



ugr

Universidad
de Granada

**DISEÑO ÓPTIMO DE UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO
DE LA ENERGÍA DEL OLAJE Y GESTIÓN INTEGRAL A
DIFERENTES ESCALAS DE TIEMPO
OPTIMAL DESIGN OF A WAVE ENERGY CONVERTER AND
INTEGRATED MANAGEMENT AT DIFFERENT TIMESCALES**

AUTORA:

María Lourdes Jalón Ramírez

TESIS PRESENTADA EN:

Universidad de Granada

DIRECTORA:

Dra. Asunción Baquerizo Azofra

Programa de Doctorado: Dinámica de Flujos Biogeoquímicos y sus Aplicaciones.

Departamento de Estructuras e Ingeniería Hidráulica

Universidad de Granada

Granada (España)

Febrero 2016

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autoræ María Lourdes Jalón Ramírez
ISBN: 978-84-9125-892-6
URI: <http://hdl.handle.net/10481/43719>

Diseño Óptimo de un Sistema de Aprovechamiento de la Energía del Oleaje y Gestión Integral a Diferentes Escalas de Tiempo/Optimal design of a wave energy converter and integrated management at different timescales

Copyright © 2016 por María Lourdes Jalón Ramírez

La doctoranda María Lourdes Jalón Ramírez y la directora de la tesis Dra. Asunción Baquerizo Azofra, garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por la doctoranda bajo la dirección de la directora de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

En Granada, a 2 de febrero de 2016,



Directora de la Tesis
Fdo.: ASUNCIÓN BAQUERIZO AZOFRA



Doctoranda
Fdo.: MARÍA LOURDES JALÓN RAMÍREZ

Resumen

En esta tesis se aborda el diseño óptimo de un dispositivo de aprovechamiento de la energía del oleaje teniendo en cuenta el carácter aleatorio del oleaje a distintas escalas temporales que van desde el estado de mar hasta el año. Se investigan asimismo otros aspectos relacionados con la funcionalidad de estos sistemas tales como la influencia de las características del oleaje incidente o la pérdida de carga localizada y el desarrollo de formas de lecho en el entorno de las infraestructuras concebidas para albergar a estos sistemas.

En primer lugar, se plantea el diseño óptimo de un sistema de columna oscilante de agua (OWC, por sus siglas en inglés) a escalas de tiempo del estado de mar, estacional y anual. En las dos últimas escalas, se usa una formulación estocástica para tener en cuenta el carácter aleatorio del clima marítimo durante el intervalo de tiempo considerado.

Asimismo, se describe una metodología para el estudio del rendimiento no estacionario de un dispositivo OWC durante su vida útil, mediante simulaciones del clima marítimo y de la correspondiente potencia neumática media, que reproducen la variabilidad temporal tanto intra-anual como inter-anual del clima marítimo en el emplazamiento. Se analizan distintas variables aleatorias de interés para la gestión del dispositivo, considerando tres configuraciones óptimas a distintas escalas temporales.

La metodología se aplica a un dispositivo OWC de sección circular, fijado al fondo. Los resultados demuestran la importancia de tener en cuenta las características del clima marítimo en el diseño, tanto los periodos de pico de los estados de mar más probables como la altura de ola significativa. Además, para incrementar la competitividad del sistema OWC y mejorar su respuesta a la variabilidad inter-anual del clima marítimo, esta investigación revela la necesidad de diseñar sistemas capaces de adaptar su configuración a los sucesivos estados de mar incidentes en su vida útil. A este respecto, se comprueba que el radio del sistema influye más en la potencia neumática media disponible que el diámetro de la turbina.

La metodología planteada es directamente extensible a problemas de optimización considerando la influencia de variables aleatorias adicionales, como el ángulo de incidencia del oleaje. Este caso de estudio puede encontrarse en la práctica en sistemas cuya ubicación, geometría y orientación estén condicionados por el emplazamiento. Tal es el caso de sistemas OWC ubicados en macizos rocosos o sobre instalaciones portuarias. Al objeto de considerar estos casos y evitando repetir de nuevo el proceso de optimización, se considera una

estructura lineal con la cámara oscilante (LOC) que permita estudiar otros efectos complementarios a los estudiados en el OWC, como la incidencia oblicua del oleaje, la reflexión del oleaje o el efecto de la pérdida de carga debido a una constricción del flujo.

Para este fin, la estructura LOC modelada se representa como una placa vertical semisumergida de pared delgada y anchura infinita, separada una cierta distancia de un muro vertical.

La teoría lineal de ondas es considerada para la resolución del problema hidrodinámico, teniendo en cuenta las pérdidas de carga localizadas que se producen debido a la presencia de una constricción en el flujo, y los efectos de los trenes de onda incidentes y reflejados. Los modelos analíticos desarrollados son validados con modelos numéricos (Fluent, Fluinco). Los resultados muestran que los modelos analíticos propuestos permiten proporcionar una primera aproximación de la influencia de aspectos fundamentales para el diseño del dispositivo como su sumergencia o anchura, el ángulo de incidencia o periodo del oleaje. Sin embargo, es necesario considerar la pérdida de carga localizada, o alternativamente especificar los valores de los parámetros para los cuales el modelo sin pérdida de carga funciona adecuadamente.

Por último, para los dos sistemas considerados como casos de estudio, se investigan los patrones del transporte de sedimentos usando modelos analíticos. Los resultados para el dispositivo óptimo muestran los mayores valores del transporte de masa y consecuentemente los mayores valores del transporte de sedimentos. Dados estos resultados, se deduce que la optimización funcional del sistema podría no ser la más conveniente para la estabilidad del lecho. Por otro lado, se observa que la consideración de la pérdida de carga localizada produce una reducción de los mayores valores del transporte de masa y del transporte de sedimentos, afectando en mayor medida a los casos que presentan un mayor valor de la velocidad horizontal a través del sistema.

Summary

The present thesis analyses the optimal design for a wave energy converter, taking into account the random nature of the waves at different timescales ranging from sea state until a year. Other aspects related with the functionality of these systems such as the influence of the characteristics of the incident wave or localized pressure drop, and the development of bed forms around the infrastructure designed to house wave energy converters, are investigated.

At first, an optimal design methodology for an oscillating water column (OWC) system considering the sea state, the season, and a year, as different time scales for optimization is proposed. For the last two scales, a stochastic formulation is used to take into account the random nature of the wave climate during the time interval considered.

In addition, a methodology is described for the study of the non-stationary performance of an OWC device during its useful life, through simulations of the wave climate and its corresponding pneumatic power, which reproduce the intra-annual and inter-annual climate variability at the site. Various random variables related to the management of the system are analyzed, considering three optimal configurations at different time scales.

The methodology is applied to a circular section bottom-fixed OWC device. The results highlight the importance of taking into account the wave climate on the design, such as the peak period for the most probable sea states and the significant wave height. In addition, to increase the competitiveness of the OWC systems and to improve their response under the inter-annual variability of the wave climate, this research reveals the necessity of the systems to adapt their configuration to different sea states. In this context, it is found that the radius of the device has more influence on the available pneumatic power than the diameter of the turbine.

The proposed methodology is directly extensible to optimization problems considering the influence of additional random variables, such as the angle of incidence of the waves. This case study can be found in practice in systems whose location, geometry and orientation are conditioned by the site. It is the case of OWC systems fixed to a rocky cliff or port facilities. In order to consider these cases while avoiding repeating the optimization process, a linear structure with oscillating chamber (LOC) is considered which is intended to allow us to investigate other complementary effects different than those studied in the OWC, such as the oblique incident waves, the reflection or the effect of the head loss due to a constriction of the flow.

To this end, the LOC structure modeled is represented as a thin vertical plate semisubmerged with infinite width, and separated a given distance from a vertical wall.

The linear wave theory is considered to solve the hydrodynamic problem taking into account the localized head losses that occur due to the presence of a constriction in the flow, and the effects of incident and reflected wave trains. The analytical models developed are validated against numerical models from Fluent and Fluinco. The results show that the proposed models can efficiently provide a first approximation about the influence of fundamental aspects for the design of the system, such as the submergence or width, the angle of incidence or the wave period. However, it is revealed the necessity to consider the localized head loss, or alternatively to specify the values of the parameters for which the model without head loss works properly.

Finally, for the two systems considered as case studies, the sediment transport patterns are investigated using analytical models. The results for the optimal device show the highest mass transport and consequently the highest sediment transport. In that case, it is revealed that the functional optimization of the system might not be the most convenient design approach for bed stability. In addition, it is shown that the consideration of the localized head loss leads to a reduction in the higher values of the mass and sediment transport, affecting those cases that present higher values of the horizontal speed through the system in a more significant way.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado en la elaboración de este trabajo, y que sin su ayuda no habr a sido posible.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia y a Juan por su apoyo y comprensi3n durante estos últimos dos meses.

Me gustaría agradecer especialmente la dedicaci3n en estos últimos años de la Dra. Asunci3n Baquerizo y del Dr. Miguel A. Losada. A Miguel A. Losada por darme la oportunidad de entrar en el Grupo de Puertos y Costas y confiar en mi. A Asunci3n Baquerizo por ser mi directora de tesis y por el esfuerzo que ha realizado para terminar esta investigaci3n.

Tambi3n me gustaría dar las gracias a Graca Neves por su acogida en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa, que me permiti3 ver otra forma de trabajar.

Quiero tambi3n agradecer a todos mis compañeros, tanto a los que ya se han ido del grupo como a los que todavía siguen aquí, por los grandes momentos que he vivido con ellos.

Por último dar las gracias a Abengoa S.A por su financiaci3n para la realizaci3n de la tesis doctoral.

Abreviaciones

MDA	Maximum Dissimilarity Algorithm
OWC	Oscillating Water Column
WEC	Wave Energy Converter
NAO	North Atlantic Oscillating
PTO	Power Take Off
rmse	Root Mean Square Error

Lista de Símbolos

Símbolo	Descripción
a	radio del OWC
c_a	velocidad del sonido en el aire
d	sumergencia del OWC
e	emergencia del OWC
f	coeficiente de fricción
$f_e(\cdot, \cdot)$	función de densidad conjunta empírica
f_o	función de profundidad asociado al modo propagante
f_l	función de profundidad asociado a los modos evanescentes ($l > 0$)
g	gravedad
h	profundidad
i	número complejo imaginario puro
k_o	número de onda para el modo propagante
k_l	número de onda para los modos propagantes ($l > 0$)
n	porosidad del fondo
p	probabilidad
q	tasa del transporte de sedimentos
q_b, q_s	tasa del transporte de sedimentos por fondo y suspensión
t	tiempo
u, v	componentes de la velocidad dentro de la capa límite, según el eje x e y
u_1, v_1	componentes oscilatoria de la velocidad dentro de la capa límite, según el eje x e y
\bar{u}_2, \bar{v}_2	corrientes eulerianas según el eje x e y
u_d, v_d	deriva de Stokes según el eje x e y
u_L, v_L	velocidad del transporte de masa según el eje x e y
z_b	cambios del nivel del fondo
A_0	amplitud del tren de ondas
$\tilde{\Gamma}, \tilde{B}, \tilde{C}$	coeficientes hidrodinámicos adimensionales
B	anchura de la cámara
C_g	velocidad de grupo
C_e	coeficiente de fricción equivalente
C_r	coeficiente de reflexión
C_c	coeficiente de captura
D	diámetro exterior del rotor de la turbina
Du	duración media de las excedencias sobre umbral
B_l, C_l, D_l	coeficientes complejos

Símbolo	Descripción
$E[.]$	valor esperado
F_{max}	fuerza máxima horizontal neta del oleaje
H_m	función de Hankel
H_s	altura de ola significativa
I_m, K_m	funciones de Bessel modificadas
J	matriz jacobiana
J_m	función de Bessel de primer tipo
K	coeficiente empírico de la turbina
L	longitud de onda
L_i	coeficiente de inercia
M_{max}	número de Mach
N	velocidad de giro (rad/s)
Nu	número de excedencias
N_l	número de modos evanescentes
P	presión
$\bar{P}_{avai,irr}$	potencia promediada en el tiempo disponible para la turbina. Oleaje irregular
P_w	potencia del oleaje
S_η	espectro de energía
T	período del tren de ondas
T_m	período medio
T_p	período pico
U_0, V_0	velocidad fuera de la capa límite, según el eje x e y
V	volumen de aire de la cámara
δ	espesor de la capa límite
μ	media
ν	viscosidad cinemática del agua
λ, β	parámetros de escala y forma. Distribución Weibull
η	desplazamiento de la superficie libre
$\bar{\eta}_{max}$	máximo desplazamiento medio de la superficie libre en el interior del OWC
θ	ángulo de incidencia del tren de ondas
θ_m	dirección media de propagación del oleaje
θ_r	fase del coeficiente de reflexión
θ_c	fase del coeficiente de captura
ω	frecuencia angular
ρ_a, ρ_w, ρ_s	densidad del aire, del agua y del sedimento
σ	desviación típica
Ψ	desfase
ϕ	función potencial
*	conjugado
$ \cdot $	módulo

Mathematics, rightly viewed, possesses not only truth, but supreme beauty - a beauty cold and austere, like that of sculpture, without appeal to any part of our weaker nature, without the gorgeous trappings of painting or music, yet sublimely pure, and capable of a stern perfection such as only the greatest art can show. The true spirit of delight, the exaltation, the sense of being more than Man, which is the touchstone of the highest excellence, is to be found in mathematics as surely as poetry

Mysticism and Logic and Other Essays
Bertrand Russell, 1919

Índice

Resumen	i
Summary	i
Agradecimientos	iii
Abreviaciones	v
Lista de Símbolos	i
I INTRODUCCIÓN	3
Capítulo 1 Contexto y Motivación	5
Capítulo 2 Objetivos de Investigación	7
II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
Capítulo 3 Formulación general de la optimización y la gestión	11
3.1 Introducción y estado del arte	11
3.2 Formulación del problema	13
3.2.1 Descripción y restricciones operativas del sistema OWC	13
3.2.2 Variabilidad temporal y carácter aleatorio del clima marítimo y de la potencia neumática media.	14
3.3 Métodos	16
3.3.1 Método de optimización	16
3.3.2 Metodología para la gestión y explotación	18
III CONSIDERACIONES RELATIVAS AL OWC	21
Capítulo 4 Interacción del oleaje con una estructura lineal con cámara oscilante	23
4.1 Introducción y estado del arte	23
4.2 Formulación del problema hidrodinámico: tren de ondas regular	25

4.2.1	Sin pérdida de carga	26
4.2.2	Con pérdida de carga	28
4.2.3	Variables de estudio	30
4.3	Aplicación a oleaje irregular	31
Capítulo 5	Tendencia de las formas del lecho	33
5.1	Introducción y estado del arte	33
5.2	Formulación del problema	35
5.2.1	Transporte de masa	35
5.2.2	Transporte de sedimentos	38
5.2.3	Casos de estudio	39
IV	CASOS DE ESTUDIO	43
Capítulo 6	Optimización y gestión de un sistema OWC	45
6.1	Definición de las características de la zona de estudio	45
6.2	Variabilidad estacional e interanual del clima marítimo y de la potencia neumática media	46
6.3	Diseño óptimo para las distintas escalas temporales	49
6.3.1	Optimización en el estado de mar	50
6.3.2	Optimización estocástica	53
6.4	Gestión y explotación del OWC	56
6.5	Discusión	58
6.6	Conclusiones	59
Capítulo 7	Pérdida de carga	61
7.1	Resultados: Tren regular de ondas	61
7.1.1	Validación de los modelos analíticos	61
7.1.2	Factor de amplificación y desplazamiento máximo de la columna de agua	66
7.1.3	Coeficientes de reflexión y captura	69
7.1.4	Fuerzas totales sobre la placa	73
7.2	Resultados: Oleaje irregular	75
7.2.1	Fuerzas totales sobre la placa	78
7.3	Discusión	80
7.4	Conclusiones	81
Capítulo 8	Tendencia de las formas del lecho	83
8.1	Validación del desarrollo matemático	83
8.2	Sistema OWC de sección circular	84
8.2.1	Perfiles de velocidad del transporte de masa	85

8.2.2	Corriente Euleriana	89
8.2.3	Deriva de Stokes	93
8.2.4	Transporte de masa	96
8.2.5	Transporte de sedimentos	103
8.3	Sistema OWC con la cámara abierta	109
8.3.1	Perfiles de velocidad del transporte de masa	109
8.3.2	Transporte de masa	110
8.3.3	Transporte de sedimentos	112
8.4	Conclusiones	114
 V CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO		117
Capítulo 9 Conclusiones y Futuras líneas de trabajo		119
Capítulo 10 Conclusions and Future Works		123
Apéndice A Modelo analítico OWC		127
A.1	Problema de la Difracción	128
A.2	Problema de la Radiación	130
Apéndice B Funciones de distribución no-estacionarias		133
Apéndice C Publicaciones		137
C.1	Artículos de revistas	137
C.2	Congresos	137
C.3	Software	137
Referencias		139

Índice de Figuras

3.1	Diagrama del posible diseño del sistema OWC	14
3.2	Esquema del método de optimización en diferentes escalas temporales.	16
3.3	Esquema de la metodología para la gestión y explotación de sistemas.	19
4.1	Diagrama del sistema	25
5.1	Coordenadas locales	36
5.2	Diagrama de los casos de estudio	39
6.1	Mapa de España con la localización del sistema OWC	46
6.2	Datos históricos procedentes del WANA 1052046, propagados a $h=10.0$ m	46
6.3	Variabilidad mensual de la potencia del oleaje disponible (kW/m)	47
6.4	Variabilidad interanual de la potencia del oleaje disponible (kW/m)	47
6.5	Funciones de densidad conjunta empíricas estacionarias para H_s y T_p (a) invierno marítimo, (b) verano marítimo, (c) año.	48
6.6	Curva de estados, variabilidad mensual (a) e interanual (b) de la potencia neumática disponible para un sistema OWC con la geometría fija: $a=3.5$ m, $d=5.0$ m, $e=5.0$ m, $D=1.0$ m, $N =104.72$ rad/s, $h= 10.0$ m.	48
6.7	Coefficientes hidrodinámicos para distintas sumergencias relativas $d/h=\{0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8\}$ y distintos radios relativos $a/h=\{0.15,0.35\}$. $h=10$ m.	49
6.8	$F(\omega)$ para el Caso 1 (a) y el Caso 2 (b) para diferentes velocidades de giro: 200 rpm (—), 1400 rpm (---), 2800 rpm (···)	50
6.9	Velocidad de giro óptima de la turbina N_{opt} (rpm) para el Caso 1 (a) y el Caso 2 (b) en función de las características de los estados de mar (H_s, T_p).	50
6.10	Sumergencia óptima d_{opt} (m) para el Caso 1 (a) y el Caso 2 (b) en función las características de los estados de mar (H_s, T_p).	51
6.11	Velocidad de giro óptima de la turbina N_{opt} (rpm) (a) y sumergencia óptima (b) para el Caso 1, sin restricción en N	51
6.12	Valor máximo de la potencia neumática disponible, $\max(\bar{P}_{avai,irr})$ (kW), para el Caso 1 (a) y el Caso 2 (b), en función de los estados de mar (H_s, T_p).	52
6.13	Sumergencia óptima d_{opt} (m) (a) y velocidad de giro óptima N_{opt} (rpm) (b), en función del periodo pico T_p (s), para el Caso 2 (círculos) y el Caso 3 (cruces), con $H_s = 0.70$ m.	53

6.14	Valor máximo de la potencia neumática disponible, $\max(\bar{P}_{avai,irr})(kW)$, para el Caso 2 (círculos) y el Caso 3 (cruces) con $H_s = 0.70$ m.	53
6.15	Potencia neumática disponible $\bar{P}_{avai,irr}(kW)$, optimizado en cada estación (a) y en el año (b), para el Caso 2 y en función de los estados de mar (H_s, T_p). . .	55
6.16	Funciones de distribución empíricas de la potencia neumática disponible para las configuraciones óptimas (A,B,C) del Caso 2.	56
6.17	Función de densidad no-estacionaria para H_s (a) y T_p (b), considerando la variabilidad intra-anual e interanual.	57
6.18	Número de excedencias del valor umbral (a) y duración media de los eventos que exceden el umbral (b), en el Caso 2.	57
7.1	Amplitud de la velocidad horizontal en $x=0$ y $z=0$, obtenida con y sin pérdida de carga, para un número creciente de modos evanescentes N_l . $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $T=5$ s, $B/h=1.0$, $d/h=0.5$	62
7.2	Condiciones de acuerdo, sin considerar la pérdida de carga	62
7.3	Condiciones de acuerdo, considerando la pérdida de carga	63
7.4	Esquema del sistema OWC y ubicación de los sensores (escala vertical exagerada). $h=10$ m	64
7.5	Factor de amplificación (H/H_0) y desfase (Ψ), para el sistema OWC con la cámara abierta.	64
7.6	Desfase Ψ calculado con pérdida de carga.	65
7.7	Perfiles y valores medios del coeficiente de fricción linearizado $C_e(z)$	66
7.8	Factor de amplificación (líneas) y desplazamiento máximo de la columna de agua (puntos), sin pérdida de carga, en función de la profundidad relativa kh , para distintas anchuras relativas: $B/h=0.25-0.50-1.0$ y distintas sumergencias relativas: $d/h=\{0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$	67
7.9	Desplazamiento de la superficie libre adimensionalizado respecto la amplitud de la onda incidente, para $t=0$. Solución analítica sin pérdida de carga. $h = 10$ m, $A_0=1$ m, $d/h=0.2$	67
7.10	Factor de amplificación (líneas) y desplazamiento máximo de la columna de agua (puntos), con pérdida de carga, en función de la profundidad relativa kh , para distintas anchuras relativas: $B/h=0.25-0.50-1.0$ y distintas sumergencias relativas: $d/h=\{0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$	68
7.11	Desplazamiento máximo de la superficie libre adimensionalizado respecto la amplitud de la onda incidente. $h = 10$ m, $A_0=1$ m, $d/h=0.8$ (a) Solución analítica sin pérdida de carga, (b) Solución analítica con pérdida de carga.	68
7.12	Módulo (a) y fase (c) del coeficiente de captura y fase del coeficiente de reflexión (b), sin pérdida de carga en función de la sumergencia relativa d/h , y de la anchura relativa B/L . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_l=200$. . .	69

7.13	(a) Módulo del coeficiente de reflexión. (b) Módulo del coeficiente de captura. (c) Fase del coeficiente de reflexión. (d) Fase del coeficiente de captura. Resultados con pérdida de carga en función de la sumergencia relativa, d/h , y de la anchura relativa B/L . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_l=200$	70
7.14	Factor de amplificación (líneas) y desplazamiento máximo de la columna de agua (puntos). $A_0=1.0$ m, $B/h=3.2$, $d/h=0.9$, $h=10.0$ m, $N_l=200$	71
7.15	Módulo (a) y fase (c) del coeficiente de captura y fase (b) del coeficiente de reflexión, sin pérdida de carga en función del ángulo de incidencia del oleaje, θ , y la sumergencia relativa, d/h . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $B/L=0.55$, $h=10.0$ m, $N_l=200$	72
7.16	(a) Módulo del coeficiente de reflexión. (b) Módulo del coeficiente de captura. (c) Fase del coeficiente de reflexión. (d) Fase del coeficiente de captura. Resultados con pérdida de carga en función del ángulo de incidencia del oleaje, θ , y la sumergencia relativa, d/h . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $B/L=0.55$, $h=10.0$ m, $N_l=200$	72
7.17	Factor de amplificación (líneas) y desplazamiento máximo de la columna de agua (puntos). $A_0=1.0$ m, $B/h=3.2$, $\theta = 10^\circ$, $h=10.0$ m, $N_l=200$	73
7.18	Fuerza máxima aplicada sobre la placa adimensionalizada, sin pérdida de carga, en función de la sumergencia relativa (d/h) y anchura relativa (B/L). $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_l=200$	74
7.19	Series temporales de la fuerza máxima aplicada sobre la placa y sobre el muro, y sus componentes, sin pérdida de carga. $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_l=200$, $B/L=0.55$. (a) $d/h=0.9$ (b) $d/h=0.5$	74
7.20	Fuerza máxima aplicada sobre la placa adimensionalizada, con pérdida de carga, en función de la sumergencia relativa (d/h) y anchura relativa (B/L). $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_l=200$	75
7.21	Fuerza máxima aplicada sobre la placa adimensionalizada, sin (a) y con pérdida de carga (b), en función del ángulo de incidencia del oleaje, θ , y la sumergencia relativa, d/h . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $B/L=0.55$, $h=10.0$ m, $N_l=200$	75
7.22	Distribuciones empíricas bivariadas: (a) $f_e(H_s, \theta_m)$, (b) $f_e(T_m, \theta_m)$	76
7.23	(a) Estados de mar con $180^\circ \leq \theta_m \leq 360^\circ$, (b) $f_e((H_s, T_m) 180^\circ \leq \theta_m \leq 360^\circ)$	76
7.24	(a) Error medio de cuantificación en función del número de centroides; (b) centroides seleccionados (estrellas) junto con los estados de mar correspondientes a cada centroide (puntos)	77
7.25	Probabilidad asociada a cada centroide (a); centroides (estrellas) seleccionados junto con sus estados correspondientes (puntos)(b)	77
7.26	Función de distribución empírica y teórica de F_{max} calculada sin pérdida de carga. $B/L=0.1$, $d/h=0.8$, (a) $H_s=1.1$ m, $T_m=4.1$ s, $\theta_m=282.3^\circ$; (b) $H_s=3.6$ m, $T_m=6.1$ s, $\theta_m=297.7^\circ$	78
7.27	Función de distribución empírica y teórica de F_{max} calculada con pérdida de carga. $B/L=0.1$, $d/h=0.8$, (a) $H_s=1.1$ m, $T_m=4.1$ s, $\theta_m=282.3^\circ$; (b) $H_s=3.6$ m, $T_m=6.1$ s, $\theta_m=297.7^\circ$	79

7.28	Función de distribución empírica y teórica F_{max} , considerando los modos propagantes e integrando hasta $z=0$, sin pérdida de carga. $B/L=0.1$, $d/h=0.8$, (a) $H_s=1.1$ m, $T_m=4.1$ s, $\theta_m=282.3^\circ$; (b) $H_s=3.6$ m, $T_m=6.1$ s, $\theta_m=297.7^\circ$	79
7.29	Función de distribución empírica y teórica de F_{max} , considerando los modos propagantes e integrando hasta $z=0$, con pérdida de carga. $B/L=0.1$, $d/h=0.8$, (a) $H_s=1.1$ m, $T_m=4.1$ s, $\theta_m=282.3^\circ$; (b) $H_s=3.6$ m, $T_m=6.1$ s, $\theta_m=297.7^\circ$	80
8.1	Velocidad del transporte de masa alrededor de un cilindro vertical: $ka=0.1941$, $h=10$ m, $A_0=0.5$ m, $a/h=0.35$. (a) Solución a partir de la función potencial proporcionada por MacCamy y Fuchs. (b) Solución proporcionada por Lamourey y Mei.	84
8.2	Superficie libre adimensionalizada para el problema hidrodinámico de la radiación (a) y de la difracción (b). $kh=1.693$, $h=10$ m, $A_0=0.5$ m, $a/h=0.5$, $d/h=0.5$, $t=2\pi/\omega$	85
8.3	Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$	86
8.4	Perfil de las componentes de la velocidad del transporte de masa adimensionalizados. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$	87
8.5	Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$	87
8.6	Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$	88
8.7	Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=6.5$ s, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$	89
8.8	Corriente euleriana adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$	90
8.9	Corriente euleriana adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=1$	91
8.10	Corriente euleriana adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$	92
8.11	Corriente euleriana adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $T=6.5$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$	93
8.12	Deriva de Stokes adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$	94
8.13	Deriva de Stokes adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=1$	95

8.14	Dervia de Stokes adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$	96
8.15	Dervia de Stokes adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $T=6.5$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$	96
8.16	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$	97
8.17	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la difracción. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $\xi=1$	98
8.18	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la radiación. $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$	99
8.19	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=1$	100
8.20	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la radiación. $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=1$	100
8.21	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$	101
8.22	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la difracción. $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $\xi=1$	102
8.23	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la radiación. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$	102
8.24	Velocidad del transporte de masa adimensionalizada (izda.), asociado a la difracción (centro) y a la radiación (drcha.) adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=6.5$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$	103
8.25	Perfiles de velocidad adimensionalizada dentro de la capa límite, para el OWC: (a) velocidad total; (b) velocidad oscilatoria; (c) corriente euleriana. $A_0=0.5$ m, $T=10.0$ s, $d=8.0$ m, $N=300.0$ rpm, $\theta=0^\circ$, $y/a=0$	104
8.26	Transporte neto de sedimento adimensionalizado. $H_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=10$	105
8.27	Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=10$	106
8.28	Transporte neto de sedimento adimensionalizado. $H_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=10$	106
8.29	Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=10$	107
8.30	Transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=10$	107

8.31	Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=10$	108
8.32	(a) Transporte neto de sedimento adimensionalizado (b) Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=6.5$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$	108
8.33	Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=1$, $y/B=0$	109
8.34	Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado, con pérdida de carga. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $y/B=0$	110
8.35	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=1$	111
8.36	Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, con pérdida de carga. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=1$	111
8.37	Amplitud de la velocidad media horizontal obtenida sin pérdida de carga (x) y con pérdida de carga (o), considerando el primer modo propagante. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$	112
8.38	Transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi =10$	113
8.39	Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi =10$	113
8.40	Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=10$	114
8.41	Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=10$, $y/B=0$	114
A.1	Diagrama del sistema OWC	127
A.2	Esquema del problema de la difracción	129
A.3	Esquema del problema de la radiación	131

Índice de Tablas

6.1	Parámetros geométricos de los sistemas OWC.	49
6.2	Resultados de la optimización estacional y anual	54
7.1	Raíz cuadrada del error cuadrático medio	65
B.1	Parámetros de ajuste de la distribución mixta no-estacionaria para la altura de ola significativa.	135
B.2	Parámetros de ajuste de la distribución mixta no-estacionaria para el período pico.	135

Parte I

INTRODUCCIÓN

1

Contexto y Motivación

La producción de energía a partir de los mares y océanos es una tecnología en desarrollo actualmente. Entre todas las formas posibles para el aprovechamiento energético (mareas, corrientes, oleaje y gradientes de salinidad y temperatura), la energía producida por el movimiento de las olas, denominada energía undimotriz, es la que ha experimentado un mayor desarrollo en los últimos años [1, 2].

La primera patente de energía del oleaje se presentó en Francia en 1799 y desde entonces, ha surgido una gran variedad de convertidores de energía del oleaje (WECs) como se recogen en algunas revisiones [3, 4], siendo el sistema de columna de agua oscilante (OWC) probablemente el más desarrollado y uno de los muy pocos que han alcanzado el estado de prototipo a tamaño real [5].

Un sistema OWC es una estructura hueca, parcialmente sumergida y abierta al mar por su parte inferior. Está dotado con un mecanismo para convertir la energía del oleaje en energía mecánica y/o eléctrica, por medio de una turbina de aire acoplada a un generador eléctrico, denominado *power take off* (PTO). Su principio de funcionamiento se basa en la generación de una circulación del aire en el interior de la estructura. Cuando el oleaje actúa sobre el sistema, la columna de agua y de aire oscilan, y se establece un flujo de aire a través de una turbina conectada a un generador eléctrico. Las turbinas generalmente utilizadas para este sistema son las turbinas Wells, que tienen la propiedad de rotar en un único sentido independientemente del sentido del flujo de aire.

Sin embargo, los sistemas OWC no son aún competitivos respecto a otras tecnologías renovables puesto que presentan una serie de limitaciones constructivas y de operatividad. Por lo general necesitan una profundidad mínima del orden de 50 m, lo que supone a

veces alejarse distancias importantes de la costa, con el consiguiente coste asociado a la línea eléctrica para el suministro de la energía generada. Además, tratan de extraer la energía de las olas asociada a la ocurrencia de temporales y en mares donde éstos transitan con olas de gran magnitud. En esta circunstancia se presentan dos condiciones de difícil convergencia. Por un lado se necesitan olas de una altura superior a un cierto umbral y por el otro, la instalación debe ser capaz de resistir grandes esfuerzos.

Hasta la fecha se han seguido varias líneas de trabajo para buscar dispositivos que den un rendimiento óptimo. Existen trabajos en la literatura que se aplican a escenarios reales de climas marítimos y calculan la producción energética a partir de un conjunto de estados representativos del clima marítimo [6, 7]. En cambio, algunos estudios ponen de manifiesto la influencia de la variabilidad intra-anual del clima marítimo en la potencia eléctrica generada [8], y la necesidad de simular series temporales para predecir el futuro rendimiento del sistema OWC teniendo en cuenta la variabilidad interanual de las características del oleaje [9].

Otro factor importante a considerar en el proceso de optimización es la pérdida de carga localizada que se genera debido al sistema de entrada de agua [10]. Para una constricción del flujo relativamente estrecha y una amplitud moderada del tren de ondas incidente, el flujo se contrae y se expande, formando vórtices que se emiten desde el sistema. Es por tanto claro que la no consideración de esta pérdida de carga localizada, puede originar una sobrestimación de la energía transmitida al interior del sistema.

Además, la propagación del oleaje fuera de la zona de rompientes genera movimientos medios no nulos de las partículas de agua que tienen la capacidad de transportar el sedimento que ha sido puesto en movimiento por el paso del tren oscilatorio [11]. Este transporte de sedimentos alrededor del dispositivo podría modificar sustancialmente su rendimiento y/o su estabilidad debido a la formación de barras de sedimentos.

Por tanto, en esta tesis doctoral se realiza un análisis de la influencia de los factores anteriormente comentados, en los sistemas OWC. En primer lugar se propone una metodología para estudiar la influencia de la escala temporal en el proceso de optimización de un nuevo sistema OWC de menores dimensiones respecto a los existentes, cuyo rango de trabajo esté asociado a escenarios de menor contenido energético (los típicos en la costa andaluza). El estudio se complementa con el análisis estadístico de variables de interés para la gestión que miden el rendimiento del dispositivo durante su vida útil, utilizando simulaciones que reproducen la variabilidad no estacionaria del clima marítimo y de la potencia neumática disponible [12].

A continuación se considera una estructura lineal con la cámara oscilante (LOC) que permita estudiar otros efectos complementarios a los estudiados en el OWC, como la incidencia oblicua del oleaje, la reflexión o el efecto de la pérdida de carga.

Finalmente, para estos dos sistemas considerados, se realiza un análisis de sensibilidad de la influencia de algunos parámetros del oleaje y parámetros geométricos de los sistemas, en el transporte de sedimentos.

2

Objetivos de Investigación

Hasta la fecha, se han seguido varias líneas de trabajo para buscar dispositivos que proporcionen un rendimiento óptimo. Según lo expuesto en el capítulo anterior, la variabilidad temporal del clima marítimo influye en la energía eléctrica generada. Esto supone que una estimación de la producción energética basada en los valores medios anuales pueda ser engañosa. En este contexto, se propone el siguiente objetivo de investigación:

• **Objetivo de Investigación 1:** *Investigar la importancia de la variabilidad de la escala temporal de la dinámica marina (oleaje) en los resultados de la optimización de sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje.*

Para alcanzar este objetivo, en el Capítulo 3 se propone una metodología racional para el diseño óptimo de sistemas de aprovechamiento de la energía undimotriz a diferentes escalas de tiempo. El método de optimización se completa con una metodología para la gestión y explotación del sistema durante su vida útil utilizando simulaciones que reproducen la no estacionariedad del clima marítimo.

