómenos y modelando el comportamiento del aire, aspecto fundamental en el principio de funcionamiento de la tecnología de OWC.

En esta sección se describen las ecuaciones que resuelve cada uno de los modelos y sus características principales.

5.3.1 IH-2VOF

Este apartado tiene como finalidad describir los aspectos fundamentales del modelo numérico IH-2VOF (Lara *et al.*, 2011), ya que se trata de una de las herramientas numéricas empleadas en el marco de la presente Tesis. IH-2VOF es fruto del desarrollo del modelo COBRAS-UC (Losada *et al.*, 2008). Puede encontrarse

la formulación matemática completa en Liu *et al.* (1999) y Hsu *et al.* (2002). El modelo ha sido sometido a un continuo proceso de desarrollo y extensa validación para estructuras de baja coronación (García *et al.*, 2004; Losada *et al.*, 2005; Lara *et al.*, 2006), rotura del oleaje sobre taludes porosos (Lara *et al.*, 2006), hidrodinámica en zona de rompientes en playas naturales (Torres-Freyermuth *et al.*, 2007; Lara *et al.*, 2011; Ruju *et al.*, 2012) y rebase en diques (Lara *et al.*, 2008; Losada *et al.*, 2008; Guanche *et al.*, 2009).

En esencia, IH-2VOF es un modelo RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) que resuelve las ecuaciones promediadas en volumen (Volume-Averaged RANS equations, VARANS) en 2D utilizando una discretización en diferencias finitas. En caso de no haber medios porosos, como es el caso del presente trabajo, la ecuaciones VARANS son idénticas a las ecuaciones RANS. Los obstáculos son tratados como fluido de densidad infinita. Las ecuaciones de Navier-Stokes, son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido, tanto en régimen laminar como en turbulento. El vector de velocidad, \mathbf{U} , y la presión, p , del flujo incompresible se obtienen resolviendo la ecuación de continuidad o conservación de la masa (Ecuación (5.33)) y de la cantidad de movimiento (Ecuación (5.34)):

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (5.33)$$

$$\rho(\mathbf{U}_t + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p + \mathbf{F}_b + \nabla \cdot \mathbf{T} \quad (5.34)$$

donde ρ es la densidad del fluido, \mathbf{U}_t la derivada temporal de la velocidad \mathbf{U} , \mathbf{F}_b el vector de las fuerzas de cuerpo (como por ejemplo la gravedad) y \mathbf{T} el tensor de tensiones. La resolución de este sistema de ecuaciones es generalmente inviable debido a la complejidad de las propias ecuaciones. Únicamente se conoce su solución analítica para unos pocos casos. La forma habitual de resolver estas ecuaciones es haciéndolo en forma discreta. Aunque introduce errores, es posible obtener resultados aproximados a la realidad, lo que permite conocer de forma muy realista, aunque no exacta, el comportamiento de los fluidos.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

En el caso de IH-2VOF, la turbulencia se considera utilizando un modelo $k - \varepsilon$ para la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ε). Este modelo cierra el sistema de ecuaciones RANS que gobierna el flujo medio, haciendo posible su resolución. Se aproxima el efecto de la turbulencia usando una viscosidad turbulenta, que varía con la posición y con el tiempo en función de la energía cinética de la turbulencia, k , y de su tasa de disipación, ε . La influencia de las fluctuaciones turbulentas sobre el flujo medio se representa mediante las tensiones de Reynolds. Los regímenes turbulentos se caracterizan por la baja difusión del momento, alta convección y cambios espacio-temporales rápidos de presión. Todo ello hace de la turbulencia un fenómeno tremendamente complejo que se desarrolla a lo largo de diversas escalas temporales y espaciales.

Para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes de forma discreta, con el propósito de simular el comportamiento turbulento del flujo, se necesita una potencia de cálculo muy elevada, incluso para los casos más sencillos. Esto se debe a que captar los fenómenos de turbulencia en su escala más pequeña requiere una discretización temporal y espacial de gran resolución. Sin embargo, para conocer las características generales de un flujo basta con resolver el comportamiento global de la turbulencia. Para solventar esta situación se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (RANS). Estas ecuaciones se obtienen a partir de las ecuaciones generales de Navier-Stokes con la consideración de que las variables implicadas pueden descomponerse en dos partes: un valor medio ($\bar{\mathbf{U}}$ y \bar{p}) más una componente fluctuante que varía rápidamente (\mathbf{U}' y p'). La componente fluctuante varía aleatoriamente en el espacio y en el tiempo, de forma que su valor medio en un tiempo característico es igual a cero.

$$\mathbf{U} = \bar{\mathbf{U}} + \mathbf{U}' \quad (5.35)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (5.36)$$

El seguimiento de la superficie libre se hace mediante la técnica VOF descrita por [Hirt & Nichols \(1981\)](#).

Los procedimientos de generación-absorción son otro de los aspectos a destacar del modelo. El modelo IH-2VOF ofrece distintas posibilidades de generación

y absorción del oleaje:

- Función fuente ligada a zonas de disipación numérica (Lin & Liu, 1999; Méndez *et al.*, 2001; Lara *et al.*, 2006).
- Tipo Dirichlet en los contornos ligada a la absorción activa (Troch & Rouck, 1999).
- Generación con contorno móvil también ligada a la absorción activa (Lara *et al.*, 2011).

5.3.2 OpenFOAM

Otra herramienta CFD utilizada en este trabajo es el modelo OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation) (OpenCFD Ltd, 2014). Higuera *et al.* (2013a,b) presentaron la implementación de condiciones de contorno específicas para la generación y absorción del oleaje. El solver utilizado es *interFoam*. El modelo resuelve las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) tridimensionales para dos fases incompresibles utilizando la discretización en volúmenes finitos y la técnica VOF (Volume Of Fluid) para el seguimiento de la superficie libre (Hirt & Nichols, 1981). Este solver admite diferentes modelos de turbulencia: k- ϵ , k- ω SST y LES. El solver utilizado asume ambos fluidos (aire y agua) incompresibles, hipótesis habitual en la mayoría de los problemas de ingeniería de costas y que es válida también en el caso de estudio (reproducción de los ensayos realizados en modelo físico), ya que el aire se comporta como un fluido incompresible a tan pequeña escala (Sarmiento & Falcão, 1985).

Las ecuaciones RANS, compuestas por la ecuación de la continuidad (Ecuación (5.37)) y la ecuación de la conservación del momento lineal (Ecuación (5.38)), son las ecuaciones de gobierno, que relacionan los campos de presión y de velocidad.

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (5.37)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \cdot \nabla \vec{U}) = \nabla p^* - \vec{g} \vec{X} \cdot \nabla \rho + \nabla \vec{U} \cdot \nabla \mu_{eff} \quad (5.38)$$

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

siendo en las Ecuaciones (5.37) y (5.38) ρ la densidad, \vec{U} el campo de velocidades, p^* la presión pseudodinámica, \vec{g} la aceleración de la gravedad, \vec{X} el vector de posición y μ_{eff} viscosidad dinámica eficiente, que tiene en cuenta la viscosidad dinámica molecular más los efectos turbulentos: $\mu_{eff} = \mu + \nu_{turb}$. ν_{turb} es la viscosidad cinemática turbulenta y se determina según el modelo de turbulencia utilizado.

El modelo considera una ecuación adicional que describe el movimiento de las fases (agua y aire). *interFoam* considera una función de fase (α) que se define como la cantidad de agua por unidad de volumen de cada celda. Si $\alpha=1$ la celda estará llena de agua, si $\alpha=0$ la celda estará llena de aire y en cualquier otro caso la celda pertenecerá a la interfaz entre las dos fases modeladas. El movimiento de las fases viene dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{U} \alpha + \nabla \cdot \vec{U}_c \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (5.39)$$

donde \vec{U}_c es un término de compresión artificial utilizado para conservar una fina interfaz entre las dos fases (agua y el aire en el caso de la OWC) (Weller, 2002).

Las condiciones de contorno presentadas por Higuera *et al.* (2013a) para generación y absorción activa del oleaje suponen un gran avance para el modelo, ampliando su aplicabilidad tanto a problemas de ingeniería costera como offshore. La absorción activa desarrollada da respuesta a las limitaciones de otras soluciones preexistentes basados en zonas de amortiguamiento artificial o relajación para la disipación del oleaje. El uso de absorción activa en los contornos posibilita, por un lado, la generación realista de oleaje, y por otro, acelerar las conmutaciones mediante la reducción del dominio computacional. Además, la utilización conjunta de generación y absorción del oleaje es necesaria, como por ejemplo en el marco de este trabajo, para representar correctamente la transformación del oleaje en las inmediaciones de estructuras. Aunque el modelo con dichas condiciones de contorno haya sido previamente validado para procesos costeros (Higuera *et al.*, 2013b) y estructuras costeras (Higuera *et al.*, 2014a,b) con resultados satisfactorios, en este trabajo se valida una nueva aplicación para el modelo numérico: el movimiento del aire interior de la cámara OWC inducido por el oleaje.

5.4 Resumen del capítulo

De la tipología de herramientas numéricas presentada en el Capítulo 2, en este capítulo se han descrito aspectos específicos de los modelos numéricos que forman parte de la propuesta metodológica para el modelado optimizado de la OWC realizada en el Capítulo 3. Tal y como se ha recogido en dicho capítulo, cada fase del desarrollo de un dispositivo se caracteriza por sus necesidades específicas, así como por unos determinados recursos de tiempo y medios computacionales, que van en aumento conforme se llega a las fases más avanzadas del desarrollo. Dichas diferencias de necesidades y recursos provocan que los modelos propuestos en esta Tesis para cada fase sean a su vez de características diferentes. Este capítulo recoge las principales características de cada uno de los modelos, las ecuaciones que resuelven, así como las simplificaciones e hipótesis que se asumen, que son fundamentales a la hora de interpretar sus resultados con buen criterio. En este capítulo también se han recogido los métodos utilizados para estimar la producción a partir de los resultados de los distintos modelos y que se utilizan en el Capítulo 7. En definitiva, en este capítulo se recoge la información necesaria para comprender los resultados de los distintos modelos incluidos en la metodología propuesta y los motivos para las diferencias entre ellos.

Las herramientas numéricas descritas en este capítulo se calibran y validan en el Capítulo 6, para poder utilizarlas después de forma fiable en la aplicación de la metodología propuesta que se recoge en el Capítulo 7.

Calibración y validación de los modelos numéricos

En el Capítulo 5 se han descrito las características principales y los métodos de resolución de los modelos numéricos utilizados en este trabajo. Sin embargo, la calibración y validación de las herramientas numéricas es indispensable para poder utilizarlas con garantías. El presente capítulo se centra en dicha labor, basándose en los resultados de la campaña experimental descrita en el Capítulo 4 y simulaciones CFD de IH-2VOF. Una vez más, los contenidos de este capítulo se organizan en tres bloques:

- Modelado numérico en el dominio de la frecuencia.
- Modelado numérico simplificado en el dominio del tiempo.
- Modelado numérico con CFD.

6.1 Modelado numérico en el dominio de la frecuencia

El modelado en el dominio de la frecuencia, debido a su asunción completa de la teoría lineal, es el más sencillo de los tres tipos de modelado recogidos en este trabajo. En esta sección se presenta la verificación de dicho modelo con otro modelo comercial en el dominio de la frecuencia (WADAM) y la calibración de una fuerza de fricción linealizada que trata de reproducir las pérdidas que se producen en la entrada sumergida de la cámara. Para ello, se ha simulado en el dominio de la frecuencia la geometría equivalente al modelo de OWC ensayado en el laboratorio y descrito en el Capítulo 4.

6.1.1 Verificación del modelo en el dominio de la frecuencia

Como primera verificación de las ecuaciones planteadas se compara la RAO (Response Amplitude Operator) obtenida del modelo en el dominio de la frecuencia considerando la fuerza debida al PTO nula ($D = 0$ y $K = 0$) con la RAO obtenida del modelado en WADAM. La RAO representa la amplitud de la oscilación vertical de la OWC, sometida a trenes regulares de ondas de amplitud unidad, en función del periodo. Dado que el modelo WADAM se basa en las ecuaciones en el dominio de la frecuencia, y los coeficientes hidrodinámicos del modelo construido en el dominio de la frecuencia se obtienen de WADAM, la coincidencia entre ambas líneas ha de ser total, tal y como se observa en la Figura 6.1. En el eje de ordenadas se representa la amplitud de la oscilación de la cámara (A_{heave}) adimensionalizada con la amplitud del tren de oleaje regular incidente ($A_{excitation}$). En abscisas se representan los periodos de los oleajes considerados. La tercera línea de dicha figura representa la RAO resultante de resolver las ecuaciones en el dominio de la frecuencia teniendo en cuenta el efecto amortiguador de un PTO óptimo, tal y como se ha descrito en el Apartado 5.1.3 del Capítulo 5. Como era de esperar la amplitud del movimiento en alzada se ve notablemente afectada por el efecto amortiguador del PTO.

6.1 Modelado numérico en el dominio de la frecuencia

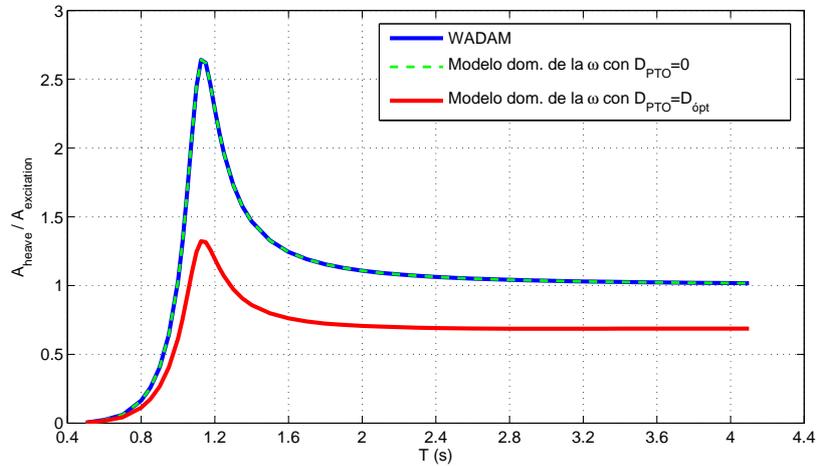


Figura 6.1: Comparación RAOs de WADAM y del modelo en el dominio de la frecuencia con y sin PTO.

6.1.2 Calibración de las pérdidas por fricción en el modelo en el dominio de la frecuencia

Tal y como se indica en el apartado dedicado a los modelos en el dominio de la frecuencia de la Sección 2.4 del Capítulo 2, la aproximación en el dominio de la frecuencia se basa en la asunción de que todas las fuerzas que intervienen en el problema son lineales, incluida la fuerza de fricción si se quisiera considerar. Por lo tanto, la forma de modelar la fuerza de fricción linealizada en el dominio de la frecuencia será la siguiente:

$$F_{fricc}(t) = c_l \dot{z}(t) = i\omega c_l \hat{z}(\omega) e^{i\omega t} \quad (6.1)$$

siendo c_l el coeficiente de fricción lineal en el dominio de la frecuencia. Aunque la fuerza de fricción sea una fuerza fuertemente no lineal y su linealización carezca de sentido físico, el coeficiente c_l puede calibrarse para representar, en un caso concreto, las pérdidas por fricción. La Figura 6.2 muestra la superficie libre interna del modelo en el dominio de la frecuencia y los resultados experimentales, con el valor de c_l calibrado para dos de los casos estudiados. Para casos de oleaje lineal (C28, parte superior de la Figura 6.2) es posible conseguir resultados

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

razonables modelando de dicha forma la fricción, pero no se obtienen resultados satisfactorios en casos de oleaje no lineal (C22, parte inferior de la Figura 6.2). La linealidad del modelo, tanto en su vertiente hidrodinámica como en el resto de términos definidos para describir el problema, pone de manifiesto la necesidad del modelado en el dominio del tiempo para aproximar de una forma realista el problema de la OWC.

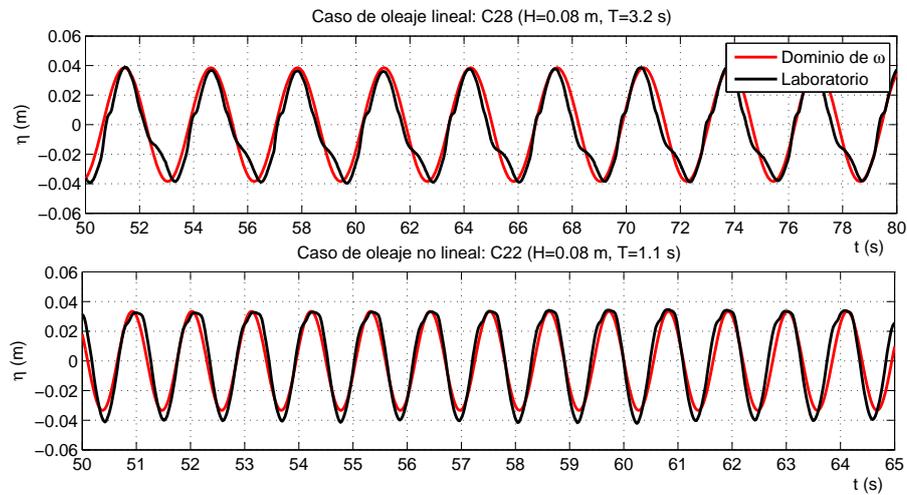


Figura 6.2: Series temporales de superficie libre interior experimental y del modelo en el dominio de la frecuencia calibrados. Oleajes regulares C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s, $c_l=180$) y C22 ($H=0.08$ m, $T=1.1$ s, $c_l=70$), apertura de 50 mm.

6.2 Modelado numérico en el dominio del tiempo

En este trabajo se ha desarrollado un modelo numérico simplificado en el dominio del tiempo que se ha descrito en el Capítulo 5. En este capítulo se ha verificado, calibrado y validado dicho modelo. Se muestra primero una verificación sencilla del modelo basada en WADAM, después la calibración experimental de la fuerza de fricción y del coeficiente de descarga en la ranura superior, y por último, la validación (experimental y basándose en el modelo CFD IH-2VOF) del modelo numérico calibrado.

6.2.1 Primera verificación del modelo

Como primera verificación del modelo construido en el dominio del tiempo se presenta una comparación con el modelo en el dominio de la frecuencia WADAM. El movimiento de la masa de agua interior de la cámara (de geometría equivalente a la ensayada experimentalmente) se simuló mediante el modelo construido con el techo de la cámara totalmente abierto a la atmósfera, y sin modelar los efectos viscosos en la entrada y salida sumergidas de la cámara. En cuanto a WADAM, se modeló un cuerpo rígido con la geometría y la densidad de la columna de agua oscilante en reposo para obtener su respuesta de movimiento con incidencia de oleaje regular de un rango de frecuencias. Análogamente, oleajes regulares de diferentes frecuencias se simularon con el modelo en el dominio del tiempo, alimentando dicho modelo con la fuerza de excitación y coeficientes hidrodinámicos provenientes de WADAM. Se calculó la amplitud media de oscilación del cuerpo en cada caso y se comparó con los resultados de WADAM.

La Figura 6.3 muestra la comparación entre la RAO de la OWC resultante de WADAM y la proveniente del modelo en el dominio del tiempo. Tal y como era de esperar, la amplitud de la oscilación es cero para los periodos más pequeños e igual a la amplitud del oleaje incidente para periodos superiores a 2.20 segundos. Según ambos modelos el periodo de resonancia se encuentra en torno a 1.10 segundos para la geometría simulada. Los resultados experimentales mostraron resonancia igualmente en torno a dicho valor. Además, el periodo natural teóricamente calculado también concidió con dicho valor. Sin embargo, la mayor discrepancia entre

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

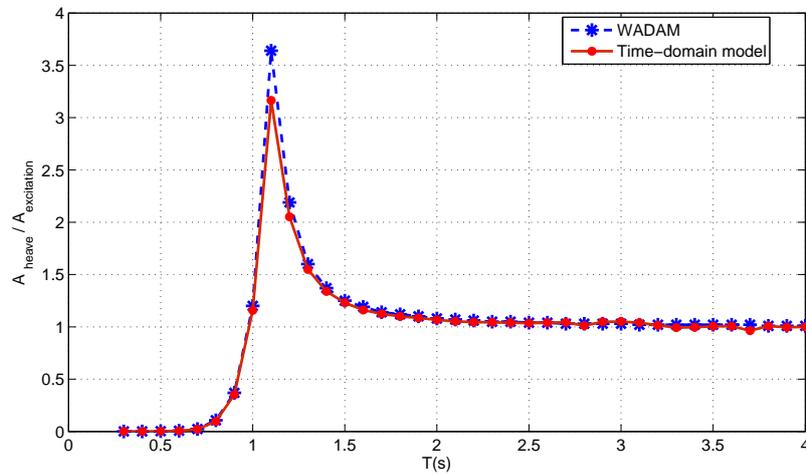


Figura 6.3: RAO de WADAM y del modelo numérico en el dominio del tiempo.

ambos modelos se registra alrededor del periodo de resonancia, donde WADAM predice un 13 % más de amplitud que el modelo en el dominio del tiempo. Esta diferencia se debe al orden del polinomio escogido para aproximar la función de transferencia utilizando la herramienta de Matlab desarrollada por Pérez & Fossen (2009). En la aproximación de dicho polinomio se ha permitido una tolerancia del 1 % entre la función de transferencia según WADAM y el polinomio definido. Se ha comprobado que la calidad de la aproximación es muy susceptible al orden del polinomio seleccionado. El orden seleccionado para la comparación mostrada en la Figura 6.3 es el que lograba la mejor aproximación en todo el rango de periodos considerado. Para los periodos distintos al de resonancia, la diferencia entre los dos modelos es menor que el 1 %.

6.2.2 Calibración de la fuerza de fricción

El paso siguiente en el desarrollo del modelo fue la consideración de la fuerza de fricción en la entrada sumergida de la cámara utilizando la Ecuación (5.12). Los coeficientes viscoso y turbulento (lineal y no lineal) se calibraron a partir de los resultados experimentales de oleaje regular con la apertura superior de la cámara

6.2 Modelado numérico en el dominio del tiempo

abierta al máximo (5 cm). Con esta apertura, la variación de presión medida experimentalmente dentro de la cámara se consideró despreciable, ver Figura 4.15 del Capítulo 4. Comparando los resultados del modelo en el dominio del tiempo con los datos experimentales, se definieron diferentes curvas de calibración para los coeficientes de fricción lineal (k_l) y no lineal (k_{nl}) en función del peralte del oleaje (H altura de ola, L longitud de onda), ver Figura 6.4:

Rango lineal ($0,003 < H/L < 0,010$):

$$\left| \begin{array}{l} k_l = 6273527 \left[\frac{H}{L} \right]^2 - 139382 \frac{H}{L} + 780 \\ k_{nl} = 0 \end{array} \right. \quad (6.2)$$

Rango lineal/no lineal ($0,010 \leq H/L \leq 0,025$):

$$\left| \begin{array}{l} k_l = 16 \\ k_{nl} = 35 \end{array} \right. \quad (6.3)$$

Rango no lineal ($0,025 < H/L < 0,045$):

$$\left| \begin{array}{l} k_l = 0 \\ k_{nl} = 542715 \left[\frac{H}{L} \right]^2 - 19834 \frac{H}{L} + 189 \end{array} \right. \quad (6.4)$$

Las mejoras en los resultados del modelo gracias a la calibración de la fricción pueden expresarse en función del error en H_{m0} , definido en la Ecuación (6.5), donde H_{m0} es la altura de ola de momento de orden cero y los subíndices *mod* y *lab* se refieren a resultados numéricos y de laboratorio respectivamente. En la parte inferior de la Figura 6.4 se observa que las diferencias entre el modelo calibrado y los resultados experimentales se reducen significativamente gracias a la calibración de la fuerza de fricción, especialmente en el rango no lineal.

$$E(\%) = \frac{H_{m0}^{mod} - H_{m0}^{lab}}{H_{m0}^{lab}} 100 \quad (6.5)$$

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

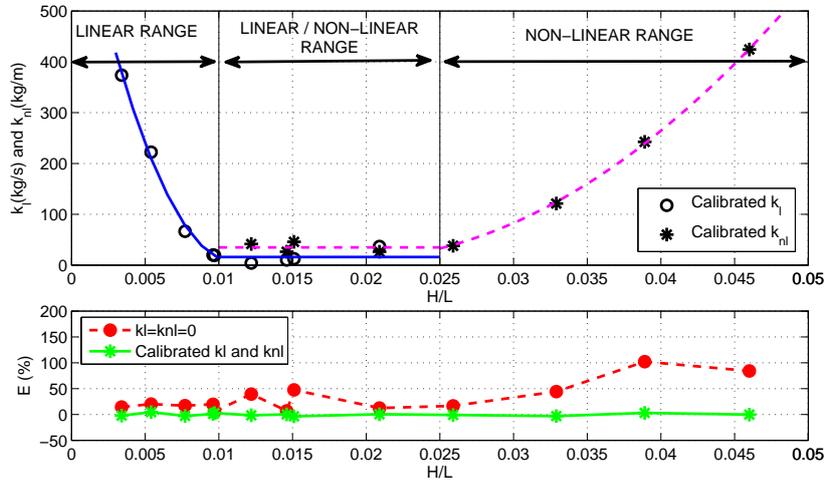


Figura 6.4: Curvas de calibración de los coeficientes de fricción lineal (k_l) y no-lineal (k_{nl}) y errores con y sin calibración de la fricción.