En el Capítulo 6 se desarrolla un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta. Para ello, se considera un nuevo sistema OWC de sección circular, apoyado en el fondo, ubicado en un emplazamiento real y que es capaz de modificar su sumergencia y la velocidad de giro de la turbina, para maximizar su rendimiento. El análisis se complementa con el estudio del rendimiento del sistema durante su vida útil utilizando simulaciones que reproducen la no estacionariedad del clima marítimo y que permiten estudiar variables de interés para la gestión que dependen de la secuencia de presentación de los estados de mar. Para el sistema OWC propuesto, el ángulo de incidencia del oleaje así como su variabilidad no influye en el proceso de optimización. Sin embargo, esta variable es de gran interés para

los sistemas OWC ubicados en los macizos rocosos o en las instalaciones portuarias. A este efecto, y para analizar otros efectos complementarios a los estudiados en el sistema OWC optimizado, se propone el objetivo de investigación 2:

☛ **Objetivo de Investigación 2:** *Analizar la influencia de las características del oleaje y la pérdida de carga localizada en la funcionalidad de sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje.*

En el Capítulo 4 se considera una estructura lineal con cámara oscilante (LOC), con el objetivo de investigar otros efectos complementarios a los estudiados en el OWC, como la incidencia oblicua del oleaje, la reflexión o el efecto de la pérdida de carga.

Se plantea su problema hidrodinámico y se resuelve matemáticamente considerando el efecto de la pérdida de carga localizada. En la estructura considerada se ha despreciado el efecto de la turbina. Esto implica que únicamente tenga lugar la refracción del oleaje, lo cual simplifica considerablemente la resolución del problema hidrodinámico respecto al sistema OWC del Capítulo 3.

A partir de la formulación obtenida, se desarrollan los modelos analíticos que permiten evaluar el efecto de la pérdida de carga o del ángulo de incidencia del oleaje sobre variables de interés para el diseño, como la transmisión de la energía del oleaje al interior de la cámara o las fuerzas de pico sobre el sistema.

En el Capítulo 7 se validan los modelos analíticos desarrollados, comparando sus resultados con los obtenidos con modelos numéricos (Fluent, Fluinco). Posteriormente se procede al análisis del efecto de la pérdida de carga en algunas variables del sistema, tanto en oleaje regular como irregular.

Para la obtención de la solución óptima del sistema OWC y los modelos analíticos desarrollados para el sistema LOC, se trabaja bajo la hipótesis de fondo horizontal, lo cual puede contrastar con el posible escenario de la formación de barras de sedimentos. Esta aproximación no invalida la metodología propuesta y para tener una visión de la influencia de esta hipótesis, se propone el objetivo de investigación 3:

☛ **Objetivo de Investigación 3:** *Analizar la formación de formas de lecho en el entorno de las infraestructuras concebidas para albergar los sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje.*

Para ambos sistemas propuestos (OWC,LOC), en el Capítulo 5 se desarrollan las expresiones correspondientes a la velocidad del transporte de masa y al transporte de sedimentos, las cuales incorporan los efectos de la difracción y de la radiación para el sistema OWC de sección circular, y el efecto de la pérdida de carga para el sistema LOC. Dichas expresiones son la base para los modelos analíticos desarrollados en este mismo capítulo sobre el transporte de masa y de sedimentos.

El análisis de la modificación del transporte de masa y de sedimentos en función de los parámetros fundamentales que influyen en la extracción de la energía del oleaje, se realiza en el Capítulo 8. Además se proporciona una tendencia de las formas del lecho, considerando o no el efecto de la pérdida de carga.

Parte II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3

Formulación general de la optimización y la gestión

En este capítulo, se plantea el diseño óptimo de un sistema de columna oscilante de agua (OWC) a escalas de tiempo del estado de mar, estacional y anual. En las dos últimas se usa una formulación estocástica para tener en cuenta el carácter aleatorio del clima marítimo durante el intervalo de tiempo considerado. Se propone asimismo una metodología para el estudio del rendimiento no estacionario de un sistema OWC durante su vida útil mediante simulaciones del clima marítimo, que reproducen la variabilidad temporal tanto intra-anual como interanual.

3.1 Introducción y estado del arte

En la literatura, existen varias líneas de trabajo cuyo objetivo es la búsqueda de dispositivos que proporcionen un rendimiento óptimo. López et al. [13] implementaron un modelo numérico para estudiar el comportamiento de un OWC fijo, dependiendo de las condiciones de oleaje y del amortiguamiento ejercido por la turbina. Seguidamente, López et al. [14, 15] analizaron experimentalmente la influencia de las corrientes en el comportamiento de un OWC fijo.

Falcão y Rodrigues [5] desarrollaron un modelo estocástico para calcular la potencia media a la salida de la planta, asociada a cada estado de mar, de un dispositivo OWC equipado con una turbina Wells. El modelo se aplicó a un escenario real de clima marítimo, optimizando la producción energética mediante el control de la velocidad de giro de la turbina. Falcão [6] aplicó el mismo modelo a tres escenarios de clima marítimo, variando

el diámetro de la turbina y considerando dos criterios distintos: (i) maximizar la energía eléctrica media anual producida, (ii) maximizar el beneficio económico anual.

Martins-Rivas y Mei [16] buscaron las características de la turbina que maximizan la eficiencia de un dispositivo OWC fijo sin limitar su velocidad de giro, para todo el rango de frecuencias. Su estudio consideró diferentes valores del radio relativo, de la sumergencia relativa y del volumen de aire dentro de la cámara. Lovas et al. [17] aplicaron esta misma metodología a dos OWC instalados in two cornered coasts y analizaron la influencia de la geometría y del ángulo de incidencia del oleaje.

Gomes et al. [7] usaron el modelo estocástico de Falcão and Rodrigues [5] para optimizar la geometría de un sistema OWC flotante y maximizar la potencia neumática media anual disponible para la turbina. Falcão et al. [18] buscaron los valores de la sumergencia y las características de la turbina de un dispositivo OWC flotante que maximizaban la absorción de energía del oleaje, para oleaje regular e irregular. Además analizaron la influencia de las variables periodo y volumen de aire de la cámara, en los resultados de la optimización.

Es habitual que los trabajos que obtienen una geometría óptima anual para escenarios reales, calculen la producción energética a partir de un conjunto de estados representativos del clima marítimo en el emplazamiento. Sin embargo, algunos estudios ponen de manifiesto la influencia de la variabilidad intra-anual del flujo de energía del oleaje en la potencia eléctrica generada. Carballo e Iglesias [8] desarrollaron una metodología para determinar el rendimiento de un WEC arbitrario, basada en el cálculo de la potencia disponible media mensual en el emplazamiento del WEC y la aplicaron a un escenario real de clima marítimo en el noroeste de España. Posteriormente, se aplicó a distintos WECs en dos localizaciones (offshore, nearshore) de la costa norte de Galicia (NW España) [19]. Ambos estudios ponen de manifiesto la importancia de considerar la variabilidad intra-anual del clima marítimo donde el WEC se vaya a instalar.

La variabilidad temporal del clima marítimo debería ser considerada en el diseño de estos dispositivos, pero también debería tenerse en cuenta en la simulación de series temporales que permitan predecir el futuro rendimiento del WEC y gestionar de forma óptima su funcionamiento. Mackay et al. [9] modelaron la variabilidad interanual de la potencia media mediante el índice climático NAO (North Atlantic Oscillating) para predecir el comportamiento de un WEC en la costa norte de Escocia.

En este capítulo, se formula la optimización de un dispositivo OWC a distintas escalas de tiempo, teniendo en cuenta el carácter aleatorio del clima marítimo durante el intervalo de tiempo en estudio. El sistema OWC considerado está fijo al fondo y presenta unas dimensiones menores respecto a los existentes (cuya área transversal está en el rango de 80 – 250 m²). Se encuentra ubicado en profundidades intermedias o reducidas y puede ser eficiente en mares que presentan oleaje relativamente poco energético pero muy frecuente en determinadas épocas del año (ciclo estacional), tal y como ocurre en el Golfo de Cádiz (SW de la Península Ibérica).

El objetivo principal de la investigación fue poner de manifiesto la importancia de las escalas de tiempo en la optimización de un OWC bajo la acción aleatoria del oleaje. Como ejemplo, la potencia neumática disponible para la turbina fue seleccionada como la función objetivo, y la sumergencia y la velocidad de giro de la turbina fueron elegidos como variables principales. Sin embargo, ajustando adecuadamente las variables, esta metodología puede aplicarse a cualquier otra magnitud que dependa del clima marítimo, tales como la función de coste-beneficio. Las escalas de tiempo considerados fueron las estaciones y el año. Las restricciones que se deben cumplir fueron las siguientes: (i) geométricas, impuesta por la profundidad a la que el sistema se encuentra; (ii) aerodinámicas, en relación con la velocidad máxima de la turbina; (iii) operativas, vinculadas a los umbrales operativos del dispositivo. Debido a la naturaleza aleatoria del clima marítimo, el problema fue abordado de la misma forma que una optimización estocástica que proporciona valores estadísticamente óptimos.

Basado en los resultados de la optimización estocástica, dos configuraciones fueron consideradas. Se calcularon sus funciones de distribución correspondientes de la potencia neumática disponible para la turbina en el estado de la mar. Estos resultados se compararon con los obtenidos para un dispositivo ideal capaz de adaptarse a la geometría óptima de cada estado de la mar (optimización determinista).

Para las configuraciones óptimas, se analizaron ciertas variables relacionadas con el rendimiento no estacionario del dispositivo. Con este fin, se simuló las series temporales de la energía neumática disponible para un gran número de realizaciones del clima marítimo durante la vida útil del sistema, basadas en la altura de ola y el periodo pico.

Estas series temporales se obtuvieron con la metodología propuesta por Solari y Van Gelder [20] para la simulación de series multivariadas usando distribuciones mixtas no estacionarias, las cuales contemplan la variabilidad interanual e intra-anual en Solari y Losada [21]. En esta tesis, el término *variabilidad intra-anual* hace referencia a las variaciones mensuales y estacionales, mientras que el término *variabilidad interanual* hace referencia a ciclos con periodos de variación mayores o iguales que el año.

3.2 Formulación del problema

3.2.1 Descripción y restricciones operativas del sistema OWC

El sistema OWC considerado está ubicado en la plataforma continental interior en una zona de profundidad constante h y cerca de la costa. Está anclado al fondo mediante una estructura (ver Fig. 3.1), la cual se considera que no afecta a la propagación del campo de oleaje. El sistema tiene una sección circular con radio a , y está sumergido una profundidad d . Se encuentra emergido una distancia e , y está equipado con una turbina Wells cuyo diámetro exterior del rotor es D y su velocidad de giro N . Este dispositivo puede variar su sumergencia y la velocidad de giro en las diferentes escalas de tiempo estudiadas.

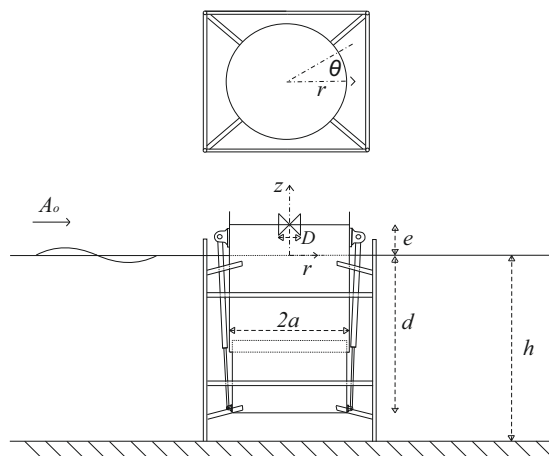


Figura 3.1: Diagrama del posible diseño del sistema OWC

Los parámetros que influyen en la extracción de la energía del oleaje se pueden clasificar en: (i) parámetros del medio (ρ_a, ρ_w, h); (ii) parámetros del oleaje local (H_s, T_p); (iii) parámetros del OWC (d, a, e, D, N). En un emplazamiento determinado, únicamente es posible actuar sobre los parámetros del sistema para buscar dispositivos óptimos. En este estudio se consideran variables la sumergencia d y la velocidad de giro de la turbina N , cuyos valores se encuentran en el rango de $2.0 \text{ m} \leq d \leq 8.0 \text{ m}$ y $N \leq 2M_{max}c_a/D$ (rad/s), respectivamente, donde M_{max} es el número de Mach con valores en el rango $0.5 - 0.6$, y c_a es la velocidad del sonido en el aire (340 m/s). Esta última restricción viene impuesta por razones aerodinámicas [5].

El dispositivo que se considera tiene, como se ha comentado, un régimen de trabajo asociado a estados de oleaje de menor contenido energético que otros sistemas OWC, adecuado para la zona del Golfo de Cádiz. Por ello se establecen dos restricciones de operatividad relacionadas con la energía del oleaje incidente en términos de la altura de ola significativa local: $0.25 \text{ m} \leq H_s \leq 3.0 \text{ m}$. Estos límites fueron calculados como los percentiles 3 y 97 de la altura de ola significativa local.

Por último, para satisfacer la hipótesis considerada por Sarmento y Falcão [22] en el cálculo del problema aerodinámico, se restringe la operatividad a que el valor máximo del desplazamiento de la superficie libre en el interior del sistema $\bar{\eta}_{max}$, sea menor que la emergencia (e).

3.2.2 Variabilidad temporal y carácter aleatorio del clima marítimo y de la potencia neumática media.

Se parte de la escala del estado de mar, considerado como un intervalo de tiempo del orden de varios minutos a pocas horas, durante el cual puede suponerse que el contenido energético del oleaje es aproximadamente estacionario.

En este contexto se asume que en un estado de mar el oleaje es un proceso estocástico estacionario y ergódico y que la superficie libre del tren incidente en una determinada posición es una variable gaussiana que resulta de la superposición de ondas monocromáticas.

Se supone que los estados de mar definidos por la altura de ola significativa y periodo pico dados, H_s y T_p , tienen un espectro de energía con la siguiente expresión [23]:

$$S_\eta(\omega) = 486.7H_s^2T_p^{-4}\omega^{-5}e^{(-1951.3T_p^{-4}\omega^{-4})} \quad (3.1)$$

donde ω denota la frecuencia angular. .

En estas condiciones, la potencia neumática media disponible para la turbina en oleaje irregular, la cual representa la potencia neumática disponible usada por la turbina para generar potencia mecánica, puede ser calculada como sigue [5, 7]:

$$\bar{P}_{avai,irr} = \frac{KD}{N\rho_a}\rho_w^2g^2 \int_0^\infty S_\eta(\omega)F(\omega)d\omega \quad (3.2)$$

En la Ec. (3.2), K es un factor empírico que depende del diseño, del número y disposición de las turbinas; D es el diámetro exterior del rotor de la turbina; N es su velocidad de giro; ρ_a es la densidad estática del aire; ρ_w es la densidad del agua; g es la aceleración de la gravedad; $S_\eta(\omega)$ es el espectro de energía del oleaje incidente y $F(\omega)$ es definido por;

$$F(\omega) = \frac{|\tilde{\Gamma}(\omega)|^2}{(\chi(\omega) + \tilde{B}(\omega))^2 + (\beta(\omega) + \tilde{C}(\omega))^2} \quad (3.3)$$

donde $\tilde{\Gamma}(\omega)$, $\tilde{B}(\omega)$, $\tilde{C}(\omega)$ son los coeficientes hidrodinámicos adimensionales y $\chi(\omega)$ y $\beta(\omega)$ tienen en cuenta las características de la turbina y la compresibilidad del aire en el sistema, respectivamente. Esta solución está basada en la potencia neumática de un tren de ondas monocromático dado en [16], y es expresada mediante:

$$(\tilde{B}, \tilde{C}) = (B, C) / \left(\frac{a}{\omega\rho_w} \right) \quad (3.4a)$$

$$\tilde{\Gamma} = \Gamma / \left(\frac{ag}{\omega} \right) \quad (3.4b)$$

$$\chi = \frac{\rho_w KD \omega}{\rho_a N a} \quad (3.4c)$$

$$\beta = \frac{\omega^2 V \rho_w}{c_a^2 a \rho_a} \quad (3.4d)$$

Los números reales B y C representan los coeficientes de amortiguamiento y masa añadida, respectivamente [24]. El coeficiente complejo Γ representa el flujo difractado por amplitud de onda unitaria y V es el volumen de aire en la cámara en ausencia de ondas.

Para una realización del clima marítimo durante un intervalo de tiempo dado, $H_s(t)$ y $T_p(t)$, la Ec. (3.2) puede ser usada para obtener la variabilidad temporal de la potencia neumática media disponible para la turbina $\bar{P}_{avai,irr}$.

3.3 Métodos

3.3.1 Método de optimización

El carácter aleatorio que la potencia neumática disponible hereda del oleaje en las distintas escalas da sentido al planteamiento del problema de optimización estocástica considerando intervalos de tiempo de diferente duración, que van desde varios meses hasta grupos de años, para analizar la importancia de la variabilidad intra-anual e interanual de los estados de oleaje en la vida útil de la instalación.

En esta Sección se estudian las configuraciones óptimas en el sentido estocástico para las escalas de tiempo estacional y anual presentadas en la sección *Optimización Estocástica* y se comparan los resultados con los obtenidos para un dispositivo ideal capaz de adaptarse a la geometría óptima de cada estado de mar, cuya formulación se presenta a continuación. La metodología usada se resumen en la Fig. 3.2.

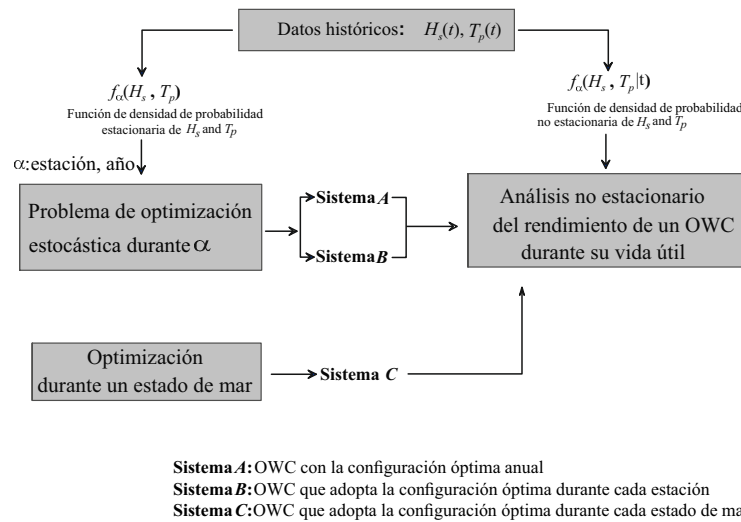


Figura 3.2: Esquema del método de optimización en diferentes escalas temporales.

Optimización en el estado de mar

En un estado de mar definido por su altura de ola significativa, H_s , y periodo de pico, T_p , tomando como función objetivo la potencia neumática media disponible para la turbina en

oleaje irregular dada por la Ec. (3.2), el problema de optimización que se plantea es:

$$\begin{aligned}
& \mathbf{max} \bar{P}_{avai,irr}(d, N, H_s, T_p) \\
& \mathbf{s.t} \\
& 2.0 \leq d \leq 8.0 \\
& 0.0 < N \leq 2.0M_{max}c_a/D \\
& \bar{\eta}_{max} < e
\end{aligned} \tag{3.5}$$

donde las restricciones vienen dadas por las condiciones que se presentan en la Sección 3.2.1, y donde $\bar{\eta}_{max}$ es el valor máximo alcanzado en el estado de mar, del promedio espacial del desplazamiento de la superficie libre en el interior del sistema. Dicho desplazamiento se debe a la superposición de las superficies libres asociadas a los problemas de la radiación y de la difracción, $\bar{\eta} = \bar{\eta}_{rad,ins} + \bar{\eta}_{dif,ins}$, admitiendo, por simplicidad, que la mayor altura de ola en un estado de mar es $H_{max} \approx 1.8H_s$.

Nótese que el problema (3.5) no es estocástico, ya que la aleatoriedad proveniente de la amplitud se elimina con la adopción de un espectro teórico, y la fase aleatoria de cada una de las ondas componentes del tren irregular no influye en el cálculo de la potencia.

Optimización Estocástica

En intervalos de tiempo de varios meses o años de duración, la función objetivo y algunas de las restricciones del problema (3.5) tienen un carácter estocástico que está determinado por el de las variables (H_s, T_p) que definen el clima marítimo, y cuya aleatoriedad durante el intervalo de tiempo considerado está caracterizada a través de la correspondiente función de densidad conjunta, $f_e(H_s, T_p)$.

El problema así planteado no tiene solución objetiva, puesto que el significado de *óptimo* no está claro hasta que no se tiene una realización del clima marítimo. Debe resolverse, por tanto, un problema determinista equivalente. Existen diferentes criterios para buscar los valores óptimos en el sentido estadístico [25]. El problema equivalente determinístico fue definido mediante el valor esperado de la función objetivo y las restricciones probabilísticas, a las que se le exige que se satisfagan al menos, con una determinada probabilidad fijada p :

$$\begin{aligned}
& \mathbf{max} E[\bar{P}_{avai,irr}] = \int_{\mathfrak{R}} \int_{\mathfrak{R}} \bar{P}_{avai,irr} f_e(H_s, T_p) dH_s dT_p \\
& \mathbf{s.t} \\
& 2.0 \leq d \leq 8.0 \\
& 0.0 < N \leq 2.0M_{max}c_a/D \\
& P(\bar{\eta}_{max} < e) \geq p
\end{aligned} \tag{3.6}$$

3.3.2 Metodología para la gestión y explotación

Como se ha visto en la sección *Optimización Estocástica*, la resolución de los problemas de optimización pasa por la elección de un determinado criterio y la adopción, para las restricciones en las que intervienen los vectores aleatorios, de una probabilidad de ocurrencia mínima admisible. Resulta interesante para la gestión, por tanto, evaluar en términos estadísticos el rendimiento no estacionario de los dispositivos seleccionados durante un determinado periodo de tiempo, por ejemplo su vida útil.

Para ello se propone una metodología basada en la propuesta por Baquerizo y Losada [26], que considera el dispositivo como un sistema forzado por agentes climáticos que pueden caracterizarse por una serie de procesos estocásticos $X_1(t), \dots, X_N(t)$, los cuales en este caso son la altura de ola, $H_s(t)$ y el periodo de pico $T_p(t)$, donde t denota tiempo.

De acuerdo con ello, técnicas de simulación multivariada fueron utilizadas para obtener realizaciones aleatorias, $H_s(t)$, $T_p(t)$ de estos procesos aleatorios durante el intervalo de tiempo seleccionado. Estas series temporales fueron discretizadas en una secuencia de estados de mar y para cada estado, la Ec. (3.2) estima la potencia neumática media disponible para el sistema OWC. El resultado fue $\bar{P}_{avai,irr}(t)$, la cual es una realización del proceso aleatorio de la potencia neumática media disponible en el intervalo de tiempo seleccionado.

Cuando este proceso es repetido un número de veces Q , se obtiene un conjunto de realizaciones igualmente probables, de la respuesta del sistema $\{\bar{P}_{avai,irr_q}(t)\}$, $q = 1, \dots, Q$. Las realizaciones son luego usadas para obtener muestras de varios indicadores que miden el rendimiento del sistema. Estos incluyen el número de superaciones de un valor umbral o la duración media de la excedencia de los eventos. Esta metodología está descrita en la Fig. 3.3.

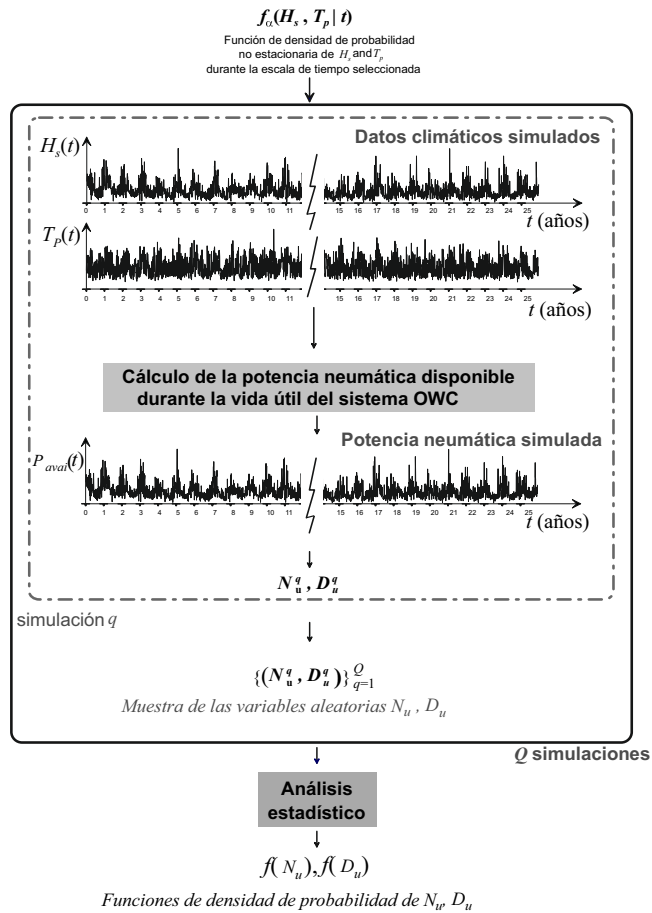


Figura 3.3: Esquema de la metodología para la gestión y explotación de sistemas.

Las realizaciones del clima marítimo son obtenidas con el modelo vectorial autorregresivo de décimo-tercer orden, propuesto en Solari y Van Gelder [20]. Este modelo utiliza funciones de distribución mixtas no estacionarias para las variables climáticas, que son capaces de reproducir los distintos regímenes así como la variabilidad intra-anual e interanual del clima marítimo [21].

Parte III

**CONSIDERACIONES RELATIVAS
AL OWC**

4

Interacción del oleaje con una estructura lineal con cámara oscilante

En este capítulo se analiza la influencia de un sistema lineal con cámara oscilante, en la propagación de un tren de ondas monocromático que incide con cierta oblicuidad, mediante modelos analíticos. El sistema estudiado consiste en una placa vertical semisumergida de pared delgada y anchura infinita, separada una cierta distancia de un muro vertical. Este sistema permite estudiar efectos complementarios al sistema OWC, como el dominio de la reflexión, la pérdida de carga y la influencia de un oleaje con incidencia oblicua.

4.1 Introducción y estado del arte

Los sistemas OWC se pueden clasificar en función de su estructura en fijos [27, 28] o flotantes [29, 30]. La mayoría de los sistemas fijos están ubicados cerca de la costa o en la línea de costa, aprovechando un macizo rocoso o instalaciones portuarias, mientras que los flotantes se ubican en aguas profundas o intermedias y se encuentran sujetos al fondo marino.

Los sistemas fijos ubicados en la línea de costa presentan una serie de ventajas respecto los sistemas flotantes, como una mayor facilidad en la construcción y el mantenimiento del sistema así como la no necesidad de cables eléctricos submarinos ni de sistemas de amarre. Sin embargo, su ubicación, geometría y orientación están condicionadas a la ubicación y dimensiones del macizo rocoso o de la instalación portuaria. Por tanto, en estos sistemas, el conocimiento del comportamiento del oleaje al interactuar con el macizo rocoso o con la instalación portuaria, así como su reflexión, transmisión y disipación, es fundamental para optimizar su diseño.

Existen distintos autores que han estudiado la interacción del oleaje con una estructura tipo placa vertical. Losada et al. [31], modelaron analíticamente la interacción de un tren de ondas monocromático con oblicuidad sobre tres tipologías de barreras verticales delgadas, mediante la teoría lineal, estudiando los coeficientes de reflexión y transmisión y las fuerzas horizontales netas en función de distintos parámetros. Isaacson et al. [32], estudiaron la interacción de un tren regular con una barrera vertical semisumergida y perforada, teniendo en cuenta la disipación de energía a través de la misma según el método de Sollit and Cross [33] y realizaron ensayos para validar el modelo teórico desarrollado.

En otros estudios se ha considerado la interacción del oleaje con varias estructuras, como por ejemplo Newman [34] que analizó la interacción de un tren de ondas con dos barreras verticales semisumergidas y observó que los coeficientes de reflexión y transmisión podían variar desde cero a uno para ciertos valores del número de onda. McIver [35] demostró que para dos placas semisumergidas a la misma profundidades y lo suficientemente cerca, cada cero del coeficiente de reflexión está acompañado con un cero del coeficiente de transmisión en una frecuencia próxima. Isaacson et al. [36] extendieron la metodología de Isaacson et al. [32], al estudio de la interacción con un par de placas verticales perforadas y semisumergidas, realizando del mismo modo el modelo analítico y los modelos experimentales. Zhu and Chwang [37] consideraron una barrera vertical perforada y semisumergida con un muro vertical ubicado a cierta distancia, y realizaron un modelo analítico considerando la disipación de energía a través de la pared basándose en las ideas de Mei et al. [38], Mei [10] and Bennett et al. [39]. Además realizaron un modelo experimental para examinar los resultados analíticos.

Los modelos analíticos revisados que han sido comparados con resultados experimentales, ponen de manifiesto su validez para representar adecuadamente la disipación de la energía a través de las barreras. Por tanto, en este capítulo se expone la formulación para el desarrollo de modelos analíticos que representen la interacción de un tren de ondas con un sistema lineal con cámara oscilante. Estos modelos permiten tener una primera aproximación de la influencia de aspectos fundamentales de diseño del dispositivo como su anchura y o la sumergencia, así como el período o el ángulo de incidencia del oleaje.

El sistema es modelado como una placa vertical semisumergida, de pared delgada y anchura infinita y separada una cierta distancia de un muro vertical. A continuación se plantea y se resuelve el problema de la propagación de un tren de ondas monocromático con la presencia de la estructura. Para la resolución del problema, se divide el área de estudio en dos regiones, en cada una de las cuales se define el potencial de velocidades, estableciéndose continuidad de presiones y velocidades en los contornos de separación entre regiones. Además, se analiza el problema con fricción en el que se tiene en cuenta el efecto de la pérdida de carga localizada según la formulación propuesta por Mei [10].

La aplicación de esta metodología de cálculo a oleaje irregular, se realiza admitiendo la hipótesis de equivalencia que permite estudiar la distribución de una variable aleatoria en

el estado de mar asignando a cada ola individual el valor de la variable aleatoria correspondiente a un tren de ondas monocromático con la misma altura y periodo [40]. Baquerizo y Losada [41] analizaron estadísticamente la variable aleatoria índice de rotura asociado a cada ola individual de un tren de ondas, encontrando que se distribuía según una Weibull biparamétrica. En este capítulo, la variable aleatoria que se va a analizar es la fuerza máxima en la placa, por ser uno de los factores fundamentales en el cálculo de la probabilidad de fallo.

4.2 Formulación del problema hidrodinámico: tren de ondas regular

Se supone un tren de ondas monocromático de amplitud A_o , frecuencia σ y oblicuidad θ , propagándose desde el infinito hacia el sistema, en una profundidad constante h . El sistema OWC se encuentra a presión atmosférica y está formado por una placa vertical de pared delgada y ancho infinito, sumergida una profundidad d y separada una distancia B de un muro vertical e impermeable Fig. 4.1:

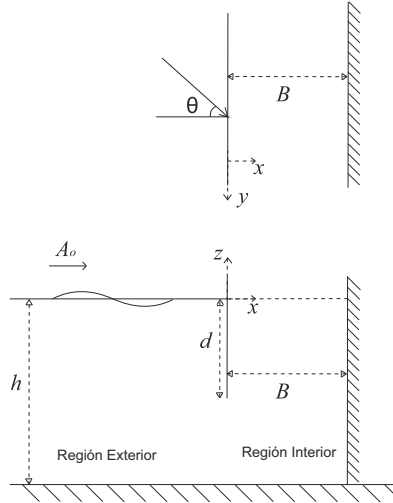


Figura 4.1: Diagrama del sistema

Admitiendo las hipótesis iniciales de fondo horizontal e impermeable, flujo irrotacional y fluido incompresible y no viscoso, el problema puede formularse en términos de la función potencial, que debe satisfacer la ecuación de Laplace en el fluido, la condición de contorno cinemática en las fronteras y la condición de contorno mixta en la superficie libre,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 z} = 0 \quad \text{para } h < z < 0 \quad (4.1a)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = -h \quad (4.1b)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 t} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = 0 \quad (4.1c)$$

donde (x,y,z) son las coordenadas cartesianas con el eje z ubicado en el nivel de mar en reposo y positivo hacia arriba, t es el tiempo y ϕ es la amplitud compleja de la función potencial expresada como:

$$\Phi(x, y, z, t) = \Re\{\phi(x, z)e^{i(\lambda y - \omega t)}\} \quad (4.2)$$

donde $\lambda = k_0 \sin\theta$ y k_0 es el número de onda de la onda incidente, que corresponde con la solución real de la ecuación de la dispersión,

$$\frac{\omega^2}{g} = k_l \tanh(k_l h), \quad l = 0, 1, 2, \dots, N_l \quad (4.3)$$

El método de resolución que se utiliza se basa en el desarrollo en serie de autofunciones de la función de profundidad, cuyos valores son las raíces de la ecuación de la dispersión, que además de tener una raíz real (k_0) que corresponde al modo progresivo, presenta infinitas raíces imaginarias ($ik_1, ik_2, \dots, ik_{N_l}$) que constituyen los modos evanescentes que son ondas estacionarias que presentan su máxima amplitud en la discontinuidad y se amortiguan al alejarse de ella.

El dominio de estudio se separa en dos regiones y la correspondiente función potencial se calcula como la combinación lineal de la onda incidente (A_0) y la reflejada (B_0) en la región anterior a la placa (ϕ_{ext}) y como combinación lineal de la onda transmitida (C_0) y la reflejada (D_0) la región entre la placa y el muro (ϕ_{int}), con los modos evanescentes ($B_l, C_l, D_l; l \geq 1$):

$$\begin{aligned} \phi_{ext}(x, z) &= A_0 f_0(z) e^{iQ_0 x} + \sum_{l=1}^{N_l} [B_l f_l(z) e^{-iQ_l x}] \quad \text{para } x < 0 \\ \phi_{int}(x, z) &= \sum_{l=0}^{N_l} [C_l f_l(z) e^{iQ_l x}] + \sum_{l=0}^{N_l} [D_l f_l(z) e^{-iQ_l (x-B)}] \quad \text{para } 0 < x < B \end{aligned} \quad (4.4)$$

donde,

$$f_l(z) = \frac{-ig \cosh k_l (h+z)}{\omega \cosh(k_l h)}, \quad k_l = k_0, ik_1, \dots, ik_{N_l} \quad (4.5)$$

$$Q_l = \sqrt{k_l^2 - \lambda^2} \quad (4.6)$$

Para asegurar la continuidad de la solución entre las dos regiones, se les exige a las funciones potenciales que satisfagan las condiciones de acuerdo cinemáticas y dinámicas en la placa ($x = 0$) y en el muro impermeable ($x = B$).

4.2.1 Sin pérdida de carga

Las condiciones de acuerdo cinemáticas y dinámicas que deben satisfacer las funciones potenciales Ec. (4.4) en la placa ($x = 0$) y en el muro impermeable ($x = B$), sin considerar el

efecto de la pérdida de carga son:

$$\phi_{ext,x}(x, z) = \phi_{int,x}(x, z) \quad x=0, -h < z < -d \quad (4.7a)$$

$$\phi_{ext,x}(x, z) = \phi_{int,x}(x, z) = 0 \quad x=0, -d < z < 0 \quad (4.7b)$$

$$\phi_{ext}(x, z) = \phi_{int}(x, z) \quad x=0, -h < z < -d \quad (4.7c)$$

$$\phi_{int,x}(x, z) = 0 \quad x=B, -h < z < 0 \quad (4.7d)$$

En primer lugar se impone la condición de flujo nulo en el muro Ec. (4.7d):

$$\sum_{l=0}^{N_l} [C_l f_l(z) i Q_l e^{i Q_l B}] - \sum_{l=0}^{N_l} [D_l f_l(z) i Q_l] = 0 \quad (4.8)$$

Teniendo en cuenta la ortogonalidad de las funciones $f_l(z)$ y multiplicando sucesivamente por $f_m(z)$, $m = 0, 1, 2, \dots$, se llega a:

$$D_l = C_l e^{i Q_l B} \quad (4.9)$$

Si se sustituye esta expresión en la función potencial de la región interior, queda:

$$\phi_{int}(x, z) = \sum_{l=0}^{N_l} C_l f_l(z) \left(e^{i Q_l x} + e^{-i Q_l (x-2B)} \right) \quad (4.10)$$

Las Ecs. (4.7a) y (4.7b) establecen que las velocidades horizontales según el eje x , tienen que ser iguales en toda la columna de agua, anulándose en la placa. Por tanto, se impone la condición de igualdad de velocidades en toda la columna de agua, en $x = 0$:

$$A_0 f_0(z) i Q_0 + \sum_{l=0}^{N_l} B_l f_l(z) (-i Q_l) = \sum_{l=0}^{N_l} C_l f_l(z) i Q_l \left(1 - e^{i Q_l 2B} \right) \quad (4.11)$$

Si se multiplica sucesivamente por $f_l(z)$, se tiene:

$$\begin{aligned} l = 0 : B_0 &= A_0 - C_0 \left(1 - e^{i Q_0 2B} \right) \\ l \geq 1 : B_l &= -C_l \left(1 - e^{i Q_l 2B} \right) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Sustituyendo estas expresiones en la función potencial de la región exterior, se llega a:

$$\phi_{ext}(x, z) = A_0 f_0(z) \left(e^{i Q_0 x} + e^{-i Q_0 x} \right) - \sum_{l=0}^{N_l} C_l f_l(z) \left(1 - e^{i Q_l 2B} \right) e^{-i Q_l x} \quad (4.13)$$

A continuación, aplicando las Ecs. (4.7b) y (4.7c), se llega a una función $G(z)$ definida en intervalos, que se conoce como serie dual:

$$G(z) = \begin{cases} 2.0 \left(\sum_{l=0}^{N_l} [C_l f_l(z)] - A_0 f_0(z) \right) = 0 & \text{para } -h < z < -d \\ \sum_{n=0}^{N_l} C_l f_l(z) (1 - e^{iQ_l 2B}) iQ_l = 0 & \text{para } -d < z < 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Los valores de los coeficientes complejos $C_l (l = 0, 1, 2, \dots, N_l)$ se determinan con el método de mínimos cuadrados, el cual requiere que la siguiente integral sea mínima:

$$\int_{-h}^0 |G(z)|^2 dz \quad (4.15)$$

Minimizando esta integral respecto C_l se obtiene la siguiente ecuación:

$$\int_{-h}^0 G(z)^* \frac{\partial G(z)}{\partial C_m} dz = 0 \quad (4.16)$$

Desarrollando la Ec. (4.16), se llega a un sistema de ecuaciones que permite determinar los valores de $C_l (l = 0, 1, 2, \dots, N_l)$:

$$C_l^* [4.0 X_{ml} + (iQ_l)^* (1.0 - e^{iQ_l 2B}) iQ_m (1.0 - e^{iQ_m 2B}) Y_{ml}] = 4.0 A_0 X_{m0} \quad (4.17)$$

where

$$\begin{aligned} X_{ml} &= \int_{-h}^{-d} f_l^*(z) f_m(z) dz \\ Y_{ml} &= \int_{-d}^0 f_l^*(z) f_m(z) dz \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.2.2 Con pérdida de carga

En el análisis realizado en el apartado anterior no se tiene en cuenta el efecto de la pérdida de carga localizada que se produce en el hueco existente entre la placa vertical y el fondo horizontal.

Para una constricción del flujo relativamente estrecha y una amplitud moderada del tren de onda incidente, el flujo se contrae y se expande, formando vórtices (en función del período del tren de ondas) que se emiten desde la placa, generándose un salto de presión entre ambos regímenes, que se puede representar como [38]:

$$\frac{P_{ext}(x, z, t) - P_{int}(x, z, t)}{\rho} = \frac{f}{2.0} u_{int}(x, z, t) |u_{int}(x, z, t)| + L_i \frac{\partial u_{int}(x, z, t)}{\partial t} \quad (4.19)$$

donde P_{ext} y P_{int} son las presiones asociadas a las regiones exterior e interior respectivamente, ρ es la densidad del agua, u_{int} es la componente de la velocidad en la región interior según la dirección x , L_i es un coeficiente de inercia que puede determinarse de forma

empírica y f es un coeficiente de fricción que en esta tesis se considera como [42]:

$$\begin{aligned} f &= \left(\frac{1}{C\epsilon} - 1 \right)^2 \\ C &= 0.6 + 0.4\epsilon^3 \\ \epsilon &= \frac{h-d}{h} \end{aligned} \quad (4.20)$$

El primer término de la derecha de la Ec. (4.19) evalúa los efectos de fricción y el segundo término los efectos inerciales. Despreciando los efectos inerciales y definiendo un término de fricción equivalente (C_e) para conservar el carácter lineal de la ecuación, se tiene:

$$\frac{P_{ext}(x, z, t) - P_{int}(x, z, t)}{\rho} = C_e(x, z)u_{int}(x, z, t) \quad (4.21)$$

donde,

$$C_e(x, z) = \frac{4.0f}{3.0\pi}|U(x, z)| \quad (4.22)$$

siendo $U(x, z)$ la amplitud de la velocidad horizontal.

Aplicando la ecuación de Bernoulli linearizada, $P(x, z, t) = -\rho\omega g z - \rho\omega \frac{\partial\Phi(x, z, t)}{\partial t}$, a la Ec. (4.21), las condiciones de acuerdo que deben satisfacer las funciones potenciales en la placa ($x = 0$) y en el muro impermeable ($x = B$), considerando el efecto de la pérdida de carga quedan:

$$\phi_{ext,x}(x, z) = \phi_{int,x}(x, z) \quad x=0, -h < z < -d \quad (4.23a)$$

$$\phi_{ext,x}(x, z) = \phi_{int,x}(x, z) = 0 \quad x=0, -d < z < 0 \quad (4.23b)$$

$$\phi_{ext}(x, z) - \phi_{int}(x, z) = C'_e(x, z)\phi_{int,x}(x, z) \quad x=0, -h < z < -d \quad (4.23c)$$

$$\phi_{int,x}(x, z) = 0 \quad x=0, -h < z < 0 \quad (4.23d)$$

con $C'_e(x, z) = -\frac{i}{\omega}C_e(x, z)$

Operando de forma análoga que en el problema sin pérdida de carga, se llega a la ecuación

$$\begin{aligned} &C_L^*[4.0X_{ml} + 2.0iQ_m\beta_m X1_{ml} + 2.0(iQ_l)^*\beta_l^* X3_{ml} \\ &+ (iQ_l)^*\beta_l^* iQ_m\beta_m (X2_{ml} + Y_{ml})] \\ &= 2.0A_0 (2.0X_{m0} + iQ_m\beta_m X3_{m0}) \end{aligned} \quad (4.24)$$

where

$$\begin{aligned}
\beta_m &= 1.0 - e^{iQ_m 2B} \\
\beta_l &= 1.0 - e^{iQ_l 2B} \\
X1_{ml} &= \int_{-h}^{-d} f_l^*(z) f_m(z) C_e'(z) dz \\
X2_{ml} &= \int_{-h}^{-d} f_l^*(z) f_m(z) C_e'(z) C_e'^*(z) dz \\
X3_{ml} &= \int_{-h}^{-d} f_l^*(z) f_m(z) C_e'^*(z) dz
\end{aligned} \tag{4.25}$$

La resolución se realiza de forma iterativa debido a que el coeficiente $C_e'(z)$ depende de la amplitud de la velocidad horizontal $|U(x=0, z)|$, que es una incógnita del problema y se ha calculado suponiendo una onda plana:

$$|U(x=0, z)| = |C_0 f_0(z) i Q_0 \beta_0| \tag{4.26}$$

Si las condiciones de acuerdo son satisfechas, el problema está bien resuelto y se pueden determinar las características cinemáticas y dinámicas más importantes del problema, como las velocidades y presiones en cualquier punto de la columna de agua así como el desplazamiento de la superficie libre, las fuerzas en cualquier punto de la placa o los coeficientes de reflexión y transmisión.

4.2.3 Variables de estudio

Las variables que influyen en la interacción del tren de ondas monocromático con el sistema descrito, se pueden clasificar en parámetros del medio (ρ, h), parámetros del tren incidente (H, T, θ) y parámetros geométricos del sistema (d, B). De entre todos ellos, se consideran como parámetros relevantes el ángulo de incidencia del oleaje θ y los monomios adimensionales profundidad relativa kh , sumergencia relativa d/h y anchura relativa B/L con el objetivo de realizar un análisis adimensional que permita establecer unos criterios de diseño que tengan en cuenta la transmisión de la energía del oleaje al interior de la cámara y la fuerza máxima sobre la placa.

Para cuantificar la transmisión de la energía del oleaje al interior de la cámara, se calculan los coeficientes de reflexión en la región exterior C_r y de captura en la región interior C_c , que se definen respectivamente como las amplitudes relativas de la onda reflejada en la región exterior y la capturada en la región interior, en relación con la amplitud de la onda

incidente. Sus módulos y fases quedan,

$$|C_r| = |A_0 - C_0\beta_0|/|A_0| \quad (4.27a)$$

$$\theta_r = \arctan(\Im\{C_r\}, \Re\{C_r\}) \quad (4.27b)$$

$$|C_c| = |C_0|/|A_0| \quad (4.27c)$$

$$\theta_c = \arctan(\Im\{C_c\}, \Re\{C_c\}) \quad (4.27d)$$

La fuerza máxima por unidad de ancho ejercida por un tren de ondas incidiendo en la placa (F_{max}) se calcula como el valor máximo de la fuerza durante un período de onda:

$$F_{max} = \max \left(\int_{-d}^{\eta_{ext}} P_{ext}(z, t) dz - \int_{-d}^{\eta_{int}} P_{int}(z, t) dz \right) = \max (F1 + F2 - F3) \quad (4.28)$$

donde

$$\eta_i(x, t) = \frac{-1.0}{g} \Re \left\{ \frac{\partial \phi_i(x, z, t)}{\partial t} \right\}, \quad i = ext, int \quad (4.29a)$$

$$P_i(x, z, t) = -\rho_\omega g z - \rho_\omega \frac{\partial \phi_i(x, z, t)}{\partial t}, \quad i = ext, int \quad (4.29b)$$

$$F1 = \int_{-d}^0 (P_{ext}(z, t) - P_{int}(z, t)) dz \quad (4.29c)$$

$$F2 = \int_0^{\eta_{ext}} P_{ext}(z, t) dz \quad (4.29d)$$

$$F3 = \int_0^{\eta_{int}} P_{int}(z, t) dz \quad (4.29e)$$

$$(4.29f)$$

4.3 Aplicación a oleaje irregular

Puesto que los datos disponibles para el oleaje irregular son datos de los estadísticos del estado de mar tales como altura de ola significativa H_s , periodo medio de paso por cero T_m y dirección media de propagación θ_m , ha sido necesario admitir que las variables aleatorias altura de ola y periodo medio de paso por cero en el estado de mar siguen la distribución de Longuet-Higgins [43].

Además, tal y como se ha comentado en la sección 4.2, puesto que la formulación empleada es válida para trenes de onda monocromáticos, se ha admitido la validez de la hipótesis de equivalencia. Esta hipótesis permite estudiar la distribución de una variable aleatoria en el estado de mar asignando a cada ola individual el valor de la variable aleatoria correspondiente a un tren de ondas monocromático con la misma altura y periodo.

Como ejemplo de aplicación a oleaje irregular, se ha estudiado la distribución de las fuerzas máximas en el estado de mar $f(F_{max})$.

5

Tendencia de las formas del lecho

El tren resultante de la interacción del oleaje incidente y la infraestructura concebida para albergar el sistema OWC genera movimientos medios no nulos de las partículas de agua, conocidos como la corriente euleriana y la corriente lagrangiana, que tienen la capacidad de transportar el sedimento que ha sido puesto en movimiento por el paso del tren oscilatorio. Dicho transporte alrededor del sistema podría modificar sustancialmente su rendimiento debido a la formación de barras de sedimentos. Este escenario contrasta con la optimización geométrica del mismo (ver Capítulo 3), puesto que cabe esperar que las formas de lecho aumenten la disipación del movimiento oscilatorio por lo que se reduciría la altura de ola que le llega al sistema y por otro lado se modificaría la distancia existente entre el sistema OWC y el fondo.

5.1 Introducción y estado del arte

La interacción del oleaje con el sistema OWC de sección circular, genera una difracción sobre el tren incidente e induce en el aire de la cámara una presión oscilatoria sobre la presión atmosférica exterior. Esta presión oscilatoria de aire, a su vez irradia ondas a través del hueco existente entre el dispositivo y el fondo. Para el sistema lineal con cámara oscilante (LOC), se desprecia el efecto de la turbina. Esto implica que únicamente tenga lugar la refracción del oleaje.

Las oscilaciones generadas por ambos sistemas, se propagan en un fluido viscoso sobre un fondo irregular de permeabilidad variable. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los efectos viscosos sólo son significativos en las proximidades de los contornos. A esta zona de confinamiento de los efectos viscosos cercana a los contornos se le conoce como capa

límite. Para el movimiento oscilatorio su espesor convencional, que se define como una relación entre la viscosidad cinemática del agua ν y la frecuencia angular del movimiento oscilatorio ω , $\delta \simeq (2\nu/\omega)^{0.5}$, es del orden de milímetros, por lo que se puede aceptar que el fluido desliza sobre la superficie sin que se cumpla la condición de velocidad igual a la del contorno para las partículas en contacto con ella. En consecuencia, la viscosidad puede suponerse nula fuera de la capa límite, desapareciendo las tensiones tangenciales, por lo que en ausencia de un mecanismo específico, no hay forma de inducir la rotación de las partículas de agua. Esto conlleva a que fuera de la capa límite el movimiento oscilatorio pueda suponerse irrotacional. Por otra parte, el agua puede tratarse como un fluido casi incompresible.

Por tanto, para la resolución de los problemas hidrodinámicos de los sistemas propuestos en esta tesis doctoral, se considera un fluido incompresible no viscoso y un flujo irrotacional de forma que el campo de velocidades y presiones puede describirse mediante la teoría potencial. Estas simplificaciones junto con la consideración de un fondo horizontal e impermeable hace que se pueda abordar de manera sencilla el análisis de las oscilaciones generadas por ambos dispositivos.

En cambio, cerca del fondo el flujo pasa a ser rotacional y los efectos viscosos son importantes, generándose una capa límite asociada a las oscilaciones producidas por los sistemas. La hidrodinámica de la capa límite bajo una onda depende del régimen de oscilación (Stokes y Boussinesq) y del régimen hidráulico que puese ser laminar, de transición, turbulento liso y turbulento rugoso (ver [44]). En la capa límite laminar el flujo se visualiza como capas que se deslizan sobre cada una con diferentes velocidades y en la turbulenta el flujo pierde su estabilidad y se forman remolinos.

El caso de la capa límite laminar lo estudió por primera vez Stokes [45] y actualmente su comprensión es razonablemente completa. El primer intento de describir el régimen turbulento de manera sencilla fue desarrollado por Jonsson [46, 47] y Jonsson y Carlsen [48], que emplearon la forma integrada de las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y asumieron un perfil de velocidades logarítmico.

La variación del espesor de la capa límite en la dirección de propagación de la onda induce una corriente estacionaria adicional, llamada corriente euleriana, que determina la dirección del transporte neto de sedimentos. Longuet-Higgins [11] estudió la capa límite en el fondo del mar debido a la propagación del oleaje y mostró que la deriva de Stokes, que representa el efecto de la trayectoria de las partículas de agua, debe ser considerada junto con la corriente euleriana para determinar el movimiento de los sedimentos en el fondo. Esta velocidad se conoce como transporte de masa y fue determinada para fondo horizontal e impermeable y capa límite laminar, con un forzamiento hidrodinámico esencialmente no viscoso e irrotacional. Posteriormente, Hunt y Johns [49] proporcionaron para un flujo oscilatorio tridimensional, el transporte de masa cerca del borde exterior de la capa viscosa sin considerar el flujo lejos del fondo. Carter, Liu y Mei [50] estudiaron el transporte de masa a través de la capa límite oscilatoria y proporcionaron una formulación en términos

del campo de velocidades oscilatorio no viscoso fuera de la capa límite teniendo en cuenta la reflexión que sufre una onda por la morfología del fondo. El transporte de masa en una capa límite turbulenta fue determinado por Longuet-Higgins [51], encontrando que la velocidad del transporte de masa en la parte superior de la capa límite no estaba afectada por la turbulencia.

Otros autores han estudiado la influencia de una estructura en el transporte de masa. Por ejemplo, Lamoure y Mei [52] analizaron el transporte de masa generada por una onda alrededor de un cilindro vertical bajo la hipótesis de que su radio es mucho menor que la longitud de onda. Al estudiar el perfil vertical de la velocidad del transporte de masa, encontraron que se producía un cambio de signo dentro de la capa límite, de modo que cerca del fondo la velocidad convergía hacia el cilindro y cerca del exterior de la capa límite la velocidad se alejaba del cilindro.

Los modos de transporte del sedimento pueden ser por fondo o suspensión. El transporte por fondo se produce cuando el valor de la tensión tangencial en el fondo excede el valor crítico para la iniciación del movimiento y las partículas se deslizan, ruedan o saltan, en contacto continuo con el fondo. En cambio, el transporte por suspensión se genera cuando la tensión tangencial en el fondo supera la velocidad de caída de las partículas y el sedimento puede desplazarse en suspensión debido a las fuerzas turbulentas.

Existen distintas formulaciones para el cálculo del transporte de sedimentos, en función del forzamiento que puede ser oleaje (flujo oscilatorio), corrientes (flujo estacionario y uniforme) o una combinación de ambas (ver [53]). Del mismo modo que en el transporte de masa, se ha estudiado la influencia de una estructura en el transporte de sedimentos. Baquerizo y Losada [54] estudiaron el transporte de sedimentos en la proximidad de un dique poroso, teniendo en cuenta el efecto de los trenes de onda incidente y reflejado. El análisis se realizó en función del ángulo de incidencia del oleaje y de las propiedades estructurales del dique, poniendo de manifiesto la existencia de patrones de erosión y depósito en la zona próxima al dique. Besio y Losada [55] analizaron analíticamente el transporte de sedimentos alrededor de un campo de estructuras cilíndricas y porosas, debido a la acción del oleaje y la corriente, poniendo de manifiesto la existencia de zonas de erosión y depósito.

En este capítulo se expone la formulación de los problemas del transporte de masa y de sedimentos. Para los sistemas definidos en los capítulos anteriores, se desarrollan las expresiones correspondientes a la velocidad del transporte de masa y al transporte neto de sedimentos, las cuales incorporan los efectos de la difracción y de la radiación para el sistema OWC de sección circular, y el efecto de la pérdida de carga para el sistema LOC.

5.2 Formulación del problema

5.2.1 Transporte de masa

El transporte de masa existente en la capa límite cerca del fondo, cuando el forzamiento hidrodinámico es esencialmente no viscoso e irrotacional, fue estudiado por Carter, Liu y Mei [50] y se encuentra desarrollado en Mei [10].

Se parte de un sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) , donde el plano $x - y$ coincide con el plano de la capa límite en el fondo, y la componente z va en la dirección vertical hacia la región exterior no viscosa. La capa límite tiene un espesor δ y fuera de ella existe un campo de velocidades no viscoso, cuyas componentes se representan como $u(x, y, z, t) = \Re\{U(x, y, z)e^{-i\omega t}\}$ y $v(x, y, z, t) = \Re\{V(x, y, z)e^{-i\omega t}\}$ (Fig. 5.1).

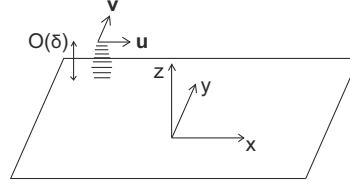


Figura 5.1: Coordenadas locales

Dentro de la capa límite, las componentes de la velocidad u y v , pueden expandirse como:

$$u = u_1 + u_2 \dots \quad (5.1a)$$

$$v = v_1 + v_2 \dots \quad (5.1b)$$

donde $u_1, v_1 = O(\omega A_0)$ y $u_2, v_2 = O(\omega k A_0^2)$.

Al primer orden, u_1 y v_1 corresponden a la componente oscilatoria,

$$u_1 = \Re\{U_0(x, y)F_1(\xi)e^{-i\omega t}\} \quad (5.2a)$$

$$v_1 = \Re\{V_0(x, y)F_1(\xi)e^{-i\omega t}\} \quad (5.2b)$$

donde U_0, V_0 son las amplitudes complejas de las componentes de la velocidad fuera de la capa límite ($U(x, y, z = -h), V(x, y, z = -h)$), y $F_1(\xi)$ es $F_1(\xi) = 1 - e^{-(1-i)\xi}$ con $\xi = z/\delta$, siendo δ el espesor de la capa límite.

Al segundo orden, las componentes u_2 y v_2 se expresan como,

$$u_2 = \bar{u}_2 + \Re\{\tilde{u}_2 e^{-2i\omega t}\} \quad (5.3a)$$

$$v_2 = \bar{v}_2 + \Re\{\tilde{v}_2 e^{-2i\omega t}\} \quad (5.3b)$$

donde \bar{u}_2 y \bar{v}_2 no varían con el tiempo y se denominan corrientes eulerianas, que a pesar de ser pequeñas, son las responsables de la corriente de deriva de las partículas del fluido después de muchos periodos. Las expresiones $\Re\{\tilde{u}_2 e^{-2i\omega t}\}, \Re\{\tilde{v}_2 e^{-2i\omega t}\}$ varían en el tiempo con un periodo de oscilación de la mitad al correspondiente a las componentes u_1, v_1 . Como consecuencia presentan una influencia menor en el campo de velocidades oscilatorio, por lo que se desprecian.

Para conocer las trayectorias que describen las partículas de agua que se desplazan debido a las presiones inducidas por el movimiento oscilatorio, es necesario calcular la velocidad Lagrangiana. Siguiendo el desarrollo de Mei [10], se obtiene que la velocidad total de la partícula es su velocidad inicial (corriente euleriana) junto con una corrección debido al hecho de que la partícula se mueve en un medio donde el campo de velocidades varía (deriva de Stokes). Esta velocidad total se conoce como transporte de masa de una partícula de fluido que se encuentra ubicada en la posición (x, y, ξ) :

$$\overline{U_L(x, y, \xi)} = (u_L(x, y, \xi), v_L(x, y, \xi)) \quad (5.4a)$$

$$u_L(x, y, \xi) = \overline{u_2}(x, y, \xi) + u_d(x, y, \xi) \quad (5.4b)$$

$$v_L(x, y, \xi) = \overline{v_2}(x, y, \xi) + v_d(x, y, \xi) \quad (5.4c)$$

Las expresiones correspondientes a las componentes de la corriente euleriana $(\overline{u_2}, \overline{v_2})$ y de la deriva de Stokes (u_d, v_d) , quedan:

$$\overline{u_2} = \Re \left\{ IF1U_0 \frac{\partial U_0^*}{\partial x} + IF2V_0 \frac{\partial U_0^*}{\partial y} + IF3U_0 \frac{\partial V_0^*}{\partial y} \right\} \quad (5.5a)$$

$$\overline{v_2} = \Re \left\{ IF1V_0 \frac{\partial V_0^*}{\partial y} + IF2U_0 \frac{\partial V_0^*}{\partial x} + IF3V_0 \frac{\partial U_0^*}{\partial x} \right\} \quad (5.5b)$$

$$u_d = \frac{1}{2\omega} \Re \left\{ iSF1U_0 \frac{\partial U_0^*}{\partial x} + iSF2V_0 \frac{\partial U_0^*}{\partial y} - iSF3U_0 \frac{\partial V_0^*}{\partial y} \right\} \quad (5.5c)$$

$$v_d = \frac{1}{2\omega} \Re \left\{ iSF1V_0 \frac{\partial V_0^*}{\partial y} + iSF2U_0 \frac{\partial V_0^*}{\partial x} - iSF3V_0 \frac{\partial U_0^*}{\partial x} \right\} \quad (5.5d)$$

donde (*) es el conjugado complejo y los coeficientes $IF1, IF2, IF3, SF1, SF2, SF3$ vienen dados por,

$$IF1 = \frac{3.0}{4.0} + \frac{1.0}{e^{\xi(1.0-i)}} \left(\xi \left(\frac{1.0}{2.0} + \frac{1.0i}{2.0} \right) - \frac{1.0}{2.0} + \frac{3.0i}{2.0} \right) - \quad (5.6a)$$

$$\frac{1.0}{e^{\xi(1.0+i)}} \left(\frac{1.0}{e^{\xi(1.0-i)}} \left(\frac{1.0}{4.0} + \frac{1.0i}{4.0} \right) + \frac{1.0i}{2.0} \right) - \frac{3.0i}{4.0}$$

$$IF2 = \frac{1.0}{4.0} - \frac{\sin \xi}{e^{\xi}} - \frac{1.0}{4.0e^{2.0\xi}} \quad (5.6b)$$

$$IF3 = \frac{1.0}{2.0} + \frac{1.0}{e^{\xi(1.0-i)}} \left(\xi \left(\frac{1.0}{2.0} + \frac{1.0i}{2.0} \right) - \frac{1.0}{2.0} + i \right) - \frac{i}{4.0e^{2.0\xi}} - \frac{3.0i}{4.0} \quad (5.6c)$$

$$SF1 = 1.0 + \xi \frac{1.0-i}{e^{\xi(1.0-i)}} - \frac{1.0}{e^{\xi(1.0+i)}} + \frac{-1.0+i}{e^{\xi(1.0-i)}} + \frac{1.0-i}{e^{2.0\xi}} \quad (5.6d)$$

$$SF2 = \frac{1.0}{e^{2.0\xi}} - \frac{2.0\cos \xi}{e^{\xi}} + 1.0 \quad (5.6e)$$

$$SF3 = \frac{i}{e^{2.0\xi}} - \frac{i}{e^{\xi(1.0-i)}} + \frac{\xi}{e^{\xi(1.0-i)}} (-1.0 + i) \quad (5.6f)$$

5.2.2 Transporte de sedimentos

La ecuación de continuidad del sedimento viene dada por:

$$(1 - n) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \nabla \cdot q = 0 \quad (5.7)$$

donde n es la porosidad del fondo, z_b representa los cambios del nivel del fondo, t es el tiempo, q es la tasa de transporte de sedimentos que representa el volumen de sedimentos por unidad de tiempo que pasa a través de un plano de anchura unidad (m^3/sm) y $\nabla \cdot$ es la divergencia.

Debido a que se ha empleado la teoría lineal para describir la hidrodinámica de los distintos sistemas considerados bajo la hipótesis de fondo horizontal, sólo se puede aplicar la ecuación de continuidad del sedimento (5.7) cuando la variación del lecho es pequeña de forma que no se modifique significativamente la formulación y las hipótesis del problema. Por tanto para inferir en la tendencia de las formas del lecho, se analiza la divergencia de la tasa de transporte de sedimentos ($\nabla \cdot q$) de modo que si es positivo corresponde a erosión y si es negativo corresponde a depósito.

El cálculo del transporte de sedimentos debido al oleaje, se realiza a partir de las expresiones proporcionadas por Bailard [56] para el la tasa del transporte por fondo y suspensión:

$$q_b(t) = \frac{0.5\rho_w f_w e_b}{(\rho_s - \rho_w)g \tan \gamma} [|\overrightarrow{U}(t)|^2 \overrightarrow{U}(t) - \frac{\tan \beta}{\tan \gamma} |\overrightarrow{U}(t)|^3 i_\beta] \quad (5.8a)$$

$$q_s(t) = \frac{0.5\rho_w f_w e_b}{(\rho_s - \rho_w)g \tan(\gamma)} [|\overrightarrow{U}(t)|^3 \overrightarrow{U}(t) - \frac{e_s}{w_s} \tan \beta |\overrightarrow{U}(t)|^5 i_\beta] \quad (5.8b)$$

donde q_b y q_s son la tasa de transporte por fondo y suspensión respectivamente, $\overrightarrow{U}(t)$ es el vector de la velocidad instantánea cerca del fondo, e_b y e_s son factores de eficiencia para el transporte por fondo y suspensión respectivamente, f_w es el factor de fricción, β es la pendiente local del fondo, γ es un factor de fricción dinámica, w_s es la velocidad de caída de la partícula, i_β es un vector unidad en la dirección de la pendiente del fondo ρ_w y ρ_s es la densidad del agua y del sedimento respectivamente y g es la aceleración de la gravedad.

Las componentes del vector velocidad instantánea cerca del fondo, $\overrightarrow{U}(t) = (u(t), v(t))$, se consideran como:

$$u(t) = \Re\{U_0(x, y)F_1(\xi)e^{-i\omega t}\} + \overline{u_2} \quad (5.9a)$$

$$v(t) = \Re\{V_0(x, y)F_1(\xi)e^{-i\omega t}\} + \overline{v_2} \quad (5.9b)$$

Al promediar en un período de onda T las expresiones del transporte de sedimentos, se

obtiene la contribución neta del transporte de sedimentos, cuyas derivadas permiten identificar las áreas posibles de erosión y depósito de sedimentos.

$$\bar{q} = \bar{q}_b + \bar{q}_s = \frac{1}{T} \int_0^T (q_b(t) + q_s(t)) dt \quad (5.10a)$$

$$\nabla \cdot \bar{q} = \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} \quad (5.10b)$$

5.2.3 Casos de estudio

Los problemas hidrodinámicos que se van a estudiar, van a ser el caso de un sistema OWC cilíndrico (Fig. 5.2a) y el sistema lineal con cámara oscilante (Fig. 5.2b).

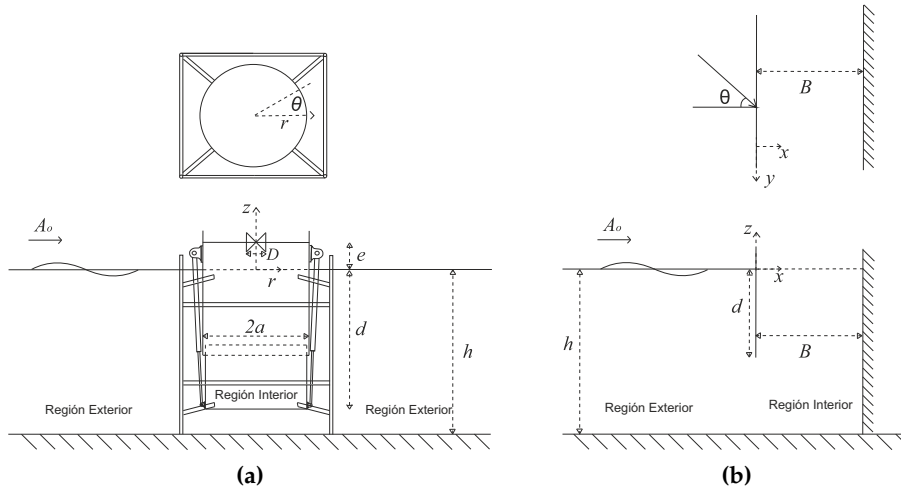


Figura 5.2: Diagrama de los casos de estudio

Como se explica en el Anejo A, el problema hidrodinámico del sistema OWC correspondiente a la Fig. 5.2a se descompone en el problema de la difracción en el que se estudia la incidencia de un tren de ondas monocromático con un sistema OWC cuya cámara se encuentra a presión atmosférica, y el problema de la radiación en el que el mar está en reposo y la oscilación se genera debido a una presión oscilatoria de aire distinta de la atmosférica en el interior de la cámara.

El problema se resuelve mediante teoría lineal y las hipótesis iniciales son fondo horizontal e impermeable, flujo irrotacional y fluido incompresible y no viscoso. El dominio de estudio se separa en dos regiones (exterior e interior) y se define un potencial para cada una, obligando a que se satisfagan las condiciones de acuerdo cinemática (flujo) y dinámica (presión) en el contorno del cilindro.