6.2.3 Calibración del coeficiente de descarga

Se sabe que el sistema de PTO de los dispositivos de OWC se compone de una turbina de aire autorectificadora conectada a un generador. Dicho PTO genera una resistencia al flujo de aire y provoca que el aire interior de la cámara ejerza una fuerza de amortiguamiento sobre el movimiento de la columna de agua. Tal y como se ha explicado en el Capítulo 4, con el objetivo de estudiar el comportamiento de la OWC con distintas fuerzas de amortiguamiento, se ensayaron experimentalmente distintas aperturas de la cámara. Basándose en los ensayos de oleaje regular realizados con apertura de 9 mm, se calibró el coeficiente de descarga en la apertura superior (c_d de la Ecuación (5.24)). Se realizó un barrido de valores de c_d para cada caso ensayado y se computó la diferencia entre los resultados numéricos y experimentales. Dicha diferencia se calculó según la Ecuación (6.6), donde p es la altura de la oscilación de la presión, la línea sobre las variables hace referencia a su valor medio y los subíndices *mod* y *lab* se refieren a los resultados numéricos y experimentales respectivamente.

6.2 Modelado numérico en el dominio del tiempo

$$E_p(\%) = \frac{\bar{p}_{mod} - \bar{p}_{lab}}{\bar{p}_{lab}} 100 \quad (6.6)$$

Se seleccionó el valor del coeficiente c_d que minimizara dicho error como el valor calibrado para cada caso. Se definió un ajuste parabólico como mejor opción para expresar los valores de c_d en función del peralte del oleaje (H/L), ver el panel superior de la Figura 6.5. El panel inferior de dicha figura muestra las diferencias entre los datos experimentales y numéricos utilizando la calibración de c_d propuesta. Dicha diferencia es menor del 10 % en todos los casos estudiados. La Ecuación (6.7) muestra dicho ajuste parabólico, que tiene rango de validez en el rango de peraltes considerado en la calibración ($0,01 \leq \frac{H}{L} \leq 0,045$).

$$c_d = -655,2472 \left[\frac{H}{L} \right]^2 + 34,3335 \frac{H}{L} + 0,6178 \quad (6.7)$$

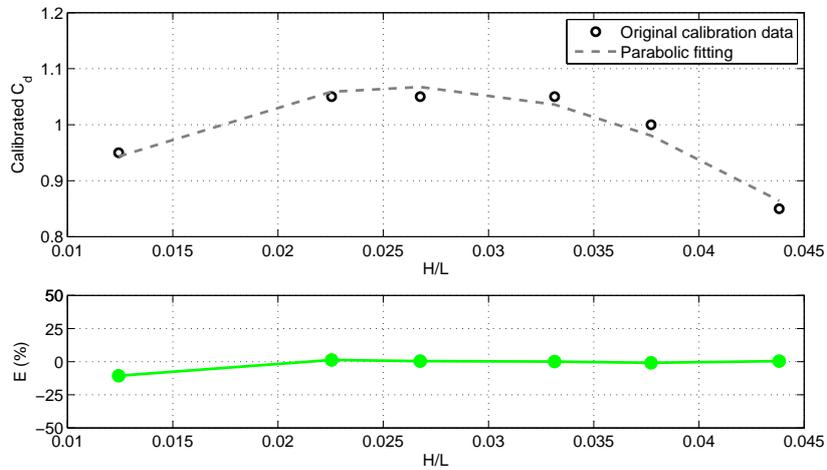


Figura 6.5: Calibración del coeficiente de descarga c_d basándose en los casos de oleaje regular con apertura de 9 mm y diferencias entre datos numéricos y experimentales.

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

6.2.4 Validación del modelo

El modelo en el dominio del tiempo desarrollado también fue comparado con resultados de modelos CFD ampliamente validados, como el modelo IH-2VOF (Losada *et al.*, 2008), que ha sido descrito en el Capítulo 5. Los resultados del modelo simplificado en el dominio del tiempo y del IH-2VOF se compararon en una prueba de decaimiento (decay test), dada la dificultad de simular experimentalmente este tipo de ensayos. Para ello, se impuso una elevación inicial de la superficie libre interior a la cámara de 0.12 metros en ambos modelos y se analizó la atenuación de la amplitud de la oscilación de la superficie libre interior en el tiempo. Ambas series temporales se comparan en la Figura 6.6, observándose muy buena concordancia entre los modelos.

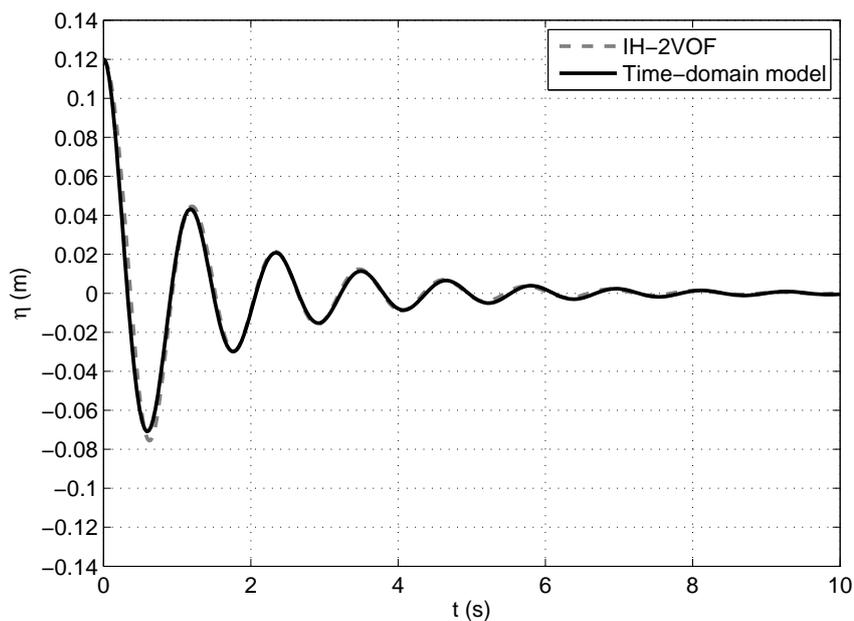


Figura 6.6: Comparación entre IH-2VOF y el modelo simplificado en el dominio del tiempo para un ensayo de decaimiento. Elevación inicial en la cámara de 0.12 m.

Una vez verificado que el modelo es capaz de reproducir correctamente un

6.2 Modelado numérico en el dominio del tiempo

ensayo de decaimiento, se continuó con el proceso de validación con oleaje regular. Para ello se utilizaron los resultados experimentales disponibles. La Figura 6.7 muestra la comparación entre el modelo en el dominio del tiempo calibrado y los resultados experimentales para un caso de apertura superior de la cámara de 50 mm, es decir, máxima, donde el efecto de la presión en la cámara se considera no significativo. A la vista de la figura puede afirmarse que la concordancia entre los resultados de superficie libre de ambos modelos es buena, aunque en el caso mostrado el modelo numérico no es capaz de reproducir las no linealidades que aparecen en la fase de descenso y seno de la OWC.

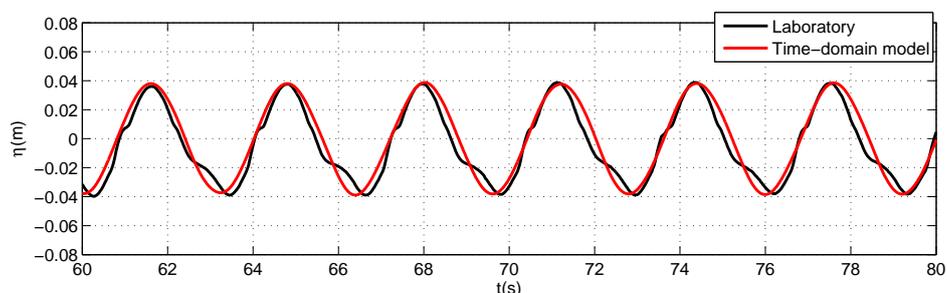


Figura 6.7: Series temporales de superficie libre interior experimental y numérica. Oleaje regular C28 ($H = 0,08$ m, $T = 3,2$ s), apertura de 50 mm, coeficientes de fricción $k_l = 17,9315$ y $k_{nl} = 0$.

A continuación se comprobó la validez de la calibración del coeficiente de descarga c_d para aperturas menores de 9 mm, y por tanto no utilizadas en la calibración. Es decir, se procedió a comprobar la independencia entre el coeficiente de descarga y el tamaño de la apertura superior. Para ello se compararon resultados experimentales y numéricos para ensayos con apertura de 4.5 mm utilizando la calibración obtenida con los casos de 9 mm de apertura. La Figura 6.8 muestra la comparación entre el modelo y los datos experimentales para la elevación de la superficie libre y la presión del aire en la cámara para un caso de apertura de 4.5 mm. En esta figura es de destacar mayor dificultad del modelo simplificado para ajustar las presiones que la superficie libre de la cámara, en particular en la fase de

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

compresión. En general el modelo es capaz de reproducir tanto las crestas como los senos de la superficie libre, al igual que la presión atmosférica cada vez que la superficie libre inicia su ascenso o descenso. Las diferencias entre resultados de laboratorio y numéricos resultaron menores del 20 % en todos los casos. Como era de esperar, las diferencias entre el modelo y el laboratorio crecen cuando decrece el tamaño de la apertura, ya que las dinámicas presentes son más complejas para modelar con un modelo simplificado. Sin embargo, en términos generales, y persiguiendo el equilibrio entre esfuerzo de cálculo y calidad de los resultados, se puede concluir que el modelo simula correctamente el comportamiento de la OWC con diferentes fuerzas amortiguadoras.

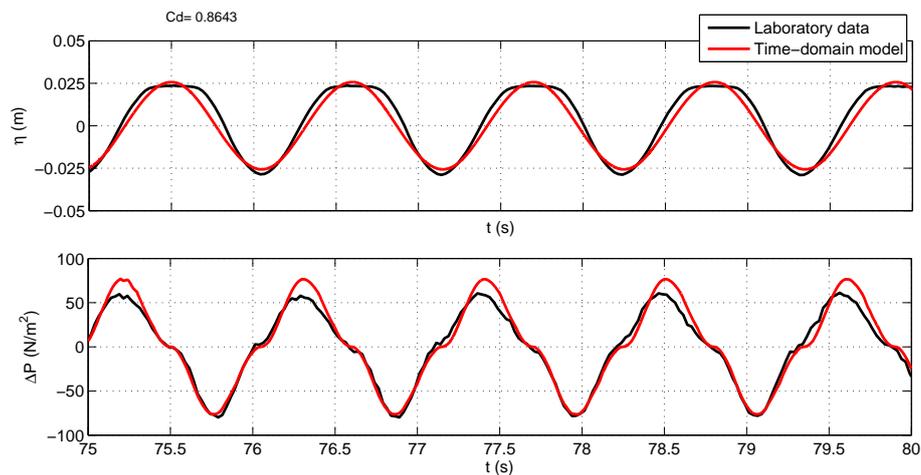


Figura 6.8: Series temporales de superficie libre y oscilación de la presión de aire interior experimental y numérica. Oleaje regular C22 ($H = 0,08$ m, $T = 1,1$ s), apertura de 4.5 mm, $c_d = 0,8643$.

El modelo también fue validado para oleaje irregular. Se demostró que la calibración de los coeficientes de fricción (Figura 6.4 y Ecuaciones (6.2),(6.3) y (6.4)) y de descarga (Figura 6.5 y Ecuación (6.7)) eran válidos también para oleaje irregular simplemente sustituyendo la altura de ola (H) por la altura de ola significativa (H_s) y el periodo (T) por el periodo de pico (T_p). Para validar la cali-

6.2 Modelado numérico en el dominio del tiempo

bración de los coeficientes de fricción para oleaje irregular se optó por simular un caso de oleaje irregular con la máxima apertura de la cámara (50 mm), evitando así la influencia del aire en la cámara y del coeficiente de descarga c_d . Como se puede observar en el Capítulo 4 no se realizaron ensayos experimentales de oleaje irregular con dicha apertura, por lo que se compararon los resultados del modelo simplificado con resultados del modelo IH-2VOF. Como puede observarse en la Figura 6.9 la concordancia entre los resultados de ambos modelos es excelente. En este caso, la fuerza de excitación que alimenta el modelo simplificado se obtuvo a partir de una simulación de oleaje irregular con IH-2VOF (ver Apartado 5.2.1).

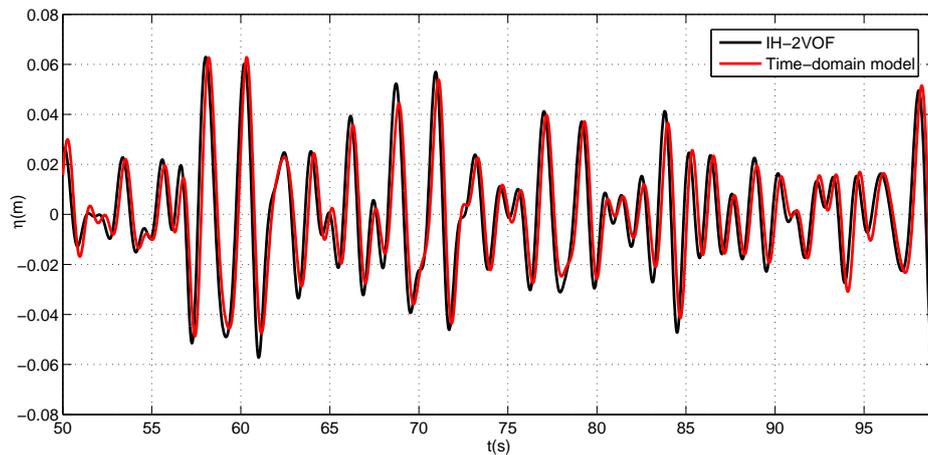


Figura 6.9: Series temporales de superficie libre interior del modelo simplificado e IH-2VOF. Oleaje irregular ($H_s = 0,08m$, $T_p = 2,2s$), cámara abierta, coeficientes de fricción $k_l = 16$ y $k_{nl} = 35$.

De la misma forma que la calibración de la fricción, la calibración del coeficiente de descarga (c_d) también fue validada para oleaje irregular. Se compararon espectros de superficie libre y presión de laboratorio y del modelo numérico para diferentes aperturas, ver por ejemplo la Figura 6.10, correspondiente a una apertura de 4.5 mm. A la vista de dicha figura, el modelo en el dominio del tiempo concuerda aceptablemente con los resultados experimentales. El modelo es capaz

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

de reproducir el primer armónico ($1/T_p$) tanto en superficie libre como en presiones, a pesar de que sobrestima el superarmónico ($2/T_p$) para ambas variables. Se ha observado también que la concordancia entre resultados experimentales y numéricos es mayor para oleajes lineales y ligeramente no lineales que para los casos más no lineales.

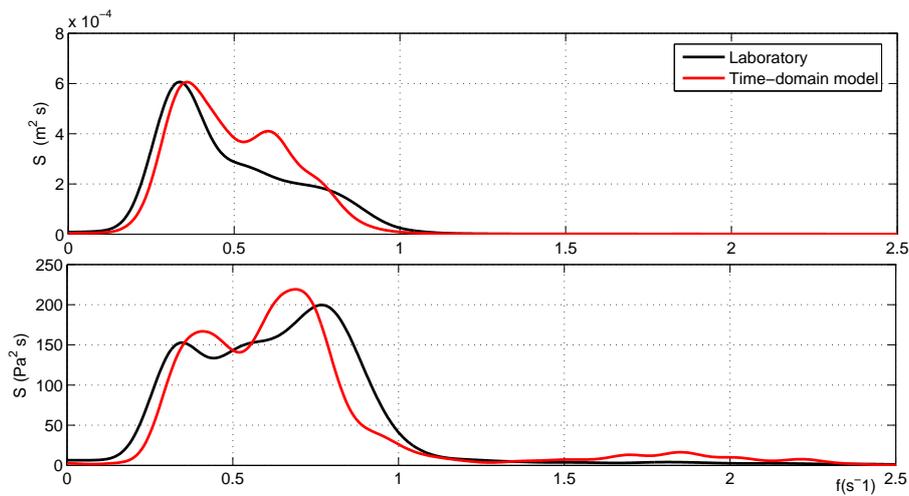


Figura 6.10: Espectros experimentales y numéricos de superficie libre y presión. Oleaje irregular Ir14 ($H_s = 0,06$ m, $T_p = 3,2$ s), apertura de 4.5 mm, coeficiente de descarga $c_d = 0,9107$.

6.2.5 Conclusiones de la calibración y validación del modelado en el dominio del tiempo

A lo largo de esta sección se ha mostrado la calibración y validación del modelo numérico simplificado en el dominio del tiempo que se ha desarrollado y descrito en detalle en la Sección 5.2 del Capítulo 5. Se ha modelado una columna de agua oscilante fija y exenta, equivalente al modelo experimental descrito en el Capítulo 4. El objetivo de este modelo es proporcionar una herramienta útil para el análisis del comportamiento de dispositivos OWC durante la fase de diseño, alcanzando un equilibrio entre complejidad del modelo y coste computacional. A la vista de los resultados, el modelo desarrollado es una alternativa eficiente

6.2 Modelado numérico en el dominio del tiempo

a modelos de mucha más alta demanda computacional como los CFD, ya que proporciona resultados satisfactorios con mucho menor coste computacional. En las simulaciones irregulares mostradas en esta sección el modelo simplificado fue en promedio 21600 veces más rápido que el modelo IH-2VOF. Sin embargo, no hay que olvidar que la gran eficiencia del modelo construido se alcanza gracias a las simplificaciones asumidas, que al mismo tiempo son responsables de sus limitaciones. Las asunciones de hidrodinámica lineal, movimiento interno de tipo pistón y el llenado isoentrópico de la cámara son las simplificaciones principales a señalar. El modelo simplificado en el dominio del tiempo presenta una serie de ventajas en comparación con WADAM, ya que es computacionalmente mucho más eficiente y permite la inclusión de términos no lineales en la ecuación, como pueden ser los términos de fricción o fuerzas de PTO derivadas de la neumática.

Aunque la compresibilidad del aire está considerada en el modelo numérico, se observó experimentalmente que el aire se comportaba como un fluido incompresible dada la pequeña escala de los ensayos. En consecuencia, la compresibilidad del aire no afectó a los resultados numéricos ya que se replicó numéricamente la misma escala de laboratorio. Las pérdidas por fricción en la entrada sumergida de la cámara y el coeficiente de descarga en el orificio superior han sido calibrados basándose en resultados experimentales para oleaje regular. Dichas calibraciones han sido validadas para oleaje irregular usando resultados experimentales y de IH-2VOF. En general, los resultados demuestran la precisión y eficiencia computacional del modelo simplificado calibrado.

6.3 Modelado con herramientas de CFD

En este trabajo se han utilizado dos modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) para simular el problema de la OWC ensayada en el laboratorio: el modelo bidimensional IH-2VOF y el modelo tridimensional OpenFOAM. La motivación para la utilización de cada uno de los modelos es distinta y se explica en esta sección.

6.3.1 IH-2VOF

Tal y como se ha indicado en la Sección 5.3.1, el modelo numérico CFD bidimensional IH-2VOF ha sido ampliamente validado para reproducir ensayos de ingeniería costera llevados a cabo en el canal utilizado para la campaña de ensayos desarrollada en el marco de la presente Tesis. En la mayoría de los problemas de ingeniería costera se considera despreciable el efecto del aire, y por ello, la versión monofase del modelo ha sido ampliamente validada. En consecuencia, se ha utilizado este modelo para ampliar la base de datos de validación para casos en los que la influencia del aire pueda despreciarse, como es el caso de la cámara totalmente abierta. Mediante el modelo IH-2VOF se simuló un dominio numérico bidimensional equivalente al canal del laboratorio descrito en el Capítulo 4. La Figura 6.11 muestra la validación experimental del modelo IH-2VOF para un caso de cámara con apertura máxima, comprobando la capacidad del modelo para la reproducción de la hidrodinámica del problema.

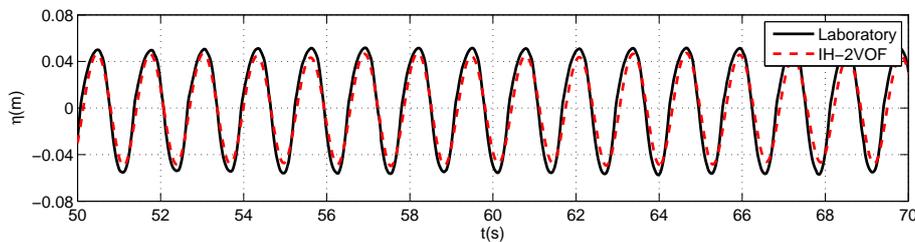


Figura 6.11: Comparación de superficie libre interior experimental y de IH-2VOF. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 50 mm.

En el apartado correspondiente a la validación del modelo numérico desarrollado en el dominio del tiempo, las Figuras 6.6 y 6.9 muestran dos casos en los que se ha utilizado el modelo IH-2VOF de base para la validación del modelo simplificado, ampliando así la base de datos experimental con simulaciones de CFD.

6.3.2 OpenFOAM

A diferencia del modelo IH-2VOF, el modelo CFD tridimensional OpenFOAM se ha utilizado en este trabajo para modelar el agua y el aire conjuntamente, es decir, en su versión bifase. Tal y como se ha dicho en el Apartado 5.3.2, el modelo, con las condiciones de contorno para generación y absorción del oleaje de [Higuera et al. \(2013a\)](#), fue experimentalmente validado en [Higuera et al. \(2013b\)](#) para diversos problemas de ingeniería costera. En esta sección se pretende validar el modelo para la simulación del problema de la Columna de Agua Oscilante ([Iturriz et al., 2013a](#)). Para ello, se comparan resultados experimentales y numéricos de superficie libre, presión del aire interior de la cámara y velocidad del aire entre la cámara y la atmósfera.

6.3.2.1 Disposición numérica de las simulaciones realizadas en OpenFOAM

Se utilizaron ensayos experimentales de oleaje regular para la validación del modelo. La Tabla 6.1 recoge los casos utilizados.

CASO	H(m)	T(s)	Apert.1(mm)	Apert.2(mm)
C24	0.08	1.3	50	9
C26	0.08	1.7	50	9
C27	0.08	2.2	50	9
C28	0.08	3.2	50	9

Tabla 6.1: Casos regulares de laboratorio simulados con OpenFOAM.

Aprovechando las capacidades del modelo se realizaron simulaciones tridimensionales. El objetivo principal de considerar la dirección horizontal perpendicular a la de propagación del oleaje era la de verificar la bidimensionalidad de los

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

ensayos, del mismo modo que se hizo en el modelo físico. La apertura superior de la cámara se modeló análogamente a como se hizo experimentalmente, es decir, como una apertura rectangular ocupando todo el ancho del canal. La Figura 6.13 muestra el esquema numérico del dominio simulado con OpenFOAM. Con el objetivo de reducir el coste computacional de las simulaciones, se intentó reducir el dominio simulado. Con dicho objetivo, se procedió a comprobar la concordancia entre los resultados de las simulaciones realizadas considerando el dominio entero del canal y de las realizadas con la mitad del dominio imponiendo contorno abierto al final del dominio. Dicha comparación se muestra en la Figura 6.12 para la superficie libre en dos sensores del canal. A partir de dicha comparación, tal y como era de esperar, se confirmó la concordancia entre resultados de ambos casos, ya que se había confirmado experimentalmente que la reflexión proveniente del final del canal no era relevante en el problema. En consecuencia, se decidió considerar la mitad del dominio en todas las simulaciones, ver Figura 6.13.

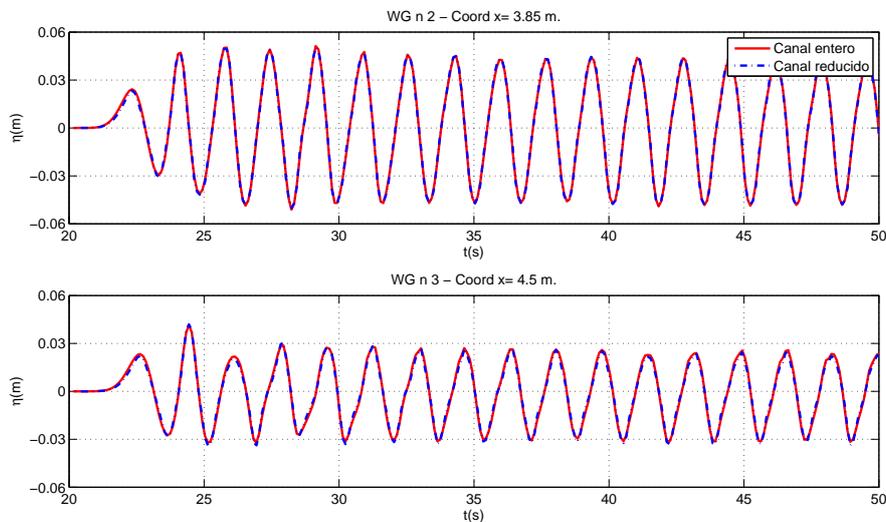


Figura 6.12: Comparación de resultados de superficie libre de un caso simulado considerando el dominio entero del canal y el dominio reducido. Caso C26 ($H=0.08$ m, $T=1.7$ s), apertura superior de 50 mm.