Sus funciones potenciales se expresan en coordenadas cilíndricas, mientras que la expresión de la velocidad del transporte de masa se encuentra en coordenadas cartesianas. Por

tanto, se realiza el siguiente cambio de coordenadas cilíndricas a cartesianas en las amplitudes complejas de las velocidades fuera de la capa límite, U_0 y V_0 :

$$U_0 = \frac{\partial \phi(r, \theta, z = -h)}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (5.11a)$$

$$V_0 = \frac{\partial \phi(r, \theta, z = -h)}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad (5.11b)$$

donde las derivadas de las funciones potenciales ϕ tienen en cuenta los problemas de la difracción y de la radiación, tanto en el interior como en el exterior del sistema:

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial r} = \frac{\partial \phi_{dif,i}}{\partial r} + \frac{\partial \phi_{rad,i}}{\partial r}, i = ext, int \quad (5.12a)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial \theta} = \frac{\partial \phi_{dif,i}}{\partial \theta} + \frac{\partial \phi_{rad,i}}{\partial \theta}, i = ext, int \quad (5.12b)$$

y sus derivadas respecto las coordenadas polares (r, θ) para ambos problemas quedan:

$$\frac{\partial \phi_{dif,int}}{\partial r} = \frac{-igA_0}{\omega} \sum_{m=0}^{N_m} \epsilon^m i^m \cos(m\theta) \sum_{l=0}^{N_l} B_{ml} \frac{\partial I_m(k_l r)}{\partial r} \frac{1}{k_l a I'_m(k_l a)} Z_l(-h) \quad (5.13a)$$

$$\frac{\partial \phi_{dif,ext}}{\partial r} = \frac{-igA_0}{\omega} \sum_{m=0}^{N_m} \epsilon^m i^m \cos(m\theta) \quad (5.13b)$$

$$\left(\left(\frac{\partial J_m(k_0 r)}{\partial r} - \frac{\partial H_m(k_0 r)}{\partial r} \frac{J'_m(k_0 a)}{H'_m(k_0 a)} \right) \frac{Z_0(-h)}{Z_0(0)} + \sum_{l=0}^{N_l} A_{ml} \frac{\partial K_m(k_l r)}{\partial r} \frac{1}{k_l a K'_m(k_l a)} Z_l(-h) \right) \quad (5.13c)$$

$$\frac{\partial \phi_{rad,int}}{\partial r} = \frac{-i\hat{P}}{\rho_w \omega} \sum_{l=0}^{N_l} D_l \frac{\partial I_0(k_l r)}{\partial r} \frac{1}{k_l a I'_0(k_l a)} Z_l(-h) \quad (5.13d)$$

$$\frac{\partial \phi_{rad,ext}}{\partial r} = \frac{-i\hat{P}}{\rho_w \omega} \sum_{l=0}^{N_l} E_l \frac{\partial K_0(k_l r)}{\partial r} \frac{1}{k_l a K'_0(k_l a)} Z_l(-h) \quad (5.13e)$$

$$\frac{\partial \phi_{dif,int}}{\partial \theta} = \frac{-igA_0}{\omega} \sum_{m=0}^{N_m} \epsilon^m i^m (-m) \sin(m\theta) \sum_{l=0}^{N_l} B_{ml} \frac{I_m(k_l r)}{k_l a I'_m(k_l a)} Z_l(-h) \quad (5.13f)$$

$$\frac{\partial \phi_{dif,ext}}{\partial \theta} = \frac{-igA_0}{\omega} \sum_{m=0}^{N_m} \epsilon^m i^m (-m) \sin(m\theta) \quad (5.13g)$$

$$\left(\left(J_m(kr) - H_m(kr) \frac{J'_m(ka)}{H'_m(ka)} \right) \frac{Z_0(-h)}{Z_0(0)} + \sum_{l=0}^{N_l} A_{ml} \frac{K_m(k_l r)}{k_l a K'_m(k_l a)} Z_l(-h) \right) \quad (5.13h)$$

donde i es el número imaginario puro, g es la aceleración de la gravedad, ω es la frecuencia angular, A_0 es la amplitud de la onda, \hat{P} es la amplitud de la presión oscilatoria de aire, h es la profundidad, a es el radio del sistema, k_0 es el número de onda del modo propagante, k_l con $l > 1$ son los números de ondas asociados a los modos propagantes, N_l es el número de modos evanescentes, A_{ml}, B_{ml}, D_l, E_l son los coeficientes complejos que se obtienen al resolver el problema hidrodinámico, $Z_l(z)$ son las autofunciones normalizadas definidas en

el Anejo A, (r, θ) son las coordenadas polares, J_m son las funciones de Bessel de primer tipo, H_m son las funciones de Hankel, I_m y K_m corresponden a las funciones de Bessel Modificadas y sus derivadas quedan:

$$\frac{\partial J_m(k_0 r)}{\partial r} = \frac{m}{r} J_m(k_0 r) - k_0 J_{m+1}(k_0 r) \quad (5.14a)$$

$$\frac{\partial H_m(k_0 r)}{\partial r} = \frac{m}{r} H_m(k_0 r) - k_0 H_{m+1}(k_0 r) \quad (5.14b)$$

$$\frac{\partial K_m(k_l r)}{\partial r} = \frac{m}{r} K_m(k_l r) - k_l K_{m+1}(k_l r) \quad (5.14c)$$

$$\frac{\partial I_m(k_l r)}{\partial r} = \frac{m}{r} I_m(k_l r) + k_l K_{m+1}(k_l r) \quad (5.14d)$$

Para el caso del sistema lineal con la cámara oscilante Fig. 5.2b no existe la radiación desde el interior puesto que la presión existente es la atmosférica, y únicamente se considera el problema hidrodinámico de la incidencia de un tren de ondas sobre la estructura. Para este sistema, se tiene en cuenta además el efecto de la pérdida de carga localizada. En este caso no es necesario realizar un cambio de coordenadas ya que sus funciones potenciales están expresadas en coordenadas cartesianas (ver Capítulo 4), quedando sus derivadas como:

$$U_{0,ext} = \frac{\partial \phi_{ext}}{\partial x} = \frac{g e^{i\lambda y}}{\omega} \left(\frac{A_0}{\cosh(k_0 h)} Q_0 e^{iQ_0 x} + \sum_{l=0}^{N_l} \frac{C_l}{\cosh(k_l h)} Q_l e^{-iQ_l x} \right) \quad (5.15a)$$

$$U_{0,int} = \frac{\partial \phi_{int}}{\partial x} = \frac{g e^{i\lambda y}}{\omega} \sum_{l=0}^{N_l} \frac{C_l}{\cosh(k_l h)} Q_l e^{(iQ_l x - iQ_l(x-2B))} \quad (5.15b)$$

$$V_{0,ext} = \frac{\partial \phi_{ext}}{\partial y} = \frac{g \lambda e^{i\lambda y}}{\omega} \left(\frac{A_0}{\cosh(k_0 h)} e^{iQ_0 x} - \sum_{l=0}^{N_l} \frac{C_l}{\cosh(k_l h)} e^{-iQ_l x} \right) \quad (5.15c)$$

$$V_{0,int} = \frac{\partial \phi_{int}}{\partial y} = \frac{g \lambda e^{i\lambda y}}{\omega} \sum_{l=0}^{N_l} \frac{C_l}{\cosh(k_l h)} e^{(iQ_l x - iQ_l(x-2B))} \quad (5.15d)$$

donde $\lambda = k_0 \sin(\theta)$, $Q_0 = \sqrt{k_l^2 - \lambda^2}$, B es el ancho del sistema, (x, y) son las coordenadas cartesianas y C_l son los coeficientes complejos que se obtienen al resolver el problema hidrodinámico. El resto de parámetros coinciden con los del sistema OWC.

Parte IV

CASOS DE ESTUDIO

6

Optimización y gestión de un sistema OWC

En este capítulo se analiza la variabilidad temporal del clima marítimo en un emplazamiento determinado y se aplica la metodología para la optimización de un sistema OWC, expuesta en el Capítulo 3.

Basado en los resultados de la optimización estocástica, se consideran dos configuraciones y se calcula sus funciones de distribución correspondientes de la potencia neumática disponible para la turbina en el estado de la mar. Estos resultados se comparan con los obtenidos para un dispositivo ideal capaz de adaptarse a la geometría óptima de cada estado de la mar (optimización determinista).

Para estas tres configuraciones óptimas, se analizan ciertas variables relacionadas con el rendimiento no estacionario del dispositivo. Con este fin, se simulan las series temporales de la energía neumática disponible para un gran número de realizaciones del clima marítimo durante la vida útil del sistema, basadas en la altura de ola y el periodo pico.

6.1 Definición de las características de la zona de estudio

El sistema OWC en este estudio está ubicado a 10.0 m de profundidad en la costa suroeste española abierta al océano Atlántico (Golfo de Cádiz).



Figura 6.1: Mapa de España con la localización del sistema OWC

Para el análisis, se utilizaron los datos de oleaje proporcionados por Puertos del Estado en el punto de Latitud 36.5°N y Longitud 7.0°W, denominado PEE WANA 1052046, ubicado en profundidades indefinidas. Estos datos incluyen parámetros estadísticos del estado de mar con una cadencia de 3 h, desde el 1996 hasta el 2011. La altura de ola significativa H_s , y el correspondiente periodo pico T_p , fueron propagados bajo la hipótesis de teoría lineal, hacia el emplazamiento del sistema OWC a 10.0 m de profundidad. La Fig. 6.2 muestra las curvas de estado de H_s y T_p obtenidas.

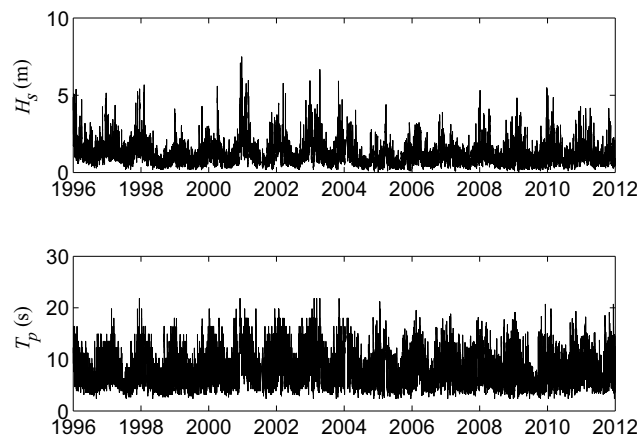


Figura 6.2: Datos históricos procedentes del WANA 1052046, propagados a $h=10.0$ m

6.2 Variabilidad estacional e interanual del clima marítimo y de la potencia neumática media

A partir de los estadísticos propagados, se estudió la variabilidad mensual e interanual de la potencia del oleaje disponible (kW/m), expresada como sigue:

$$P_w = \rho_w g \int_0^{\infty} S_{\eta}(\omega) C_g(\omega) d\omega \quad (6.1)$$

donde C_g es la velocidad de grupo.

La Fig. 6.3 muestra para cada mes, la potencia del oleaje disponible en los diferentes años estudiados (círculos negros) así como el valor medio considerando todos los años (círculos grises). Se observa que el mes con mayor variabilidad es diciembre y el mes con menor variabilidad es agosto. Los valores medios obtenidos para cada mes muestran la considerable variabilidad anual de las condiciones climáticas.

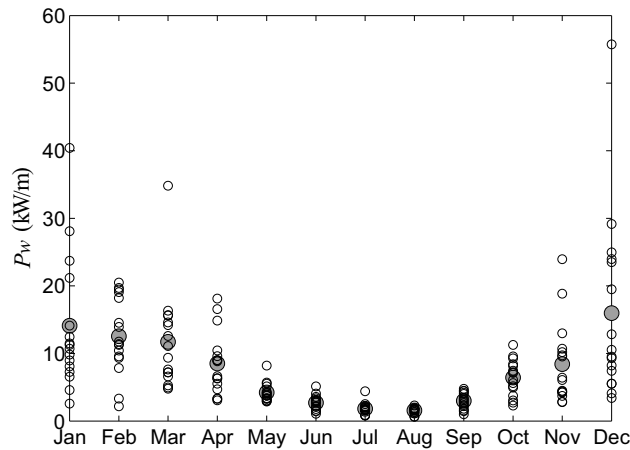


Figura 6.3: Variabilidad mensual de la potencia del oleaje disponible (kW/m)

En la Fig. 6.4 se representan los valores medios anuales para cada uno de los años considerados. Se observa que se alternan años relativamente severos en torno a 1996 con valores del orden de los 12.0 kW/m con años más benignos en promedio (en torno a 2006) en los que la potencia del oleaje disponible es del orden de la mitad o incluso un tercio de dicho valor. Este comportamiento sugiere buscar no sólo el diseño óptimo anual, sino también los asociados a los semestres que van de octubre a marzo (invierno marítimo) y de abril a septiembre, (verano marítimo)[8].

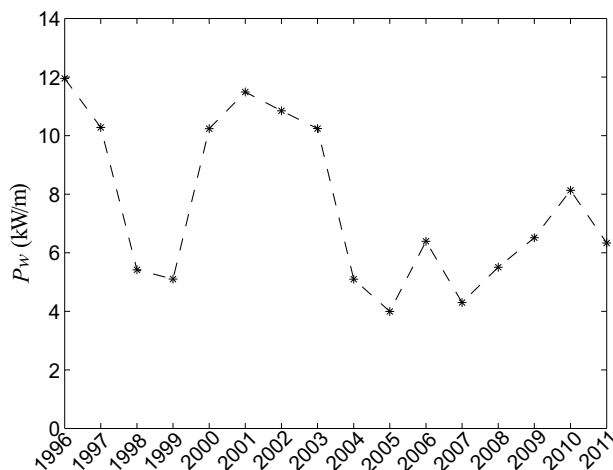


Figura 6.4: Variabilidad interanual de la potencia del oleaje disponible (kW/m)

Los datos en la Fig. 6.2 fueron usados para inferir las funciones de densidad conjunta empíricas para H_s y T_p para el invierno marítimo, el verano marítimo y el año (ver Fig. 6.5).

Estas funciones fueron utilizadas para resolver los problemas de optimización estocástica formulados en estos tres periodos temporales.

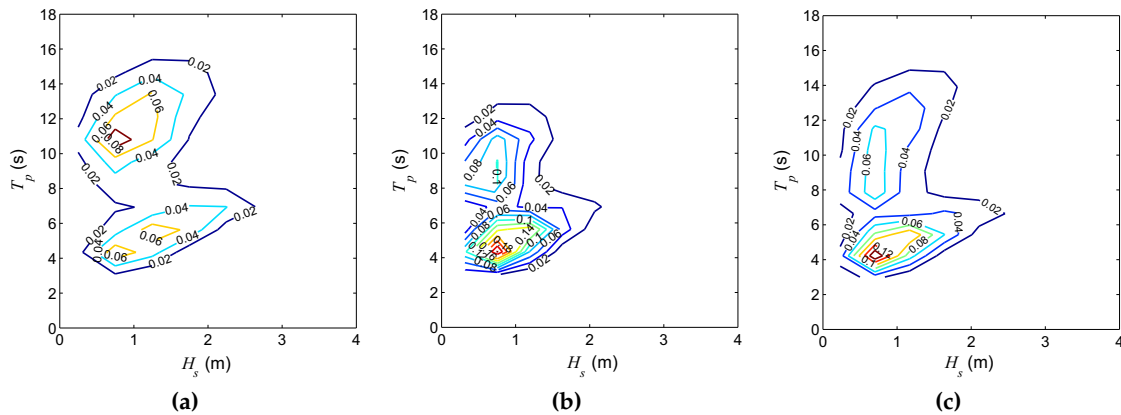


Figura 6.5: Funciones de densidad conjunta empíricas estacionarias para H_s y T_p (a) invierno marítimo, (b) verano marítimo, (c) año.

Las funciones previas corresponden a la distribución estacionaria estacional y anual. La función de densidad de probabilidad no estacionaria que reproduce la variabilidad temporal (intra-anual e interanual) fue también estimada y usada para las simulaciones del clima marítimo (ver sección 6.4)

Las curvas de estados a 10 m de profundidad fueron usadas para obtener la variación temporal de la potencia neumática disponible en el estado de mar, para un sistema OWC fijado al fondo. La variabilidad mensual e interanual del clima marítimo también se refleja en esta magnitud (ver Fig.6.6, paneles a y b). Esto pone de manifiesto la importancia de la consideración de la variabilidad temporal del clima marítimo en el diseño de este tipo de dispositivos.

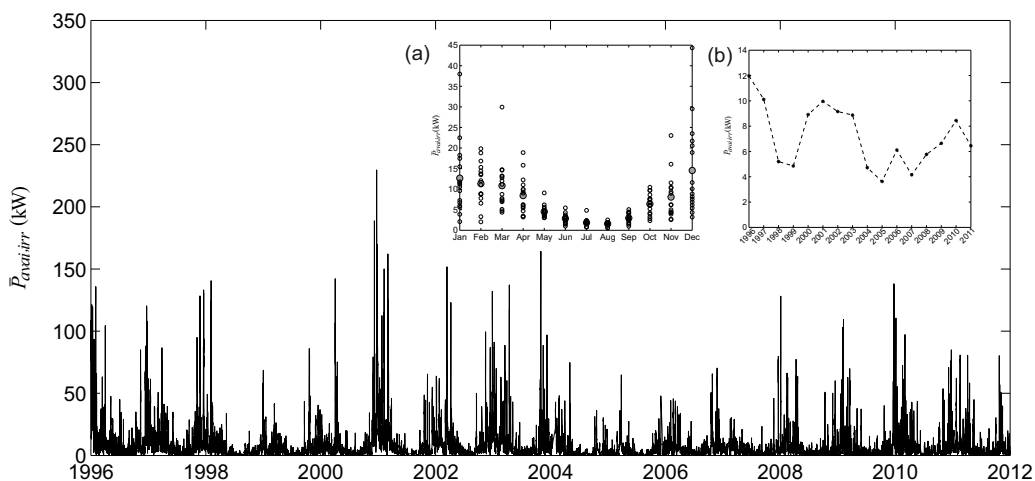


Figura 6.6: Curva de estados, variabilidad mensual (a) e interanual (b) de la potencia neumática disponible para un sistema OWC con la geometría fija: $a=3.5$ m, $d=5.0$ m, $e=5.0$ m, $D=1.0$ m, $N=104.72$ rad/s, $h=10.0$ m.

6.3 Diseño óptimo para las distintas escalas temporales

La búsqueda de dispositivos óptimos siguiendo la formulación presentada en la sección 3.3.1 se ha realizado para diferentes valores del radio del dispositivo a y del diámetro de la turbina D . La Tabla 6.1 muestra los casos analizados con $K=0.45$ y $e=5.0$ m, tomando $V = \pi a^2 e$. También se consideraron los siguientes valores de la velocidad del sonido en el aire $c_a=340.0$ m/s y del ratio $\rho_w/\rho_a=1000.0$, donde ρ_w y ρ_a son la densidad del agua y del aire, respectivamente.

Caso	a (m)	D (m)
1	1.5	1.0
2	3.5	1.0
3	3.5	2.5

Tabla 6.1: Parámetros geométricos de los sistemas OWC.

Las curvas correspondientes de los coeficientes adimensionales de masa añadida $\tilde{C}(\omega)$, amortiguamiento $\tilde{B}(\omega)$ y flujo difractado por amplitud de onda unitaria $\tilde{\Gamma}(\omega)$ se han calculado analíticamente siguiendo la metodología de Martins y Mei [16], y para algunas sumergencias se muestran en la figura siguiente:

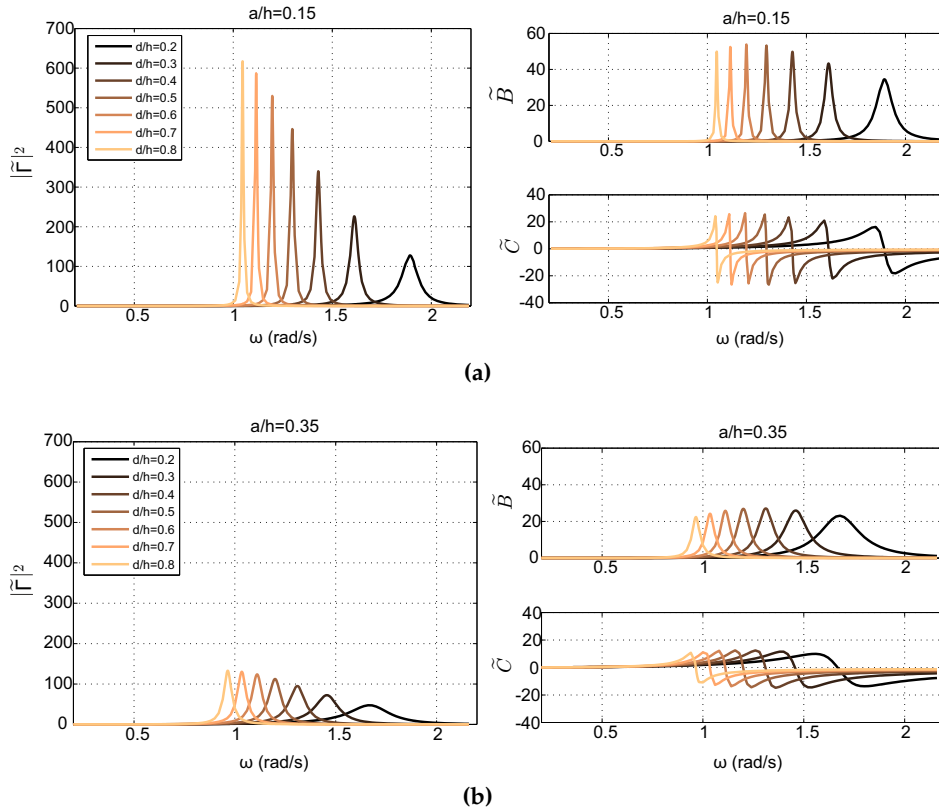


Figura 6.7: Coeficientes hidrodinámicos para distintas sumergencias relativas $d/h=\{0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8\}$ y distintos radios relativos $a/h=\{0.15,0.35\}$. $h=10$ m.

6.3.1 Optimización en el estado de mar

Para la interpretación de los resultados, es conveniente tener en cuenta el comportamiento resonante de la cámara, ya señalado por Evans and Porter [57, 58]. La Fig. 6.8 representa la función $F(\omega)$ (Ec. 3.3) que afecta al espectro de la energía incidente del oleaje en la Ec. (3.2), para diferentes valores de d y N . Se observa que el mejor comportamiento es obtenido para los mayores d alrededor de un periodo resonante cerca de 6.0 s para el Caso 1 y entre 6.0-12.0 s para el Caso 2, aproximadamente. Además, a menores valores de N , mayor es la diferencia entre las funciones y el bando de ancha es menor.

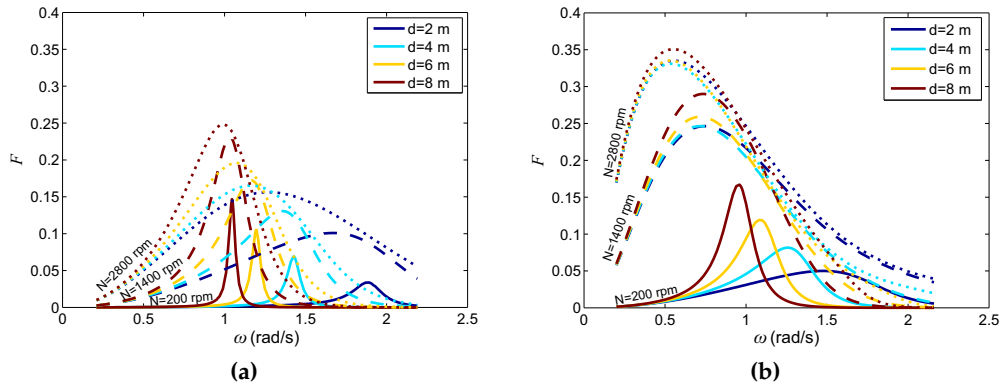


Figura 6.8: $F(\omega)$ para el Caso 1 (a) y el Caso 2 (b) para diferentes velocidades de giro: 200 rpm (—), 1400 rpm (---), 2800 rpm (···)

Las Figuras 6.9 y 6.10 representan los valores óptimos de la velocidad de giro N_{opt} , (Fig. 6.9) y de sumergencia d_{opt} , (Fig. 6.10), para los Casos 1 y 2 en función de las características de los estados de mar.

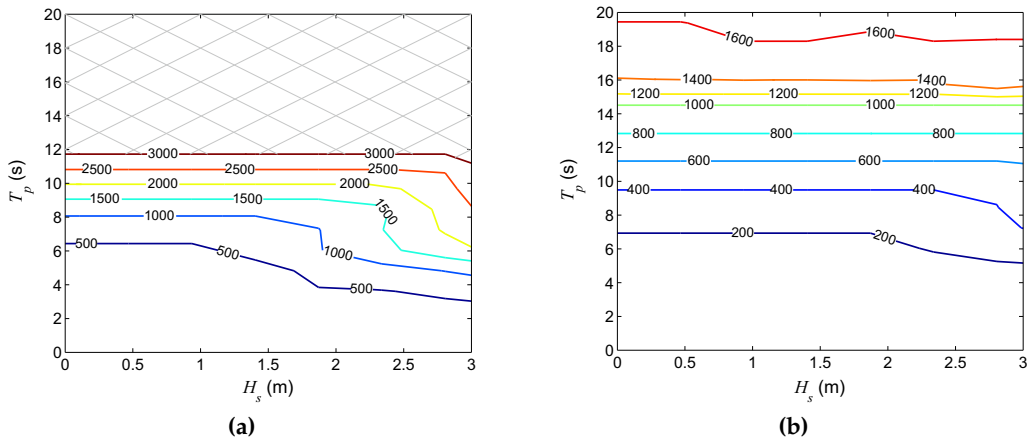


Figura 6.9: Velocidad de giro óptima de la turbina N_{opt} (rpm) para el Caso 1 (a) y el Caso 2 (b) en función de las características de los estados de mar (H_s , T_p).

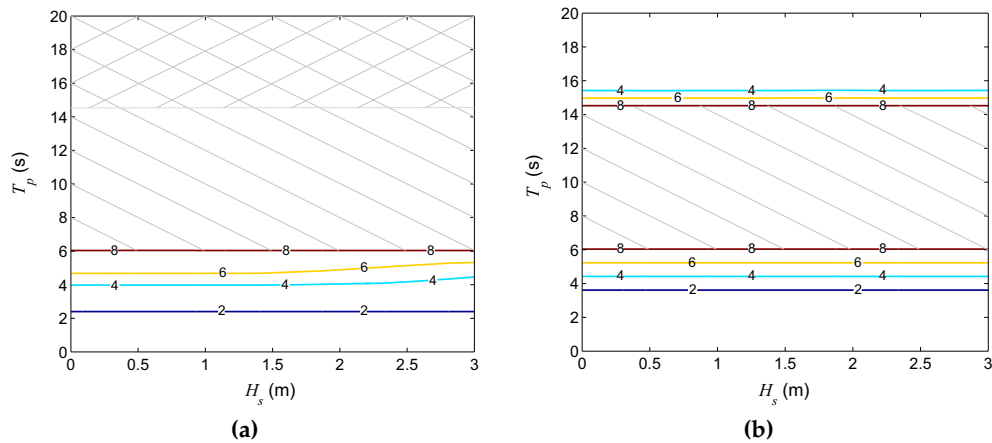


Figura 6.10: Sumergencia óptima d_{opt} (m) para el Caso 1 (a) y el Caso 2 (b) en función las características de los estados de mar (H_s, T_p).

La velocidad de giro óptima de la turbina depende débilmente de la altura de ola para estados de mar menos energéticos. Aumenta con el contenido de la energía del oleaje incidente para valores de H_s mayores que 1.0 m (Caso 1) y 2.0 (Caso 2) aproximadamente, para cumplir la restricción impuesta en $\bar{\eta}_{max}$. También aumenta con el periodo pico, acorde con el comportamiento de $F(w)$ con N . Para el Caso 1, el máximo valor permitido de N es alcanzado para periodos pico T_p mayores que 12.0 s, mientras que para mayores radios (Caso 2) la restricción en N no se satura.

Como puede observarse en ambos casos, la sumergencia óptima depende muy débilmente de la altura de ola significativa y aumenta con el periodo de pico hasta alcanzar la máxima sumergencia impuesta ($d = 8$ m) en aproximadamente $T_p = 6.0$ s. Para el Caso 2, vuelve a disminuir a partir de $T_p = 15.0$ s aproximadamente. Estas figuras y otros resultados obtenidos sin imponer la restricción en el máximo valor de N para el Caso 1 (Fig. 6.11), permiten distinguir las zonas que son afectadas por la restricción impuesta en d (diagonales) y N (cruces), que son marcadas en las Figs. 6.9–6.10.

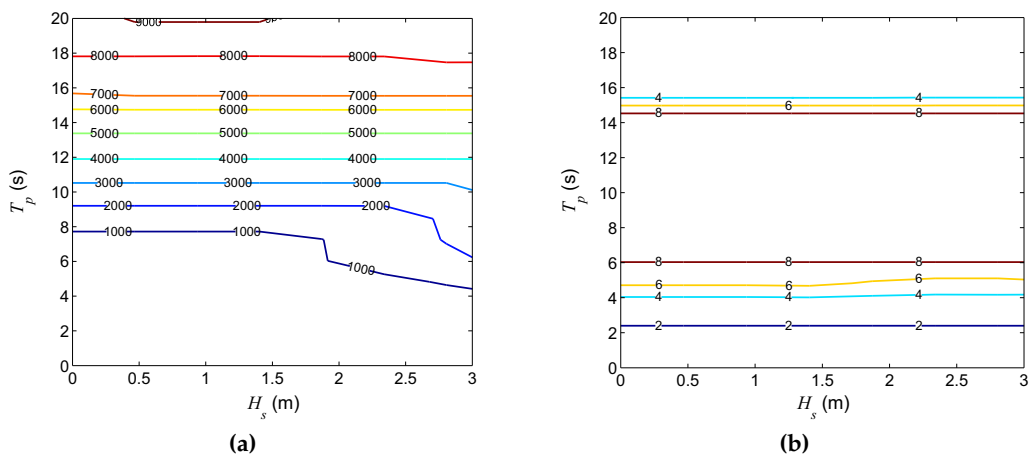


Figura 6.11: Velocidad de giro óptima de la turbina N_{opt} (rpm) (a) y sumergencia óptima (b) para el Caso 1, sin restricción en N .

La saturación en la restricción en d está asociada al fenómeno de resonancia anteriormente nombrado. Como los periodos de los modos de oscilación libre dentro de la cámara están cerca de 6.0 s (Caso 1) y 8.0 s (Caso 2) para el mayor N_{opt} obtenido, en una proximidad de estos valores se alcanzan las máximas elevaciones de la superficie libre $\bar{\eta}_{max}$.

Para los correspondientes valores óptimos se dibujan en la Fig.6.12 las isolíneas del valor máximo de la potencia neumática disponible, esto es, los máximos de la función objetivo. Para un periodo fijo, los valores aumentan con la altura de ola. Todos los estados de mar con el mismo contenido energético presentan valores máximos en torno a un periodo de pico constante de aproximadamente 6.0 s (Caso 1) y 7.0 s (Caso 2), que se relacionan con el planteamiento de los valores óptimos de d para T_p alrededor del periodo resonante. Se obtiene un rendimiento significativamente mejor en el Caso 2 que en el Caso 1, puesto que la potencia neumática aumenta con el radio del sistema.

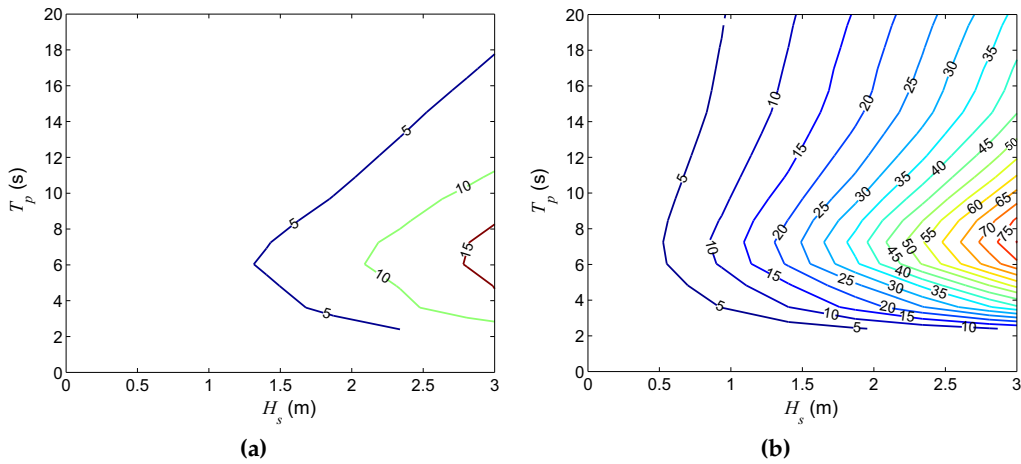


Figura 6.12: Valor máximo de la potencia neumática disponible, $\max(\bar{P}_{avai,irr})$ (kW), para el Caso 1 (a) y el Caso 2 (b), en función de los estados de mar (H_s, T_p).

Debido a que los resultados de la sumergencia óptima son débilmente independientes de la H_s , para ilustrar la influencia del diámetro de la turbina D en la optimización, se representan la sumergencia óptima d_{opt} (Fig. 6.13a), la velocidad de giro óptima N_{opt} (Fig. 6.13b) y el valor máximo de la potencia neumática disponible $\max(\bar{P}_{avai,irr})$ (Fig. 6.14), en función del periodo de pico del estado de mar para los Casos 2 y 3, considerando una altura de ola significativa constante $H_s=0.70$ m.

Desde el punto de vista práctico es destacable que la sumergencia óptima obtenida sea la misma hasta un valor de T_p aproximadamente de 15.0 s, para los dos diámetros de la turbina, coincidiendo con la máxima sumergencia permitida para periodos mayores de 6.0 s. Las velocidades de giro mantienen un ratio N_3/N_2 de 2.5 hasta $T_p=11.5$ s, que coincide con el ratio de los dos diámetros de las turbinas D_3/D_2 , proporcionando la misma potencia neumática (ver Fig. 6.14), debido al factor D/N que aparece en la Ec. (3.2). Para mayores periodos de pico, los valores del Caso 3 se mantienen constantes al alcanzar la velocidad máxima de giro establecida por razones aerodinámicas.

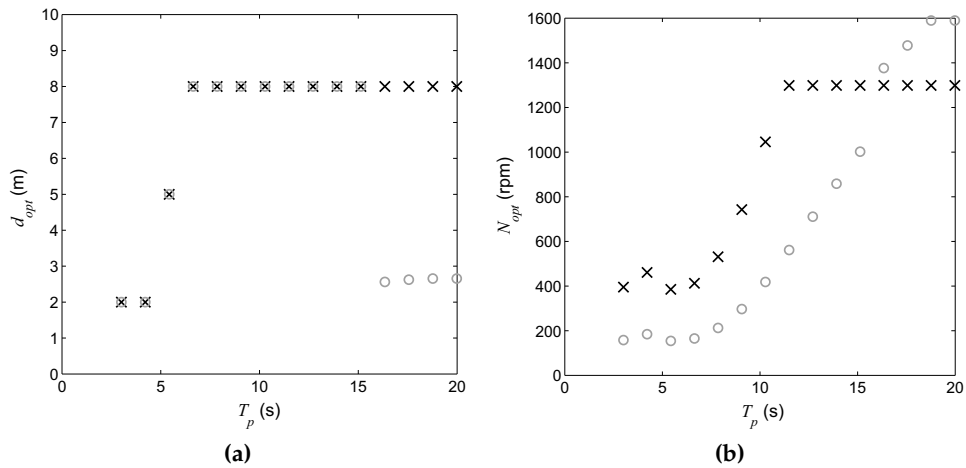


Figura 6.13: Sumergencia óptima d_{opt} (m) (a) y velocidad de giro óptima N_{opt} (rpm) (b), en función del periodo pico T_p (s), para el Caso 2 (círculos) y el Caso 3 (cruces), con $H_s = 0.70$ m.

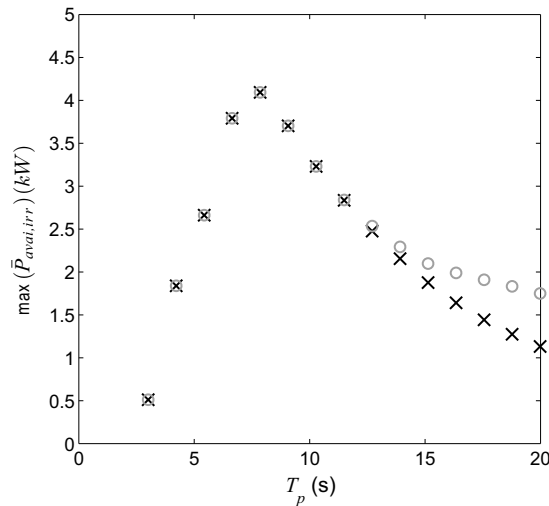


Figura 6.14: Valor máximo de la potencia neumática disponible, $\max(\bar{P}_{avai,irr})(kW)$, para el Caso 2 (círculos) y el Caso 3 (cruces) con $H_s = 0.70$ m.

De los resultados obtenidos anteriormente y de las pruebas realizadas con otros valores, se deduce que el diseño óptimo no da variaciones significativas en el rendimiento para distintos valores del diámetro de la turbina, sin embargo, mejora notablemente la potencia neumática disponible con radios mayores del sistema.

6.3.2 Optimización estocástica

Teniendo en cuenta las conclusiones extraídas de la optimización en el estado de mar, la optimización estocástica en escalas de tiempo estacional y anual (ver problema 3.6), se ha realizado para dos dispositivos OWC con distinto radio $a_1 = 1.5$ m (Caso 1); $a_2 = 3.5$ m (Caso2), manteniendo constantes el resto de los parámetros geométricos ($e=5.0$ m, $D=1.0$ m). Se ha tomado el valor $p = 0.85$ como mínimo de la probabilidad de ocurrencia de la restricción impuesta sobre el desplazamiento medio máximo de la superficie libre y se

han considerado las funciones de densidad asociadas a cada una de las estaciones y al año (Fig. 6.5).

Los valores de la sumergencia d_{opt} , y velocidad de giro N_{opt} , estimados, y el correspondiente valor esperado de la potencia neumática disponible en el intervalo de tiempo considerado se muestran en la Tabla 6.2

Tiempo	a (m)	d_{opt} (m)	N_{opt} (rpm)	$\bar{P}_{avai,irr}$ (kW)
Invierno	$a_1=1.5$	2.45	3246.80	1.75
Marítimo	$a_2=3.5$	8.00	338.43	9.96
Verano	$a_1=1.5$	8.00	583.53	1.32
Marítimo	$a_2=3.5$	8.00	240.82	5.34
Año	$a_1=1.5$	2.41	2836.00	1.32
	$a_2=3.5$	8.00	294.14	6.94

Tabla 6.2: Resultados de la optimización estacional y anual

Los valores óptimos obtenidos en cada intervalo de tiempo son aquellos que tratan de amplificar lo más posible el rango de frecuencias más probables, cumpliendo la restricción impuesta sobre $\bar{\eta}_{max}$ que, de acuerdo con [16], es mayor según es menor la relación a/d .

Como se observa en la Fig. 6.5, durante los intervalos de tiempo invierno marítimo y año, se dan con frecuencia tanto oleajes con periodos de pico cortos, como los estados de mar con periodos más largos, abarcando un rango de frecuencias angulares comprendido entre 0.4 y 1.5 rad/s. En el verano marítimo los estados de mar con frecuencias angulares entre 0.8 y 1.5 rad/s son los más probables. Además, para los dos radios, a mayor valor de N , mayor es el rango de frecuencias que amplifica el factor $F(w)$ (Fig.6.8). De la misma forma, a igualdad de valores de N , se obtienen mayores valores de la potencia a mayor sumergencia.

Así, en el Caso 2 para todos los intervalos de tiempo analizados y en el Caso 1 para el verano marítimo, la sumergencia óptima es la máxima admitida. Los valores de N_{opt} son relativamente pequeños, pero cubren el rango de frecuencias de interés. En el Caso 1, para el invierno marítimo y el año, con valores grandes de d se incumple la restricción en la elevación de la superficie libre.

Puesto que el Caso 2 presenta los mejores valores, los siguientes resultados fueron obtenidos para este caso. La Fig. 6.15 representa el valor de la potencia neumática disponible, según las características del estado de mar. Se aprecia que los mejores rendimientos se obtienen con el dispositivo óptimo para la estación en la que se dan los estados de mar más energéticos (invierno marítimo). Como era de esperar, el óptimo correspondiente a la estación menos severa, toma menores valores de $\bar{P}_{avai,irr}$.

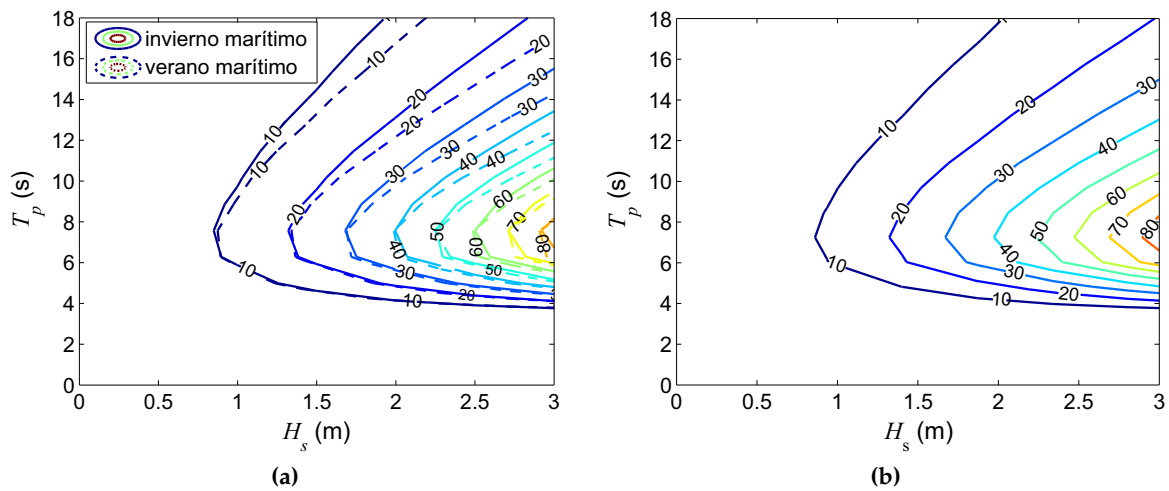


Figura 6.15: Potencia neumática disponible $\bar{P}_{avai,irr}$ (kW), optimizado en cada estación (a) y en el año (b), para el Caso 2 y en función de los estados de mar (H_s , T_p).

Estos resultados por sí mismos no proporcionan información sobre el rendimiento global del sistema durante el intervalo de tiempo considerado, ya que éste depende de la frecuencia de presentación de cada estado de mar. Para analizar este aspecto, las siguientes configuraciones fueron consideradas:

- (A) El dispositivo óptimo anual ($d = 8.0$ m, $N = 294.14$ rpm)
- (B) Un dispositivo que adopta la configuración óptima según la estación, esto es, que se configura como el óptimo obtenido en el invierno marítimo ($d = 8.0$ m, $N = 338.43$ rpm) durante los meses de dicha estación y como el óptimo del verano marítimo ($d = 8.0$ m, $N = 240.82$ rpm) durante los meses más suaves.
- (C) Un dispositivo ideal capaz de adaptarse a la geometría óptima de cada estado de mar.

Para cada uno de ellos se han estimado las funciones de distribución de la variable potencia neumática disponible a partir de los datos de clima marítimo, asignando a cada estado de mar la potencia según la Ec. (3.2) (ver Fig. 6.16). El mayor rendimiento por estados se alcanza para el dispositivo óptimo que adapta su geometría a los distintos estados (C), seguido por el sistema que adapta su geometría a los dos semestres (B).

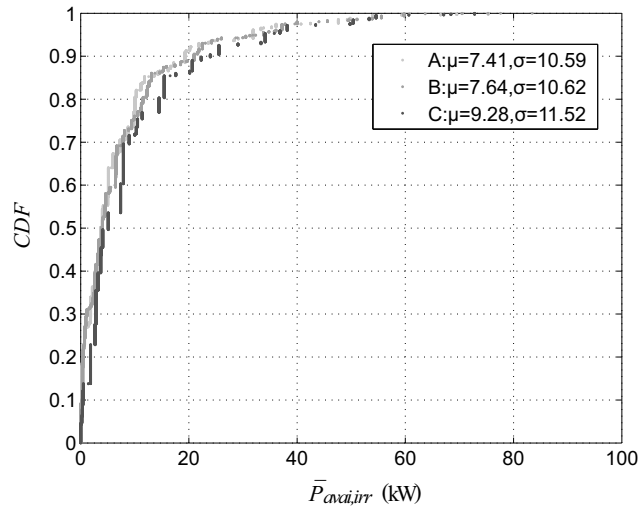


Figura 6.16: Funciones de distribución empíricas de la potencia neumática disponible para las configuraciones óptimas (A,B,C) del Caso 2.

6.4 Gestión y explotación del OWC

Las funciones de distribución del valor esperado de la potencia disponible con las configuraciones óptimas consideradas representan comportamientos medios del sistema en el intervalo de tiempo considerado. Sin embargo, la explotación del dispositivo OWC depende de la secuencia real de estados de oleaje que arriben al sistema, debido a las condiciones operativas descritas en el Capítulo 3. Esta secuencia es aleatoria y no se conoce a priori, pero es determinante para analizar la capacidad real de poder operar durante su vida útil.

Siguiendo la metodología de Solari y Losada [21] se han ajustado las distribuciones mixtas no estacionarias capaces de reproducir la variabilidad estadística a distintas escalas de tiempo (veáse Anejo B). Las variaciones interanuales se han modelado con una componente cíclica de 5 años y otra de 11 años (Ec. B.6), que son los periodos de variación mayores de un año que Egüen [59] señala como los más significativos en la zona de estudio seleccionada. La elección de esta técnica para reproducir la variabilidad interanual responde a la corta duración de los datos disponibles para el análisis (16 años).

En la Fig. 6.17 se presentan las funciones de densidad no estacionarias de la altura de ola significativa y el periodo de pico ajustadas a los datos y con la que se han realizado las simulaciones.

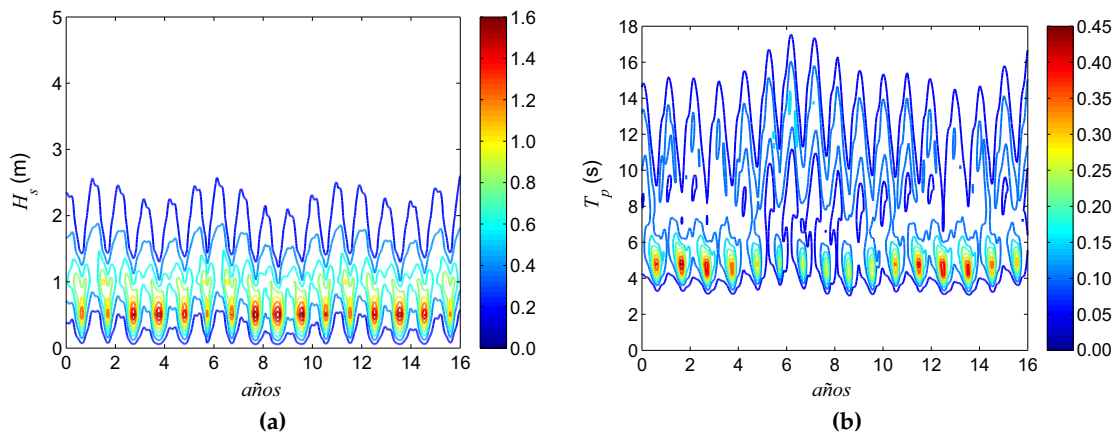


Figura 6.17: Función de densidad no-estacionaria para H_s (a) y T_p (b), considerando la variabilidad intra-anual e interanual.

Los resultados que se presentan a continuación se han obtenido tomando como intervalo de tiempo una vida útil de $V=25$ años y utilizando 100 simulaciones de H_s , T_p y la correspondiente serie de la potencia neumática disponible para los dispositivos óptimos A, B, C del Caso 2.

La incertidumbre del comportamiento no estacionario de sistemas OWC fue evaluado considerando un umbral de 50 kW y analizando las siguientes variables aleatorias que miden la bondad de su operación: Nu , número de superaciones del valor umbral; y Du , duración media de los eventos de superación del umbral (persistencia). Sus funciones de densidad de probabilidad empíricas se muestran en la Fig. 6.18.

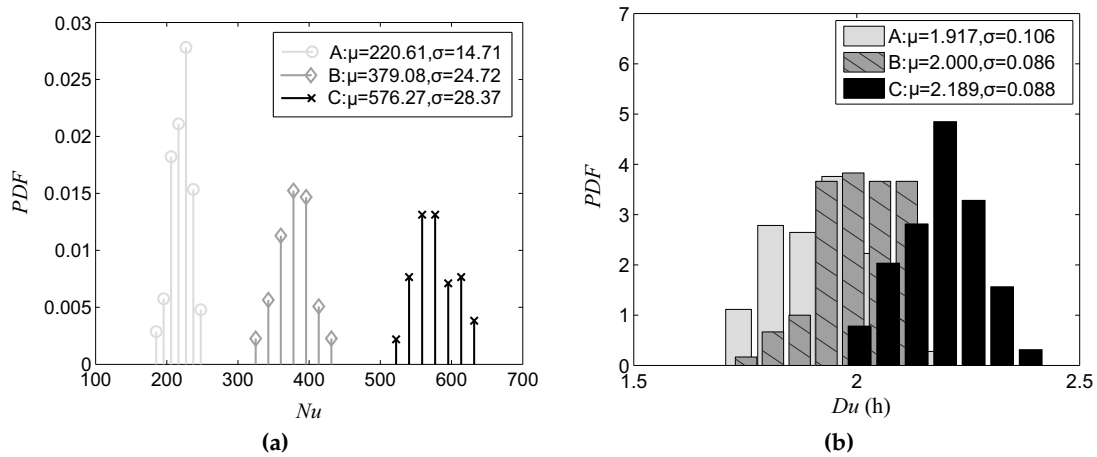


Figura 6.18: Número de excedencias del valor umbral (a) y duración media de los eventos que exceden el umbral (b), en el Caso 2.

Se observa que el sistema que adapta su geometría a los distintos estados de mar (C) presenta un mayor número de eventos de superación del valor umbral con las duraciones mayores, en general, próximas a 2 h. Los dispositivos B y A obtienen valores del número de eventos significativamente menores que C, del orden de 400 y 200 respectivamente frente a

los casi 600 de C . Estas diferencias no son tan significativas en cuanto a las duraciones de dichos eventos, ya que para todos ellos los valores medios de las duraciones son próximos a las 2 h y muestran desviaciones típicas del mismo orden de magnitud.

6.5 Discusión

La metodología propuesta tiene un carácter general, si bien se ha aplicado con una serie de simplificaciones con el objetivo de clarificar tanto su presentación como los resultados obtenidos. A continuación se comentan las implicaciones que tienen algunas de ellas.

El clima marítimo en el emplazamiento ideal se ha obtenido admitiendo que la batimetría es recta y paralela y aplicando una formulación simplificada para tener en cuenta el asomeramiento y la refracción. En una zona real, conocidos los datos históricos de clima marítimo en aguas profundas o alguna zona próxima a la de estudio, y la batimetría, pueden utilizarse modelos de propagación del oleaje capaces de reproducir los procesos de transformación de interés como por ejemplo REFDIF [60] o SWAN [61].

El espectro adoptado para describir el estado de mar corresponde a un oleaje totalmente desarrollado y puede no representar algunas situaciones. Esta elección permite prescindir de otras variables como la velocidad, la dirección del viento y el fetch en el área de generación, lo que simplifica la presentación de los resultados. La inclusión de estas variables no presenta por lo demás dificultad teórica, si bien en la práctica puede resultar de difícil aplicación por la falta de datos.

En este sentido cualquier mejora en la caracterización del clima marítimo redundará en la bondad de los resultados. De todos modos, los valores de la optimización estocástica dependen del sitio y los resultados del estudio deben considerarse como cualitativos.

El sistema OWC estudiado está fijado al fondo con una estructura cuya interacción con el oleaje se desprecia, de modo que no se considera en los problemas de la radiación y difracción. Cuando esta simplificación no es satisfecha, hay que realizar un análisis del problema hidrodinámico más detallado.

Como ejemplo de aplicación, la potencia neumática disponible para la turbina, fue elegida como la función objetivo y la sumergencia y la velocidad de giro de la turbina fueron seleccionadas como las variables principales. Esta metodología, sin embargo, puede ser aplicada a cualquier otra función objetivo relacionada con el rendimiento del sistema OWC que depende del clima marítimo. En este sentido, aunque el coste-beneficio del sistema OWC es una función relevante para optimizar, su formulación requiere un análisis en profundidad que está fuera del objetivo de esta tesis.

Para el cálculo de la velocidad de giro óptima de la turbina únicamente se ha impuesto la restricción debido a los efectos del número de Match. Si la velocidad máxima permitida fuera inferior, podría añadirse al problema de optimización otra restricción sobre la variable N , lo que afectaría al rendimiento de los estados de mar con mayor contenido energético que es donde la velocidad alcanzada es mayor.

En el cálculo de la potencia neumática media disponible en el estado de mar, no se ha tenido en cuenta la pérdida de carga en la estructura. Su inclusión daría probablemente valores inferiores de la sumergencia óptima, como ponen de manifiesto algunos trabajos en los que se ha analizado la influencia de la sumergencia de un sistema OWC en la eficiencia, mediante modelos numéricos los cuales tienen en cuenta la pérdida de carga [62].

Se ha considerado un dispositivo aislado, aunque la metodología desarrollada abre la posibilidad de analizar en un futuro su extensión a un campo de sistemas OWC. Para ello sería necesario resolver el problema hidrodinámico de la interacción entre sistemas, teniendo en cuenta su disposición y la direccionalidad del oleaje [55, 63].

6.6 Conclusiones

Se propone una metodología que resalta la importancia de las escalas temporales en el diseño y la gestión de sistemas de energía óptimos, concretamente en sistemas OWC. Los resultados de este estudio muestran que para mejorar la competitividad de los sistemas OWC y mejorar su respuesta a la variabilidad interanual del clima marítimo, es necesario diseñar sistemas cuya configuración pueda ser adaptada a los sucesivos estados de mar. Este hallazgo abre una prometedora línea de investigación que vale la pena explorar con mayor profundidad.

Las diferentes escalas de tiempo estudiadas fueron el estado de mar, las estaciones y el año. Para las dos últimas, una formulación estocástica fue usada para tener en cuenta el carácter aleatorio del clima marítimo durante el intervalo de tiempo considerado. Este estudio de los parámetros óptimos de diseño del sistema OWC, fue combinado con el análisis del rendimiento del sistema durante su vida útil. Las simulaciones realizadas reprodujeron la no estacionariedad intra-anual e interanual del clima marítimo y permitieron estudiar variables de interés para la gestión que dependen de la secuencia de presentación de los estados de mar.

Bajo estas condiciones, se analizó los valores de la sumergencia y la velocidad de giro de la turbina para los cuales el rendimiento del dispositivo es óptimo, satisfaciendo una serie de restricciones operativas. En el estado de mar se observó que ambas variables dependen muy débilmente de la altura de ola significativa, si bien la potencia óptima aumenta con H_s . Para valores de H_s fijos, el aprovechamiento óptimo mostró mejores resultados en torno a un determinado valor del periodo de pico de aproximadamente 6.0 y 7.0 s en los dos casos analizados. Estos resultados demuestran la importancia de tener en cuenta los periodos que predominan en la zona de estudio para la elección del OWC.

Respecto a los valores óptimos en el sentido estocástico, a escalas estacional y anual se encontró que el rendimiento aumenta con el contenido energético del oleaje y es máximo para determinados valores del periodo de pico. Como era de esperar, los dispositivos óptimos para la estación más severa y el año dan mejores rendimientos para los estados de mar con mayores valores de la altura de ola significativa y mayores periodos de pico que el dispositivo óptimo calculado para la estación con un clima marítimo más benigno.

Los resultados globales medidos a través de las funciones de distribución estacionarias de la potencia neumática disponible, obtenidos para un dispositivo que adopta las características óptimas en cada estado, uno que se configura como el óptimo dependiendo de la estación en la que se encuentre y otro fijo con las características del óptimo anual, muestran pocas diferencias. Sin embargo, el estudio de algunas variables de interés para la gestión realizado mediante simulaciones no estacionarias del clima y la correspondiente potencia que reproducen la variabilidad intra-anual e interanual durante la vida útil, demuestran que el dispositivo que da mejor rendimiento de forma continuada es el que se adapta a la configuración óptima en cada estado de mar, con mayor número de eventos por encima de un valor umbral y de mayor duración. El dispositivo óptimo anual que mantiene sus características fijas, da un rendimiento significativamente peor que los otros dos.

7

Pérdida de carga

En este capítulo se desarrollan modelos analíticos cuya formulación está expuesta en el Capítulo 4. Estos modelos han sido validados con modelos numéricos (Fluent, Fluinco) y permiten tener una primera aproximación de la influencia de aspectos fundamentales de diseño del sistema, como su sumergencia o anchura, así como el ángulo de incidencia o periodo del oleaje.

7.1 Resultados: Tren regular de ondas

7.1.1 Validación de los modelos analíticos

La validación de los modelos analíticos desarrollados, con y sin pérdida de carga, se realizó mediante la verificación de las condiciones de acuerdo impuestas, Ecs. 4.7a- 4.7d y 4.23a- 4.23d, y comparando sus resultados con los obtenidos mediante modelos numéricos (Fluent, Fluinco).

Para la elección del número de modos evanescentes N_l , se analizó la influencia del número de modos evanescentes en la amplitud de la velocidad horizontal según el eje x $|U|$, calculada con y sin pérdida de carga, en un punto determinado de la placa en la que la velocidad es nula ($z = 0, x = 0$). Para el cálculo, se considera un periodo corto ($T = 5$ s), puesto que para los periodos largos la influencia del número de modos evanescentes es menor. De la Fig. 7.1 se observa que tanto para el cálculo sin pérdida como con pérdida de carga, a partir de $N_l=200$, el resultado ha convergido a una solución estable, por tanto se adopta $N_l=200$ en todos los cálculos que aparecen a continuación.

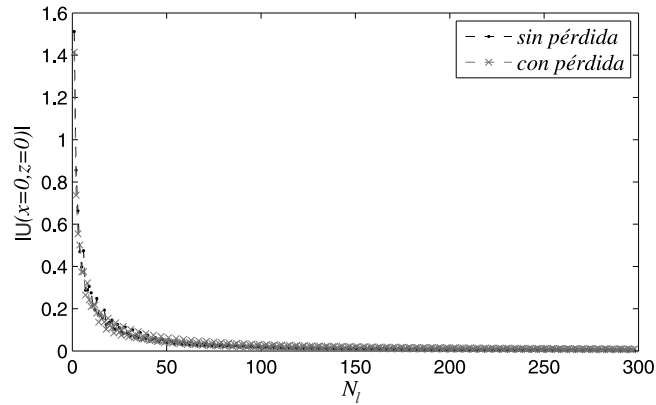


Figura 7.1: Amplitud de la velocidad horizontal en $x=0$ y $z=0$, obtenida con y sin pérdida de carga, para un número creciente de modos evanescentes N_l . $A_o=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $T=5$ s, $B/h=1.0$, $d/h=0.5$.

Verificación de las condiciones de acuerdo en la placa y en el muro

Se consideró un sistema OWC formado por una placa vertical de pared delgada ubicada a una profundidad relativa $kh = 1.05$, de sumergencia relativa $d/h = 0.5$, separada de un muro vertical e impermeable a distintas distancias relativas $B/L = 0.0418-0.0836-0.1671$, sobre la que incide de forma perpendicular ($\theta = 0^\circ$) una onda monocromática de amplitud unidad ($A_o=1.0$ m) y periodo $T=7.0$ s. Se calcularon las condiciones de acuerdo impuestas considerando $N_l=200$ modos evanescentes, que se muestran en las Figs. 7.2 y 7.3.

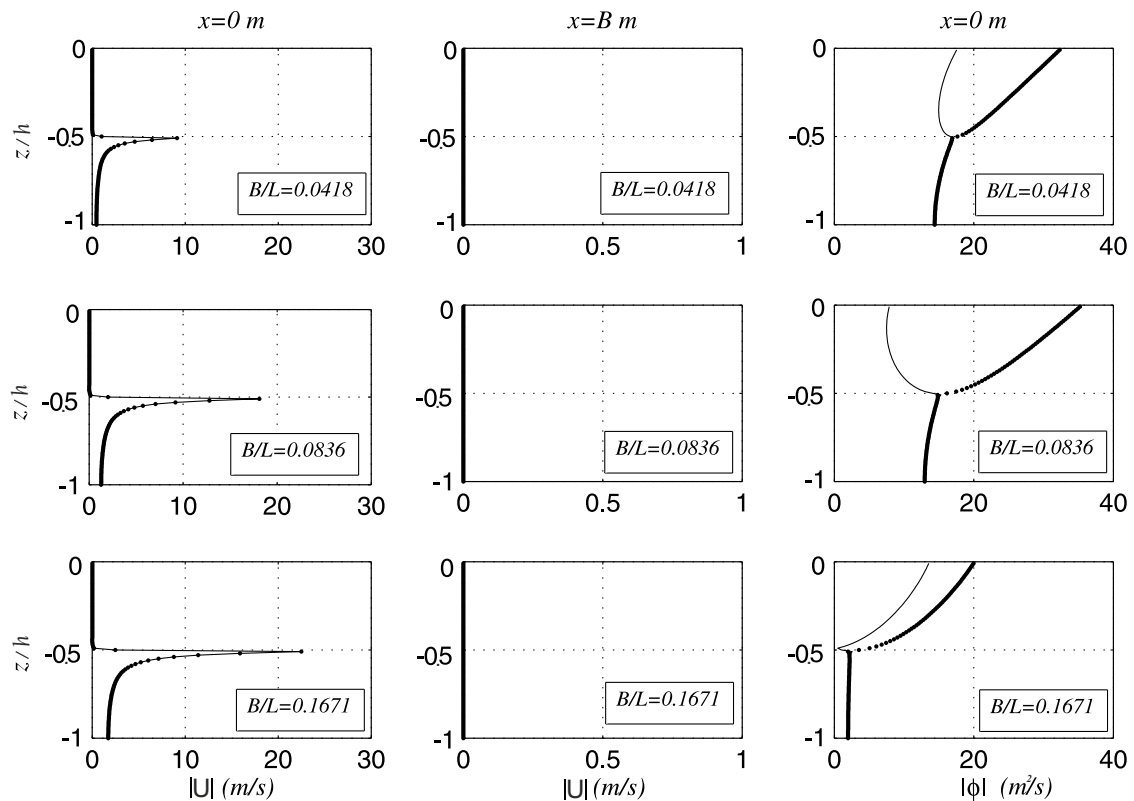


Figura 7.2: Condiciones de acuerdo, sin considerar la pérdida de carga

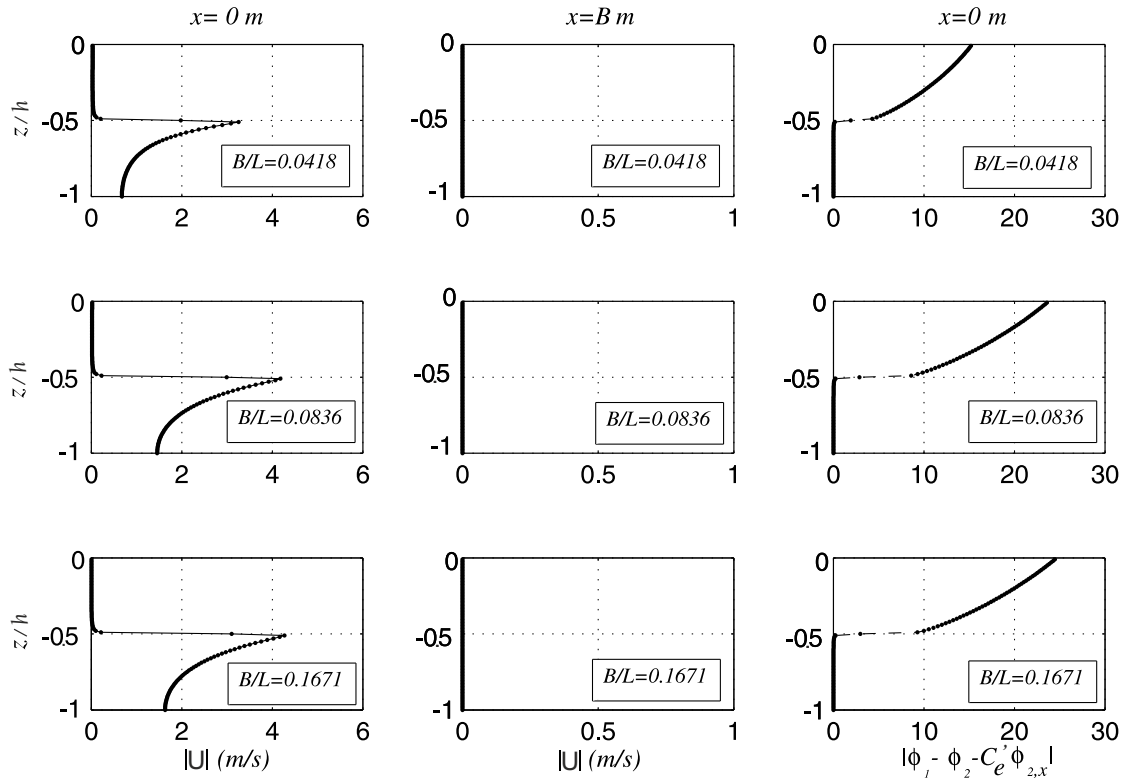


Figura 7.3: Condiciones de acuerdo, considerando la pérdida de carga

De ambas figuras se aprecia que para los distintos valores de B/L , los perfiles de velocidad $|U(z)|$, calculados en $x = 0$, satisfacen la condición de continuidad (Ecs. 4.7a,4.7b; Ecs. 4.23a,4.23b), en la que las velocidades de las dos regiones presentan el mismo valor en profundidad, que aumenta al aumentar B/L y se anulan en toda la longitud de la placa ($-0.5 \leq z/h \leq 0$). Además, se observa el fenómeno de Gibbs, que aparece cuando se aproxima una función discontinua mediante un desarrollo en serie de autofunciones y se manifiesta como un salto de la función aproximada cerca del punto de discontinuidad ($z/h = -0.5$). Los perfiles de velocidad calculados en el muro ($x = B$) para los distintos valores de B/L , son nulos puesto que se ha supuesto que el muro es totalmente impermeable (Ecs. 4.7d y 4.23d).

Obsérvese que la condición de continuidad para las presiones es distinta en el problema sin pérdida de carga Ec. (4.7c) y con pérdida de carga Ec. (4.23c). En el problema sin pérdida de carga la diferencia de las funciones potenciales asociadas a cada una de las regiones debe ser nula en el hueco existente entre la placa y el fondo ($-1.0 \leq z/h \leq -0.5$), mientras que en el problema con pérdida de carga dicha diferencia debe ser proporcional a la velocidad.

Al comparar los resultados de los dos problemas planteados, se observa que el problema sin pérdida de carga proporciona un mayor valor del módulo de la velocidad cerca de la placa ($z/h=-0.5$) respecto el problema con pérdida de carga. Sin embargo, los resultados del módulo de la velocidad cerca del fondo ($z/h=-1.0$) son prácticamente iguales para ambos problemas.

Validación con modelos numéricos

Para la validación de los modelos analíticos, se han comparado los resultados con los obtenidos por Teixeira et al. [62] para un sistema OWC con la cámara abierta. La Fig. 7.4, representa el esquema del sistema OWC y la posición de los sensores que se han considerado en los modelos analíticos.

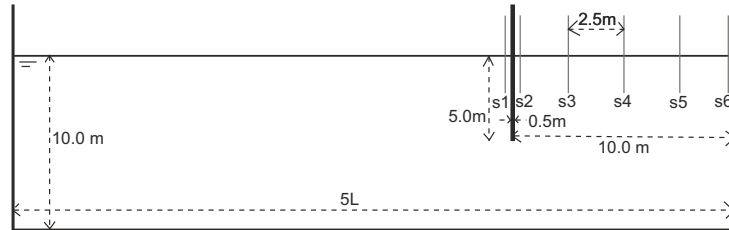


Figura 7.4: Esquema del sistema OWC y ubicación de los sensores (escala vertical exagerada). $h=10m$

Las variables que se compararon fueron el factor de amplificación (H/H_0) y el ángulo de desfase (Ψ), para distintos periodos comprendidos entre 5.0 y 18.0 s (Fig. 7.5). El factor de amplificación se define como el ratio entre la altura de ola dentro de la cámara (H) y la altura de ola incidente (H_0) y el ángulo de desfase como la diferencia angular entre la onda interior y la exterior a la cámara. Del mismo modo que Teixeira et al. [62], el cálculo de la altura de ola dentro de la cámara se realizó considerando la elevación media de agua proporcionada por los sensores interiores y el desfase se calculó como la diferencia de fase entre las ondas que proporcionan los sensores $s2, s1$.

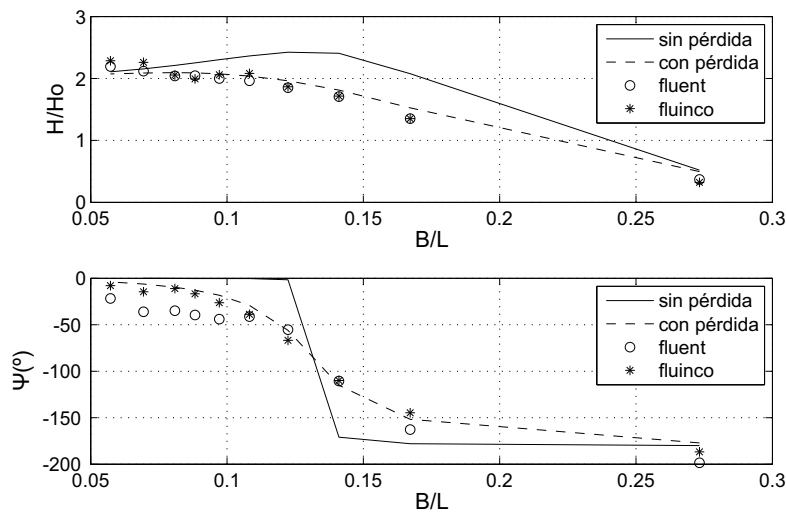


Figura 7.5: Factor de amplificación (H/H_0) y desfase (Ψ), para el sistema OWC con la cámara abierta.

De la Fig. 7.5 se observa que en $B/L=0.13$ aproximadamente, para el caso sin pérdida de carga se produce resonancia alcanzando un valor de $H/H_0 \approx 2.5$ y en el desfase aparece un salto de $-\pi$ a 0, es decir un cambio de cresta a seno. En cambio, al considerar la pérdida de carga desaparece el efecto resonante en $B/L=0.13$ y el desfase presenta un cambio gradual, asociado a la fricción. Si se representa el desfase entre 0 y $-\pi/2$, restando π a los desfases que superan $-\pi/4$, se obtiene el desfase máximo alrededor del valor resonante (Fig. 7.6).

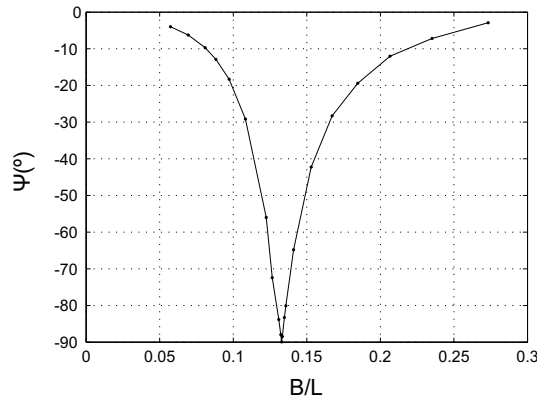


Figura 7.6: Desfase Ψ calculado con pérdida de carga.

Respecto a la aproximación de las soluciones analíticas a las numéricas, se ha calculado la raíz cuadrada del error cuadrático medio (*rmse*):

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (7.1)$$

donde x_i corresponde a los valores numéricos e y_i a los valores analíticos. En la tabla 7.1 se muestran los resultados:

	Fluent		Fluinco	
	H/H_0	Ψ	H/H_0	Ψ
sin pérdida	0.41	39.00	0.40	34.55
con pérdida	0.10	19.90	0.13	7.38

Tabla 7.1: Raíz cuadrada del error cuadrático medio

Los resultados ponen de manifiesto un mejor ajuste tanto del factor de amplificación como del desfase, con el modelo analítico con pérdida de carga. Para el factor de amplificación el mejor ajuste se obtiene con el Fluent ($rmse = 0.1$) mientras que con el desfase es para el Fluinco ($rms=7.38$).

Por tanto, en vista a los resultados puede concluirse que el modelo analítico considerando la pérdida de carga proporciona un valor del factor de amplificación próximo al proporcionado por los modelos numéricos, existiendo una mayor diferencia para los valores del desfase aunque todos siguen la misma tendencia de crecimiento al aumentar B/L .

En la siguiente figura (Fig. 7.7) se han representado los perfiles del coeficiente de fricción linealizado $C_e(z)$ y sus valores medios $\bar{C}_e(z)$ que se han obtenido a partir de la Ec. (4.22), para los distintos periodos estudiados.