Como primer paso se definió una malla adecuada que discretizara el dominio

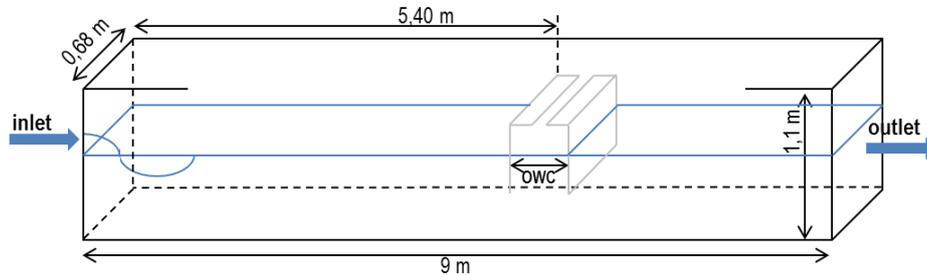


Figura 6.13: Esquema del dominio simulado en OpenFOAM.

del problema buscando el equilibrio entre el coste computacional y la exactitud de los resultados. Dado que se modelaron diferentes aperturas de la ranura superior de la cámara, el tamaño mínimo de celda en la dirección de propagación del oleaje se varió dependiendo de ello. Para los casos con apertura superior de 50 mm se definió una malla de aproximadamente 2 millones de elementos, con celdas uniformes de 17 mm de largo en dirección de propagación del oleaje, 20 mm de ancho y 10 mm de alto. Sin embargo, para los casos de 9 mm de apertura fue necesario refinar la malla en torno a dicha apertura. Para ello, se definieron tres áreas de refinamiento progresivo: la primera en la zona del canal alrededor de la cámara, la segunda en torno al techo de la cámara, y la tercera y última alrededor de la apertura en sí, llegando a una malla de 4 millones de elementos. Este refinamiento progresivo dio lugar a una celda mínima de 2 mm de largo en la dirección de propagación del oleaje, 2 mm de ancho y 1 mm de alto. En consecuencia, aproximadamente 5 celdas cubrían la apertura superior en dirección de propagación del oleaje.

La viscosidad cinemática del agua (γ_{agua}) se consideró de $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y la del aire (γ_{aire}) de $1,48 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. El modelo de turbulencia utilizado era de tipo $k - \omega$ SST, ya que la separación de flujo alrededor de la estructura es importante en el problema estudiado. Se simularon series de 80 segundos de duración en un cluster, utilizando 24 procesadores (Intel Xeon CPU E5-2670) por simulación. La Tabla 6.2 recoge las velocidades medias de simulación.

En los apartados siguientes se comparan las diferentes magnitudes medidas

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

Tamaño apert. sup. (mm)	Velocidad de cálculo (segundos simulados/horas de núcleo)
50	0.04
9	0.0095

Tabla 6.2: Velocidades de simulación medias en función del tamaño de la apertura superior.

experimentalmente con los resultados del modelo OpenFOAM.

6.3.2.2 Superficie libre fuera y dentro de la cámara

En primer lugar, se compararon las series temporales de superficie libre resultantes del modelo numérico con los registros experimentales de superficie libre en los sensores colocados a lo largo del canal, es decir, fuera de la cámara de la OWC. Las Figuras 6.14 (sensores antes de la cámara) y 6.15 (sensores después de la cámara) muestran dicha comparación para el caso C26 (ver Tabla 6.1) y una apertura superior de la cámara de 50 mm. La disposición de los sensores de nivel se puede ver en la Figura 4.1.

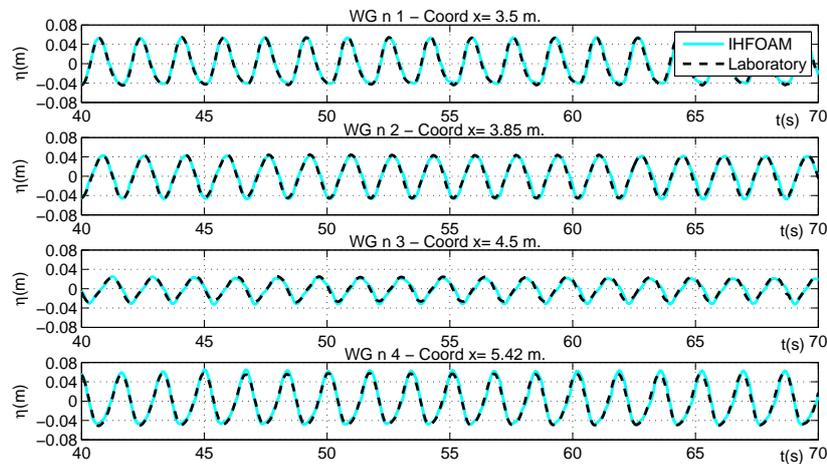


Figura 6.14: Series temporales de superficie libre experimentales y numéricas en los sensores de nivel colocados antes de la cámara. Caso C26 ($H=0.08$ m, $T=1.7$ s), apertura superior de 50 mm.

En la Figura 6.14 puede observarse la formación de una onda cuasiestacionaria justo antes de la cámara por efecto de la reflexión, mientras que la ola transmitida es progresiva y de menor amplitud, ver Figura 6.15. El acuerdo entre resultados experimentales y numéricos es muy satisfactorio en todos los casos estudiados, por lo que se puede afirmar que el modelo predice la superficie libre a lo largo del canal con exactitud tanto para casos de apertura de 50 mm como para casos de 9 mm.

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

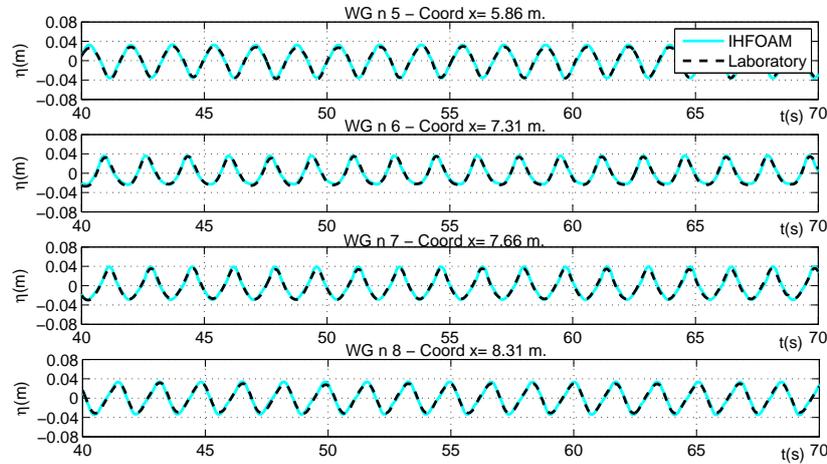


Figura 6.15: Series temporales de superficie libre experimentales y numéricas en los sensores de nivel colocados después de la cámara. Caso C26 ($H=0.08$ m, $T=1.7$ s), apertura superior de 50 mm.

El siguiente paso es validar el modelo para la simulación de la superficie libre interna de la cámara, ya que el principio de funcionamiento de la tecnología OWC se basa en la oscilación de la masa de agua interior. Las Figuras 6.16 y 6.17 muestran la comparación entre resultados numéricos y experimentales para el caso C24 (ver Tabla 6.1), para aperturas de 50 mm y 9 mm respectivamente. Se representan las series correspondientes a las tres secciones paralelas donde se registró experimentalmente la superficie libre. Los resultados se pudieron comparar en esas tres secciones gracias a la tridimensionalidad de las simulaciones de OpenFOAM. La similitud entre las tres secciones corrobora una vez más la bidimensionalidad de los ensayos. En las Figuras 6.16 y 6.17 se puede apreciar la disminución de la amplitud de la oscilación de la superficie libre interior conforme se cierra la apertura superior de la cámara. Dicho efecto, debido a una mayor fuerza de amortiguamiento que el aire contenido en la cámara impone a la superficie de agua, se percibió incluso visualmente durante los ensayos experimentales. Basándose en los casos estudiados, se confirma una gran concordancia entre los

6.3 Modelado con herramientas de CFD

resultados numéricos y experimentales en cuanto a la superficie libre dentro de la cámara. Una vez comprobada la capacidad del modelo para predecir la oscilación de la superficie libre interior a la cámara, se continúa el proceso de validación estudiando la presión dentro de la cámara, responsable de la circulación de aire entre el interior de la cámara y la atmósfera.

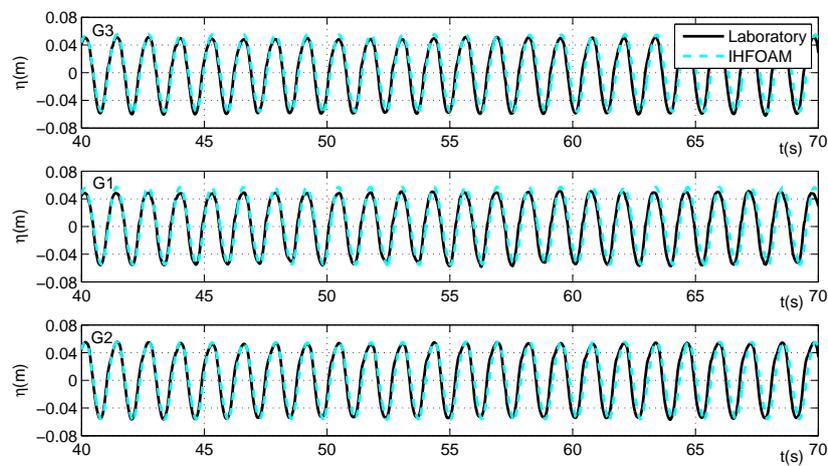


Figura 6.16: Series temporales de superficie libre experimentales y numéricas en las 3 secciones interiores a la cámara. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 50 mm.

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

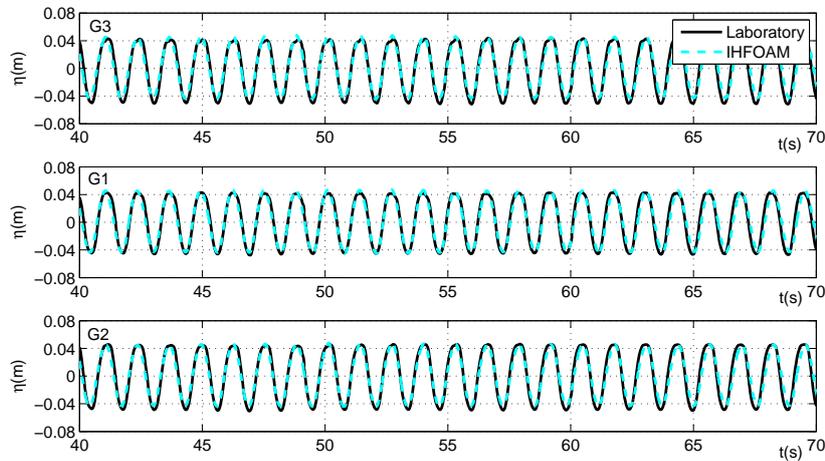


Figura 6.17: Series temporales de superficie libre experimentales y numéricas en las 3 secciones interiores a la cámara. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 9 mm.

6.3.2.3 Presión de aire en la cámara

En un dispositivo OWC real las variaciones de presión interior originan el flujo de aire a través de la turbina, activando su movimiento y en consecuencia la producción energética. Tal y como se ha indicado, el aire de la cámara ejerce un importante efecto de amortiguamiento al movimiento de la columna de agua y este efecto aumenta conforme se cierra la apertura superior. Se comprobó experimentalmente que las variaciones de presión en la cámara con apertura de 50 mm eran muy pequeñas, es decir, el efecto del amortiguamiento del aire era despreciable. Esto puede observarse en la Figura 4.15. En consecuencia, en esta sección no se incluyen resultados de casos con apertura de 50 mm. Con el objetivo de validar la capacidad del modelo para reproducir la presión del aire en la cámara, se compararon series temporales experimentales y numéricas.

Las Figuras 6.18, 6.19 y 6.20 muestran las series temporales de presión experimentales y numéricas para los casos C24, C27 and C28 (ver Tabla 6.1) con 9 mm de apertura. Se representan las series recogidas en los dos sensores de pre-

sión colocados durante los ensayos experimentales, los cuales muestran resultados equivalentes. Se observa una clara influencia del periodo del oleaje en el comportamiento general de las series. Las aceleraciones y deceleraciones que muestran las series se observaron claramente en el laboratorio y en los vídeos de los ensayos. Basándose en los resultados se observa que el modelo es capaz de reproducir la pronunciada asimetría horizontal que muestran las series de presión debido a las diferencias entre los procesos de vaciado y llenado de la cámara. Durante el proceso de vaciado el aire abandona la cámara hacia un espacio abierto y el proceso puede considerarse isoentrópico, dado que el cambio en el estado termodinámico del aire que permanece en la cámara es reversible (Falcão & Justino, 1999). Por el contrario, la entropía varía durante el proceso de llenado de la cámara. El aire entra en un espacio confinado a través de una apertura superior donde se producen importantes pérdidas de carga. Debido a ello puede justificarse que la presión negativa alcanza valores superiores a la positiva. La asimetría horizontal en el campo de presiones se deriva del campo de velocidades verticales de la OWC. Si se observan las curvas de desplazamiento vertical de la superficie libre de los casos ensayados, puede verse que el descenso es más rápido (mayor pendiente) que el ascenso (ver Figura 7.11 del Capítulo 7).

En general, puede afirmarse que el modelo es capaz de predecir de forma realista el comportamiento de la presión interior a la cámara. Sin embargo, hay instantes en los que el modelo tiende a sobrestimar las presiones, especialmente en casos cercanos al periodo de resonancia de la cámara, cuando se producen los mayores picos de presión. Dichas diferencias pueden ser debidas distintas causas, entre ellas una turbulencia demasiado baja en el modelo numérico.

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

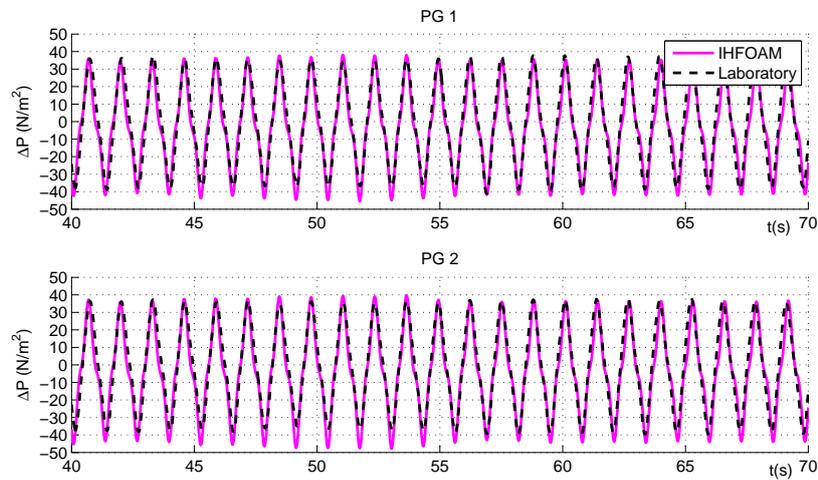


Figura 6.18: Series temporales de presión del aire en la cámara experimentales y numéricas. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 9 mm.

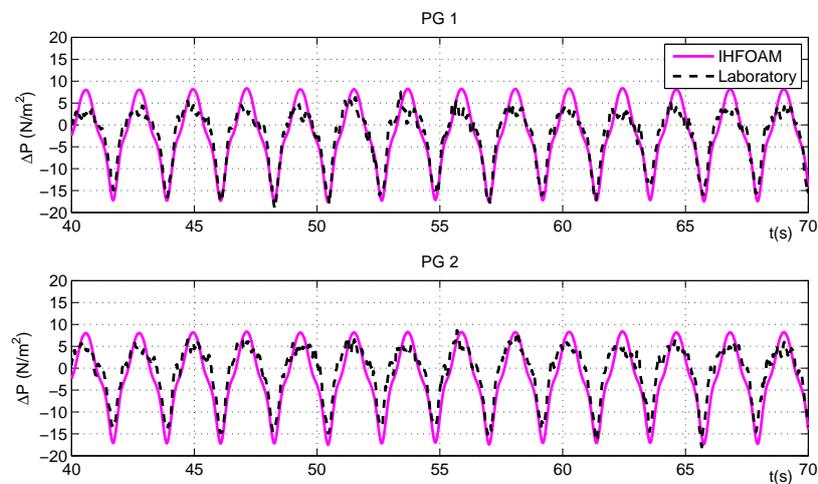


Figura 6.19: Series temporales de presión del aire en la cámara experimentales y numéricas. Caso C27 ($H=0.08$ m, $T=2.2$ s), apertura superior de 9 mm.

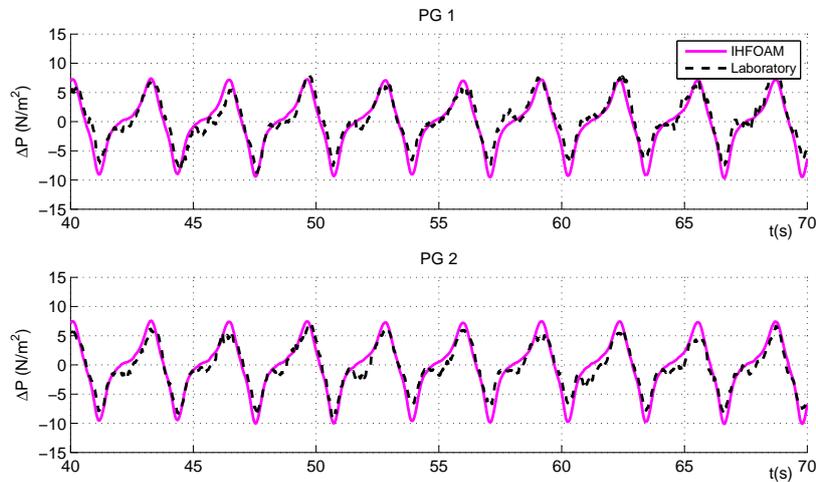


Figura 6.20: Series temporales de presión del aire en la cámara experimentales y numéricas. Caso C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s), apertura superior de 9 mm.

6.3.2.4 Velocidad de aire a través de la apertura

La turbina de aire de un dispositivo real de OWC estará conectada a un generador eléctrico. Tal y como se ha explicado en el Capítulo 4 dicha turbina se ha conceptualizado experimentalmente como una apertura superior variable en la parte superior de la cámara. Al haber simulado numéricamente dos fases (agua y aire), las series temporales numéricas de velocidad de aire en la apertura se han comparado con los registros experimentales del anemómetro.

Las Figuras 6.21 y 6.22 muestran la serie temporal tridimensional de la velocidad del aire para el caso C24 (ver Tabla 6.1) con aperturas de 50 mm y 9 mm respectivamente. A diferencia de los resultados de presión, los resultados de velocidades de aire no muestran un cambio de orden de magnitud significativo al cerrar la apertura. Los resultados experimentales se obtuvieron utilizando un anemómetro ultrasónico descrito en el Capítulo 4. Existen varias razones por las cuales se deduce que la selección de dicho instrumento no fue el adecuado. Por un lado, el volumen de medida de dicho anemómetro era demasiado grande y su localización, condicionada por resto de la disposición experimental, demasiado distante de la

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

apertura. Debido a ello, dependiendo del periodo del oleaje ensayado, en algunos casos el chorro de aire pudo no llegar a atravesar todo el volumen de medida del instrumento, subestimando así la magnitud real de la velocidad. Por otro lado, el chorro de entrada es mucho menos direccional que el de salida en el lado de la atmósfera abierta (donde se encuentra el anemómetro) y puede que el aire circule entre el anemómetro y el techo de la cámara sin pasar por el volumen de control.

Con el objetivo de verificar la capacidad del modelo para reproducir flujos de aire, los registros del anemómetro se compararon con el promedio de los resultados numéricos correspondientes al volumen de medida del anemómetro. Por ello, hay que subrayar que las series temporales que se muestran en este apartado no representan el flujo de aire a través de la apertura, sino que el promediado en el volumen de control del anemómetro utilizado. En la Figura 6.23 se muestran los instantes de máximo caudal de aire de salida y de entrada, y la posición aproximada del volumen de control del anemómetro.

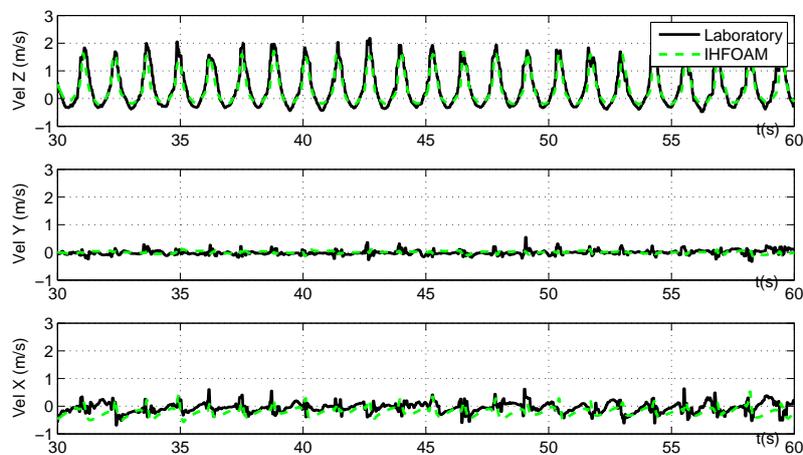


Figura 6.21: Series temporales de velocidad del aire sobre la cámara. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 50 mm.

Las Figuras 6.24 y 6.25 también muestran la comparación entre series tem-

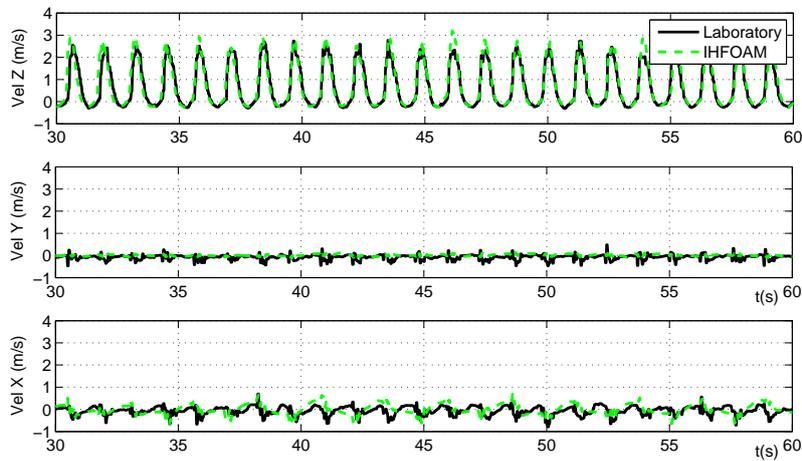


Figura 6.22: Series temporales de velocidad del aire sobre la cámara. Caso C24 ($H=0.08$ m, $T=1.3$ s), apertura superior de 9 mm.

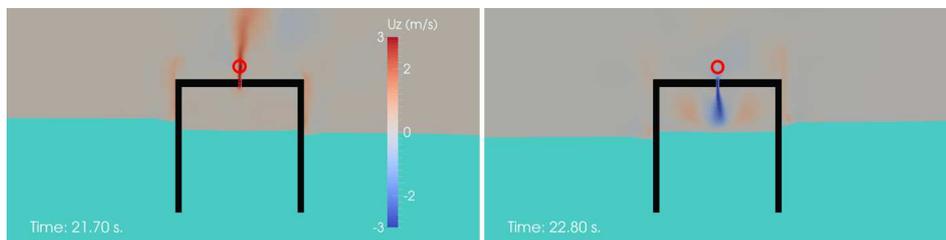


Figura 6.23: Instantes de máximo caudal de aire de salida y de entrada y posición del volumen de medida del anemómetro.

porales de velocidad de aire numéricas y experimentales en las tres dimensiones para otros casos de periodos más largos ensayados (C27 y C28, ver Tabla 6.1). De todos los casos estudiados, se extraen algunas conclusiones comunes. En primer lugar, se observa que la velocidad del aire en dirección vertical es dominante en todos los casos, mostrando claros eventos periódicos de llenado y vaciado de la cámara. Por el contrario, la velocidad del aire en el plano horizontal (paralelo y transversal a la dirección de propagación del oleaje) es prácticamente desprecia-

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

ble. En segundo lugar, al igual que las series temporales de presión, la velocidad vertical del aire también presenta marcadas asimetrías en todos los casos analizados. El aire que sale de la cámara (velocidad vertical positiva) alcanza valores muy superiores a los del aire que entra en la cámara (velocidad vertical negativa). Durante el proceso de expiración de aire el volumen de medida indicado en la Figura 6.23 intercepta el chorro de salida, mientras que en la inspiración se produce un flujo convergente hacia la entrada, mucho más disperso direccionalmente y que no se caracteriza correctamente mediante el volumen de control utilizado. Sin embargo, se ha comprobado la capacidad del modelo numérico para reproducir correctamente los resultados de dicho volumen de control, validándose así los campos de velocidad provenientes del modelo.

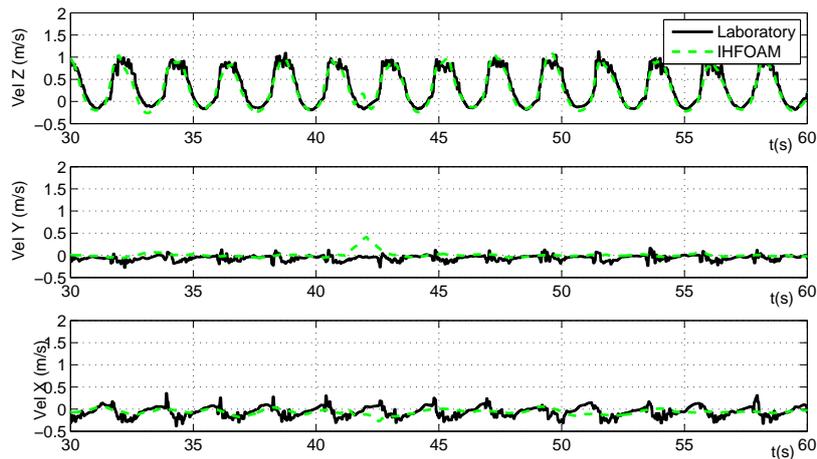


Figura 6.24: Series temporales de velocidad del aire sobre la cámara. Caso C27 ($H=0.08$ m, $T=2.2$ s), apertura superior de 9 mm.

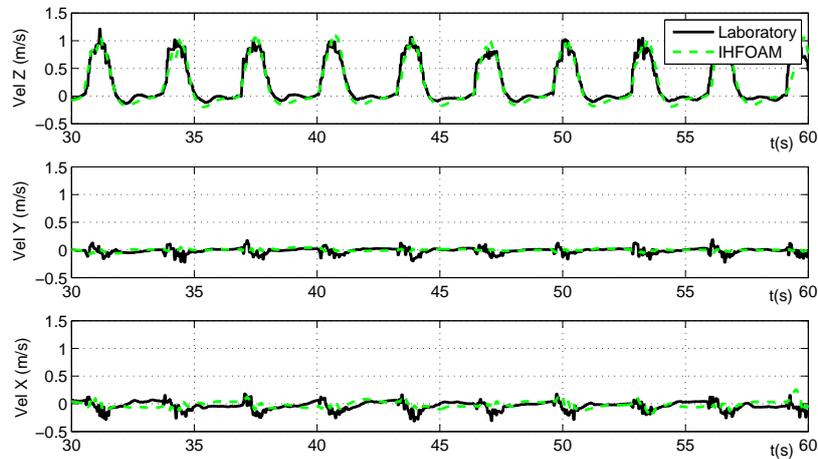


Figura 6.25: Series temporales de velocidad del aire sobre la cámara. Caso C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s), apertura superior de 9 mm.

6.3.2.5 Conclusiones de la validación de OpenFOAM

El modelo OpenFOAM ha sido validado en este trabajo basándose en resultados experimentales de la campaña de ensayos descrita en el Capítulo 4. Durante dichos ensayos la turbina se conceptualizó como una apertura superior variable, con el objetivo de poder simular diferentes resistencias a la circulación del aire a través de ella. Se han comparado series temporales numéricas y experimentales de elevación de la superficie libre interior, presión del aire y velocidad del aire a través de la apertura superior, y el modelo ha demostrado ser capaz de reproducir las complejas dinámicas implicadas en el funcionamiento de un dispositivo OWC. La alta resolución de las mallas empleadas permite analizar en detalle las variables de interés en la cámara y alrededor de ella, como por ejemplo los campos de presión, velocidad del aire y vorticidad tanto en el agua como en el aire, tal y como se verá en el Capítulo 7.

Aplicación de la metodología propuesta y discusión

En el Capítulo 6 se han calibrado y validado modelos numéricos de distinta complejidad para la simulación del problema de la OWC. Además, en el Capítulo 3 se ha propuesto una metodología de modelado numérico optimizado de la OWC, en la que se propone el uso de un tipo de modelo para cada fase del desarrollo de un dispositivo de OWC, con el objetivo de buscar el equilibrio entre las exigencias de precisión de cada tarea y la complejidad de los modelos. Así, cada tipo de modelo estará asociado a necesidades propias de etapas tempranas o más avanzadas del desarrollo de un dispositivo de tipo OWC. En orden de complejidad creciente, en el presente capítulo se aborda el problema de una OWC mediante el modelado en el dominio de la frecuencia, el modelado simplificado en el dominio del tiempo y el modelado CFD. El objetivo de este capítulo es verificar la validez de la propuesta metodológica realizada en el Capítulo 3 a través de su aplicación. Con dicho objetivo, se utilizan las distintas herramientas numéricas para resol-

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

ver tareas habituales de las fases del desarrollo a las que se han asignado. Los contenidos del capítulo se organizan de la siguiente forma:

- Selección de la localización óptima para un determinado dispositivo de OWC mediante el modelo en el dominio de la frecuencia.
- Estimación de la producción en dicha localización mediante el modelo simplificado en el dominio del tiempo experimentalmente calibrado.
- Análisis detallado de las dinámicas en torno a la cámara mediante el modelo CFD OpenFOAM.
- Discusión de la metodología propuesta.

7.1 Selección de la localización óptima para un dispositivo: modelado en el dominio de la frecuencia

El objetivo de esta sección es seleccionar la localización más conveniente para un dispositivo dado. Esta tarea requiere de un modelo rápido y sencillo con el que se capaces de analizar multitud de emplazamientos en un periodo corto de tiempo. Para ello se ha utilizado el modelado más sencillo recogido en la presente Tesis: el modelado en el dominio de la frecuencia. El diseño para el que se ha realizado dicha selección de localización es análogo al ensayado experimentalmente (ver Capítulo 4), pero a escala de prototipo. Para ello, se ha aplicado un factor de escala longitudinal (E_L) de 30 al modelo reducido, consiguiendo unas dimensiones del orden de magnitud de un posible prototipo real. Tal y como se ha explicado en los Capítulos 2 y 5, para el modelado de la OWC en el dominio de la frecuencia se realizan una serie de simplificaciones y en esta sección se asumen otras adicionales. Las más significativas son las siguientes:

- El movimiento de la columna de agua se asume como un movimiento de tipo pistón.
- En el caso de que la profundidad del emplazamiento requiriera una estructura flotante para albergar la OWC, se asume que ésta es estable y que sus movimientos son lentos, considerándose despreciable su influencia en el comportamiento de la cámara.
- Todas las fuerzas modeladas se consideran lineales y no se consideran las fuerzas asociadas a los anclajes o las pérdidas viscosas en la entrada sumergida de la cámara.
- No se modela ninguna masa de aire en la cámara que amortigüe la oscilación de la columna de agua. Como alternativa más sencilla, la amortiguación debida al sistema de PTO se ha determinado tal y como se ha indicado en el Apartado 5.1.3. El valor óptimo del coeficiente de amortiguamiento según dicho apartado para la geometría considerada (D_{opt}) se representa en la Figura 7.1 en función del periodo.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

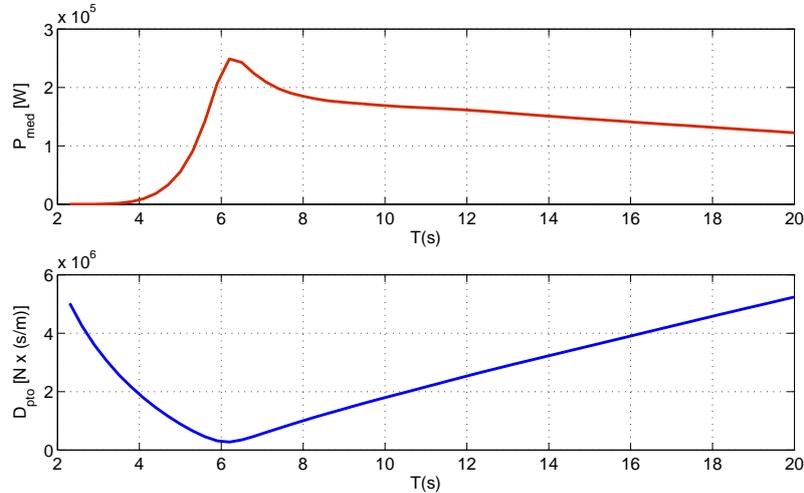


Figura 7.1: D_{opt} óptima en función del periodo y la producción media horaria correspondiente.

Teniendo en cuenta las hipótesis anteriores y la amortiguación óptima definida, se modela el comportamiento del dispositivo en el dominio de la frecuencia, llegando a resultados análogos a los mostrados en la Figura 6.1 del Capítulo 6 para la geometría considerada.

Una vez determinado el comportamiento del cuerpo para cada frecuencia del rango considerado, se definen las distintas localizaciones estudiadas para la posible instalación del dispositivo. Los emplazamientos a estudiar se han seleccionado basándose en el trabajo de Babarit *et al.* (2012), donde se compara el comportamiento de distintas tecnologías de energía undimotriz en diversas localizaciones. Los emplazamientos analizados en el presente trabajo son en concreto Belmullet (Irlanda), EMEC (Escocia), Lisboa (Portugal) y la isla de Yeu (Francia), recogidos en la Figura 7.2.

El clima marítimo en cada uno de los emplazamientos puede definirse por su matriz de ocurrencia, es decir, por una matriz en la que cada elemento corresponde a un estado de mar (definido por su altura de ola significativa $H_s(m)$ y su periodo

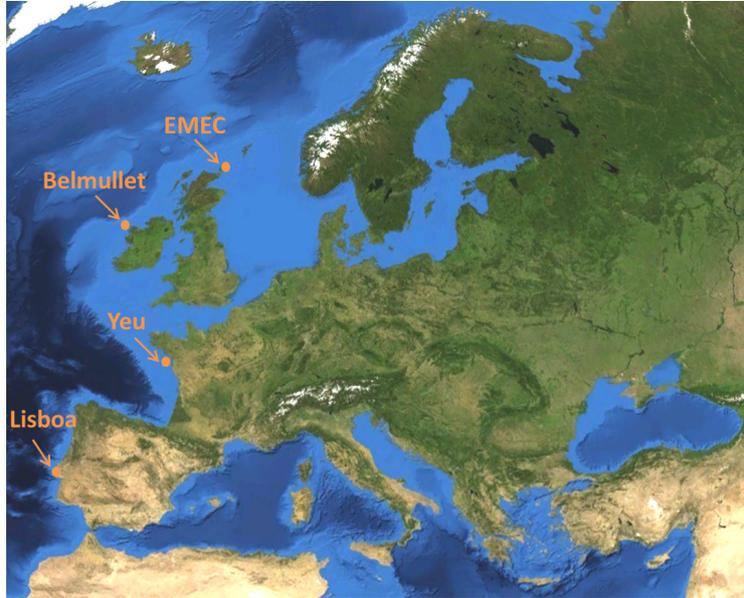


Figura 7.2: Mapa de los emplazamientos considerados en el proceso de selección (Babarit *et al.*, 2012).

de pico $T_p(s)$), y que contiene el porcentaje de tiempo al año en el que el estado de mar en cuestión se registra en dicho emplazamiento. La Figura 7.3 muestra las matrices de ocurrencia correspondientes a cada emplazamiento considerado. En el caso de Belmullet los estados de mar más frecuentes se concentran en torno a la altura de ola significativa (H_s) de 3.5 metros, y periodo de pico (T_p) de 11.5 segundos, tratándose por tanto de un emplazamiento muy energético. En EMEC los periodos más frecuentes son más bajos, situándose en torno a $T_p = 7$ segundos, así como las alturas de ola, en torno a $H_s = 1$ metro. En el caso de Lisboa, tanto el periodo como la altura más frecuentes son algo mayores que en EMEC ($H_s = 1,5 m$, $T_p = 9,5 s$). Por último, en el caso de la isla de Yeu se registran dos rangos con similar ocurrencia, el primero en torno a $H_s = 1,25 m$ y $T_p = 8,5 s$, y el segundo en torno a $H_s = 3 m$ y $T_p = 9,5 s$.

Modelando en el dominio de la frecuencia cada estado de mar de las matrices de ocurrencia, amortiguando cada frecuencia con el óptimo correspondiente

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

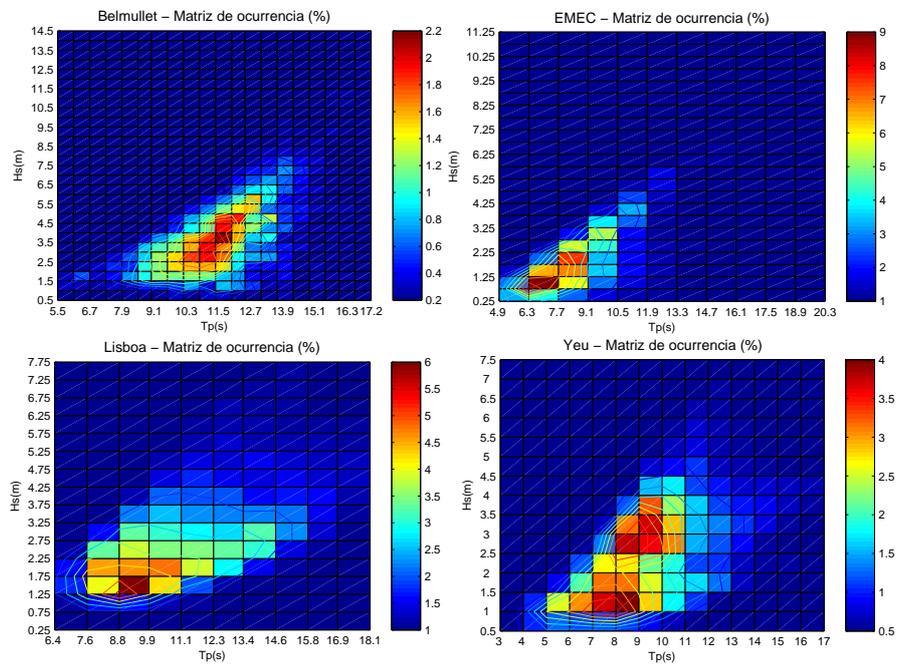


Figura 7.3: Matrices de ocurrencia correspondientes a los emplazamientos considerados.

(Figura 7.1) y siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 5.1.2, se puede estimar la capacidad de producción del dispositivo en cada uno de los estados de mar de la matriz de ocurrencias (de Andrés *et al.*, 2014). La duración de las simulaciones realizadas es de 3600 segundos y se ha computado la producción media horaria para cada estado de mar. La matriz que representa dicha magnitud se conoce como matriz de potencia, la cual se muestra en la Figura 7.4.

Sin embargo, para estimar la producción de un dispositivo en un emplazamiento, ha de tenerse en cuenta la ocurrencia de cada estado de mar, ya que de nada sirve que un dispositivo sea muy productivo bajo un estado de mar que raramente se producirá en su futuro emplazamiento. Multiplicando término a término las matrices de ocurrencia de las localizaciones (Figura 7.3) y la matriz de po-

7.1 Selección de la localización en el dominio de la frecuencia

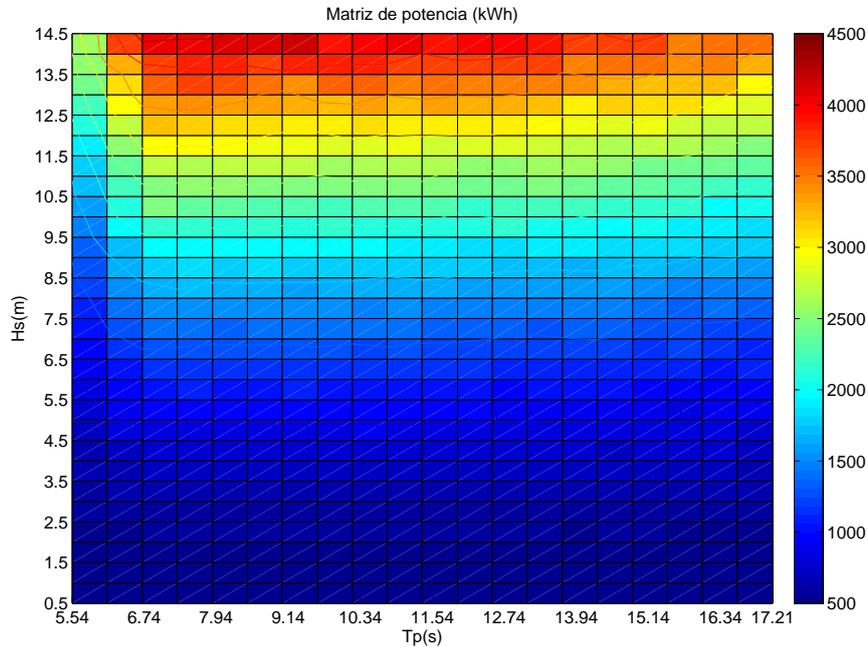


Figura 7.4: Matriz de potencia del dispositivo estudiado, estimada en el dominio de la frecuencia.

tencia (Figura 7.4) y multiplicando por el número de horas del año, se obtienen las matrices de producción en cada emplazamiento considerado, ver Figura 7.5. Como criterio para seleccionar el emplazamiento más conveniente para el dispositivo estudiado se ha decidido maximizar la producción anual. Para ello se ha computado la producción estimada anual para cada localización sumando la contribución debida a cada estado de mar de la Figura 7.5, que se recoge en la Tabla 7.1. A la vista de las producciones estimadas puede concluirse que Belmullet es el emplazamiento más conveniente para el dispositivo considerado.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

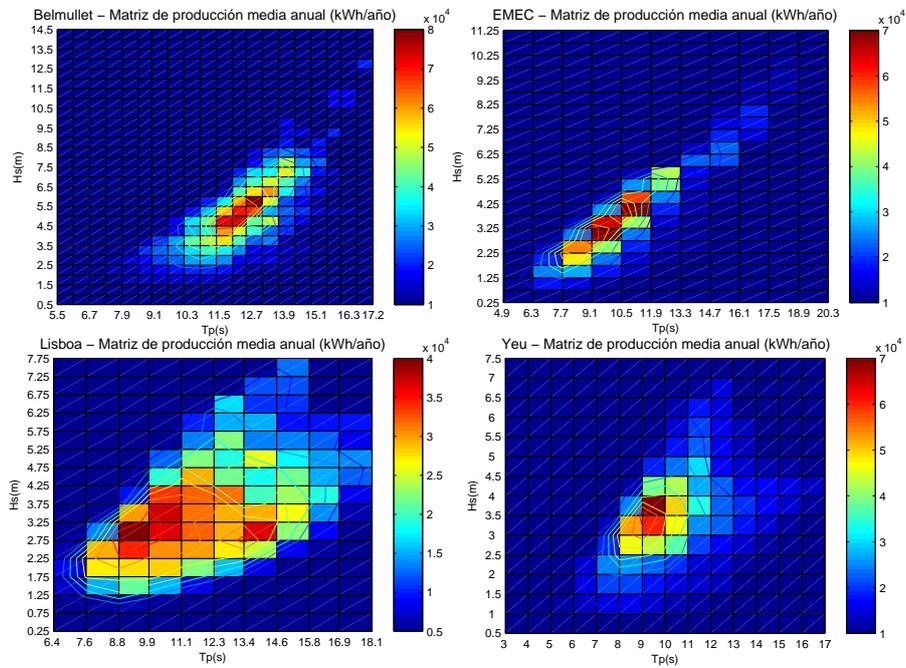


Figura 7.5: Matrices de producción correspondientes a los emplazamientos considerados, estimadas en el dominio de la frecuencia.

Emplazamiento	Producción anual estimada (GWh/año)
Belmullet	2.700
EMEC	0.900
Lisboa	1.300
Yeu	1.125

Tabla 7.1: Producciones anuales en los emplazamientos considerados, estimadas en el dominio de la frecuencia.

7.2 Estimación de la producción en la localización seleccionada: modelado en el dominio del tiempo

Una vez se ha seleccionado el emplazamiento más conveniente para el dispositivo mediante simulaciones en el dominio de la frecuencia, se estima la producción en dicha localización mediante el modelo construido en el dominio del tiempo, computacionalmente más costoso pero que asume menos simplificaciones, y por tanto, ofrece una reproducción más fiel a la realidad. El modelo simplificado en el dominio del tiempo es además mucho más rápido que los modelos CFD, por ejemplo, 21600 veces más rápido que el modelo IH-2VOF simulando oleaje irregular (Iturrioz *et al.*, 2012). En los Capítulos 2 y 5 se explican los aspectos que diferencian el modelado en el dominio de la frecuencia y el modelado en el dominio del tiempo desarrollados en el presente trabajo, los cuales son los responsables de las diferencias entre los resultados de uno y otro modelo. A continuación, a modo de recordatorio, se resumen los principales:

- En el modelado en el dominio del tiempo se consideran fuerzas no lineales, como la fuerza de fricción en la entrada sumergida de la cámara. Además, en este trabajo dicha fuerza ha sido experimentalmente calibrada en función del peralte del oleaje incidente, como se explica en el Apartado 6.2.2.
- En el modelado en el dominio del tiempo se modela el aire del interior de la cámara. Dicho aire se considera como un gas ideal, los procesos de llenado y vaciado se consideran isoentrópicos y la compresibilidad del aire adiabática. También se ha calibrado experimentalmente un coeficiente de descarga que representa las pérdidas de carga que el aire sufre al circular a través de la apertura superior, como se explica en el Apartado 6.2.3.
- En el modelado en el dominio del tiempo, el amortiguamiento de la oscilación de la OWC debido al PTO se optimiza para cada estado de mar, en lugar de para cada frecuencia, tal y como se explica en el Apartado 5.2.4. Dichas amortiguaciones óptimas que maximizan la producción de un determinado estado de mar están asociadas en este trabajo a un tamaño de la apertura superior de la cámara.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

La parte superior de la Figura 7.6 recoge las relaciones entre el área de apertura superior (A_{ap}) y el área interior de la cámara (A_{int}) que maximizan la producción neumática en cada caso considerado. Acorde con lo expuesto en el Apartado 5.2.3, se ha optado por computar la producción neumática por tratarse de un caso a escala de prototipo y el aire se comporta como un fluido compresible. Dicha selección se ha realizado a partir de barridos de diferentes tamaños de aperturas para cada estado de mar considerado. En la figura se indican también el límite por rotura de Miche(1944) y la validez de la calibración experimental desarrollada.

En la parte inferior de la Figura 7.6 se representa la relación de aperturas óptima (A_{ap}/A_{int}) en función del peralte de cada estado de mar, donde también se indica el rango de validez de la calibración experimental. Puede concluirse que la apertura óptima sigue una curva en función del peralte del oleaje, incluso fuera del rango de validez de la calibración experimental.

En la selección de la amortiguación óptima y en la producción obtenida tiene gran influencia la fuerza de fricción hidrodinámica calibrada experimentalmente (ver Apartado 6.2.2), cuyos coeficientes (k_l y k_{nl}) se han escalado cumpliendo la semejanza de Froude. En la Figura 7.7 se muestran algunas curvas de producción en función de distintas aperturas, tanto sin considerar la fuerza de fricción en la entrada sumergida como con la fricción calibrada. Dichas curvas sirvieron para la selección de la apertura óptima para cada estado de mar. Se observa que la producción disminuye a consecuencia de considerar la fuerza de fricción, siendo su influencia mayor conforme el peralte crece.

Una vez determinado el amortiguamiento óptimo para cada estado de mar, se computa la matriz de potencia (parte superior de la Figura 7.8) y de producción media anual (parte inferior de la Figura 7.8) en el dominio del tiempo en Belmullet siguiendo el procedimiento indicado para la producción neumática en el Apartado 5.2.3. La matriz de potencia de dicha figura puede compararse con la matriz de potencia calculada en el dominio de la frecuencia (Figura 7.4). A simple vista se observan marcadas diferencias en la forma de la matriz, así como en los valores correspondientes a los estados de mar con mayores alturas de ola.