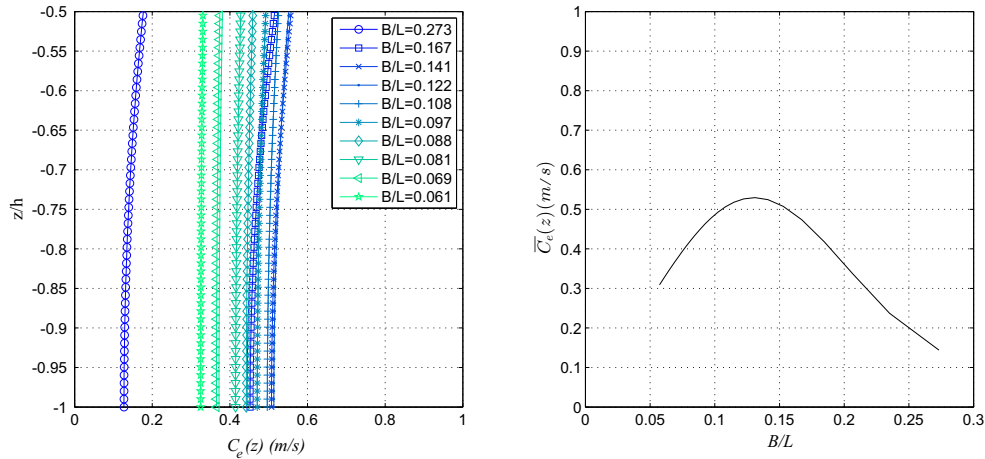


Figura 7.7: Perfiles y valores medios del coeficiente de fricción linearizado $C_e(z)$

Se observa que al aumentar el valor de B/L , aumenta el valor de $C_e(z)$ y de $\bar{C}_e(z)$ hasta llegar a $B/L=0.13$ aproximadamente, en el que $\bar{C}_e(z)$ alcanza un máximo. Este mismo comportamiento también aparece en los resultados de H/H_0 sin pérdida de carga (Fig. 7.5) y en el desfase calculado entre 0 y $-\pi/2$ (Fig. 7.6).

7.1.2 Factor de amplificación y desplazamiento máximo de la columna de agua

Dos de los parámetros que se consideraron importantes estudiar fueron el factor de amplificación (H/H_0), definido en sección 7.1.1 y el desplazamiento máximo de la columna de agua adimensionalizado respecto la amplitud de la onda incidente (η_{max}/A_0). En las figuras siguientes se representan sus valores en función de la sumergencia relativa de la placa (d/h), de la profundidad relativa (kh) y de distintos casos de anchura relativa del sistema (B/h), para los problemas sin y con pérdida de carga.

Los resultados obtenidos sin pérdida de carga, Fig. 7.8, ponen de manifiesto la existencia de un periodo resonante para cada una de las sumergencias estudiadas. Los mayores valores absolutos de la amplificación y del desplazamiento máximo de la columna de agua, aparecen para el menor B/h estudiado, en el que además, coinciden ambos valores. Sin embargo, al aumentar el valor de B/h , en las sumergencias relativas y periodos menores, los valores de la amplificación disminuyen respecto el desplazamiento máximo de la columna de agua. Esto se debe a la aparición de sloshing que aparece al modificar la anchura de la cámara, manteniendo constantes el restos de parámetros, como queda reflejado en la Fig.7.9.

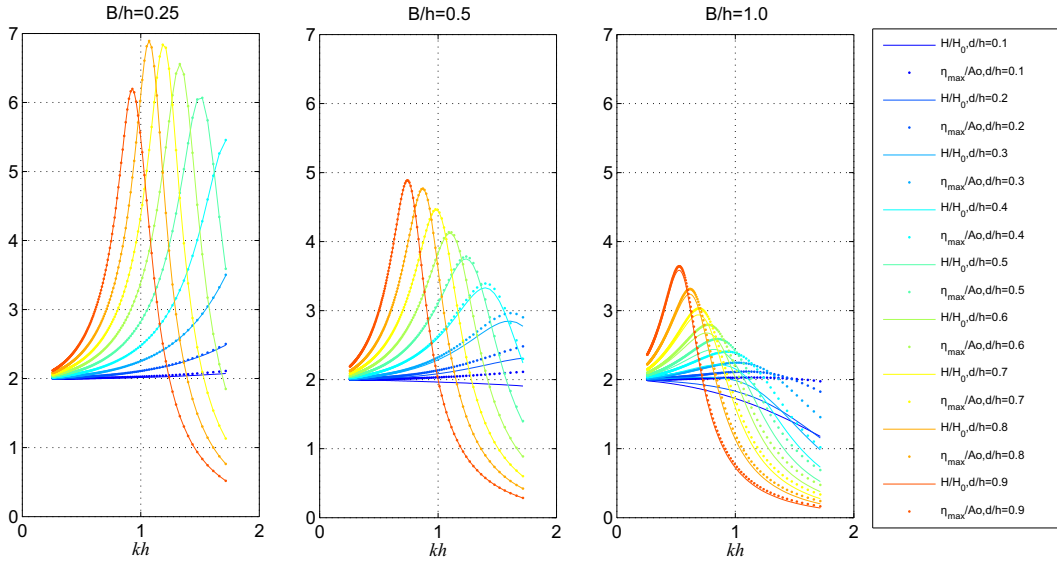


Figura 7.8: Factor de amplificación (líneas) y desplazamiento máximo de la columna de agua (puntos), sin pérdida de carga, en función de la profundidad relativa kh , para distintas anchuras relativas: $B/h=0.25-0.50-1.0$ y distintas sumergencias relativas: $d/h=\{0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$

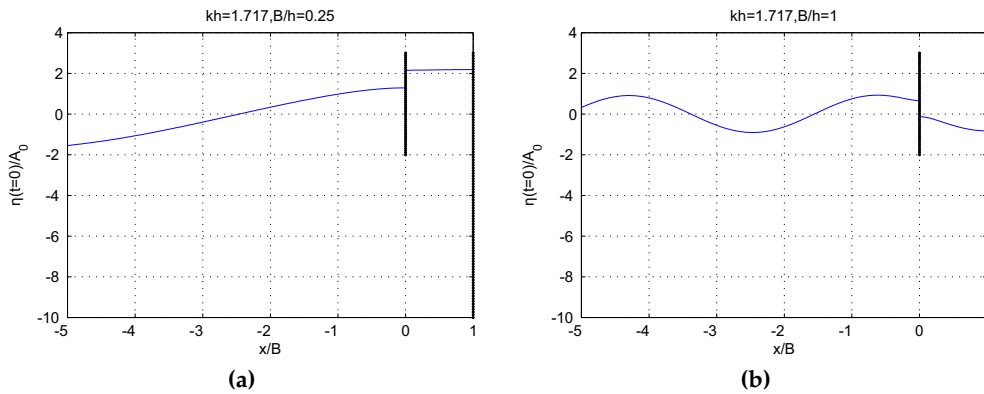


Figura 7.9: Desplazamiento de la superficie libre adimensionalizado respecto la amplitud de la onda incidente, para $t=0$. Solución analítica sin pérdida de carga. $h = 10$ m, $A_0=1$ m, $d/h=0.2$

La Fig. 7.10 muestra los resultados con pérdida de carga. Del mismo modo que en el caso sin pérdida de carga, los mayores resultados de la amplificación y el desplazamiento máximo de la columna de agua, aparecen en el menor B/h estudiado, en el que además, coinciden ambos valores. Al aumentar el valor de B/h , en las sumergencias relativas y periodos menores, los valores de la amplificación disminuyen respecto el desplazamiento máximo de la columna de agua, debido al sloshing del mismo modo que en el caso sin pérdida. Sin embargo, desaparece el periodo resonante para algunas sumergencias respecto los resultados sin pérdida de carga, como se observa en la Fig. 7.11 que representa el desplazamiento máximo de la superficie libre para dos sistemas con la misma geometría y calculados sin y con pérdida de carga para el periodo resonante.

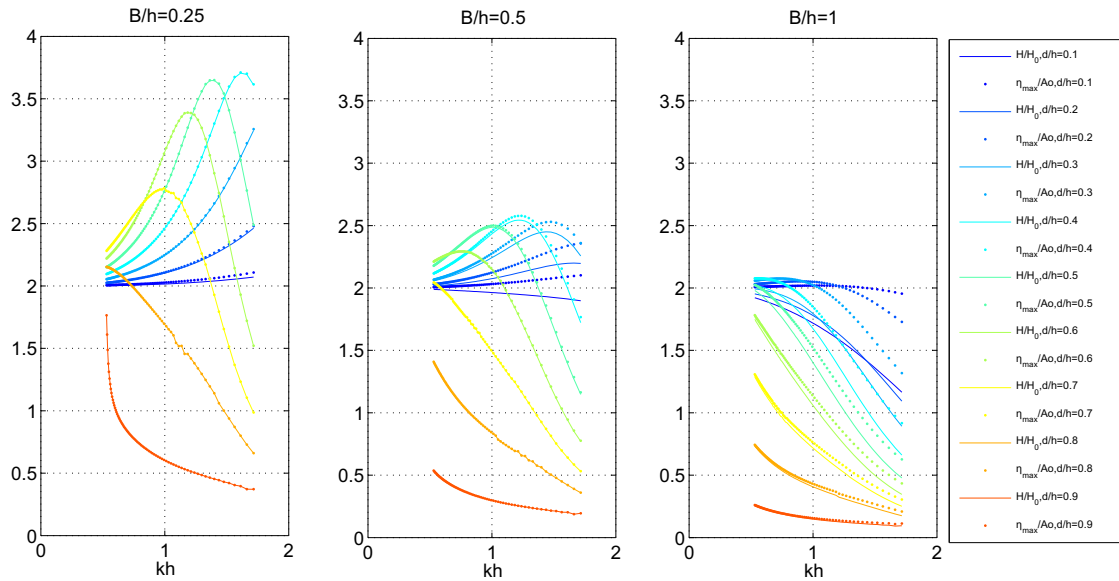


Figura 7.10: Factor de amplificación (líneas) y desplazamiento máximo de la columna de agua (puntos), con pérdida de carga, en función de la profundidad relativa kh , para distintas anchuras relativas: $B/h=0.25-0.50-1.0$ y distintas sumergencias relativas: $d/h=\{0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$

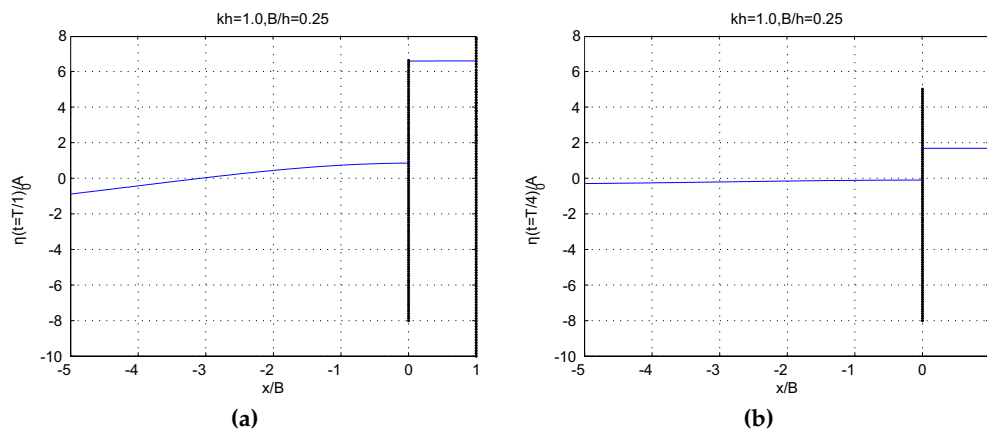


Figura 7.11: Desplazamiento máximo de la superficie libre adimensionalizado respecto la amplitud de la onda incidente. $h = 10$ m, $A_0=1$ m, $d/h=0.8$ (a) Solución analítica sin pérdida de carga, (b) Solución analítica con pérdida de carga.

Estos resultados ponen de manifiesto que la no consideración de la pérdida de carga en los modelos analíticos, puede llevar a un dimensionamiento no óptimo del sistema OWC. A modo de ejemplo, se aprecia que en el cálculo sin pérdida de carga y para $B/h=0.1$ hay un rango de periodos en los que las sumergencias relativas mayores presentan mayores valores del factor de amplificación, mientras que con el cálculo con pérdida de carga, estas sumergencias relativas son las que presentan un menor factor de amplificación.

A continuación, se analiza el efecto de la consideración de la pérdida de carga, en los coeficientes de reflexión y captura, y en las fuerzas totales sobre la placa. El estudio se realiza para distintos valores de sumergencia relativa (d/h), anchura relativa (B/L) y ángulo

de incidencia del oleaje (θ), para una onda monocromática de amplitud $A_0=1.0$ m y periodo $T=7.0$ s, propagándose en una profundidad $h=10.0$ m ($kh=1.05$).

7.1.3 Coeficientes de reflexión y captura

Con el objetivo de analizar la influencia de la sumergencia de la placa d , y de la anchura del sistema B , en los coeficientes de reflexión y captura, se calculó el módulo y la fase de ambos coeficientes, Ecs. 4.27a-4.27b-4.27c-4.27d, en función de la sumergencia relativa d/h , y de la anchura relativa B/L , tanto para el problema sin pérdida de carga (Fig. 7.12) como con pérdida de carga (Fig. 7.13).

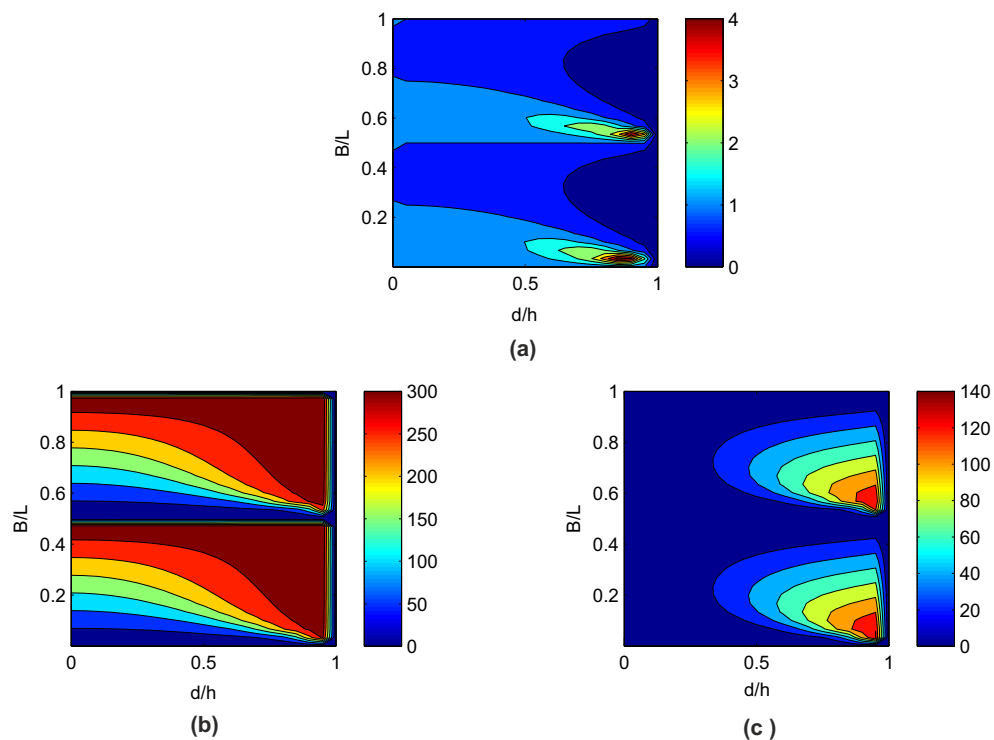


Figura 7.12: Módulo (a) y fase (c) del coeficiente de captura y fase del coeficiente de reflexión (b), sin pérdida de carga en función de la sumergencia relativa d/h , y de la anchura relativa B/L . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_I=200$.

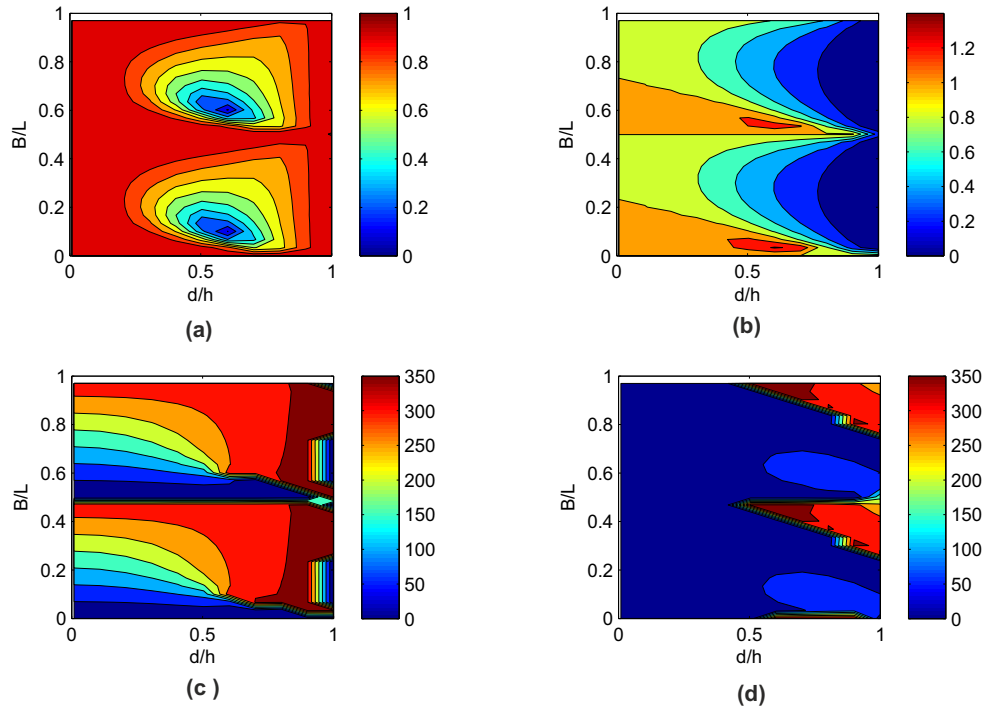


Figura 7.13: (a) Módulo del coeficiente de reflexión. (b) Módulo del coeficiente de captura. (c) Fase del coeficiente de reflexión. (d) Fase del coeficiente de captura. Resultados con pérdida de carga en función de la sumergencia relativa, d/h , y de la anchura relativa B/L . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_1=200$.

La Fig. 7.12 muestra los resultados sin pérdida de carga. Se observa que la fase correspondiente al coeficiente de captura (Fig. 7.12d) presenta valores entre $0^\circ - 180^\circ$, mientras que los valores de la fase del coeficiente de reflexión (Fig. 7.12c) están entre $0^\circ - 360^\circ$. El módulo del coeficiente de captura tiende a cero generalmente al aumentar la sumergencia relativa, salvo en el entorno de $B/L=0.033$, 0.53 aproximadamente, en el que aumenta al aumentar la sumergencia relativa hasta alcanzar un valor máximo. El módulo del coeficiente de reflexión, no se ha representado puesto que al tener un muro vertical ubicado después de la placa y no considerar la pérdida de carga, el valor obtenido ha sido de $|C_r|=1$ en todos los casos.

Para entender la razón por la que el coeficiente de captura es mayor de uno en algunos casos estudiados, se han seleccionado los valores $B/L=0.53$ y $d/h=0.9$ en los que $|C_c|=4$ y se ha calculado el factor de amplificación y el desplazamiento máximo de la columna de agua, para un oleaje incidente con amplitud $A_0=1$ m e incidencia $\theta = 0^\circ$, en función de la profundidad relativa (Fig.7.14). De la figura se observa, que para esas características geométricas, se produce una resonancia en la profundidad relativa $kh=1.05$, que coincide con la profundidad relativa considerada para el cálculo de los coeficientes.

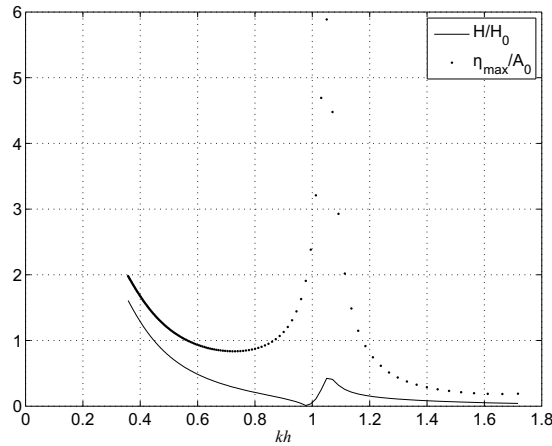


Figura 7.14: Factor de amplificación (líneas) y desplazamiento máximo de la columna de agua (puntos). $A_0=1.0$ m, $B/h=3.2$, $d/h=0.9$, $h=10.0$ m, $N_I=200$.

Si se comparan los resultados sin pérdida de carga (Fig. 7.12) con los correspondientes al considerar la pérdida de carga (Fig. 7.13), se observa que los valores máximos del módulo del coeficiente de captura (Fig. 7.13b) son menores que los obtenidos para el problema sin pérdida de carga y se alcanzan para una sumergencia menor. En este caso el coeficiente de reflexión varía entre 0 – 1 debido al efecto de la pérdida de carga (Fig. 7.13a).

Las fases asociadas a los coeficientes de reflexión (Fig. 7.13c) siguen teniendo los mismos valores que en el problema sin pérdida de carga. En cambio, las fases asociadas a los coeficientes de captura presentan una mayor diferencia (Fig. 7.13d).

A continuación se analizó la influencia del ángulo de incidencia del oleaje θ , en los coeficientes de reflexión y captura, considerando los mismos valores de amplitud, periodo y profundidad que en los casos estudiados anteriormente, y un valor fijo de la anchura relativa $B/L=0.55$, en el que aproximadamente la captación es mayor.

Los valores del ángulo de incidencia del oleaje considerados, se encuentran entre la incidencia normal a la placa ($\theta = 0^\circ$) y la incidencia paralela a la placa ($\theta = 90^\circ$). Sin embargo, existe un ángulo crítico en el intervalo $[50^\circ - 60^\circ]$ a partir del cual el punto de reflexión se aleja de la placa y aparece una onda que se propaga en la dirección paralela a la placa, modificando las condiciones hidrodinámicas. Este fenómeno denominado "mach reflection", fue observado por Perroud [64] al estudiar experimentalmente la reflexión de una onda solitaria en una pared vertical. Por tanto, se considera que los resultados obtenidos para $\theta > 60^\circ$ con la formulación analítica propuesta, no son verosímiles.

El módulo del coeficiente de captura sin pérdida de carga (Fig. 7.15b), presenta valores mayores que los calculados con pérdida de carga para $\theta < 20^\circ$ (Fig. 7.16b), aunque para $20^\circ < \theta < 60^\circ$, ambos resultados son similares para todas las sumergencias relativas analizadas. El módulo del coeficiente de reflexión con pérdida de carga (Fig. 7.16a), presenta dos valores mínimos alrededor de $\theta = 0^\circ - 65^\circ$ para $d/h = 0.8$ aproximadamente, por lo que en estos puntos se está produciendo la mayor pérdida de carga.

Respecto a las fases, los resultados sin pérdida de carga para $\theta < 20^\circ$, presentan una mayor variabilidad respecto la sumergencia relativa que los resultados con pérdida de carga.

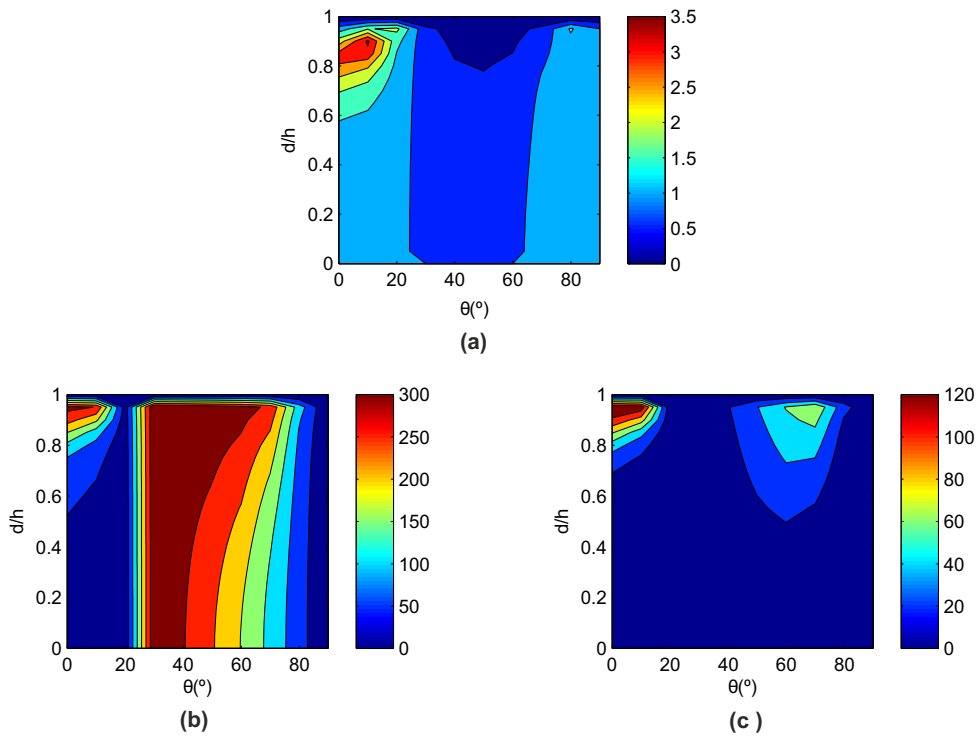


Figura 7.15: Módulo (a) y fase (c) del coeficiente de captura y fase (b) del coeficiente de reflexión, sin pérdida de carga en función del ángulo de incidencia del oleaje, θ , y la sumergencia relativa, d/h . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $B/L=0.55$, $h=10.0$ m, $N_f=200$.

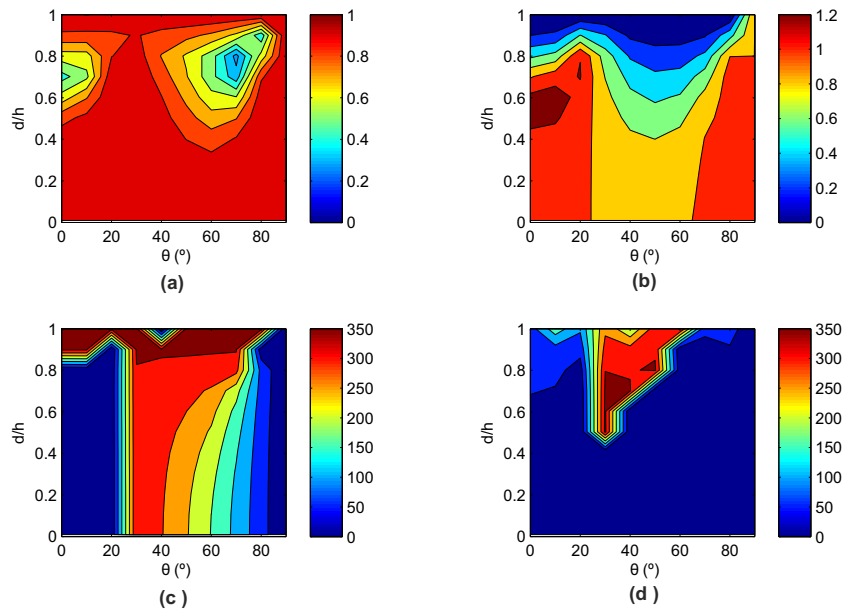


Figura 7.16: (a) Módulo del coeficiente de reflexión. (b) Módulo del coeficiente de captura. (c) Fase del coeficiente de reflexión. (d) Fase del coeficiente de captura. Resultados con pérdida de carga en función del ángulo de incidencia del oleaje, θ , y la sumergencia relativa, d/h . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $B/L=0.55$, $h=10.0$ m, $N_f=200$.

Para explicar por qué sin pérdida de carga se alcanza un valor de $|C_c| > 1$, para unos determinados valores de sumergencia y ángulo de incidencia del oleaje, se ha calculado en función de la profundidad relativa el factor de amplificación y del desplazamiento máximo de la columna de agua, para un oleaje incidente con amplitud $A_0=1$ m e incidencia $\theta = 10^\circ$, y un sistema con geometría $d/h=0.9$ y $B/h=3.2$ (Fig. 7.17). De la figura se observa, al igual que en la Fig. 7.14, que se produce una amplificación en $kh=1.05$ aproximadamente, que corresponde con la profundidad relativa considerada para el cálculo de los coeficientes.

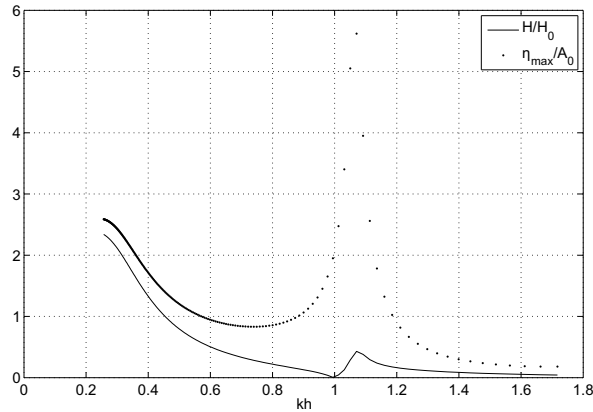


Figura 7.17: Factor de amplificación (líneas) y desplazamiento máximo de la columna de agua (puntos). $A_0=1.0$ m, $B/h=3.2$, $\theta = 10^\circ$, $h=10.0$ m, $N_l=200$.

7.1.4 Fuerzas totales sobre la placa

Aplicando la Ec. (4.28) se calculó la fuerza máxima sobre la placa vertical y se adimensionalizó respecto la fuerza máxima para un muro vertical (F_{max}/F_{muro}). La fuerza máxima sobre el muro vertical se calcula suponiendo que la placa está completamente sumergida.

La Fig. 7.18 representa los resultados sin pérdida de carga. Obsérvese que cuando no hay placa ($d/h=0.0$) la fuerza máxima adimensionalizada es nula y que cuando la placa está completamente sumergida ($d/h=1.0$) la fuerza máxima adimensionalizada es 1.0, independientemente del valor de B/L . Además los mayores valores de la fuerza máxima adimensionalizada aparece en los valores de sumergencia y anchura relativa en los que el coeficiente de captura es mayor.

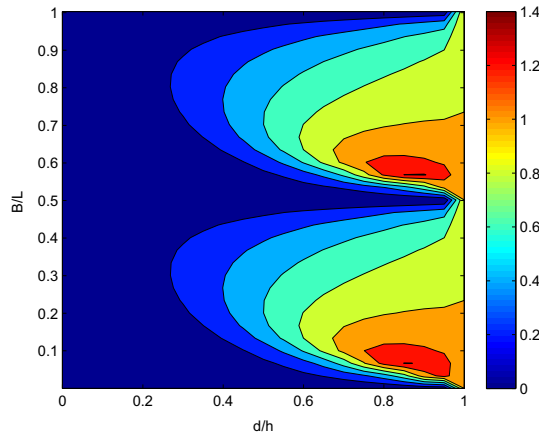
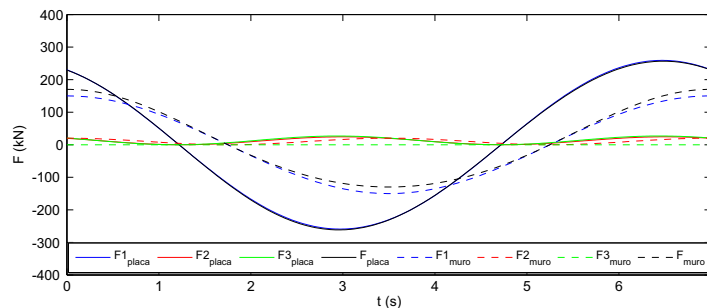
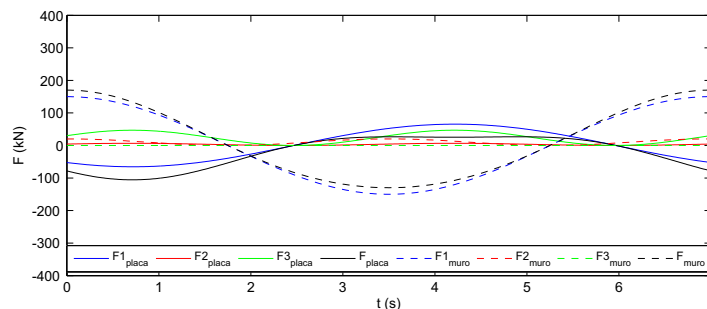


Figura 7.18: Fuerza máxima aplicada sobre la placa adimensionalizada, sin pérdida de carga, en función de la sumergencia relativa (d/h) y anchura relativa (B/L). $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_l=200$.

Para entender por qué ocurre esto, se representan las series temporales de las componentes que definen la fuerza neta para la placa y el muro vertical (Ecs. 4.29c, 4.29d, 4.29e). La Fig. 7.19a corresponde al caso geométrico en el que la fuerza máxima adimensionalizada es mayor que uno observándose como la serie temporal de la fuerza sobre la placa es mayor respecto la del muro vertical. En cambio al representar las series temporales para una geometría en la que la fuerza máxima adimensionalizada es menor que uno (Fig. 7.19b) se observa cómo la serie temporal de la fuerza sobre el muro es mayor respecto la de la placa.



(a)



(b)

Figura 7.19: Series temporales de la fuerza máxima aplicada sobre la placa y sobre el muro, y sus componentes, sin pérdida de carga. $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_l=200$, $B/L=0.55$. (a) $d/h=0.9$ (b) $d/h=0.5$

A continuación se representan los resultados correspondientes a la consideración de la pérdida de carga (Fig. 7.20). Del mismo modo que en los resultados sin pérdida de carga,

la fuerza máxima adimensionalizada es nula para $d/h=0$ y uno para $d/h=1.0$. Si se comparan con los resultados obtenidos sin pérdida de carga, Fig. 7.18, se observa que la mayor diferencia ocurre para $d/h > 0.5$ en todos los valores de B/L .

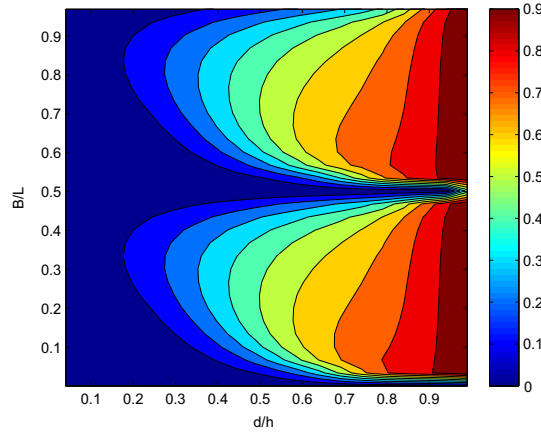


Figura 7.20: Fuerza máxima aplicada sobre la placa adimensionalizada, con pérdida de carga, en función de la sumergencia relativa (d/h) y anchura relativa (B/L). $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $N_I=200$.

La Fig. 7.21a-b corresponde a los resultados considerando variable el ángulo de incidencia del oleaje, sin y con pérdida de carga respectivamente. Para $\theta > 20^\circ$, ambos resultados son similares, existiendo una mayor diferencia para $0^\circ < \theta < 20^\circ$ y $d/h > 0.5$, en la que la fuerza máxima adimensionalizada calculada sin pérdida de carga alcanza valores superiores a uno en la zona de d/h en la que la captación es máxima.