7.2 Estimación de la producción en el dominio del tiempo

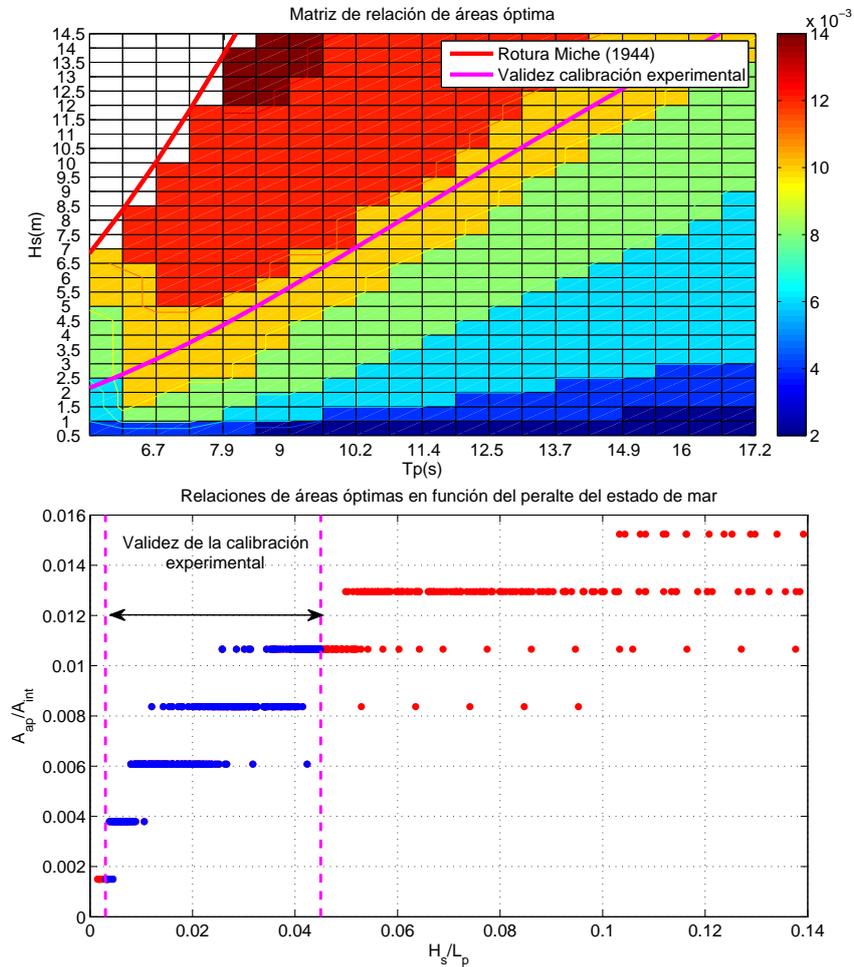


Figura 7.6: Relación óptima entre el área de la apertura y el área interior de la cámara para cada estado de mar considerado y curva en función del peralte de cada estado de mar.

Esto se debe a que el modelo en el dominio del tiempo considera las fuerzas de fricción hidrodinámicas experimentalmente calibradas, cuya importancia aumenta con el peralte del oleaje. Además, la figura correspondiente al modelado en el dominio del tiempo muestra una especie de quiebro en torno a las mayores alturas de ola, que se corresponde con la validez de la calibración experimental (ver par-

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

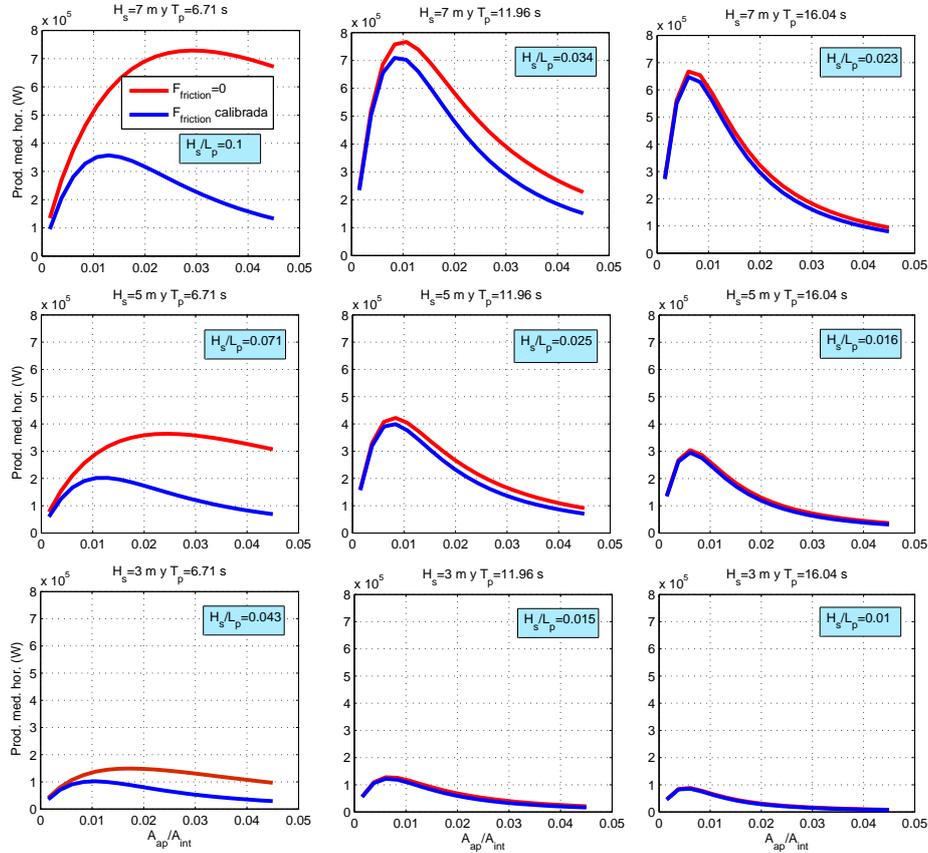


Figura 7.7: Curvas de producción con y sin fricción en función de la relación de áreas para la selección del amortiguamiento óptimo para distintos estados de mar.

te superior de la Figura 7.6). La matriz de producción mostrada en este apartado equivaldría a la correspondiente a Belmullet de la Figura 7.5, calculada ésta en el dominio de la frecuencia. Las diferencias entre ambas matrices se expresan en la Figura 7.9, también expresadas en forma de porcentajes calculados según se indica:

$$Dif(\%) = \frac{PM_{\omega} - PM_t}{PM_{\omega}} \cdot 100 \quad (7.1)$$

donde PM_{ω} se refiere a la producción anual media según el modelo en el dominio de la frecuencia y PM_t a la producción según el modelo en el dominio del tiempo.

7.2 Estimación de la producción en el dominio del tiempo

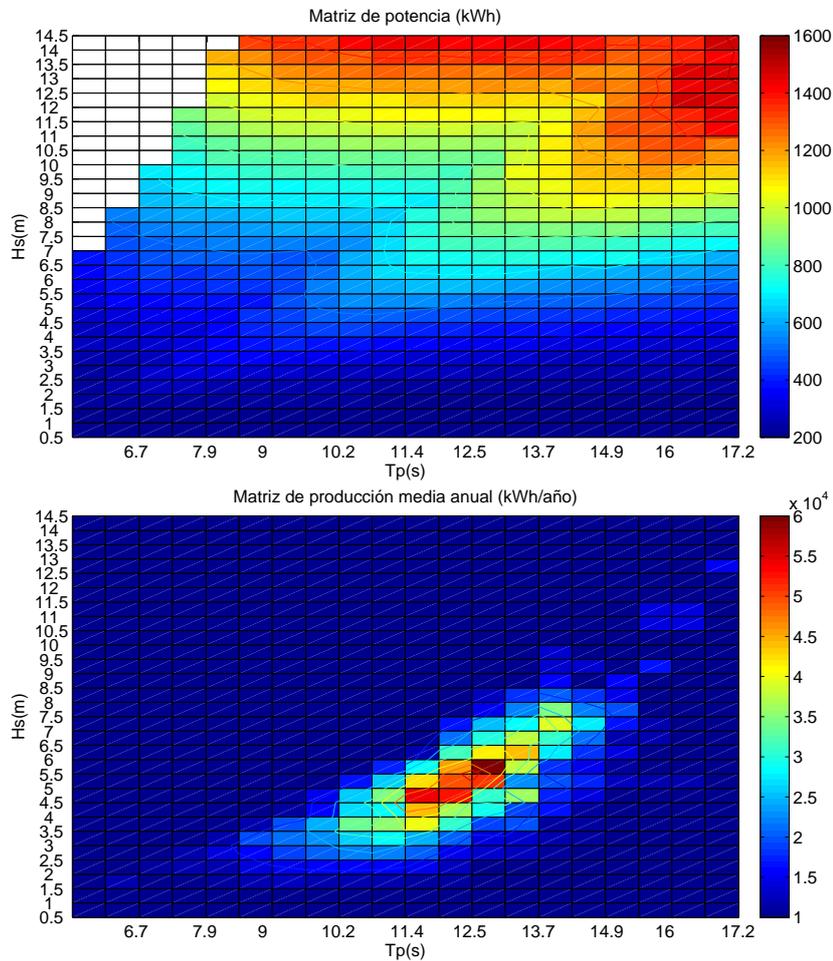


Figura 7.8: Matrices de potencia y de producción correspondientes a Belmullet, estimadas en el dominio del tiempo.

En la Figura 7.9 se observa que, en general, el modelo en el dominio de la frecuencia predice mayor producción que el modelo en el dominio del tiempo. Dicho resultado era de esperar, ya que en el dominio de la frecuencia no se consideran las pérdidas por fricción en la entrada sumergida de la cámara, las cuales fueron experimentalmente calibradas para el modelo en el dominio del tiempo. Se observa

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

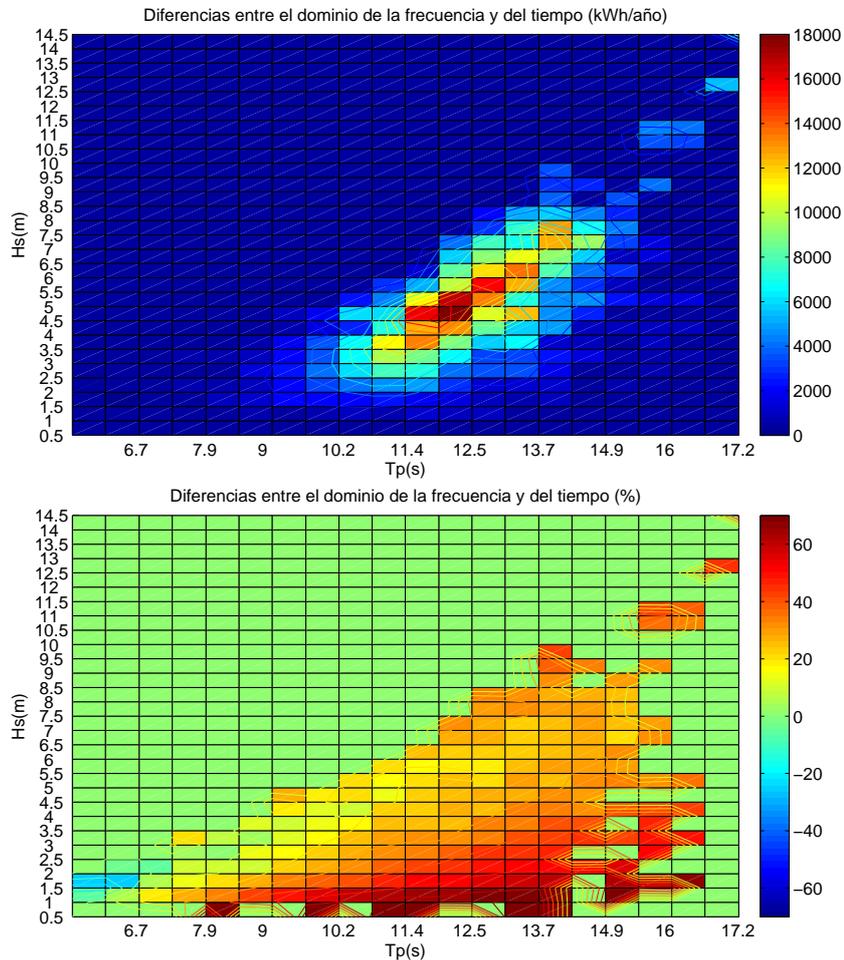


Figura 7.9: Diferencias entre la matriz de producción correspondiente a Belmullet en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

que en los estados de mar más productivos en Belmullet estas diferencias se sitúan en torno al 20%. La Tabla 7.2 recoge las producciones anuales estimadas según ambos modelos, diferenciándose en un 25%. Como observación final, hay que subrayar que la diferencia entre los tiempos computacionales de cada modelo es muy importante. Para estimar la matriz de producción en Belmullet en el dominio de la frecuencia se necesitó aproximadamente un minuto, y otros cinco minutos

7.2 Estimación de la producción en el dominio del tiempo

para la selección de las amortiguaciones óptimas para el rango de periodos. Sin embargo, para la matriz de producción en el dominio del tiempo se necesitaron aproximadamente 25 minutos para simular cada estado de mar, sumando un total de 9 horas para el barrido de aperturas correspondiente a cada estado de mar.

Modelo	Producción anual estimada (GWh/año)
Dominio de la frecuencia (ω)	2.700
Dominio del tiempo (t)	2.016

Tabla 7.2: Producciones anuales en Belmullet, estimadas mediante el modelo en el dominio de la frecuencia y del tiempo.

7.3 Análisis detallado las dinámicas en torno a la cámara: modelado con OpenFOAM

Una vez definido el diseño preliminar de un dispositivo y decidido su posible emplazamiento, el desarrollo de un WEC requiere un análisis más detallado de las dinámicas implicadas en el problema. Para ello, en la metodología propuesta en el Capítulo 3 se considera el uso del modelo CFD OpenFOAM. Dicho modelo ha sido descrito en la Sección 5.3 y validado en el Capítulo 6 para reproducir correctamente el funcionamiento hidrodinámico de una OWC, demostrando que las dinámicas en torno a la cámara pueden ser analizadas con detalle gracias a sus capacidades (Iturrioz *et al.*, 2014b). Este modelo, a diferencia de los utilizados en las Secciones 7.1 y 7.2, es capaz de considerar y modelar el dominio entero del canal. El refinamiento de la malla en la zona de la cámara posibilita la representación de las magnitudes de interés con alta resolución. Para analizar la variabilidad espacial de dichas magnitudes, se recogen en esta sección los resultados de uno de los casos utilizados para la validación del modelo. La geometría considerada es la ensayada experimentalmente y descrita en el Capítulo 4. Sin embargo, con el modelado CFD se resolverán las diferentes variables en cada celda del dominio, creando una base de datos mucho más extensa que la recogida por la instrumentación del laboratorio (ver Sección 4.4).

En primer lugar se estudia el escalado del problema de la OWC en OpenFOAM, con el objetivo de conocer la variación de los fenómenos al pasar de escala reducida a escala de prototipo. A continuación, se realiza el análisis de detalle propiamente dicho mediante el modelo OpenFOAM.

7.3.1 Análisis del escalado del problema con OpenFOAM

La presente Tesis se centra principalmente en los aspectos hidrodinámicos del problema de la OWC, pero no se debe olvidar que el objetivo último del desarrollo de dicha tecnología es el aprovechamiento de la energía del oleaje, es decir, la producción energética. El hecho de abordar el problema mediante herramientas físicas o numéricas a escala reducida implica simplificaciones y asunciones que repercuten inevitablemente en los resultados obtenidos. Sin embargo, es impor-

tante conocer y cuantificar en la medida de lo posible dichas desviaciones de la realidad. En el caso del modelado de la OWC, dicho cometido es especialmente complejo dado que el problema cuenta con sus componentes hidrodinámica y neumática.

Tal y como se ha indicado, las simulaciones realizadas en OpenFOAM no consideran la compresibilidad del aire. Con el objetivo de estudiar el escalado de la producción sin influencia de la compresibilidad, se han comparado los resultados de dos casos de oleaje regular ejecutados con OpenFOAM: un caso a escala de laboratorio y otro a escala prototipo, ver la Tabla 7.3, donde E_L se refiere a la escala de longitudes o geométrica. Los parámetros del oleaje simulado se escalan según la semejanza de Froude. El caso a escala de laboratorio también fue ensayado experimentalmente tal y como se indica en el Capítulo 4, y el modelo OpenFOAM fue validado para dicho caso, ver Figura 6.16 del Capítulo 6. Hay que señalar que el modelo pudo ser satisfactoriamente validado con datos de laboratorio a pesar de no considerar la compresibilidad del aire gracias a que el aire no es compresible a tan pequeña escala.

ESCALA	H(m)	T(s)	Apert. superior(m)
Laboratorio ($E_L = 30$)	0.08	1.3	0.05
Prototipo	2.40	7.12	1.50

Tabla 7.3: Casos de oleaje regular comparados para el análisis del escalado de la producción con OpenFOAM.

En mecánica de fluidos, los ensayos experimentales a escala reducida se basan en los principios de semejanza. Dichos principios se definen a partir de variables adimensionales que combinan distintas magnitudes del problema y se obtienen de las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos. Siguiendo estos principios es posible trasladar los resultados experimentales de un modelo a escala reducida a un escenario a escala real. Así, cuando se tienen dos escenarios gobernados por el mismo grupo de ecuaciones y las variables adimensionales relevantes se mantienen invariables entre ellos, mostrarán comportamientos similares. Sin embargo, dicha similitud no será perfecta, ya que no es posible cumplir

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

exactamente todas las condiciones que ello implicaría. Se trata pues de identificar cuáles son las variables adimensionales fundamentales en función del problema que se afronte. En ingeniería hidráulica, suele imponerse la semejanza de Froude, ya que en general las fuerzas viscosas pueden considerarse despreciables frente a las inerciales y de gravedad.

Al no haber influencia de la compresibilidad en ninguno de los dos casos (ya que el modelo no la considera), y en caso de que las fuerzas viscosas fueran despreciables en el problema, sería de esperar que el escalado de las magnitudes siguiera la semejanza de Froude, es decir, que el número de Froude se mantenga constante entre el modelo y el prototipo:

$$\frac{V_R}{\sqrt{g_R \cdot L_R}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m \cdot L_m}} \quad (7.2)$$

donde V representa la velocidad, L una longitud característica y g la aceleración de la gravedad. Los subíndices R y m representan magnitudes del escenario real y del modelo a escala respectivamente. A partir de dicha relación de semejanza, y asumiendo la aceleración de la gravedad y la densidad del aire constantes en los dos escenarios, la Tabla 7.4 recoge el escalado según Froude de las distintas magnitudes estudiadas.

Magnitud	Escala
Longitud	E_L
Área	E_L^2
Velocidad	$E_L^{1/2}$
Tiempo	$E_L^{1/2}$
Presión	E_L
Producción	$E_L^{7/2}$

Tabla 7.4: Escalado de las diferentes magnitudes según la semejanza de Froude.

La Figura 7.10 muestra la superficie libre interior de la cámara para los dos casos de la Tabla 7.3, la velocidad de dicha superficie libre, la oscilación de la presión del aire en la cámara y la producción neumática instantánea (Ecuación 5.32). Para simplificar la interpretación de dicha figura se han escalado según Froude

los resultados de la simulación a escala reducida y se han representado ambas series temporales a escala de prototipo. Es decir, una coincidencia perfecta entre las series temporales superpuestas equivaldría a un escalado exacto según Froude entre las simulaciones realizadas a escala reducida y escala de prototipo. Analizando los resultados de la figura, a rasgos generales se confirma razonablemente el escalado de Froude en términos de amplitud de las variables, pero se aprecian diferencias entre los patrones que presentan las series temporales. Estas diferencias son especialmente notables en el caso de la velocidad de la superficie libre interior, donde el caso a escala de prototipo muestra asimetrías entre crestas y senos y entre tramos de superficie libre inferior o superior al nivel de reposo. Por continuidad, dichas asimetrías se trasladan también a la velocidad del aire a través de la apertura, lo cual incide directamente en las irregularidades de los resultados de producción neumática instantánea mostrados. Sin embargo, atendiendo a términos de producción media, se obtiene que el escalado de la producción resultante es de $31,41^{7/2}$.

Son varias las causas que podrían dar lugar a las diferencias entre los resultados numéricos del caso a escala reducida y el caso a escala de prototipo. En primer lugar, tal y como se ha mencionado, el escalado de Froude es únicamente válido cuando las fuerzas viscosas son despreciables en el problema estudiado. El número de Reynolds (R_e) cuantifica la importancia de las fuerzas viscosas respecto a las inerciales, considerándose turbulentos aquellos casos en los que dicho número es alto. El número de Reynolds se define como sigue:

$$R_e = \frac{VD}{\gamma} \quad (7.3)$$

donde V es la velocidad del flujo, D una longitud significativa del proceso y γ la viscosidad cinemática del fluido. Calculando el número de Reynolds en los diferentes procesos que conforman el problema, se concluye que el flujo de aire a través de la apertura superior del caso a escala reducida se encuentra en gran parte del tiempo en régimen no turbulento ($R_e \approx 4000$ a escala de laboratorio para velocidades máximas y $R_e \approx 1000000$ a escala de prototipo), donde la semejanza de Froude no se cumple. La semejanza que permitiría el correcto escalado de dicho proceso sería la de Reynolds, la cual en el caso estudiado no se ha man-

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

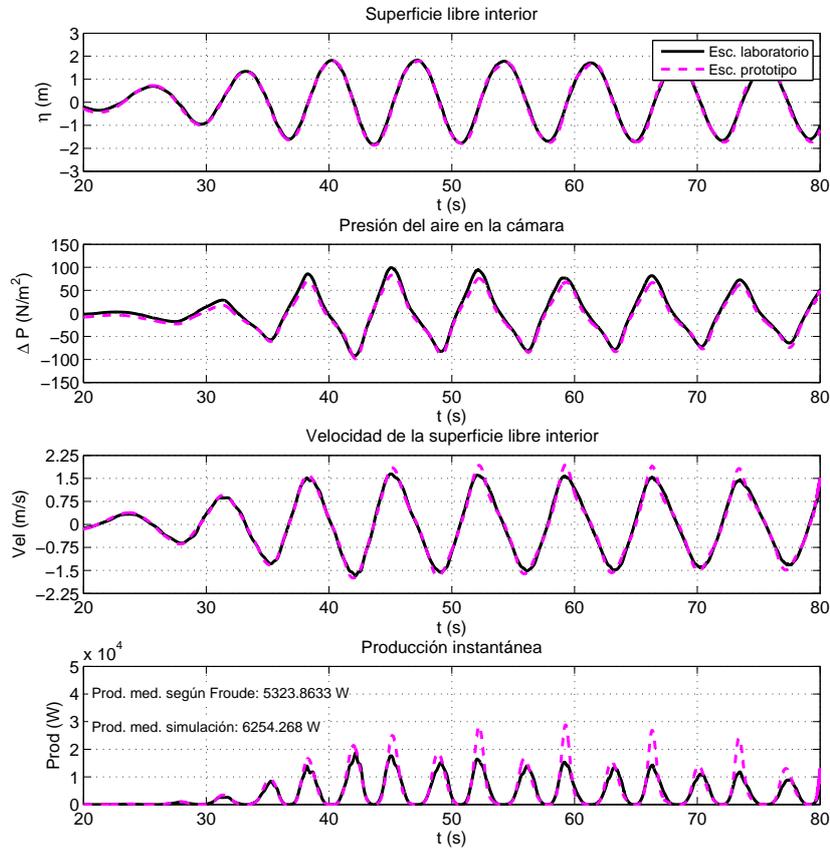


Figura 7.10: Resultados de los casos comparados para el análisis del escalado de la producción con OpenFOAM.

tenido. En el caso de la entrada sumergida de la cámara, el orden de magnitud del número de Reynolds queda alejado del límite del flujo turbulento para ambos casos ($Re \approx 100000$ para escala de laboratorio y $Re \approx 24000000$ a escala de prototipo). En segundo lugar, puede que los resultados obtenidos variaran utilizando otro modelo de turbulencia. El modelo de turbulencia utilizado ($k\omega - SST$) es un modelo de turbulencia indicado para flujos turbulentos totalmente desarrollados,

lo cual en el caso de la circulación del aire a través de la apertura superior no se cumple en parte del problema. Por último, el escalado de los vórtices que se forman en el aire confinado en la cámara es un problema muy complejo que necesitaría un profundo análisis para caracterizarlo. En consecuencia, puede afirmarse que los efectos de escala de los modelos de OWC tanto numéricos como físicos, constituyen una fuente de incertidumbre a tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados de los modelos reducidos.

7.3.2 Análisis detallado del problema mediante OpenFOAM

Teniendo presentes las incertidumbres concluidas del apartado anterior, en este apartado se analiza el problema de la OWC a escala reducida mostrando resultados de un caso simulado en laboratorio. El modelo OpenFOAM permite estudiar con gran nivel de detalle la hidrodinámica presente en el problema, ofreciendo la posibilidad de estudiar la influencia de parámetros de diseño como la forma del labio de entrada y la vorticidad en torno a ella o los patrones de la circulación del aire en la cámara. Con el objetivo de comprender las dinámicas en torno al dispositivo se considera un ciclo de presurización-despresurización de la cámara, es decir, un periodo del oleaje, T , y se analizan las instantáneas de distintos momentos del ciclo. El caso seleccionado para dicho estudio es el C28, ver Tabla 6.1. El análisis comienza en un instante de máxima presión positiva en la cámara y se representan después aquellos instantes considerados de interés. En la Figura 7.11 se indican los instantes representados en esta sección (ver puntos desde (a) hasta (i)). En dicha figura se representan la oscilación de la superficie libre interior de la cámara (η), la oscilación de la presión de aire interior (ΔP), la velocidad de la superficie libre interior ($d\eta/dt$) y la velocidad del aire a través de la apertura superior ($Vel_{Z_{topslot}}$) mediante series temporales. Como puede observarse, los instantes de presión máxima y mínima se corresponden con instantes de velocidad de la superficie libre máxima y mínima respectivamente, además de con los instantes de velocidad de aire máxima y mínima. Adicionalmente, los instantes de presión atmosférica en la cámara ($\Delta P = 0$) se corresponden con los instantes de parada de la superficie libre ($d\eta/dt = 0$). Es decir, la presión del aire de la cámara es mayor que la atmosférica cuando la superficie libre interior asciende y menor cuando ésta desciende, tal y como es de esperar de un modelo que considera el

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

aire incompresible.

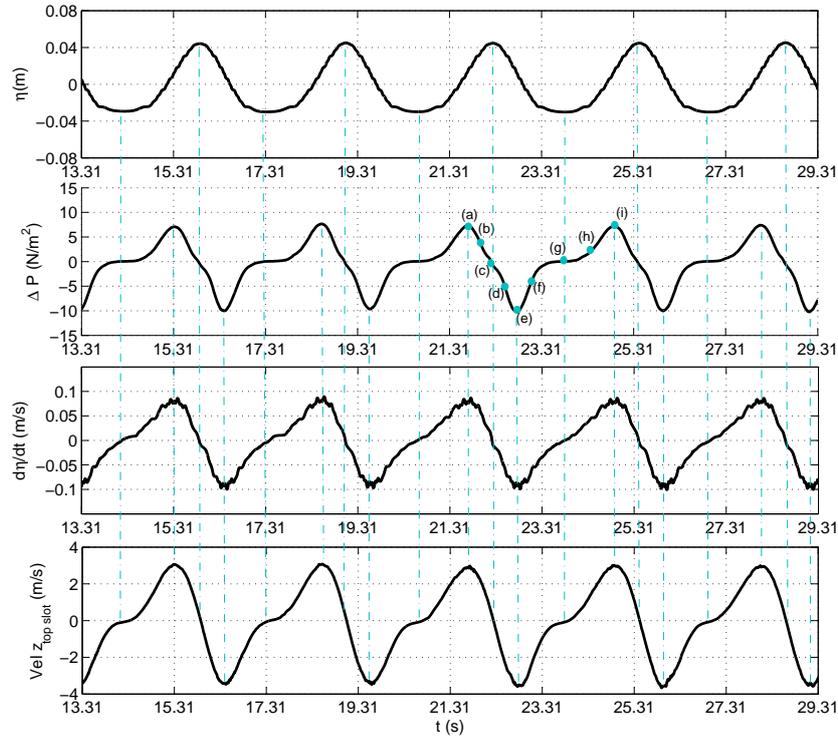


Figura 7.11: Series temporales de superficie libre en la cámara, oscilación de la presión del aire, velocidad de la superficie libre y velocidad del aire a través de la apertura superior. Caso C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s), apertura superior de 9 mm.

A continuación se comienza el análisis de las instantáneas correspondientes a los momentos indicados en la Figura 7.11. En primer lugar, la Figura 7.12 muestra la presión dinámica a lo largo del canal para los instantes de tiempo seleccionados. La incidencia del oleaje propagado a lo largo del canal en la cámara supone el motor del funcionamiento de la OWC, y en esta sección se relacionará el paso de la ola bajo la cámara con las dinámicas que tienen lugar en ella.

7.3 Análisis detallado con OpenFOAM

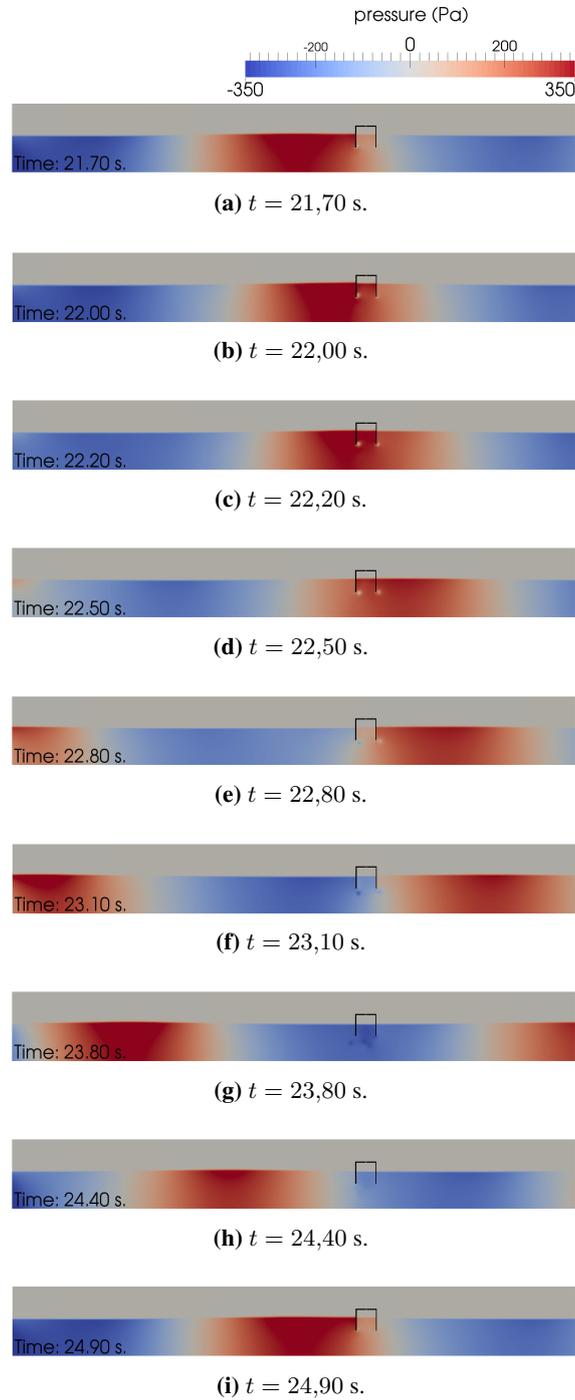


Figura 7.12: Presión dinámica (Pa) a lo largo del canal durante un ciclo de presurización-despresurización de la cámara. Caso C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s), apertura superior de 9 mm.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

Centrando el análisis en la cámara, se recogen distintas figuras que ilustran su funcionamiento durante el ciclo considerado. Por un lado, la Figura 7.13 representa la oscilación de la presión del aire en el interior de la cámara, es decir, lo que la presión en cada instante difiere del valor en reposo. Un valor positivo (color rojo) significa que la presión total en la cámara es superior al valor atmosférico (101325 Pa), y un valor negativo (color azul), que la presión interior es menor que la atmosférica. Por sencillez, el término *presión* se utilizará refiriéndose a dicha magnitud en esta sección. Por otro lado, la Figura 7.14 representa la velocidad vertical del aire en torno a la cámara, que representa el flujo que haría circular a la turbina de un dispositivo OWC real. Un valor positivo de dicha variable corresponde a un flujo ascendente (hacia la atmósfera), y un valor negativo, a un flujo descendente (hacia dentro de la cámara).

En la Figura 7.13 se observa que el valor máximo de la presión se alcanza en el primer instante representado ($t = 21,70 s$), lo que sucede justo antes de que llegue la cresta de la ola, ver Figura 7.12. A partir de ese instante, comienza el proceso de despresurización de la cámara, el cual puede ser dividido en dos partes. La primera, mientras la presión en la cámara se mantiene positiva, y la segunda, mientras la presión baja tomando valores negativos. Mientras la presión se mantiene positiva la cresta de la ola viaja bajo la cámara elevando la superficie libre interior, pero la presión comienza a caer hasta su valor atmosférico ($t = 22,20 s$). En ese instante la elevación de superficie libre interior de la cámara alcanza su máximo. Relacionándolo con la velocidad del aire, se observa que esta despresurización positiva sucede gracias a la circulación de aire de la cámara hacia la atmósfera, ver Figura 7.14. La velocidad de salida del aire alcanza su máximo durante esta parte del ciclo ($t = 22 s$). Volviendo sobre la Figura 7.13, se observa que la presión alcanza valores negativos en dicho punto ($t = 22,50 s$). La superficie libre interior comienza a descender y la presión continúa disminuyendo. Con la presión de la cámara menor que la atmosférica, el aire comienza a circular desde la atmósfera hacia el interior de la cámara. Cuando la superficie libre interior se encuentra al nivel de reposo (SWL) ($t = 22,80 s$), la presión en la cámara alcanza su mínimo. A partir de ahí, la presión comienza a aumentar, primero dentro de valores negativos, ya que la superficie libre interior continúa bajando pero el flujo

7.3 Análisis detallado con OpenFOAM

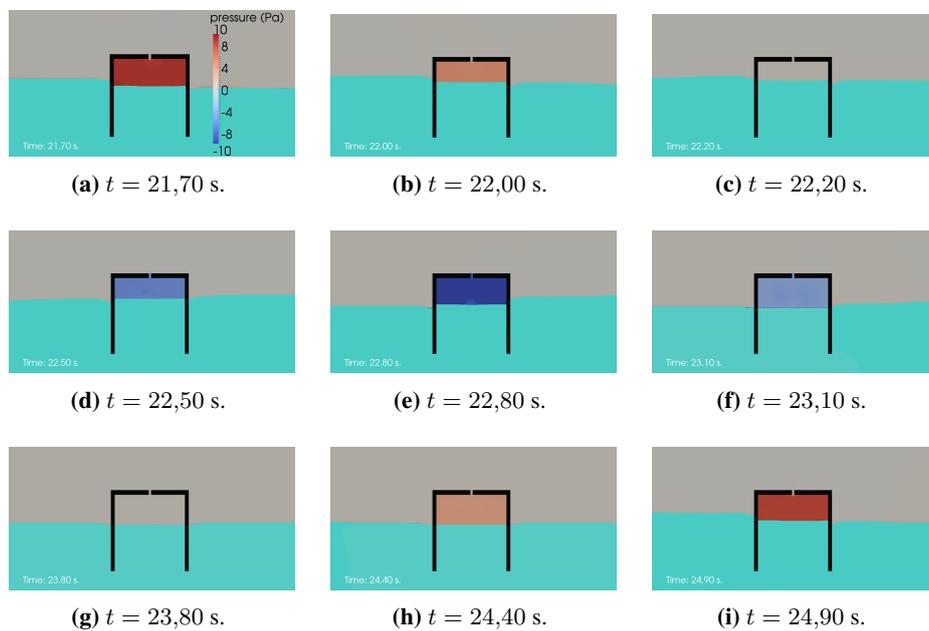


Figura 7.13: Oscilación de la presión (Pa) en la cámara durante un ciclo de presurización-despresurización de la cámara. Caso C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s), apertura superior de 9 mm.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

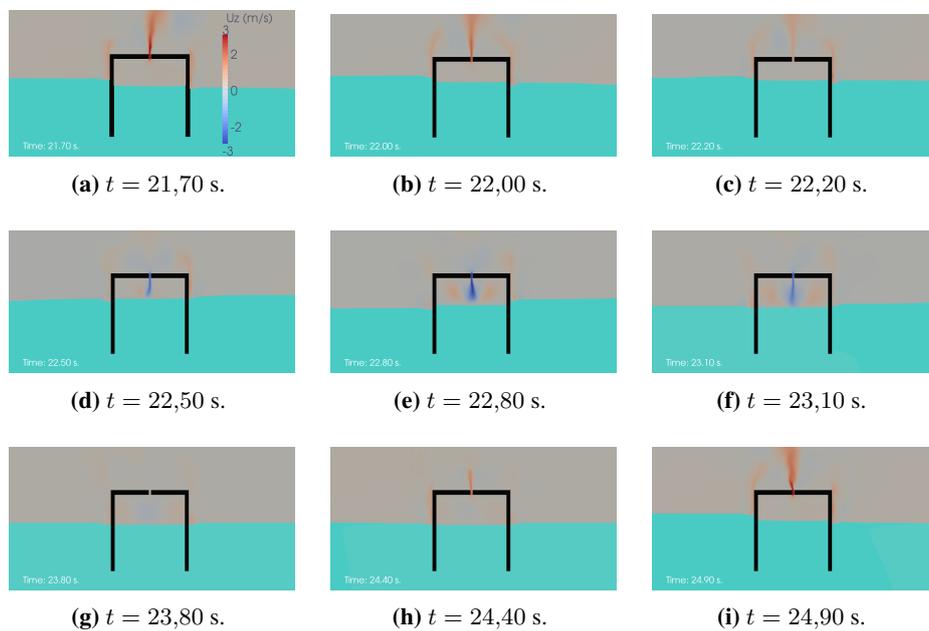


Figura 7.14: Velocidad vertical del aire (m/s) en la cámara durante un ciclo de pre-surrización-despresurización de la cámara. Caso C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s), apertura superior de 9 mm.

de aire hacia el interior es fuerte ($t = 23,10$ s). Cuando la superficie libre alcanza su valor mínimo, la presión en la cámara es igual a la atmosférica ($t = 23,80$ s). Después, la superficie libre comienza a ascender y la presión comienza a ser positiva, es decir, superior a la atmosférica. Como consecuencia, comienza el flujo de aire de la cámara hacia la atmósfera ($t = 24,40$ s). Cuando la presión en la cámara alcanza su máximo ($t = 24,90$ s), el estado inicial del ciclo analizado se repite ($t = 21,70$ s).

Del ciclo analizado puede concluirse una vez más que el aire circula hacia la atmósfera cuando la superficie libre asciende, y al revés cuando la superficie libre descende. Se aprecia también, tal y como se extraía de las series temporales de validación (ver Apartado 6.3.2.3), que el proceso de presurización es más largo que el proceso de despresurización.

A partir de las simulaciones de OpenFOAM puede calcularse también la vorticidad de los fluidos: agua y aire. En cuanto a la vorticidad en el agua, esta magnitud es de gran interés en el estudio de dispositivos OWC, sobre todo en torno a la entrada sumergida de la cámara. La vorticidad representa la rotación del vector velocidad en una distancia infinitesimal y matemáticamente se expresa como el rotacional del campo de velocidades (\vec{U}):

$$\overrightarrow{vort} = rot\vec{U} = \left[\frac{\partial U_z}{\partial y} - \frac{\partial U_y}{\partial z} \right] \vec{i} + \left[\frac{\partial U_x}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial x} \right] \vec{j} + \left[\frac{\partial U_y}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial y} \right] \vec{k} \quad (7.4)$$

Aprovechando las capacidades de OpenFOAM, las simulaciones numéricas realizadas con dicha herramienta fueron tridimensionales, modelando las tres dimensiones del canal experimental. Basándose en los resultados, tanto experimentales como numéricos, se confirmó la bidimensionalidad de los fenómenos presentes en el problema simulado, ver Apartado 6.3.2.2. En un flujo bidimensional donde la velocidad es independiente de la coordenada y (dirección transversal a la de propagación) o no tiene componente en y , el vector de vorticidad (\overrightarrow{vort}) es siempre paralelo al eje y y se puede entender por ello como una variable escalar:

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

$$vor_y = \frac{\partial U_x}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial x} \quad (7.5)$$

La Figura 7.15 muestra la vorticidad en la dirección y en torno a la cámara para los mismos instantes mostrados en las Figuras 7.13 y 7.14. La vorticidad es especialmente importante alrededor de la entrada y salida sumergidas de la cámara, ya que las paredes de la cámara imponen radicales cambios de dirección al flujo de agua que entra o sale de la cámara. Se observa que el campo de vorticidad cambia en magnitud y dirección durante el proceso de presurización-despresurización de la cámara. Mientras la cresta de la ola viaja bajo la cámara y la superficie libre interior sube (en torno a $t = 22,20$ s) se extienden zonas muy concentradas de vorticidad negativa tras las paredes en el sentido de propagación del oleaje. Sin embargo, cuando la cresta de la ola continúa hacia el final del canal y la superficie libre interior comienza a bajar (en torno a $t = 22,80$ s) se presentan áreas de vorticidad positiva. Estas áreas tienden a extenderse en sentido opuesto al de propagación y son menos intensas que las negativas comentadas anteriormente.

En términos generales, la vorticidad representa la rotación del fluido, y por consiguiente, las regiones de alta vorticidad están directamente relacionadas a una alta producción turbulenta, lo que da lugar a una pérdida de la energía del fluido. Por ello, la geometría de las paredes sumergidas de la cámara es un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de diseñar un dispositivo eficiente de OWC. El efecto de redondear los bordes de la entrada y salida sumergidas o la inclinación de las paredes son aspectos susceptibles de estudiar con este tipo de modelos.

La vorticidad del aire en torno a la cámara se representa en la Figura 7.16. Puede observarse que tanto el flujo de aire entrante como saliente generan vorticidad tanto en sentido horario como antihorario, mostrando un comportamiento cuasisimétrico respecto al eje vertical en el centro de la cámara. Las zonas de más intensa vorticidad se concentran en el flujo que atraviesa la apertura y en torno a las esquinas superiores de la cámara, donde la geometría de la cámara obliga al flujo de aire a cambiar radicalmente de dirección. De la comparación con la Figura 7.14 se extrae que las áreas e instantes de máxima vorticidad coinciden con velocidades de aire máximas. Los resultados mostrados ponen de manifiesto una

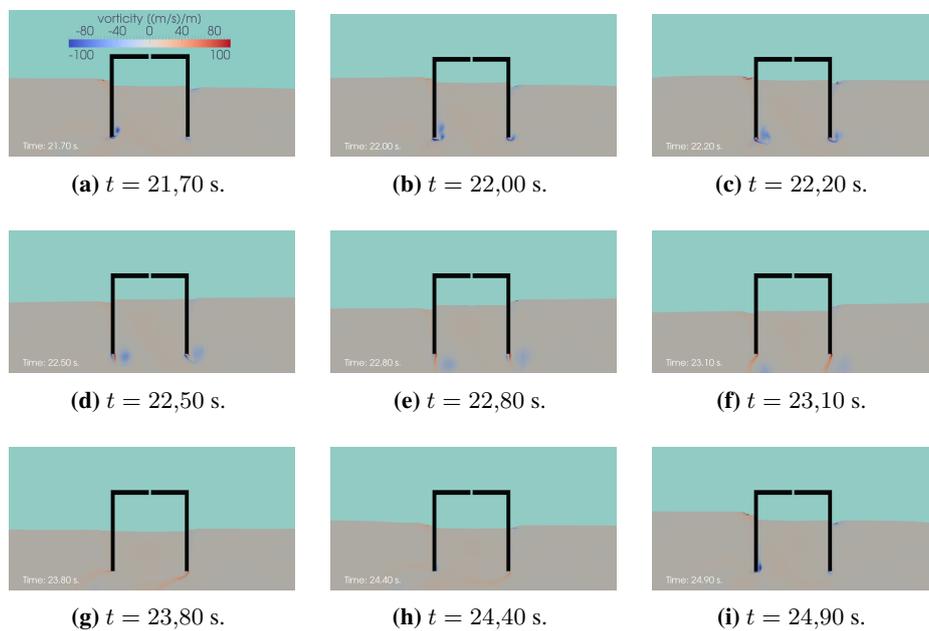


Figura 7.15: Vorticidad en el agua [(m/s)/m] durante un ciclo de presurización-despresurización de la cámara. Caso C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s), apertura superior de 9 mm.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

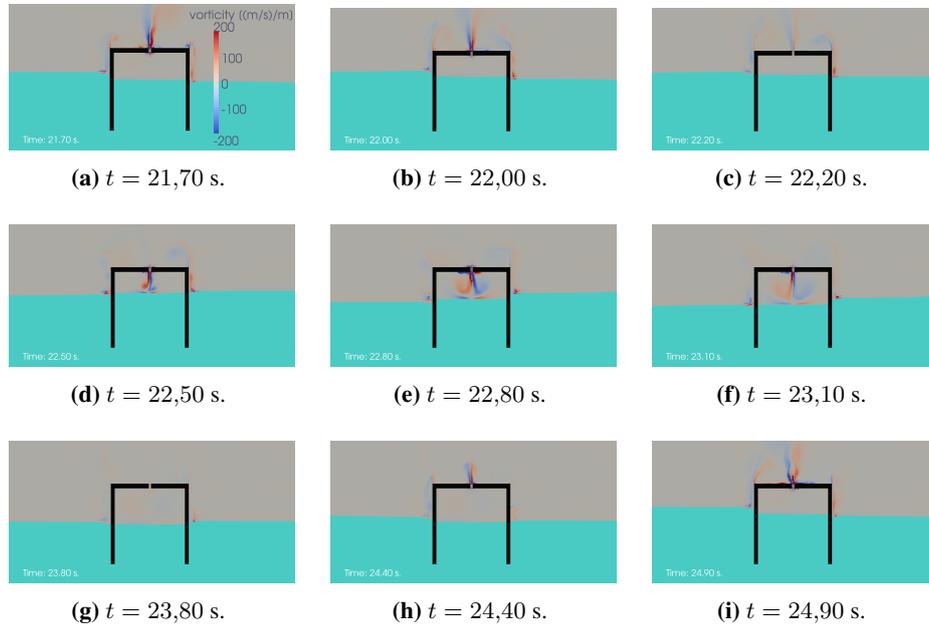


Figura 7.16: Vorticidad del aire [(m/s)/m] durante un ciclo de presurización-despresurización de la cámara. Caso C28 ($H=0.08$ m, $T=3.2$ s), apertura superior de 9 mm.

vez más la gran capacidad del modelo para simular flujos de aire en detalle.

7.4 Discusión de la metodología propuesta

En este capítulo se han llevado a cabo algunas aplicaciones de los modelos considerados en la presente Tesis como parte de la metodología propuesta para el análisis y desarrollo de dispositivos OWC. En dicha propuesta se ha identificado cada tipo de modelo con fases más tempranas o avanzadas del desarrollo, buscando el equilibrio entre la complejidad de cada modelo, y por tanto, coste computacional y temporal de las simulaciones, y los recursos disponibles en cada fase. Los usos que en este capítulo se han asignado a cada modelo forman parte de las etapas identificadas con su complejidad. En concreto, se ha utilizado el análisis en el dominio de la frecuencia para una primera estimación de la producción de un dispositivo en distintos emplazamientos, el modelo simplificado en el dominio del tiempo para una estimación de la producción más realista en la localización anteriormente seleccionada, y por último, el modelo CFD OpenFOAM para un análisis detallado de los campos de presión, velocidad y vorticidad alrededor de la cámara. Por último, se han abordado también los efectos de escala derivados de la simulación de la OWC a escala reducida. Este apartado está dirigido a sopesar la validez de la metodología propuesta. Además, a consecuencia de que el modelo más complejo utilizado (OpenFOAM) no considera la compresibilidad del aire, se ha evaluado la afeción de dicha simplificación al problema global estudiado y concretamente a la estimación de producción energética.

7.4.1 Influencia de la compresibilidad en la producción energética

Diversos autores han puesto de manifiesto la importancia de la compresibilidad del aire a escala de prototipo (Sarmiento & Falcão, 1985; Falcão & Justino, 1999) y la imposibilidad de analizarla en laboratorio empleando métodos convencionales. Muchos modelos numéricos ampliamente utilizados y validados en el ámbito de la ingeniería costera, como por ejemplo IH-2VOF y OpenFOAM, no consideran dicha compresibilidad, ya que su influencia es despreciable en la mayoría de los problemas de ingeniería de costas para los cuales han sido ideados. Sin embargo, Martin-rivas & Mei (2009a) demostraron que la compresibilidad del aire a escala real incrementa de manera significativa la producción de los dispositivos

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

OWC. Es decir, las estimaciones de producción calculadas sin considerar la compresibilidad del aire aportarían una aproximación conservadora de la producción, ya que infraestiman la energía extraída por el dispositivo.

Entendiendo el problema de la OWC en su conjunto, la compresibilidad del aire es un aspecto clave en el funcionamiento de la tecnología de OWC, que influye tanto a la parte hidrodinámica como a la conversión de energía de un fluido de trabajo (aire) en energía mecánica en la turbina. El hecho de determinar correctamente el flujo de aire que circula a través de la turbina es fundamental para avanzar en el diseño de técnicas de control y la optimización de las turbinas. En este apartado se pretende poner de manifiesto la influencia de la compresibilidad del aire en la producción energética, utilizando para ello el modelo simplificado en el dominio del tiempo (Sección 5.2) que ha sido validado en el Capítulo 6. Dicho modelo considera la compresibilidad adiabática del aire. La hipótesis de compresión adiabática es habitual cuando se calienta o enfría un gas por cambios de presión y asume que no existe intercambio de calor con el entorno. Esta hipótesis es válida en ausencia de condensación en el interior de la cámara, lo cual también se asume. Además, se han considerado los procesos de llenado y vaciado isoentrópicos. A consecuencia de la compresibilidad del aire, su densidad variará, y el escalado de las magnitudes estudiadas (superficie libre en la cámara, velocidad de ésta, presión del aire interior y producción energética) no se registrará por lo recogido en la Tabla 7.4.