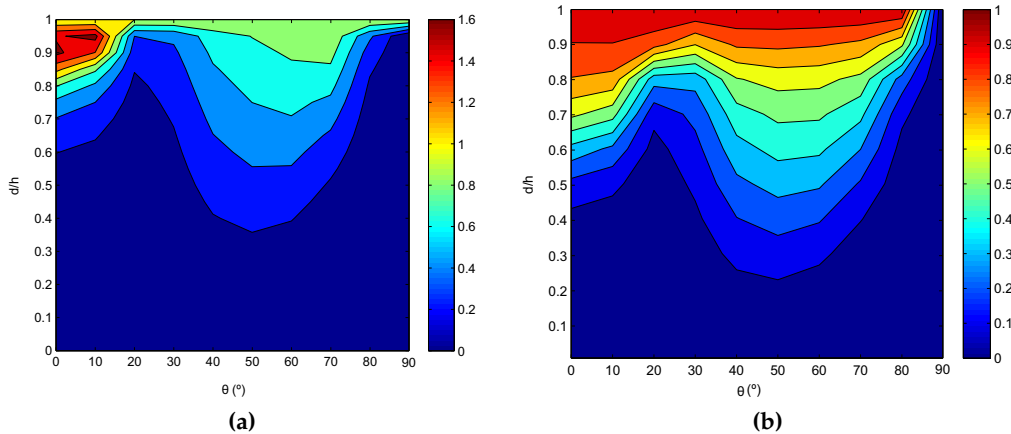


Figura 7.21: Fuerza máxima aplicada sobre la placa adimensionalizada, sin (a) y con pérdida de carga (b), en función del ángulo de incidencia del oleaje, θ , y la sumergencia relativa, d/h . $T=7.0$ s, $A_0=1.0$ m, $B/L=0.55$, $h=10.0$ m, $N_I=200$.

7.2 Resultados: Oleaje irregular

Según los resultados obtenidos anteriormente, se considera un sistema con una anchura relativa $B/h=1.0$ y una sumergencia relativa $d/h=0.8$. Como localización del dispositivo se ha elegido la misma zona que para el caso del OWC (ver Fig. 6.1). La Fig. 7.22 muestra

las funciones de densidad conjunta $f_e(H_s, \theta_m)$ y $f_e(T_m, \theta_m)$ obtenidas, observándose que las direcciones predominantes son del sector oeste.

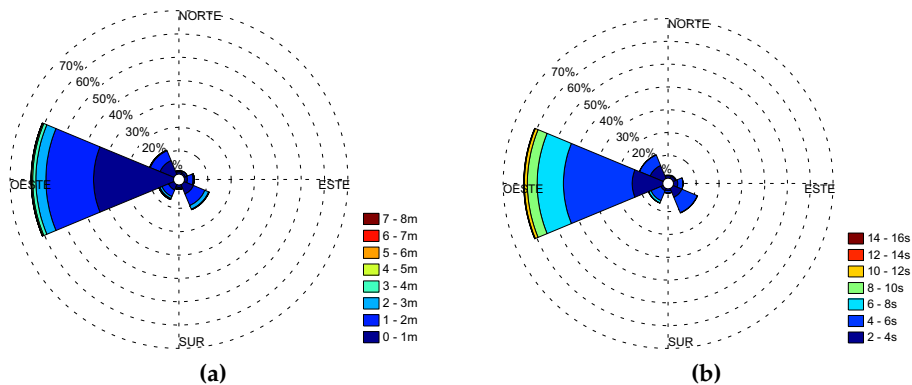


Figura 7.22: Distribuciones empíricas bivariadas: (a) $f_e(H_s, \theta_m)$, (b) $f_e(T_m, \theta_m)$

El sistema que se analiza se supone que tiene una orientación Norte-Sur debido a que es la más desfavorable según la Fig. 7.22, por lo que se trabaja con los estados de mar comprendidos entre $180^\circ \leq \theta_m \leq 360^\circ$. Según la posición de los ejes para la resolución de los distintos problemas, estos estados de mar se corresponden con $-90^\circ \leq \theta_m \leq 90^\circ$. En las figuras siguientes se muestran los estados de mar resultantes (37557) y su función de densidad empírica condicionada a los valores de θ_m .

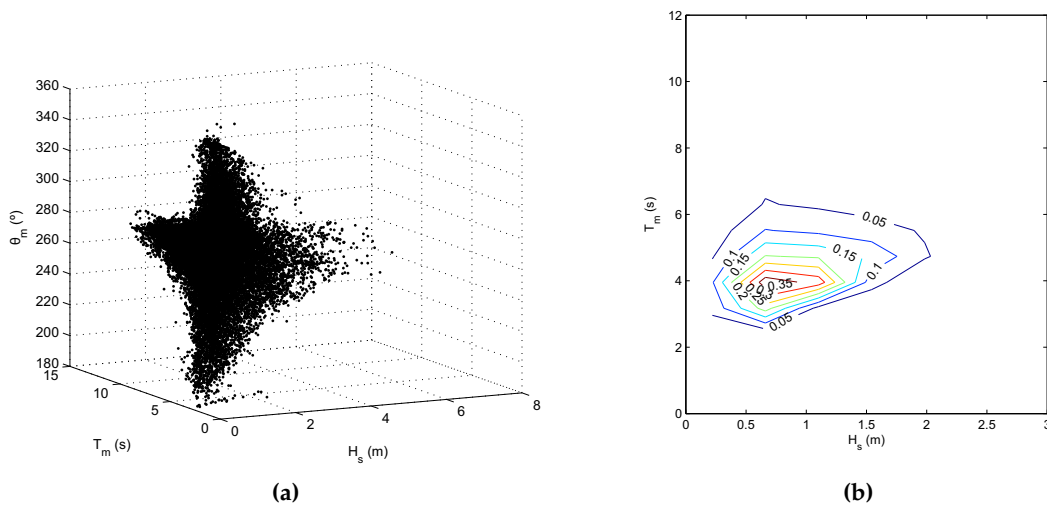


Figura 7.23: (a) Estados de mar con $180^\circ \leq \theta_m \leq 360^\circ$, (b) $f_e((H_s, T_m) | 180^\circ \leq \theta_m \leq 360^\circ)$

De entre todos los estados de mar cuyo θ_m se encuentra entre 180° y 360° , se selecciona un conjunto representativo mediante técnicas de clúster y algoritmos de selección, que se especifican a continuación. Siguiendo a Camus et al. [65], se aplica el algoritmo de selección de máxima disimilitud (MDA) porque no necesita una preselección de los datos y proporciona centroides cuyos valores se corresponden con estados de mar procedentes de los datos

de oleaje. Para la selección del número de centroides, se ha considerado siete tamaños distintos (25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600) y se ha calculado el error de cuantificación definido como la distancia media entre cada vector y su correspondiente centroide, Fig. 7.24a. De los resultados se ha seleccionado $M=400$ centroides, cuyo resultado al aplicar el MDA se ha representado en la Fig. 7.24b. El MDA no es una técnica de clúster, por lo que para determinar los estados correspondientes a cada centroide se ha minimizado la distancia euclídea correspondiente a cada centroide.

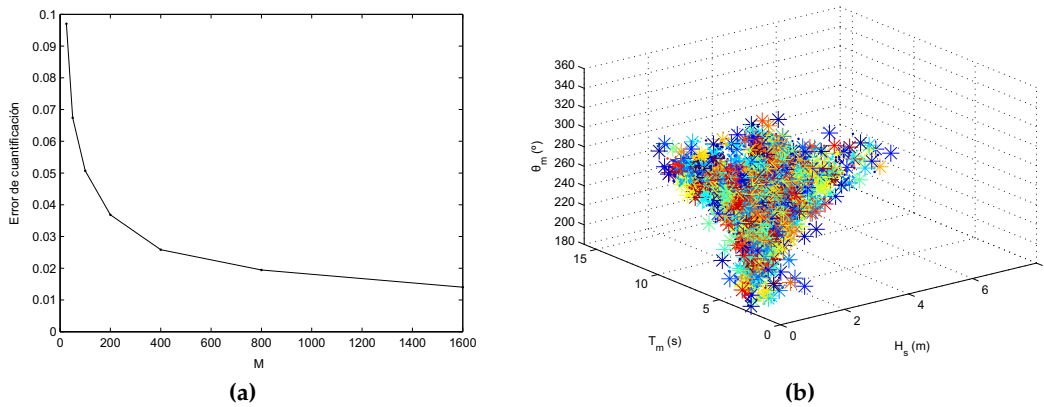


Figura 7.24: (a) Error medio de cuantificación en función del número de centroides; (b) centroides seleccionados (estrellas) junto con los estados de mar correspondientes a cada centroide (puntos)

Estos 400 centroides son un conjunto representativo del clima marítimo. Sin embargo, de entre los $M=400$ centroides se deben seleccionar un número determinado de estados para realizar el cálculo del régimen de fuerzas, debido a su alto coste computacional. Para la selección de estados, se ha calculado la probabilidad asociada a cada centroide (Fig. 7.25a), seleccionando un estado con una alta probabilidad de ocurrencia ($H_s=1.1$ m, $T_m=4.1$ s, $\theta_m=282.3^\circ$) y otro menos probable ($H_s=3.6$ m, $T_m=6.1$ s, $\theta_m=297.7^\circ$) (Fig. 7.25b).

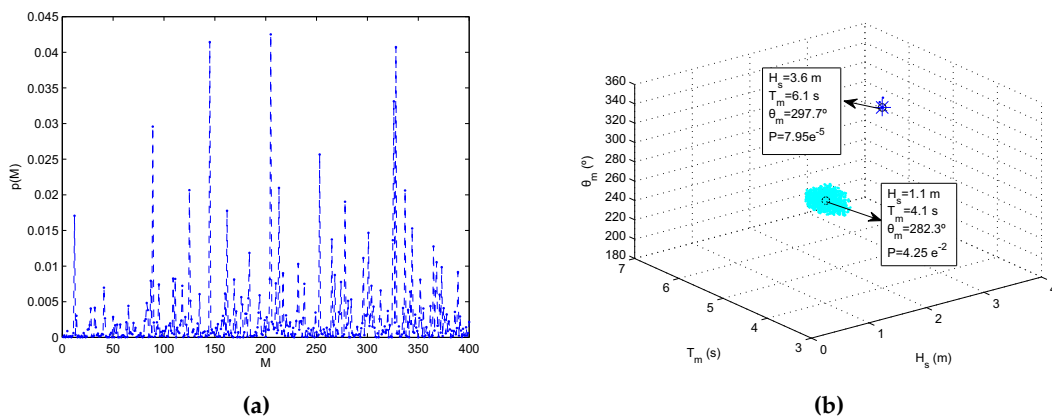


Figura 7.25: Probabilidad asociada a cada centroide (a); centroides (estrellas) seleccionados junto con sus estados correspondientes (puntos)(b)

7.2.1 Fuerzas totales sobre la placa

Partiendo de las hipótesis expuestas en la sección 4.3, se realiza mediante la técnica de simulación de Montecarlo, una simulación de los valores de la altura de ola y el periodo medio de paso por cero de las olas individuales para cada uno de los estados de mar seleccionados, obteniendo de esta manera una muestra (H_i, T_i) del vector aleatorio (H_s, T_m, θ_m) . Para cada ola individual se calcula la fuerza máxima, mediante la Ec. (4.28), y se analiza estadísticamente la muestra así obtenida $\{F_{max,i}\}$.

Las figuras siguientes representan para los dos estados de mar seleccionados, la función de distribución empírica estimada y la de distribución teórica ajustada, a partir de las muestras para el caso sin pérdida de carga (Fig. 7.26) y con pérdida de carga (Fig. 7.27). En la plataforma continental, el desplazamiento vertical de la superficie libre es un proceso gaussiano, $N(0, \sigma_\mu)$ y para oleaje tipo swell (espectro de banda estrecha) las alturas de ola siguen una distribución Rayleigh de parámetro el valor medio cuadrático de la muestra, H_{rms} . Sin embargo, para el cálculo de la variable aleatoria fuerza máxima de la ola individual, se añade la fuerza producida por la columna de agua por encima del nivel medio y los modos evanescentes que decaen con la distancia y con la profundidad, lo que conlleva a que el modelo gaussiano no sea estrictamente aplicable y como resultado, la distribución de sus amplitudes en un estado de mar siguen una distribución Weibull biparamétrica, de parámetro de escala λ y de forma β (Ec. 7.2), siendo el parámetro de forma un indicador de cuánto la distribución de Weibull se aleja de Rayleigh. Cuando $0 < \beta < 2$, hay más valores grandes y más pequeños de F_{max} , en cambio, cuando $\beta > 2$ hay menos valores grandes y menos pequeños de F_{max} que para una distribución Rayleigh. Para $\beta = 1$, $f(F_{max})$ corresponde a una distribución exponencial.

$$f(F_{max}) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{F_{max}}{\lambda} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{F_{max}}{\lambda} \right)^\beta \right] \quad (7.2)$$

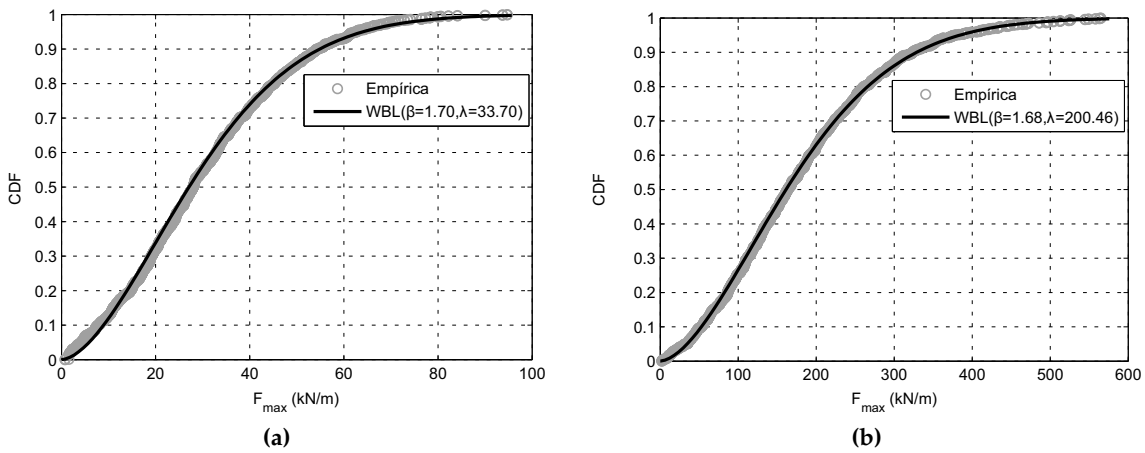


Figura 7.26: Función de distribución empírica y teórica de F_{max} calculada sin pérdida de carga. $B/L=0.1$, $d/h=0.8$, (a) $H_s=1.1$ m, $T_m=4.1$ s, $\theta_m=282.3^\circ$; (b) $H_s=3.6$ m, $T_m=6.1$ s, $\theta_m=297.7^\circ$

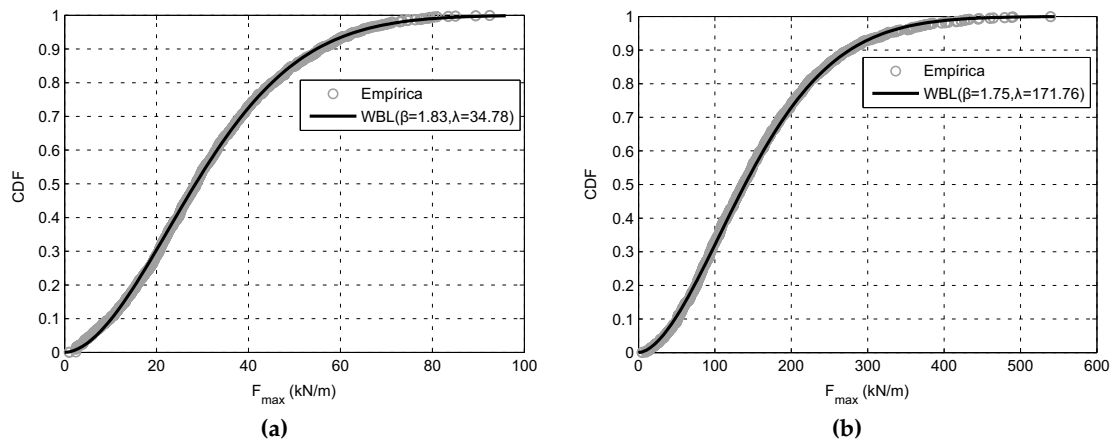


Figura 7.27: Función de distribución empírica y teórica de F_{max} calculada con pérdida de carga. $B/L=0.1$, $d/h=0.8$, (a) $H_s=1.1$ m, $T_m=4.1$ s, $\theta_m=282.3^\circ$; (b) $H_s=3.6$ m, $T_m=6.1$ s, $\theta_m=297.7^\circ$

Si se realiza el cálculo considerando únicamente los modos propagantes y despreciando la fuerza producida por encima del nivel medio, las fuerzas máximas siguen también una distribución Weibull (Figs. 7.28-7.29), aunque con un parámetro de forma más próximo al correspondiente a la distribución Rayleigh ($\beta = 2$). Sin embargo, para el estado de mar más probable, hay una reducción del valor máximo de la F_{max} del 17.25% (Fig. 7.28a) y del 19.9% (Fig. 7.29a) para los casos sin y con pérdida respectivamente. Para el estado de mar menos probable la reducción es del 20.81 % (Fig. 7.28b) y del 33.94 (Fig. 7.29b) para los casos sin y con pérdida respectivamente.

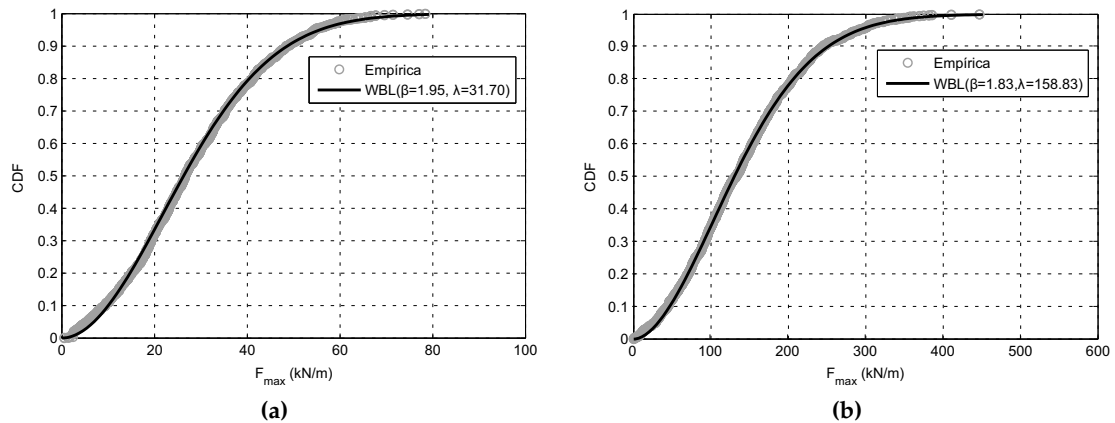


Figura 7.28: Función de distribución empírica y teórica F_{max} , considerando los modos propagantes e integrando hasta $z=0$, sin pérdida de carga. $B/L=0.1$, $d/h=0.8$, (a) $H_s=1.1$ m, $T_m=4.1$ s, $\theta_m=282.3^\circ$; (b) $H_s=3.6$ m, $T_m=6.1$ s, $\theta_m=297.7^\circ$

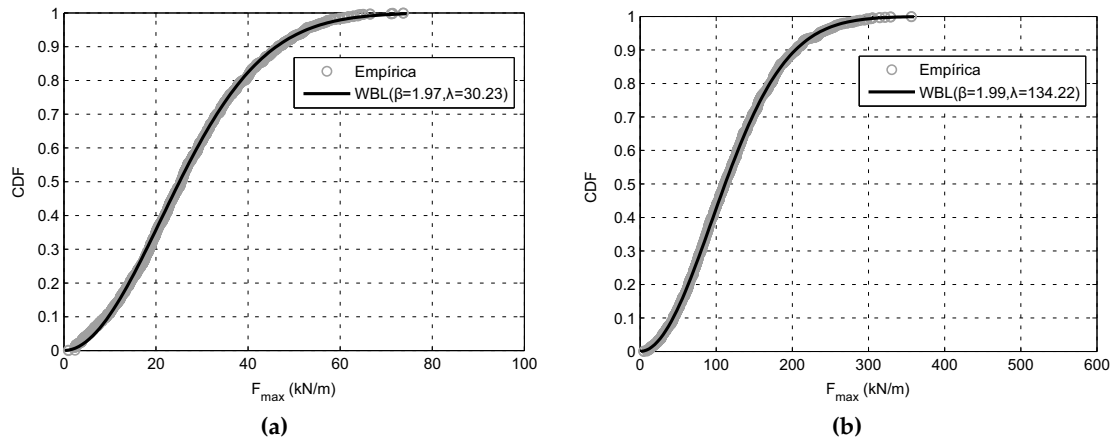


Figura 7.29: Función de distribución empírica y teórica de F_{max} , considerando los modos propagantes e integrando hasta $z=0$, con pérdida de carga. $B/L=0.1$, $d/h=0.8$, (a) $H_s=1.1$ m, $T_m=4.1$ s, $\theta_m=282.3^\circ$; (b) $H_s=3.6$ m, $T_m=6.1$ s, $\theta_m=297.7^\circ$

Por tanto, se concluye que la no linealidad que introducen la consideración de la fuerza producida por la columna de agua por encima del nivel medio y los modos evanescentes, hace que la muestra F_{max} sea no gaussiana, alejándose su distribución desde la Rayleigh hacia la Exponencial. Un resultado similar fue encontrado por Sarpkaya e Isaacson [66] que estudiaron la función de densidad de la fuerza máxima sobre un pilote, para un espectro de banda estrecha y distintos valores de la relación entre las fuerzas de inercia respecto las de arrastre, poniendo de manifiesto la modificación de la función de densidad desde Rayleigh hasta la Exponencial, en función de la relación de dichas fuerzas.

7.3 Discusión

El análisis propuesto se ha aplicado con una serie de simplificaciones. A continuación se comentan las implicaciones que tienen algunas de ellas.

El método del desarrollo en serie de las autofunciones, es útil para la resolución del problema de la interacción de un tren de ondas monocromático y una estructura, siendo necesario realizar una optimización del número de los modos evanescentes para encontrar la solución exacta. Puesto que se ha realizado un análisis en función de los parámetros geométricos, para reducir el coste computacional se ha supuesto una geometría y se ha calculado el número óptimo de los modos evanescentes, de modo que todos los casos se han calculado con ese valor óptimo de los modos evanescentes.

Al aplicar la teoría propuesta por Mei [10], se considera únicamente los términos asociados a los efectos de fricción, que son predominantes para periodos largos. Además, en el módulo de la velocidad para el cálculo del coeficiente de fricción linealizado, se considera onda plana, despreciando el efecto de los modos evanescentes ($l = 0$), que presentan una mayor influencia en los periodos cortos. Todo esto implica, que para periodos cortos, la solución no sea exacta.

La validación de los modelos analíticos se ha realizado con modelos numéricos que consideran una placa vertical de espesor 0.5 m, mientras que los modelos analíticos suponen una placa vertical delgada por simplicidad.

7.4 Conclusiones

Los coeficientes de reflexión y captura, que se definen respectivamente como las amplitudes relativas de la onda reflejada en la región exterior y la capturada en la región interior, en relación con la amplitud de la onda incidente, permiten determinar la energía reflejada y la transmitida hacia el interior del sistema.

Estos coeficientes, al igual que la fuerza total sobre la parte semisumergida, varían en función del periodo y del ángulo de incidencia del oleaje (T, θ), de la sumergencia relativa del sistema (d/h) y del ancho relativo del sistema (B/L), por lo que es necesario realizar un análisis de sensibilidad de estas variables.

Para tener una primera aproximación de estas variables, se desarrollan modelos analíticos que tengan o no en cuenta la pérdida de carga que se produce debido a la presencia del hueco inferior de la placa. Estos modelos están basados en el desarrollo en serie de autofunciones [67], siendo necesario realizar una optimización del número de las componentes del desarrollo en serie (N_l). Sus resultados, se validan con modelos numéricos desarrollados por Teixeira et al. [62]. Los resultados ponen de manifiesto un mejor ajuste del modelo analítico que considera la pérdida de carga.

Si se comparan los resultados obtenidos con los dos modelos analíticos, en el problema sin pérdida de carga, para todas las sumergencias relativas estudiadas d/h , aparece un periodo resonante, que aumenta su valor al aumentar la anchura relativa del sistema B/h . En cambio, la consideración de la pérdida de carga, afecta a las sumergencias mayores, desapareciendo el periodo pico resonante y disminuyendo la amplificación que se produce dentro de la cámara.

Para el caso sin pérdida de carga, en las características geométricas en las que $|C_c| > 1$ aparece la mayor fuerza máxima aplicada sobre la placa, siendo mayor que la fuerza máxima aplicada sobre un muro vertical. En cambio, en el problema con pérdida de carga, las mayores fuerzas aparecen para la placa completamente sumergida ($d/h = 1$), como era de esperar.

Por tanto, para el diseño óptimo con modelos que no consideren la pérdida de carga, se deberían especificar las sumergencias para las cuales el modelo está funcionando correctamente.

Para la aplicación a oleaje irregular, se ha admitido la hipótesis de que las variables ateorias altura de ola y periodo medio de paso por cero en el estado de mar siguen la distribución de Longuet-Higgins. Mediante la técnica de simulación de Montecarlo se ha simulado las olas individuales en un estado de mar y admitiendo la validez de la hipótesis de equivalencia, se ha analizado a modo de ejemplo la distribución de las fuerzas máximas en el estado de mar. Esta distribución debería ser Rayleigh, puesto que la altura de ola

de paso por cero en un estado de mar en la plataforma continental, sigue una función Rayleigh. Sin embargo, debido a la no linealidad que aportan los modos evanescentes y la consideración de la fuerza producida por la columna de agua por encima del nivel medio, para los dos estados de mar analizados se ha obtenido una distribución Weibull. Si en el cálculo de F_{max} se desprecia los modos evanescentes y el efecto de la fuerza por encima del nivel medio, la distribución obtenida es Rayleigh, aunque la reducción del valor máximo de la fuerza máxima en el estado llega hasta el 34% en los casos analizados.

8

Tendencia de las formas del lecho

En este capítulo se analiza el transporte de masa y de sedimentos que se genera alrededor de los sistemas OWC definidos anteriormente, aplicando modelos analíticos cuya formulación está expuesta en el Capítulo 5.

8.1 Validación del desarrollo matemático

Con el objetivo de verificar el desarrollo matemático, se comparan los resultados obtenidos con los proporcionados por Lamoure y Mei [52] que partiendo de las expresiones de la velocidad del transporte de masa proporcionadas por Carter, Liu y Mei [50], desarrollaron las correspondientes expresiones en coordenadas polares para un cilindro vertical suponiendo que $ka \ll 1$:

$$\begin{bmatrix} \langle u_L \rangle_r \\ \langle u_L \rangle_\theta \end{bmatrix} = \left(\frac{gkA_0}{\omega \cosh kh} \right)^2 \frac{4}{a} \left(\frac{a}{r} \right)^3 \begin{bmatrix} -a^2/r^2 + \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \end{bmatrix} \frac{1}{2\omega} \frac{1}{4} (4e^{-\xi} \sin \xi + e^{-2\xi} - 1) \quad (8.1)$$

donde $\langle u_L \rangle_r, \langle u_L \rangle_\theta$ son las componentes del transporte de masa en coordenadas polares, g es la aceleración de la gravedad, k es el número de onda, A_0 es la amplitud del tren incidente, ω es su frecuencia angular, h es la profundidad, a es el radio del cilindro, $\xi = z/\delta$ siendo δ el espesor de la capa límite oscilatoria y (r, θ) son las coordenadas polares.

El problema de la interacción del oleaje con un cilindro vertical impermeable sobre un fondo horizontal, fue resuelto por MacCamy y Fuchs [68], que aplicaron la teoría conocida para ondas acústicas y electromagnéticas al caso de ondas en el agua. Su solución obtenida

está expresada en términos de la función potencial combinando los efectos del tren incidente y reflejado:

$$\phi = \Re \left\{ A_0 f_0(z) \sum_{m=0}^{N_m} \epsilon^m i^m \cos(m\theta) \left(J_m(kr) - H_m(kr) \frac{J'_m(ka)}{H'_m(ka)} \right) e^{-i\omega t} \right\} \quad (8.2)$$

donde A_0 es la amplitud del tren de ondas incidente, f_0 es la función de profundidad para el modo propagante, k es el número de onda, ω es la frecuencia angular, t es el tiempo, J_m y J'_m son la función de Bessel de primer tipo y su derivada respectivamente, H_m y H'_m son la función de Hankel y su derivada respectivamente, a es el radio del sistema y (r, θ, z) son las coordenadas cilíndricas.

Partiendo de la expresión de la función potencial anterior Ec. (8.2), se desarrollan las expresiones de las velocidades del transporte de masa en coordenadas cartesianas y su solución se compara con la proporcionada por Lamoure y Mei (Fig. 8.1).

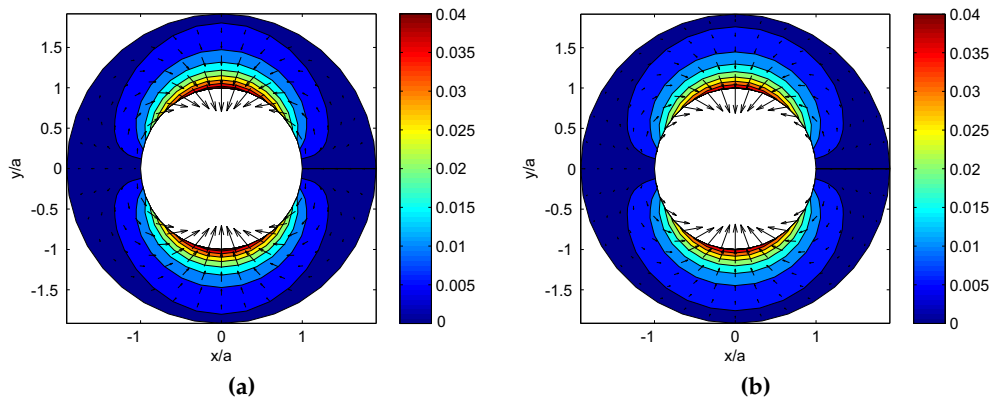


Figura 8.1: Velocidad del transporte de masa alrededor de un cilindro vertical: $ka=0.1941$, $h=10$ m, $A_0=0.5$ m, $a/h=0.35$. (a) Solución a partir de la función potencial proporcionada por MacCamy y Fuchs. (b) Solución proporcionada por Lamoure y Mei.

De la figura se observa que ambos resultados coinciden, por lo que se dan por válidas las expresiones del transporte de masa y su desarrollo a partir de una función potencial expresada en coordenadas cilíndricas. A continuación, se analiza la influencia de parámetros fundamentales del oleaje como el periodo y el ángulo de incidencia, parámetros asociados al OWC como la sumergencia y la velocidad de giro y el efecto de la pérdida de carga en el transporte de masa y el transporte de sedimentos.

8.2 Sistema OWC de sección circular

Los parámetros que influyen en la extracción de la energía del oleaje se pueden clasificar en: (i) parámetros del medio (ρ_a, ρ_w, h); (ii) parámetros del oleaje local (H_s, T_p); (iii) parámetros del OWC (d, a, e, D, N). De entre todos ellos, en esta sección se analiza la influencia del periodo T , de la sumergencia d y de la velocidad de giro N .

Además se tiene en cuenta el efecto de los problemas hidrodinámicos de la difracción y radiación que lleva asociado un sistema OWC. A modo de ejemplo, en la Fig. 8.2 se representa la superficie libre adimensionalizada para ambos problemas.

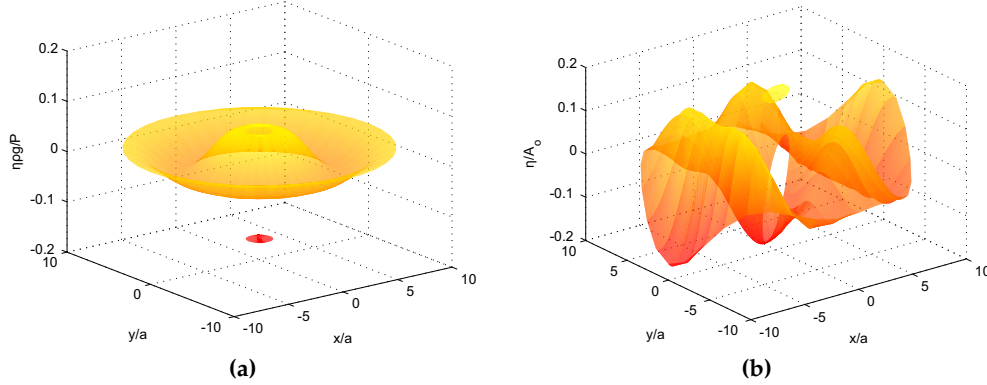


Figura 8.2: Superficie libre adimensionalizada para el problema hidrodinámico de la radiación (a) y de la difracción (b). $kh=1.693$, $h=10$ m, $A_0=0.5$ m, $a/h=0.5$, $d/h=0.5$, $t=2\pi/\omega$

8.2.1 Perfiles de velocidad del transporte de masa

En primer lugar se analizan los perfiles del transporte de masa dentro de la capa límite oscilatoria o de Stokes. Esta capa límite se produce cuando el forzamiento es un flujo oscilatorio, generándose y desapareciendo en cada semiperiodo.

Influencia del periodo del oleaje

Al realizar la optimización estocástica anual para un sistema OWC con radio $a=3.5$ m y diámetro de la turbina $D=1.0$ m (Caso 2), se obtuvieron unas características óptimas de 8.0 m de sumergencia y 300 rpm (aproximadamente) de velocidad de giro de la turbina (ver tabla 6.2). De la Fig. 6.5c, se observa que los periodos pico más probables están entre 4.0 – 10.0 s aproximadamente, por lo que se va a analizar la influencia del periodo en el transporte de masa.

La Fig. 8.3 representa los perfiles del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado $|\vec{U}_L|_{adim} = \frac{1}{H_0} \sqrt{\frac{a}{8}} \sqrt{u_L^2 + v_L^2}$, para un sistema OWC con geometría óptima anual sometido a un tren de ondas de amplitud $A_0=0.5$ m, ángulo de incidencia $\theta = 0^\circ$ y distintos periodos. De la figura se observa que para todos los periodos en algunos valores de x/a y ξ se tiene que $|\vec{U}_L|_{adim}=0$. Para $T=10.0-8.0$ s los valores máximos se alcanzan dentro del sistema ($x/a < -1$) mientras que para $T = 4.0$ s se alcanzan fuera del sistema ($x/a > -1$), independientemente del valor de ξ . En cambio, para $T = 6.0$ s, los valores alcanzados dependen de ξ , siendo mayores fuera del sistema para $\xi < 1.0$ aproximadamente.