Con la intención de corroborar lo señalado en el párrafo anterior, se simularon dos casos (uno a escala de laboratorio y otro a escala de prototipo) utilizando el modelo construido en el dominio del tiempo, el cual considera la compresibilidad del aire. La Tabla 7.5 muestra los casos simulados con el modelo simplificado en el dominio del tiempo.

7.4 Discusión de la metodología propuesta

ESCALA	H(m)	T(s)	Apert. superior(m)
Laboratorio ($E_L = 30$)	0.08	1.1	0.0045
Prototipo	2.40	6.03	0.135

Tabla 7.5: Casos regulares comparados para el escalado de la producción con el modelo simplificado en el dominio del tiempo.

La Figura 7.17 muestra los resultados para los dos casos indicados. Análogamente a lo explicado para la Figura 7.10, se han reescalado los resultados de la simulación a escala reducida para poder superponer las series e interpretarlas de forma sencilla. A la vista de los resultados, se confirma que la compresibilidad del aire afecta al escalado del problema, siendo las relaciones entre las amplitudes de cada variable distintas a las que dicta el escalado de la Tabla 7.4. Cuando se modela el problema sin tener en cuenta la compresibilidad del aire y las fuerzas viscosas son despreciables, basta con escalar la geometría del dominio y los parámetros del oleaje incidente según Froude para obtener dos problemas semejantes. Sin embargo, utilizando una herramienta numérica que considera la compresibilidad se obtienen factores de escala mayores que cuando no se considera el efecto de la compresibilidad. Consecuentemente, la producción neumática instantánea también se escala por un factor mayor, confirmando al aumento de la producción por efecto de la compresibilidad expuesto por [Martin-rivas & Mei \(2009a\)](#). La Tabla 7.6 recoge los factores de escalado observados para cada variable estudiada. Se observa que la producción a escala real aumenta aproximadamente en un 50 % considerando el efecto de la compresibilidad. La Figura 7.18 muestra la variación de la densidad del aire durante las simulaciones realizadas para el estudio del escalado del problema, asumiendo una densidad inicial a temperatura ambiente y presión atmosférica de $1,20 \text{ kg/m}^3$. Se confirma que la variación de la densidad del aire es despreciable a escala pequeña, mientras que es la principal responsable de que el escalado del problema a tamaño de prototipo no siga lo establecido en la Tabla 7.4.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

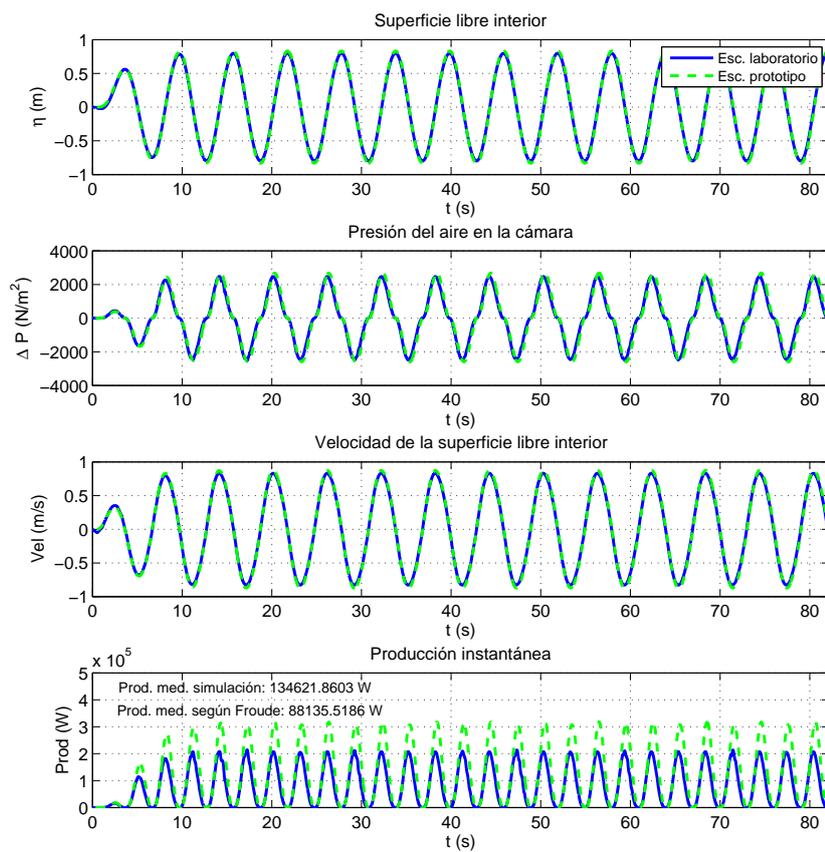


Figura 7.17: Resultados de los casos comparados para el escalado de la producción con el modelo simplificado en el dominio del tiempo.

Magnitud	Escala
Oscilación de la cámara	31,3
Velocidad	$33,6^{1/2}$
Presión	31,6
Producción	$34^{7/2}$

Tabla 7.6: Escalado observado de las diferentes magnitudes considerando la compresibilidad del aire.

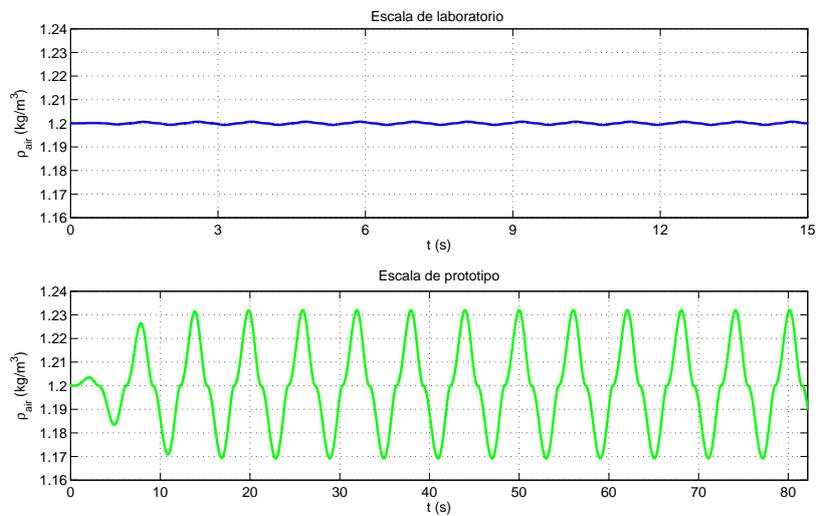


Figura 7.18: Variación de la densidad del aire durante las simulaciones realizadas con el modelo simplificado en el dominio del tiempo.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

7.4.2 Valoración de la metodología propuesta

Uno de los factores clave para valorar la adecuación de cada modelo al uso que se le ha asignado es el esfuerzo computacional requerido. Las diferencias entre las velocidades de cálculo de cada modelo son muy grandes, las cuales se recogen en la Tabla 7.7, en segundos simulados por hora de cálculo de núcleo (s. simulados/h. núcleo). En el caso de OpenFOAM, en dicha tabla se incluyen únicamente datos correspondientes a oleaje regular, ya que en el marco del presente trabajo no se han simulado oleajes irregulares con dicho modelo. Sin embargo, los datos con los que se cuenta bastan para reflejar el enorme coste computacional del modelo con respecto a los otros modelos empleados. Así, el modelo simplificado en el dominio del tiempo simula un caso de oleaje irregular 350 000 veces más rápido que OpenFOAM un caso regular. En lo que respecta al modelo más sencillo de todos, el modelo simplificado en el dominio de la frecuencia simula un oleaje irregular 15000 veces más rápido que el modelo simplificado en el dominio del tiempo.

Modelo	Tipo de oleaje	Velocidad de cálculo (s. simulados/h. núcleo)
Dom. de la frecuencia (ω)	Irregular	$131,544 \cdot 10^6$
Dom. del tiempo (t)	Irregular	8640
OpenFOAM	Regular	0.025

Tabla 7.7: Velocidades de simulación medias en función del tipo de modelo utilizado.

Teniendo en cuenta la tarea asignada a cada modelo según la metodología propuesta, se considera que en términos generales los tres modelos (dominio de la frecuencia, dominio del tiempo y OpenFOAM) han cumplido con su cometido satisfactoriamente.

En primer lugar, el modelo simplificado en el dominio de la frecuencia ha servido para una primera estimación del potencial de producción del dispositivo de OWC considerado en distintas localizaciones de una forma muy eficiente. Dicha eficiencia proporciona a los desarrolladores la flexibilidad necesaria en las etapas

más tempranas del desarrollo de WECs para ampliar el número de emplazamientos considerados o trabajar en el prediseño de los dispositivos con un coste computacional más que razonable. Sin embargo, no debe olvidarse que detrás de esa eficiencia de cálculo se encuentran las simplificaciones asumidas en la construcción del modelo. Entre ellas cabe destacar la no consideración de las no-linealidades del problema, así como un amortiguamiento por efecto del PTO muy simplificado y determinado para cada periodo en el dominio de la frecuencia. A pesar de ello, las distintas localizaciones se comparan en igualdad de condiciones, lo cual sigue aportando un criterio de comparación de emplazamientos válido para las primeras fases del desarrollo.

En segundo lugar, el modelo simplificado en el dominio del tiempo es capaz de considerar de forma más realista y compleja el problema de la OWC, evidentemente con mayor coste computacional. Las simplificaciones asumidas siguen siendo importantes, entre ellas la asunción del movimiento de tipo pistón y las respectivas al modelado del aire del interior de la cámara (compresión y expansión del aire adiabáticos, proceso de llenado isoentrópico). Sin embargo, dicho modelo ha sido experimentalmente validado basándose en resultados de laboratorio con resultados satisfactorios. Además, las fuerzas de fricción que provocan pérdidas en la entrada sumergida de la cámara fueron experimentalmente calibradas y validadas, así como el coeficiente de descarga a través de la apertura superior de la cámara. Por el contrario, algunos estados de mar considerados en el caso a escala real no se encuentran dentro del rango de validez comprobado experimentalmente. Como ventaja adicional, incluso respecto a modelos mucho más complejos y computacionalmente costosos, el modelo simplificado en el dominio del tiempo considera la compresibilidad del aire, el cual tal y como se ha indicado es un factor beneficioso para la optimización de la producción de los dispositivos OWC. Con todo ello, se considera que se obtiene una segunda estimación de la producción más realista en la localización seleccionada, que para los estados de mar más productivos se cuantifica 20 % menor que la estimada mediante el modelo simplificado en dominio de la frecuencia. Se concluye que las pérdidas debidas a la fricción superan al incremento de la producción debido a la consideración de la compresibilidad del aire.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y DISCUSIÓN

Por último, el modelo CFD OpenFOAM es el único capaz de proporcionar la información necesaria para un análisis detallado de las dinámicas en torno a la cámara. Sin embargo, el *solver* en el que se basa la herramienta considera el aire como un fluido incompresible, siendo la compresibilidad del aire importante a escala real. Por esta razón, y teniendo en cuenta también el enorme coste computacional y de almacenamiento que requiere cada simulación de OpenFOAM, se ha utilizado un caso a escala de laboratorio (validado experimentalmente) para mostrar la capacidad del modelo para obtener campos de velocidad, presión y vorticidad tanto en el agua como en el aire. En consecuencia, queda manifiesta la necesidad de un modelo CFD que modele el aire como un fluido compresible para abordar el problema de la OWC a escala de prototipo con garantías. Para estudiar el escalado del problema en OpenFOAM se han comparado los resultados correspondientes a dos casos de oleaje regular escalados según Froude, comprobando que al pasar a escala de prototipo se producen asimetrías entre crestas y senos de las series temporales de las variables. Dichas asimetrías pueden deberse al escalado de la vorticidad en el aire confinado en la cámara y a la respuesta no lineal del movimiento de la superficie libre de la cámara debido a la turbulencia. Asimismo, sería interesante el empleo de otro modelo de turbulencia distinto para comprobar en qué medida varían los resultados.

En resumen, como conclusión general del capítulo puede afirmarse que la metodología propuesta en el Capítulo 3 cumple satisfactoriamente con el objetivo propuesto, que no es otro que abordar las tareas correspondientes a cada fase del desarrollo WEC con la herramienta numérica más adecuada según el criterio de equilibrio entre coste computacional y precisión de los resultados necesario en cada momento. Por último, del estudio realizado se extrae la necesidad de modelar con herramientas CFD la compresibilidad del aire para estudiar en detalle las dinámicas en torno a la cámara a escala de prototipo.

Conclusiones

En la presente Tesis se ha abordado el problema del modelado numérico de la Columna de Agua Oscilante. Como primer paso, y con el objetivo de elaborar un diagnóstico del estado actual de la tecnología, se recopilaron las aportaciones más significativas realizadas a su desarrollo hasta la fecha (Capítulo 2). De dicha labor se extrajo que la OWC es una de las tecnologías de extracción de energía del oleaje más estudiadas desde hace décadas. Además, a la vista de trabajos recientes de expertos de distintos ámbitos, tanto académicos como de la industria, se constata que se trata de una de las tecnologías más prometedoras.

En el Capítulo 2 se han repasado los distintos prototipos de OWC que han llegado a ser probados en campo, comprobando que la mayoría de ellos no mostró el comportamiento esperado, dejando en evidencia la necesidad de profundizar en el conocimiento y comprensión del problema de la OWC. Dicha profundización puede llevarse a cabo mediante ensayos en modelo físico a escala reducida o herramientas numéricas. Análogamente a lo que sucede en todos los ámbitos de la ingeniería costera y offshore, ambas herramientas deben complementarse para abordar con garantías el problema.

8. CONCLUSIONES

En cuanto al modelado numérico del problema, se constató que las aproximaciones numéricas existentes son numerosas, las cuales difieren en la forma de modelar el problema y en su complejidad. Sin embargo, desde las fases más tempranas hasta las más avanzadas del desarrollo de un dispositivo OWC las tareas son muy diversas en cuanto a la precisión de resultados necesario y los recursos (temporales y económicos) asumibles para ello. En este sentido, se identificó un vacío metodológico en el estado del arte en cuanto a la asignación de distintas herramientas numéricas a cada tarea del desarrollo, para poder abordarlas de manera eficiente. En consecuencia, en la presente Tesis se ha presentado una propuesta metodológica para el modelado numérico optimizado de la OWC, buscando el equilibrio entre la precisión de los resultados requerido y el esfuerzo computacional asumible en cada fase del desarrollo (Capítulo 3). Una vez definida la propuesta metodológica, se han descrito y desarrollado las herramientas necesarias para aplicarlas en resolver tareas concretas comprendidas en el marco del desarrollo de un dispositivo OWC y verificar la validez de la propuesta metodológica realizada.

Tal y como se ha indicado, toda herramienta numérica ha de ser experimentalmente calibrada y validada para poder utilizarla de forma fiable. Sin embargo, la experimentación tanto a escala de prototipo como en modelo físico supone costes temporales y económicos que hacen totalmente necesario el modelado numérico. Por todo ello, resulta imprescindible abordar el problema mediante una metodología híbrida de trabajo que combine herramientas numéricas y modelado experimental, tal y como se ha hecho en la presente Tesis. En el Capítulo 2 se han recogido los principales dispositivos que han alcanzado la fase de experimentación a escala de prototipo, así como los principales trabajos a escala reducida en laboratorio. Sin embargo, los resultados recogidos de los prototipos ensayados en campo no están en general disponibles para su libre uso por parte de la comunidad científica. En cuanto a la experimentación en modelo físico, los datos disponibles tampoco abundan, y además, raramente recogen resultados simultáneos de las tres variables que se han considerado de interés en el estudio de la OWC: la superficie libre interior a la cámara, la presión del aire confinado y la velocidad de circulación del aire entre la cámara y la atmósfera abierta. Por todo ello, en el marco de la presente Tesis se realizó la campaña de modelado físico presentado en el Capítu-

lo 4, que sirvió de base experimental para calibrar y validar las herramientas que componen la propuesta metodológica presentada. En dicha campaña se ensayó un modelo fijo a escala reducida de OWC en un canal bidimensional sometido a oleaje regular e irregular, y se recogieron datos de las tres variables citadas. La resistencia impuesta por la turbina a la circulación del aire entre la cámara y la atmósfera se conceptualizó mediante una ranura en el techo de la cámara, lo cual permitió variar dicha resistencia cambiando el tamaño de la apertura.

La propuesta metodológica realizada combina herramientas de modelado simplificado en el dominio de la frecuencia, en el dominio del tiempo y herramientas de CFD. A continuación se recogen las conclusiones referentes a la adecuación de cada una de ellas a las tareas que se le han asignado:

- La **aproximación en el dominio de la frecuencia** se propone como alternativa más sencilla y rápida para abordar las **fases iniciales del desarrollo** de un dispositivo OWC. Su hipótesis de linealidad para todas las fuerzas actuantes y el modelado del PTO en el dominio de la frecuencia son sus principales simplificaciones, y las causas de su eficiencia de simulación. Para determinar el amortiguamiento debido al sistema de PTO impuesto al movimiento de la OWC, se procedió a seleccionar para cada frecuencia considerada aquel valor que maximizara la producción debida a un oleaje regular de dicha frecuencia. Para el cálculo de la producción de un estado de mar se ha amortiguado el movimiento con el PTO correspondiente a su periodo de pico. Las fuerzas de fricción en la entrada sumergida de la cámara son fuerzas intrínsecamente no lineales que no se tienen en cuenta en este modelado. Se ha tratado de calibrar dichas fuerzas linealizadas basándose en los resultados experimentales sin éxito. Este modelo se propone para su uso durante las etapas más tempranas (prediseño) del desarrollo, por ejemplo para abordar problemas como la comparación de la conveniencia de distintas posibles localizaciones o estimar una primera aproximación de la producción. En el presente trabajo se ha utilizado el modelo simplificado en el dominio de la frecuencia para seleccionar el emplazamiento más conveniente para un determinado dispositivo, lo cual se ha realizado con un coste computacional mínimo.

8. CONCLUSIONES

- Para **fases más avanzadas del desarrollo (diseño)** de un dispositivo OWC, donde el emplazamiento futuro ya esté determinado o las opciones de ubicación muy acotadas, se propone el uso de un **modelo simplificado en el dominio del tiempo**. El modelo propuesto en el dominio del tiempo modela de una forma simple, pero mucho más realista que el modelo en el dominio de la frecuencia, los complejos procesos que componen el problema de la OWC. Por un lado, considera las fuerzas no lineales como la fuerza de fricción sumergida, que ha podido ser experimentalmente calibrada y validada para oleaje irregular para un rango de peraltes de oleaje. Por otro lado, el aire del interior de la cámara, clave para la comprensión global del problema, se modela como fluido que interactúa con el movimiento de la cámara. El aire se considera un gas ideal y compresible, lo cual supone una importante propiedad que contribuye a optimizar la producción energética a escala de prototipo. El vaciado y llenado de aire de la cámara se han considerado isoentrópicos, lo cual es una hipótesis cuestionable durante el proceso de llenado de la cámara, ya que las pérdidas a través de la entrada hacen variar la entropía del aire. Sin embargo, basándose en trabajos de otros autores, se ha considerado que dicha asunción conducía a un buen compromiso entre la precisión del modelo y el coste computacional. Otra de las simplificaciones a subrayar es el modelado de la superficie libre interior de la cámara como un pistón. El coeficiente de descarga a través de la apertura superior fue también experimentalmente calibrado y validado para un rango de peraltes de oleaje.

La resistencia impuesta a la circulación del aire entre la cámara y la atmósfera se debe en un dispositivo real a un sistema de control de la fuerza ejercida por la PTO en el tiempo, que persigue la optimización de la producción energética. Por ello, en este modelo simplificado en el dominio del tiempo se ha seleccionado el amortiguamiento óptimo en función del estado de mar, en lugar de utilizar para cada estado de mar el amortiguamiento óptimo correspondiente a su periodo de pico, tal y como se hizo en el modelado simplificado en el dominio de la frecuencia. Siguiendo las indicaciones de

la propuesta metodológica presentada, se ha utilizado dicho modelo para estimar la producción en el emplazamiento seleccionado anteriormente mediante el modelo en el dominio de la frecuencia, obteniendo para los estados de mar de máxima producción estimaciones 20 % inferiores a los obtenidos en el dominio de la frecuencia. A la vista de los resultados, se concluye que las pérdidas por fricción calibradas superan a las ganancias en la producción debidas a la compresibilidad del aire a escala de prototipo. Se asume que se trata de una estimación más realista de la producción, pero los costes computacionales ascienden a valores que no se consideran asumibles en las etapas de prediseño (ver Tabla 7.7).

- Por último, para las **fases más avanzadas** del desarrollo, en las cuales se aborda el **diseño en detalle** de los dispositivos, en este trabajo se propone el uso de **herramientas de CFD**. Dichas herramientas consumen recursos que solo están justificados en el caso de que se requiera un nivel de detalle inalcanzable mediante métodos simplificados. Éste puede ser el caso del análisis de fenómenos turbulentos o vorticidad, que son importantes a la hora del diseño detallado de la geometría de los dispositivos. Las herramientas de CFD son imprescindibles para determinar, por ejemplo, el espesor de las paredes, la forma del labio sumergido o la geometría de la cámara de aire. En el presente trabajo se ha utilizado **el modelo OpenFOAM**, el cual resuelve las ecuaciones RANS para dos fluidos incompresibles (agua y aire). Dado que la experimentación en modelo físico se realizó a escala reducida, donde la compresibilidad del aire es despreciable, el modelo OpenFOAM pudo ser validado experimentalmente y los campos de presión, velocidad y vorticidad fueron analizados tanto en el agua como en el aire, quedando de manifiesto las capacidades del modelo, ligadas a su alto coste computacional (ver Tabla 7.7). Sin embargo, analizar el problema a escala de prototipo en detalle con herramientas de CFD teniendo en cuenta la influencia de la compresibilidad se considera una prioridad. La influencia de la compresibilidad ha quedado de manifiesto mediante simulaciones a escala de prototipo con el modelo simplificado en el dominio del tiempo, llegando a incrementar la producción aproximadamente en un 50 %.

8. CONCLUSIONES

En definitiva, en este trabajo se ha desarrollado una aplicación de la metodología propuesta y recogida en las Figuras 3.1 y 3.2 del Capítulo 3. Si se quisiera desarrollar un diseño hasta una etapa precomercial, se volvería a recorrer la línea de diseño (Figura 3.2) definida en dicho capítulo hasta alcanzar el nivel de detalle y conocimiento necesarios para poder abordar con garantías la construcción de un prototipo. En términos generales, se considera que el trabajo realizado cumple satisfactoriamente los objetivos perseguidos, ya que la metodología propuesta en el Capítulo 3 ha sido validada para cada una de las tareas definidas. Sin embargo, en el desarrollo de este trabajo se han identificado necesidades o puntos de interés no considerados en la metodología propuesta y que se recogen en el Capítulo 9 como futuras líneas de investigación.

Futuras líneas de trabajo

Como en todo trabajo de investigación, en el desarrollo de la presente Tesis se han dejado de lado aspectos importantes que podrían motivar individualmente extensos trabajos de investigación. Algunas de estas cuestiones se quedaron al margen del marco del trabajo desde su concepción, y el interés de otros ha quedado en relieve a raíz de resultados del trabajo desarrollado. A continuación se recogen los principales líneas futuras de trabajo identificadas:

- Estudio de la compresibilidad del aire a escala de prototipo:
 - Modelado con herramientas de CFD.
 - Técnicas experimentales para modelar sus efectos a escala reducida.
- Mejoras del modelo simplificado en el dominio del tiempo:
 - Estudio de las alternativas de aproximación o cálculo de la integral de convolución y la masa añadida en el infinito.
 - Modelado del flujo de aire entrante no isoentrópico.
 - Consideración de la deformación de la superficie libre interior de la cámara.

9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

- Transformación del problema para dispositivos de OWC multicámara:
 - Realización de ensayos experimentales multicámara.
 - Ampliación del modelo simplificado en el dominio del tiempo para considerar dispositivos multicámara. Validación experimental.
 - Modelado CFD de dispositivos multicámara. Validación experimental.
- Dispositivos OWC flotantes:
 - Modelado experimental de dispositivos flotantes.
 - Desarrollo del modelo simplificado en el dominio del tiempo para modelar los efectos del cuerpo flotante. Validación experimental.
 - Modelado de cuerpos flotantes en modelos CFD. Validación experimental.
- Modelado numérico de distintas turbinas de aire.
- Modelado numérico de las estrategias de control destinadas a la optimización de la producción.

Referencias

- ALCORN, R., HUNTER, S., SIGNORELLI, C., OBEYESEKERA, R., FINNIGAN, T. & DENNISS, T. 2005 Results of the testing of the Energetech wave energy plant at Port Kembla. *Energeth Report* . 5, 44
- ALVES, M. A. 2012 *Numerical simulation of the dynamics of point absorber wave energy converters using frequency and time domain approaches*. PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal. 12, 13, 57, 69, 115, 116, 125
- ALVES, M. A., COSTA, I. R., SARMENTO, A. J. N. A. & CHOZAS, J. A. 2010 Performance Evaluation of an Axysimmetric Floating OWCs. In *20th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2010)*. Beijing, China. 57
- ALVES, M. A. & SARMENTO, A. J. N. A. 2006 Non-Linear and Viscous Analysis of the Diffraction Flow in OWC Wave Power Plants. In *16th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2006)*. San Francisco, California, USA. 6, 58
- ALVES, M. A., SARMENTO, A. J. N. A., VICENTE, M. & GUERINEL, M. 2011 Implementation and verification of a time domain model to simulate the dynamic of OWCs. In *9th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2011)*. Southampton, UK. 13, 48, 125, 127
- DE ANDRÉS, A. D., GUANCHE, R., VIDAL, C. & LOSADA, I. J. 2014 Analysis of the geometric tunability of a WEC from a worldwide perspective. In *33rd*

REFERENCIAS

- International Conference on Ocean, Offshore and Arctic engineering (OMAE 2014)*. San Francisco, California, USA. [176](#)
- 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* **79**, 43 – 49. [121](#)
- BABARIT, A., HALS, J., MULIAWAN, M., KURNIAWAN, A., MOAN, T. & KROKSTAD, J. 2012 Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. *Renewable Energy* **41**, 44 – 63. [xix](#), [13](#), [52](#), [119](#), [174](#), [175](#)
- BAUDRY, V., BABARIT, A. & CLÉMENT, A. 2013 An overview of analytical, numerical and experimental methods for modelling Oscillating Water Columns. In *10th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2013)*. Aalborg, Denmark. [48](#)
- BONKE, K. & AMBLI, N. 1986 Prototype wave power stations in Norway. In *International Symposium of Utilization of Ocean Waves - Wave to Energy Conversion*, pp. 34–45. ASCE, La Jolla, CA, USA. [5](#), [39](#)
- BRITO-MELO, A., GATO, L. M. C. & SARMENTO, A. J. N. A. 2002 Analysis of Wells turbine design parameters by numerical simulation of the OWC performance. *Ocean Engineering* **29**, 1463–1477. [70](#)
- BRITO-MELO, A., HOFMANN, T., SARMENTO, A. J. N. A., CLÉMENT, A. H. & DELHOMMEAU, G. 2001 Numerical modeling of OWC-shoreline devices including the effect of surrounding coastline and non-flat bottom. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* **11** (2), 147–154. [71](#)
- BRITO-MELO, A., SARMENTO, A. J. N. A., CLÉMENT, A. H. & DELHOMMEAU, G. 1998 Hydrodynamic Analysis of Geometrical Design Parameters of Oscillating Water Columns. In *3rd European Wave Energy Conference*, pp. 23–30. Patras, Greece. [71](#)
- BRITO-MELO, A., SARMENTO, A. J. N. A., CLÉMENT, A. H. & DELHOMMEAU, G. 1999 3D boundary element code for the analysis of OWC wave-power plants. In *9th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Brest, France. [56](#)

- CLÉMENT, A. H. 1999 Using differential properties of the green function in sea-keeping computational codes. In *7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, pp. 1–15. 60
- CRUZ, J. 2008 *Ocean Wave energy. Current Status and Future Perspectives*. Springer. 5, 49, 69
- CUMMINS, W. E. 1962 The impulse response function and ship motions. *Schiffs-technik* **9**, 101–109. 7, 13, 59, 119, 123, 126
- DE BACKER, G. 2007 *Hydrodynamic design optimization of wave energy converters consisting of heaving point absorbers*. PhD Thesis, Ghent University, Belgium. 6, 50, 58, 63, 132
- DNV 2008 *SESAM Users Manual, WADAM*. 12, 113
- DTI 2005 *Nearshore floating oscillating water column: prototype development and evaluation*. Rep URN 05/581. 45
- DUCLOS, G., CLÉMENT, A. H. & CHATRY, G. 2001 Absorption of Outgoing waves in a Numerical Wave Tank Using a Self-Adaptive Boundary Condition. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* **11** (3), 168–175. 61
- EL MARJANI, A., CASTRO, F., RODRÍGUEZ, M. A. & PARRA, M. T. 2008 Numerical modelling in wave energy conversion systems. *Energy* **33**, 1246–1253. 58
- EVANS, D. V. 1978 The oscillating water column wave energy device. *J. Inst. Maths Applics* **22**, 423–499. 6, 50, 70
- EVANS, D. V. 1982 Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions. *J. Inst. Mech.* **114**, 481–499. 6, 50, 55, 56
- EVANS, D. V. & PORTER, R. 1995 Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device. *Applied Ocean Research* **17**, 155–164. 6, 50, 69
- FALCÃO, A. F. O. 2010 Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **14**, 899–918. 4, 5, 31, 41, 45

REFERENCIAS

- FALCÃO, A. F. O. & GATO, L. M. C. 2012 Air turbines. In *Comprehensive Renewable Energy* (ed. A. Sayigh), pp. 111–149. Elsevier, Oxford. [87](#)
- FALCÃO, A. F. O. & JUSTINO, P. A. P. 1999 OWC wave energy devices with air flow control. *Ocean Engineering* **26**, 1275–1295. [8](#), [68](#), [69](#), [70](#), [71](#), [128](#), [163](#), [201](#)
- FALCÃO, A. F. O. & SARMENTO, A. J. N. A. 1980 Wave generation by a periodic surface pressure and its applications in wave-energy extraction. In *International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. Toronto, Canada. [57](#)
- FALNES, J. 2002 *Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear interactions including wave energy extraction*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. [116](#)
- FOLLEY, M. & WHITTAKER, T. J. 2002 Identification of non-linear flow characteristics of the LIMPET shoreline OWC. In *12th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2002)*. Kyushu, Japan. [48](#)
- GARCÍA, N., LARA, J. L. & LOSADA, I. J. 2004 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters. *Coastal Engineering* **51** (10), 991 – 1020. [133](#)
- GARRETT, C. 1970 Bottomless harbours. *J. Fluid Mechanics* **43** (3), 433–449. [57](#)
- GOMES, R. P. F., HENRIQUES, J. C. C., GATO, L. M. C. & FALCÃO, A. F. O. 2011 Design of a Floating Oscillating Water Column for Wave Energy Conversion. In *9th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*. Southampton, UK. [43](#), [57](#)
- GOMES, R. P. F., HENRIQUES, J. C. C., GATO, L. M. C. & FALCÃO, A. F. O. 2012 Testing of a small-scale floating OWC model in a wave flume. In *4th International Conference on Ocean Energy (ICOE 2012)*. Dublin, Ireland. [47](#)
- GUANCHE, R., LOSADA, I. J. & LARA, J. L. 2009 Numerical modelling of coastal structures stability. *Coastal Engineering* **56**, 543–558. [133](#)

- HEATH, T., WHITTAKER, T. J. T. & BOAKE, C. B. 2000 The design, construction, and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay, Scotland). In *4th European Wave Energy Conference*, pp. 49–55. [5](#), [40](#)
- HIGUERA, P., LARA, J. L. & LOSADA, I. J. 2013a Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM. *Coastal Engineering* **71**, 102 – 118. [15](#), [135](#), [136](#), [155](#)
- HIGUERA, P., LARA, J. L. & LOSADA, I. J. 2013b Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM. *Coastal Engineering* **71**, 119 – 134. [6](#), [15](#), [135](#), [136](#), [155](#)
- HIGUERA, P., LARA, J. L. & LOSADA, I. J. 2014a Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. Part I: Formulation and validation. *Coastal Engineering* **83**, 259 – 270. [15](#), [136](#)
- HIGUERA, P., LARA, J. L. & LOSADA, I. J. 2014b Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. Part II: Applications. *Coastal Engineering* **83**, 243 – 258. [15](#), [136](#)
- HIRT, C. W. & NICHOLS, B. 1981 Volume of Fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics* **39**, 201–225. [15](#), [134](#), [135](#)
- HOLMES, B., HURLEY, J., LEWIS, A., SARMENTO, A. J. N. A., FALCÃO, A. F. O. & BRITO-MELO, A. 1996 1:25 Scale Testing of the Azores Pilot Plant. In *2nd European Wave Energy Symposium*, pp. 148–155. [5](#), [40](#)
- HONG, D. C. 1991 Amplification of waves between two arbitrary shape plates. *J. Ships Ocean Engin.* **6**, 41–50. [58](#)
- HONG, D. C., HONG, S. Y. & HONG, S. W. 2004 Numerical study of the motions and drift force of a floating OWC device. *Ocean engineering* **31**, 139–164. [58](#)
- HSU, T. J., SAKAKIYAMA, T. & LIU, P. L. F. 2002 A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. *Coastal Engineering* **46**, 25–50. [133](#)

REFERENCIAS

- IEA 2013 *World Energy Outlook*. International Energy Agency (IEA). 30
- IKOMA, T. & OSAWA, H. 2011 Expected values of wave power absorption around the Japanese islands using OWC types with projecting walls. In *30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2011)*. Rotterdam, The Netherlands. 48
- ITURRIOZ, A., GUANCHE, R., ARMESTO, J. A., ALVES, M. A., VIDAL, C. & LOSADA, I. J. 2012 Building a numerical model for OWC analysis. In *Poster Session 1 of the 4th International Conference on Ocean Energy (ICOE 2012)*. Dublin, Ireland. 179
- ITURRIOZ, A., GUANCHE, R., ARMESTO, J. A., ALVES, M. A., VIDAL, C. & LOSADA, I. J. 2014a Time-domain modeling of a fixed detached oscillating water column towards a floating multi-chamber device. *Ocean Engineering* **76**, 65–74. xvii, 13, 52, 120, 122, 124
- ITURRIOZ, A., GUANCHE, R., ARMESTO, J. A., VIDAL, C. & LOSADA, I. J. 2013a Experimental and numerical development of floating multi-chamber OWC device. In *10th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2013)*. Aalborg, Denmark. 155
- ITURRIOZ, A., GUANCHE, R., ARMESTO, J. A., VIDAL, C. & LOSADA, I. J. 2013b Experimentally calibrated time-domain numerical model for a fixed OWC device. In *32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic engineering (OMAE 2013)*. Nantes, France. 13, 120
- ITURRIOZ, A., GUANCHE, R., LARA, J. L., VIDAL, C. & LOSADA, I. J. 2014b OpenFOAM experimental validation for Oscillating Water Column modelling. *Ocean Engineering (in review)*. 186
- JOSSET, C. & CLÉMENT, A. 2007 A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants. *Renewable energy* **32**, 1379–1402. 70
- JOSSET, C., DUCLOS, G. & CLÉMENT, A. H. 2002 A Coupled Rankine/Kelvin BEM 3D Solver for the Time-Domain Simulation of OWC Wave Power

- Plants. In *12th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISO-PE 2002)*. Kyushu, Japan. 70
- KESTIN, J. 1966 *A course in Thermodynamics*. Blaisdell Pub. Co. 68
- KOO, W. & KIM, M.-H. 2010 Nonlinear time-domain simulation of a land-based oscillating water column. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* **136** (5), 276–285. 71
- KORSMEYER, F., BINGHAM, H. & NEWMAN, J. 1999 *TiMIT-A Panel Method for Transient Wave-Body Interactions*. Research Laboratory of Electronics, MIT. 60
- LARA, J. L., GARCÍA, N. & LOSADA, I. J. 2006 RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering* **53** (5-6), 395 – 417. 133, 135
- LARA, J. L., LOSADA, I. J. & GUANCHE, R. 2008 Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model. *Ocean Engineering* **35** (13), 1388 – 1400. 133
- LARA, J. L., RUJU, A. & LOSADA, I. J. 2011 Reynolds averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proceedings of the Royal Society A* 467 pp. 1215–1242. 14, 132, 133, 135
- LEE, C. H., NEWMAN, J. & NIELSEN, F. 1996 Wave interactions with an oscillating water column. In *6th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Los Angeles, USA. 56
- LIN, P. Z. & LIU, P. L. F. 1999 Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* **125**, 207–215. 135
- LIU, P. L. F., LIN, P. Z., CHANG, K. A. & SAKAKIYAMA, T. 1999 Numerical modelling of wave interaction with porous structures. *Journal of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE* **125** (6), 322–330. 58, 133

REFERENCIAS

- LIU, Z., HYUN, B. S. & HONG, K. Y. 2008 Application of numerical wave tank to OWC air chamber for wave energy conversion. In *18th Int. Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 350–356. Vancouver, Canada. [58](#), [71](#)
- LOPES, M. F. P., HALS, J., GOMES, R. P. F., MOAN, T., GATO, L. M. C. & FALCÃO, A. F. O. 2009 Experimental and numerical investigation of non-predictive phase-control strategies for a point-absorbing wave energy converter. *Ocean Engineering* **36**, 386 – 402. [5](#), [47](#)
- LOPES, M. F. P., RICCI, P., GATO, L. M. C. & FALCÃO, A. F. O. 2007 Experimental and numerical analysis of the oscillating water column inside a surface piercing vertical cylinder in regular waves. In *7th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2007)*. Porto, Portugal. [48](#)
- LOSADA, I. J., LARA, J. L., CHRISTENSEN, E. D. & GARCÍA, N. 2005 Modelling of velocity and turbulence fields around and within low-crested rubble-mound breakwaters. *Coastal Engineering* **52** (10-11), 887 – 913. [133](#)
- LOSADA, I. J., LARA, J. L., GUANCHE, R. & GONZÁLEZ-ONDINA, J. M. 2008 Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering* **55** (1), 47 – 62. [132](#), [133](#), [148](#)
- MALMO, O. & REITAN, A. 1986 Wave power absorption by oscillating water column in a reflecting wall. *Applied Ocean Research* **8**, 42–48. [48](#)
- MANSARD, E. P. D. & FUNKE, E. R. 1980 The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. In *17th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 157–172. [xxi](#), [11](#), [86](#), [90](#)
- MARTIN-RIVAS, H. & MEI, C. C. 2009a Wave power extraction from an oscillating water column at the tip of a breakwater. *Journal of Fluid Mechanics* **626**, 395–414. [8](#), [56](#), [57](#), [67](#), [201](#), [203](#)
- MARTIN-RIVAS, H. & MEI, C. C. 2009b Wave power extraction from an oscillating water column along a straight coast. *Ocean Engineering* **36** (6–7), 426–433. [56](#)
- MASUDA, Y. 1971 Wave-activated generator. Bordeaux, France. [5](#), [43](#)

- MASUDA, Y. 1979 Experimental full-scale results of wave power machine Kai-meï in 1978. In *First Symposium in Wave Energy Utilization*, pp. 349–363. Gothenburg, Sweden. [5](#), [43](#)
- MASUDA, Y., KIMURA, H., LIANG, X., GAO, X., MOGENSEN, R. M. & ANDERSEN, T. 1995 Regarding BBDB wave power generation plant. In *2nd European Wave Power Conference*, pp. 69–76. [5](#), [45](#)
- MASUDA, Y. & MCCORMICK, M. E. 1987 Experiences in pneumatic wave energy conversion in Japan. In *Utilization of ocean waves - wave to energy conversion* (ed. M. E. McCormick & Y. C. Kim), pp. 1–33. ASCE, New York. [5](#), [44](#)
- MASUDA, Y., XIANGUANG, L. & XIANGFAN, G. 1993 High performance of cylinder float backward bent duct buoy (BBDB) and its use in European seas. In *First European Wave Energy Symposium*, pp. 323–337. [5](#), [45](#)
- MENDES, A. C. & MONTEIRO, W. M. L. 2007 Performance analysis of OWC energy converter in non linear waves. In *7th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2007)*. Porto, Portugal. [48](#)
- MÉNDEZ, F. J., LOSADA, I. J. & LOSADA, M. A. 2001 Wave-induced mean magnitudes in permeable submerged breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* **127**, 7–15. [135](#)
- MORRIS-THOMAS, M. T., IRVIN, R. J. & THIAGARAJAN, K. P. 2007 An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the ASME* **129**, 273 – 278. [47](#)
- NAGATA, S., TOYOTA, K., IMAI, Y., SETOGUCHI, T. & MAMUN, M. A. H. 2011 Numerical Analysis on Primary Conversion Efficiency of Floating OWC-type Wave Energy Converter. In *21st International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2011)*. Maui, Hawaii, USA. [5](#), [44](#)
- NUNES, G., VALÉRIO, D., BEIRÃO, P. & DA COSTA, J. S. 2010 Modelling and control of a wave energy converter. *IFAC Proceedings Volumes* **1**, 279–284. [71](#)

REFERENCIAS

- NUNES, G., VALÉRIO, D., BEIRÃO, P. & DA COSTA, J. S. 2011 Modelling and control of a wave energy converter. *Renewable Energy* **36** (7), 1913–1921. [8](#), [68](#)
- OGILVIE, T. 1964 Recent progress towards the understanding and prediction of ship motions. In *Sixth Symposium on Naval Hydrodynamics*, pp. 3–79. [123](#)
- OHNEDA, H., IGARASHI, S., SHINBO, O., SEKIHARA, S. & KUBOTA, H. 1991 Construction procedure of a wave power extracting caisson breakwater. In *3rd Symposium on Ocean Energy Utilization*, pp. 171–179. [5](#), [39](#)
- OpenCFD Ltd 2014 OpenFOAM homepage. WWW page. <http://www.openfoam.org>. [15](#), [135](#)
- PERDIGÃO, J. & SARMENTO, A. J. N. A. 2003 Overall-efficiency optimisation in OWC devices. *Appl. Ocean Resear.* **25**, 157–166. [70](#)
- PÉREZ, T. & FOSSEN, T. 2008 Time-domain vs. frequency-domain identification of parametric radiation force models for marine structures at zero speed. *Modelling, Identification and Control* **29** (1), 1–19. [8](#), [64](#)
- PÉREZ, T. & FOSSEN, T. I. 2011 Practical aspects of frequency-domain identification of dynamic models of marine structures from hydrodynamic data. *Ocean Engineering* **38** (2–3), 426–435. [13](#), [65](#), [124](#)
- PÉREZ, T. & FOSSEN, T. I. 2009 A Matlab toolbox for parametric identification of radiation-force models of ships and offshore structures. *Modelling, Identification and Control* **30**, 1–15. [16](#), [122](#), [144](#)
- PRONY, B. R. D. 1795 Essai expérimental et analytique sur les lois de la dilatabilité des fluides elastiques et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alcool à différentes températures. *J. École Polytechnique* **1** (2), 24–76. [7](#), [61](#), [63](#)
- RAM, K., FAIZAL, M., AHMED, M. R. & LEE, Y. H. 2010 Experimental studies on the flow characteristics in an oscillating water column device. *Journal of Mechanical Science and Technology* **24**, 2043–2050. [47](#)

- RAVINDRAM, M. & KOOLA, P. M. 1991 Energy from the sea waves - the Indian wave energy program. *Current Sci* **60**, 676–680. [5](#), [41](#)
- RICCI, P. & ALVES, M. A. 2006 Optimisation of the geometry of wave energy converters. In *International Conference on Ocean Energy*. Bremerhaven, Germany. [56](#)
- RICCI, P., FALCÃO, A. F. O., SAULNIER, J. B. & PONTES, M. T. 2008 Time-domain models and wave energy converters performance assessment. In *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, pp. 699–708. Estoril, Portugal. [61](#)
- ROSS, D. 1979 Energy from the waves. *Pergamon Press* . [5](#), [31](#)
- RUJU, A., LARA, J. L. & LOSADA, I. J. 2012 Radiation stress and low-frequency energy balance within the surf zone: A numerical approach. *Coastal Engineering* **68**, 44–55. [133](#)
- SARMENTO, A. J. N. A. 1992 Wave flume experiments on two-dimensional oscillating water column wave energy devices. *Experiments in Fluids* **12**, 286 – 292. [47](#)
- SARMENTO, A. J. N. A. & FALCÃO, A. F. O. 1985 Wave generation by an oscillating surface-pressure and its application in wave-energy extraction. *J. Fluid Mech.* **150**, 467–485. [6](#), [8](#), [50](#), [57](#), [67](#), [70](#), [135](#), [201](#)
- SARMENTO, A. J. N. A., GATO, L. M. C. & FALCÃO, A. F. O. 1990 Turbine-controlled wave energy absorption by oscillating water column devices. *Ocean Engineering* **17**, 481–497. [69](#)
- SCHMIECHEN, M. 1973 On state space models and their application to hydrodynamic systems. *NAUT Report 5002, Department of Naval Architecture, University of Tokyo, Japan* . [7](#), [63](#)
- SHENG, W., FLANNERY, B., LEWIS, A. & ALCORN, R. 2012 Experimental studies of a floating cylindrical OWC WEC. In *31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Rio de Janeiro, Brazil. [47](#)

REFERENCIAS

- SMITH, C. M. 1983 *Some problems in linear water waves*. PhD Thesis, University of Bristol, UK. [56](#)
- SYKES, R. K., LEWIS, A. W. & THOMAS, G. P. 2011 Predicting hydrodynamic pressure un fixed and floating OWC using a piston model. In *9th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2011)*. Southampton, UK. [47](#)
- TAGHIPOUR, R., PÉREZ, T. & MOAN, T. 2008 Hybrid frequency-time domain models for dynamic response analysis of marine structures. *Ocean Engineering* **35** (7), 685–705. [7](#), [13](#), [60](#), [63](#), [65](#), [124](#)
- TORRE-ENCISO, Y., ORTUBIA, I., DE AGUILETA, L. I. L. & MARQUÉS, J. 2009 Mutriku wave power plant: from the thinking out to the reality. In *8th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2009)*, pp. 319–329. Uppsala, Sweden. [5](#), [42](#), [48](#)
- TORRES-FREYERMUTH, A., LOSADA, I. J. & LARA, J. L. 2007 Modeling of surf zone processes on a natural beach using Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations. *Journal of Geophysics Research* **112**. [133](#)
- TROCH, P. & ROUCK, J. D. 1999 An active wave generating-absorbing boundary condition for VOF type numerical model. *Coastal Engineering* **38** (4), 223–247. [135](#)
- VIDAL, C. 1984 *Estudio de las Disponibilidades de Energía del Oleaje en el mar Cantábrico. Selección y Análisis en Modelo Matemático y Físico de un Sistema Hidroneumático Fijo Colector para el Aprovechamiento de la Energía del Oleaje*. PhD Thesis, Universidad de Cantabria, España. [47](#)
- VIDAL, C. 1987 Análisis de un sistema hidroneumático colector para el aprovechamiento de la energía del oleaje. *Revista de Obras Públicas, Junio 1987* pp. 397–410. [47](#)
- WAMIT 2012 WAMIT Users manual. WWW page. <http://www.wamit.com/manualV7.0>. [7](#), [12](#), [54](#), [60](#), [113](#)
- WASHIO, Y., OSAWA, H., NAGATA, Y., FUJII, F., FURUYAMA, H. & FUJITA, T. 2000 The offshore floating type wave power device Mighty Whale: open sea

- tests. In *10th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2000)*, , vol. 1, pp. 373–380. Seattle, USA. [5](#), [43](#)
- WEBER, J. 2007 Representation of non-linear aero-thermodynamic effects during small scale physical modeling of OWC wave energy converters. In *7th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2007)*. Porto, Portugal. [5](#), [47](#)
- WELLER, H. G. 2002 *Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations. Technical Report TR/HGW/02*. Nabla Ltd. [136](#)
- WELLS, A. A. 1976 Fluid driven rotary transducer. *British Patent Spec No 1595700* . [39](#), [40](#), [41](#), [56](#), [57](#), [70](#), [71](#)
- WHITTAKER, T. J. T., MCILWAINE, S. J. & RAGHUNATHAN, S. 1993 A review of the Islay shoreline wave power station. In *First European Wave Energy Symposium*, pp. 283–286. [5](#), [40](#)
- WHITTAKER, T. J. T. & MCPEAKE, F. A. 1986 Design optimization of axisymmetric tail tube buoys. In *Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization* (ed. D. V. Evans & A. F. O. Falcão). Springer-Verlag, Berlin. [47](#)
- YU, Z. 1998 State-space modeling of dynamic systems in ocean engineering. *Journal of Hydrodynamics* **1**, 1–17. [64](#)
- YU, Z. & FALNES, J. 1995 State-space modeling of a vertical cylinder in heave. *Applied Ocean Research* **17**, 265–275. [7](#), [13](#), [63](#), [64](#), [123](#), [125](#)
- ZHU, S.-P. & MITCHELL, L. 2009 Linear diffraction of ocean waves around a hollow cylindrical shell structure. *Wave Motion* **46**, 78–88. [57](#)
- ZHU, S.-P. & MITCHELL, L. 2011 Combined diffraction and radiation of ocean waves around an OWC device. *Journal of Applied Mathematics and Computing* **36** (1–2), 401–416. [57](#)