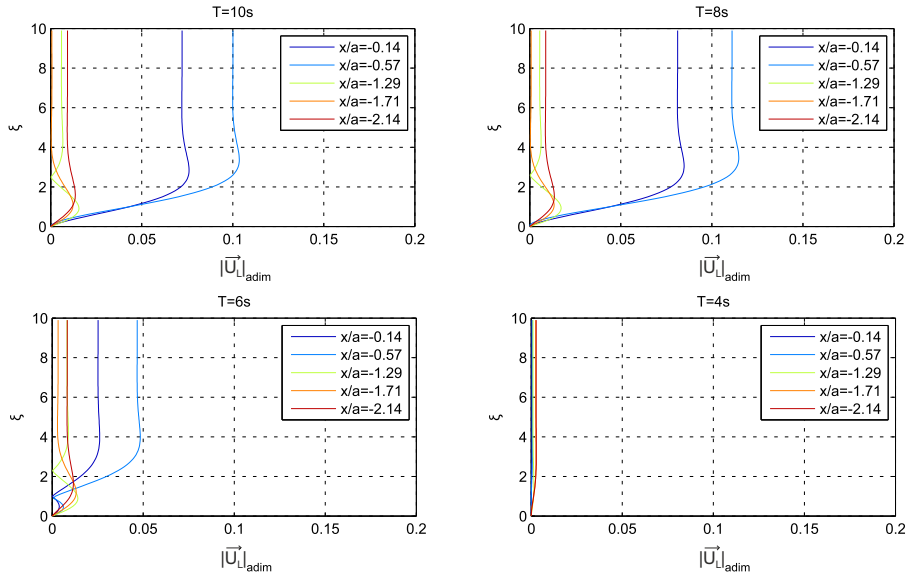


Figura 8.3: Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$

Para entender por qué en los puntos en los que se tiene $|\vec{U}_L|_{adim}=0$, los perfiles presentan un punto de inflexión, se representan las componentes del transporte de masa $u_{L_{adim}}$, $v_{L_{adim}}$ para $T=8-6$ s. De la Fig. 8.4 se observa que la componente según el eje y ($v_{L_{adim}}$) es nula puesto que los perfiles se están representando para $y/a=0$. La componente según el eje x ($u_{L_{adim}}$) tiene valores negativos y positivos, lo que conlleva a que exista un valor de ξ en el que $u_{L_{adim}}=0$. Dicho valor de ξ es de 1.0 y 2.5 aproximadamente, para los perfiles correspondientes a $x/a=-0.14, -0.57$ y $x/a=-1.29$ respectivamente. Lamoure y Mei [52] encontraron que para un cilindro vertical el punto en el que $u_L=0$ era para $\xi=2$, lo cual se aproxima con el obtenido fuera del sistema OWC ($\xi = 2.5$ en $x/a=-1.29$). Además observaron que para $\xi < 2$ el perfil del transporte de masa es convexo y positivo, mientras que para $\xi > 2$ cambia su signo, lo que implica un cambio en el sentido del transporte de masa. Esto también se ha obtenido para el exterior del OWC ($x/a=-1.29$) aunque en el interior del OWC el perfil obtenido es opuesto (ver $T=6$ s, $x/a=-0.57$).

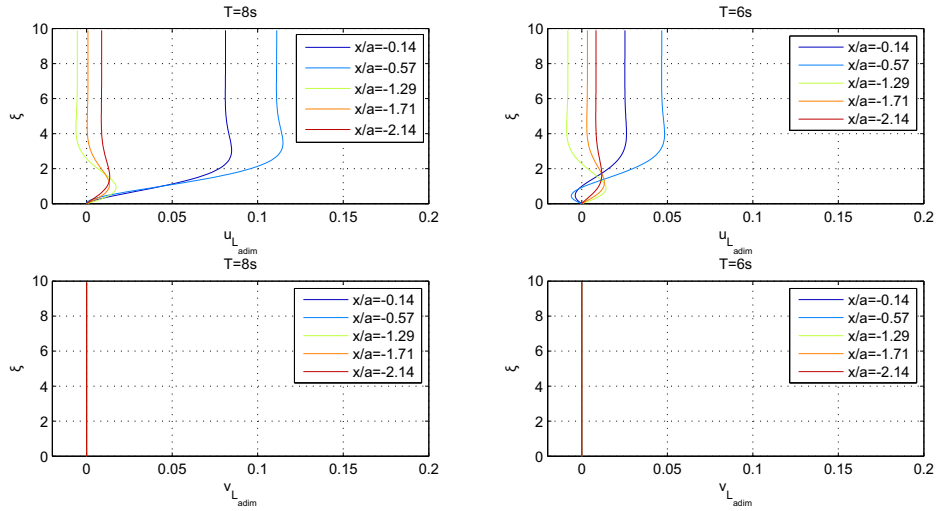


Figura 8.4: Perfil de las componentes de la velocidad del transporte de masa adimensionalizados. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$

Influencia de la velocidad de giro

El siguiente análisis se realiza sobre la velocidad de giro de la turbina N . Para ello se compara la sumergencia óptima anual ($d=8.0$ m) con una velocidad de giro distinta a la óptima anual ($N=1000.0$ rpm), para distintos periodos.

Los resultados correspondientes a una velocidad de giro no óptima anual (Fig. 8.5), muestran la misma tendencia que con N_{opt} aunque los valores alcanzados son menores.

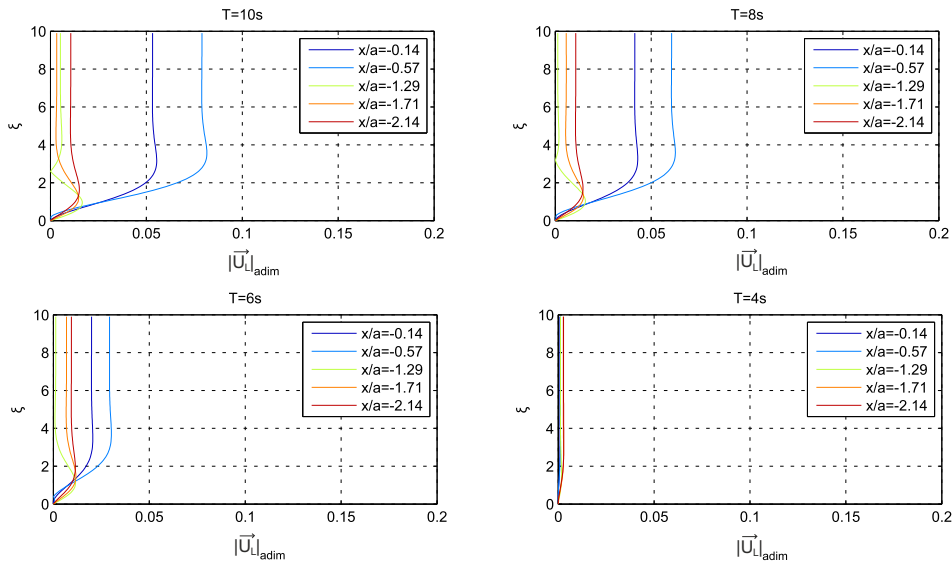


Figura 8.5: Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$

Influencia de la sumergencia

Para el periodo en el que se alcanza la máxima velocidad del transporte de masa (Fig. 8.3), se analiza la influencia de la sumergencia. En la siguiente figura (Fig. 8.6) se representa los

perfiles del transporte de masa para un periodo $T = 8.0$ s y distintas sumergencias $d = 2.0-5.0-8.0$ m.

A diferencia de los casos anteriores, se observa que los mayores valores se obtienen en el interior del sistema independientemente del valor de ξ . Además, al disminuir d los valores máximos disminuyen y los perfiles para los distintos valores de x/a son prácticamente iguales, desapareciendo los valores de $|\vec{U}_L|_{adim}=0$, es decir, las componentes del transporte de masa presentan únicamente valores negativos o positivos y por tanto no aparece un cambio en el sentido del transporte de masa.

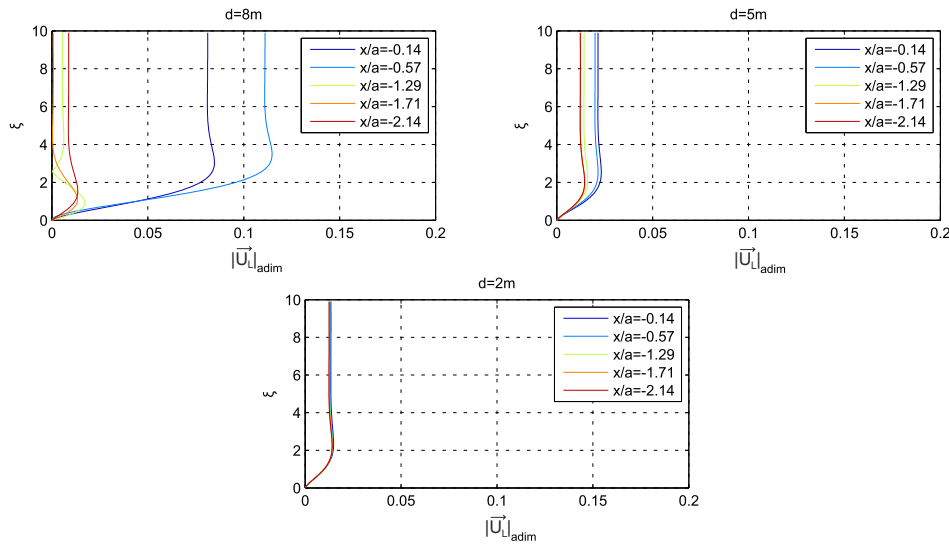


Figura 8.6: Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$

Influencia del periodo y velocidad de giro óptimos

La velocidad de giro de $N=300$ rpm y la sumergencia de $d=8$ m, son los óptimos anuales asociados a un emplazamiento determinado. A continuación, se analiza los valores óptimos asociados a un tren de ondas monocromático. Para ello, se ha supuesto un sistema OWC con la sumergencia que está dando mayores velocidades del transporte de masa ($d=8$ m) y siguiendo el procedimiento desarrollado por Hervé y Mei [16], se ha calculado el periodo y la velocidad de giro que hacen que la captura del sistema para un tren de ondas monocromático sea del 100 %. El periodo obtenido es de $T = 6.5$ s y la velocidad de giro de $N = 53$ rpm.

Al representar los perfiles correspondientes (Fig. 8.7) se observa que en todos los valores de x/a se tiene un punto de ξ en el que $|\vec{U}_L|_{adim}=0$, lo que implica que se está produciendo un cambio de sentido en el transporte de masa. Este punto está más próximo a cero cuanto más cerca se está del centro del sistema ($x=y=0$), y los mayores valores aparecen en el interior o exterior del sistema en función de ξ .

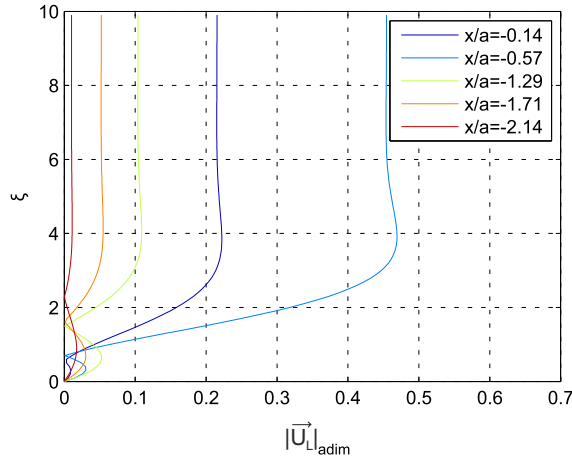


Figura 8.7: Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=6.5$ s, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$, $y/a=0$

En función de los resultados obtenidos, se considera $\xi=1$ y se calcula la corriente euleriana, la deriva de Stokes y el transporte de masa suponiendo un tren de ondas de amplitud $A_0=0.5$ m y ángulo de incidencia $\theta = 0^\circ$, con distintos periodos.

8.2.2 Corriente Euleriana

Influencia del periodo del oleaje

La Fig. 8.8 representa el módulo y dirección de la corriente euleriana adimensionalizada $|\bar{U}_2|_{adim} = \frac{1}{H_0} \sqrt{\frac{a}{g}} \sqrt{u_2^2 + v_2^2}$, alrededor de un sistema OWC con geometría óptima anual, para distintos valores del periodo del oleaje y $\xi=1$.

De entre todos ellos, el mayor valor se alcanza en el interior del sistema para $T = 8.0$ s, puesto que los valores de sumergencia y velocidad de giro representados corresponden con los óptimos para dicho periodo (ver Figs. 6.9b-6.10b). Al disminuir T (aumentar a/L), los máximos alcanzados se van desplazando hacia el exterior del sistema, obteniéndose para el caso de $T=4$ s unos resultados de un orden de magnitud menor respecto los otros periodos. En todos los casos la dirección predominante es paralela al tren de ondas propagante, salvo en el interior del sistema para $T=6.0-4.0$ s en la que la dirección tiene sentido opuesto respecto el tren propagante.

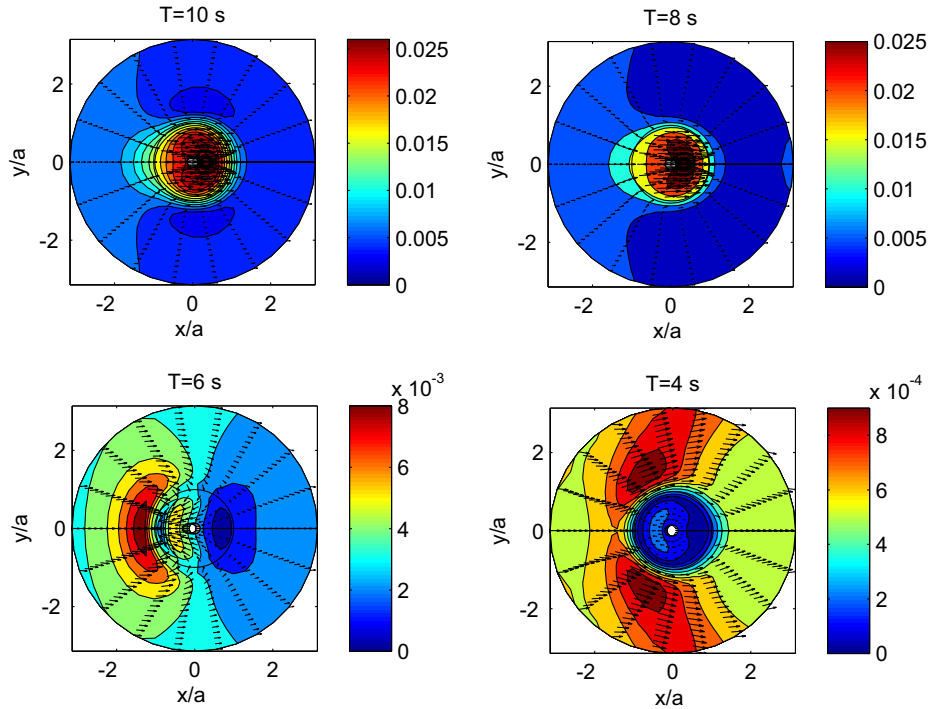


Figura 8.8: Corriente euleriana adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$.

Influencia de la velocidad de giro

Con $N=1000.0$ rpm, las máximas velocidades (Fig. 8.9) son menores respecto las obtenidas para N_{opt} (Fig. 8.16). En cambio, las mínimas velocidades obtenidas son mayores respecto las obtenidas para N_{opt} , lo que origina una reducción del rango de valores entre los que se encuentran los resultados.

Las direcciones predominantes se mantienen iguales que en el caso anterior, aunque para el problema con $T=6.0-4.0$ s la dirección predominante en el interior del sistema es paralela a la dirección de propagación.

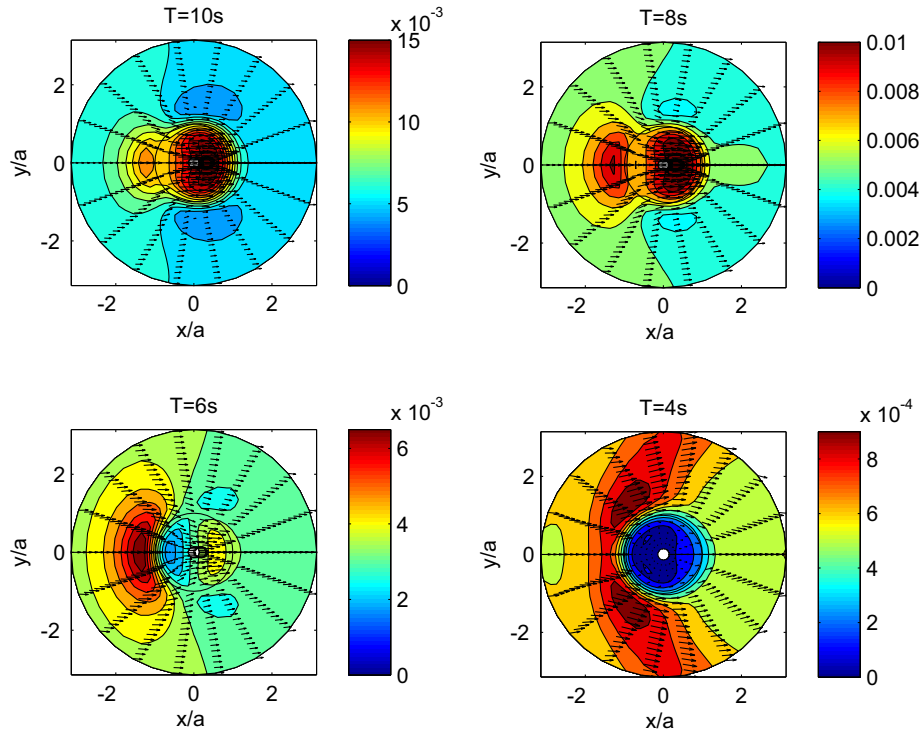


Figura 8.9: Corriente euleriana adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=1$.

Influencia de la sumergencia

En las siguientes figuras, se representan las corrientes eulerianas (Fig. 8.10) para un periodo $T=8.0$ s y distintas sumergencias $d= 2.0-5.0-8.0$ m.

En este caso, los mayores valores de la corriente euleriana se alcanzan dentro de la cámara aunque al disminuir el valor de d , disminuye el valor alcanzado y el rango de valores entre los que se encuentra. Las direcciones son paralelas a la dirección de propagación, tanto en el interior como en el exterior del sistema.

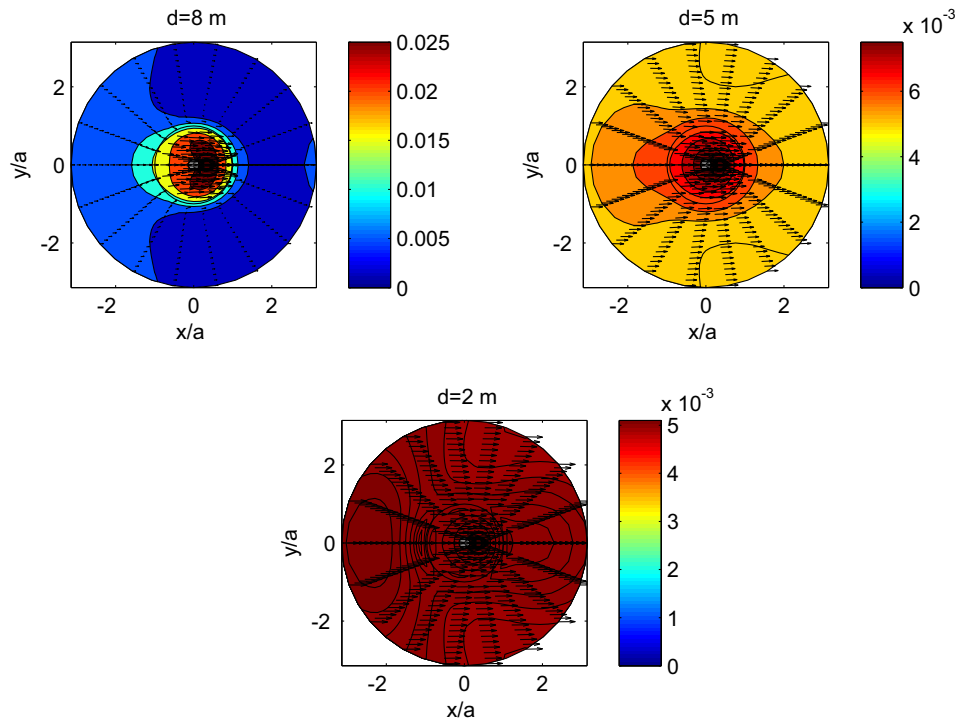


Figura 8.10: Corriente euleriana adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$

Influencia del periodo y velocidad de giro óptimos

Los resultados correspondientes al periodo y la velocidad de giro óptimos (Fig. 8.11) muestran que la dirección predominante no es paralela a la dirección propagante, sino que converge hacia el sistema.

Los valores alcanzados son mayores respecto los casos analizados anteriormente, produciéndose el máximo en el exterior del sistema. Esto tiene sentido puesto que para $T=6.0$ s independientemente del valor de N , el máximo se produce en el exterior del sistema. Lo cual indica que para una geometría dada, el periodo del oleaje determina la posición de los valores máximos y mínimos.

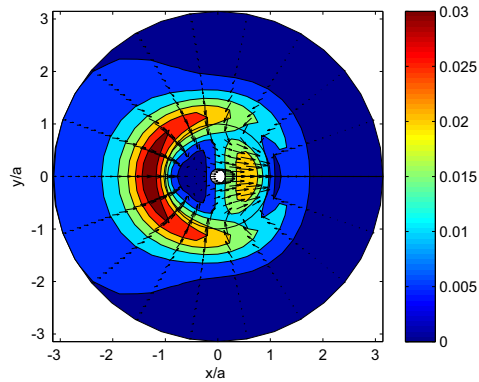


Figura 8.11: Corriente euleriana adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $T=6.5$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$

8.2.3 Deriva de Stokes

Influencia del periodo del oleaje

La Fig. 8.12 representa el módulo y dirección de la deriva de Stokes adimensionalizada $|\bar{U}_d|_{adim} = \frac{1}{H_0} \sqrt{\frac{a}{g}} \sqrt{\bar{u}_d^2 + \bar{v}_d^2}$, alrededor de un sistema OWC con geometría óptima anual, para distintos valores del periodo del oleaje y $\xi=1$.

Sus resultados son del mismo orden de magnitud que la corriente euleriana, aunque para $T=6.0$ s el valor máximo se alcanza dentro del sistema y las direcciones son paralelas a la dirección de propagación del oleaje, tanto en el interior como en el exterior del sistema.

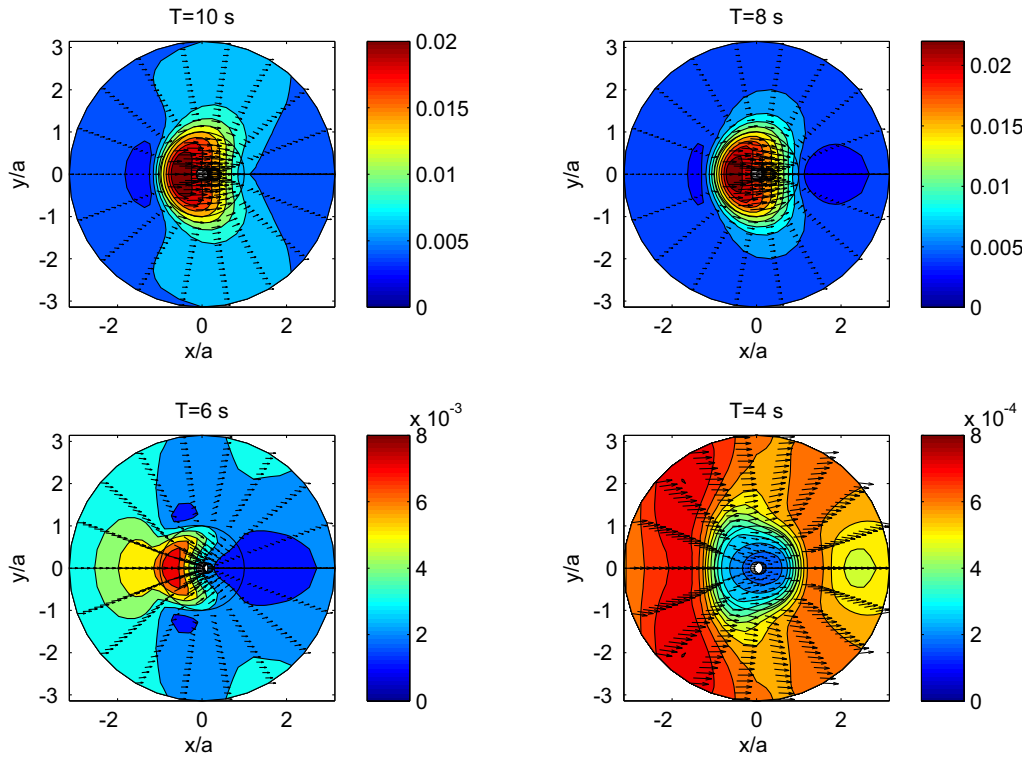


Figura 8.12: Deriva de Stokes adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$.

Influencia de la velocidad de giro

A continuación se estudia la influencia de la velocidad de giro (Fig. 8.13). Los valores mínimos obtenidos son mayores y los máximos son aproximadamente iguales respecto el caso anterior. Las direcciones siguen siendo paralelas a la dirección de propagación del oleaje.

Respecto a la corriente euleriana, se obtiene el mismo orden de magnitud aunque los valores máximos para $T = 6.0-4.0$ s aparecen en otra posición.

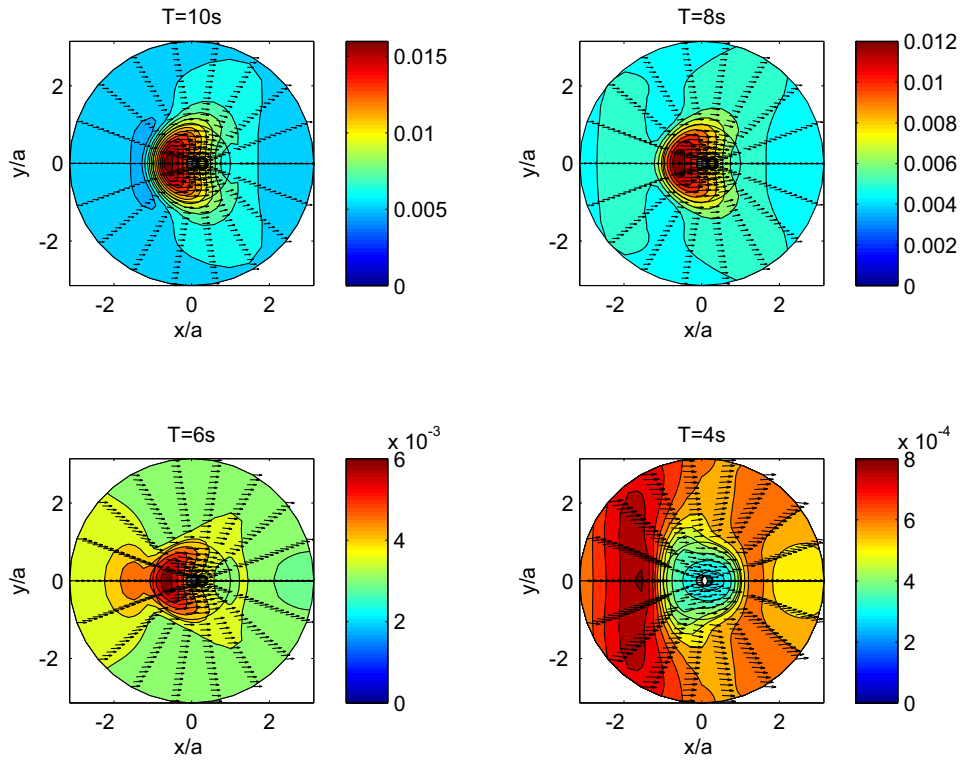


Figura 8.13: Deriva de Stokes adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=1$.

Influencia de la sumergencia

Del mismo modo que la corriente euleriana, los mayores valores se alcanzan dentro de la cámara aunque al disminuir el valor de d , disminuye el valor alcanzado y el rango de valores entre los que se encuentra. Las direcciones son paralelas a la dirección de propagación, tanto en el interior como en el exterior del sistema.

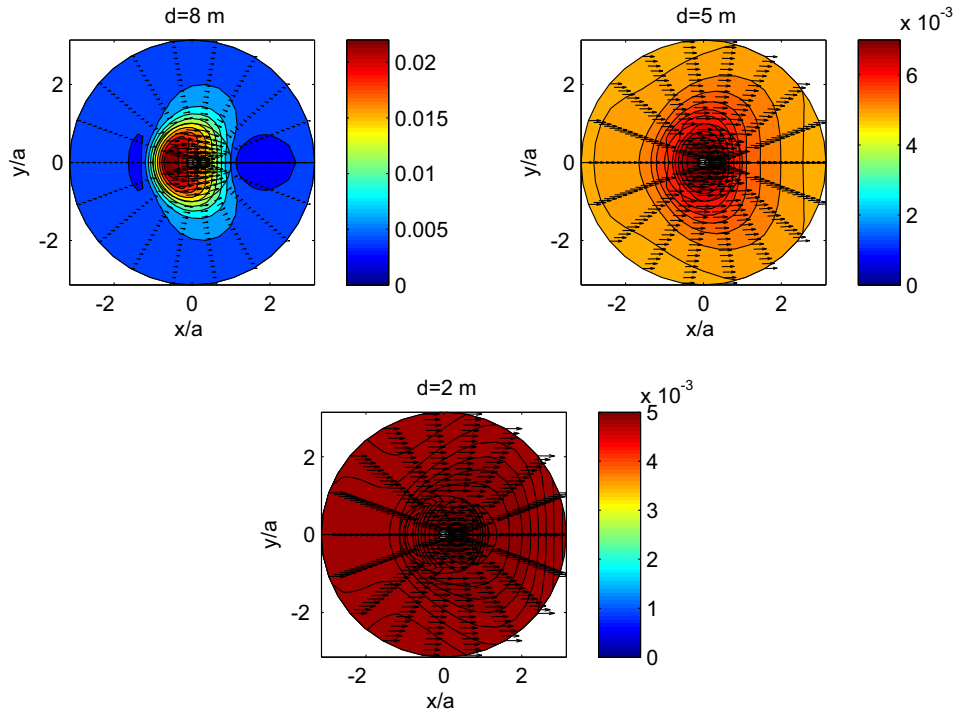


Figura 8.14: Deriva de Stokes adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$

Influencia del periodo y velocidad de giro óptimos

En este caso, los valores máximos alcanzados considerando un periodo y una velocidad de giro óptimos, son mayores respecto la corriente euleriana y aparecen en el interior del sistema, del mismo modo que para $T=6.0$ s considerando distintos N . Sin embargo, se sigue manteniendo que las direcciones predominantes convergen hacia el sistema.

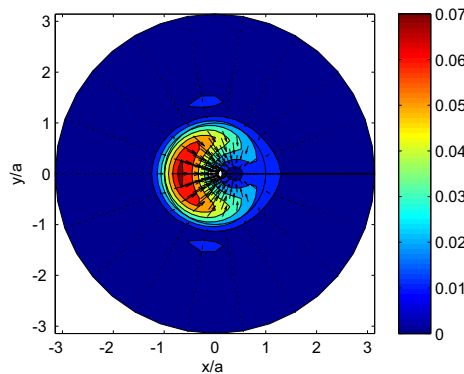


Figura 8.15: Deriva de Stokes adimensionalizada. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $T=6.5$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$

8.2.4 Transporte de masa

Del análisis de la corriente euleriana y la deriva de Stokes, se concluye que para los distintos casos estudiados, ambas corrientes presentan el mismo grado de influencia en el transporte de masa, puesto que se ha obtenido el mismo rango de valores para ambas corrientes y el problema se resuelve aplicando la teoría lineal.

Esto conlleva a que en el estudio del transporte de masa, se analice únicamente el efecto de la difracción y de la radiación asociado al OWC.

Influencia del periodo del oleaje

La Fig. 8.16 representa el módulo y dirección de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado $|\vec{U}_L|_{adim} = \frac{1}{H_0} \sqrt{\frac{a}{g}} \sqrt{u_L^2 + v_L^2}$, alrededor de un sistema OWC con geometría óptima anual, para distintos valores del periodo del oleaje y $\xi=1$.

Al igual que ocurre en la corriente euleriana y la deriva de Stokes, el mayor valor se alcanza en el interior del sistema para $T=8.0$ s, puesto que los valores de sumergencia y velocidad de giro representados corresponden con los óptimos para dicho periodo (ver Figs. 6.9b-6.10b). Al disminuir T (aumentar a/L), los máximos alcanzados se van desplazando hacia el exterior del sistema, obteniéndose para el caso de $T=6.0$ s el valor máximo en el exterior, al igual que la corriente euleriana. El desplazamiento de los valores máximos alcanzados se explica por la influencia que tiene la elección del valor de ξ sobre los mismos (ver Fig. 8.3).

Los resultados obtenidos presentan el mismo orden de magnitud excepto para $T=4.0$ s que presenta unos resultados de un orden de magnitud menor. En todos los casos la dirección predominante es paralela al tren de ondas propagante, salvo en el interior del sistema para $T=6.0$ s en la que la dirección es convergente hacia el centro del sistema.

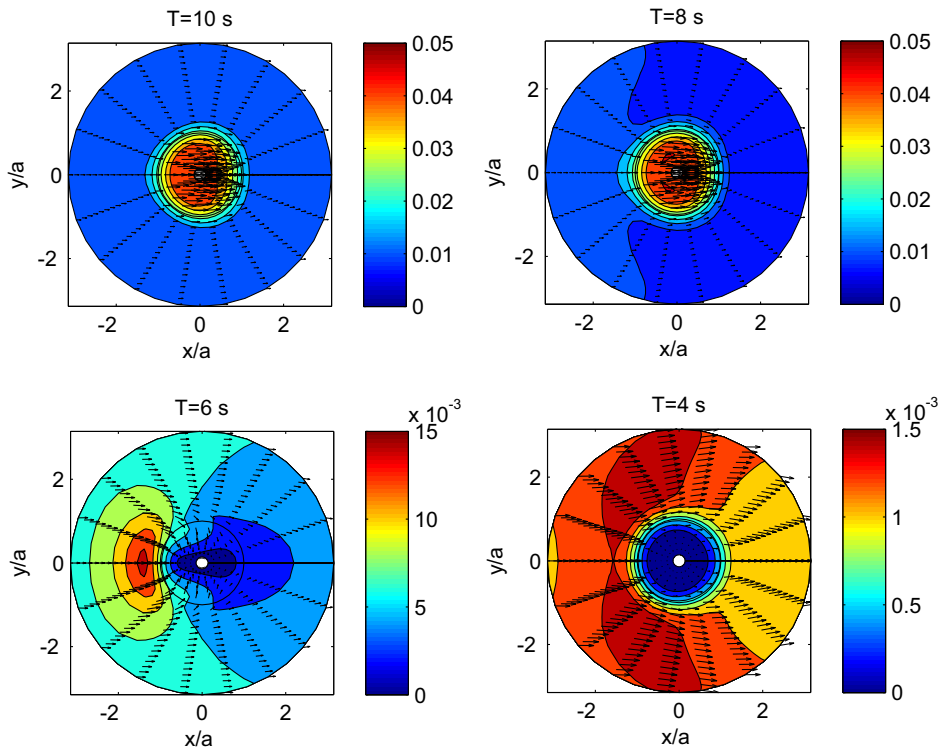


Figura 8.16: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$.

Los resultados correspondientes a la difracción (Fig. 8.17), tienen simetría respecto el eje x como era de esperar. Los mayores valores se alcanzan en el interior del sistema para $T=8.0$ s y se van desplazando hacia el exterior al disminuir T . Sus valores son del mismo orden

de magnitud que los obtenidos considerando el problema total, aunque son ligeramente superiores para $T=6.0$ s. La dirección predominante es paralela a la dirección de propagación, excepto en el interior del sistema para $T=6.0$ s en la que la dirección tiene sentido opuesto, al igual que ocurre para la corriente euleriana (ver Fig. 8.8)

El problema de la radiación (Fig. 8.18) presenta unos resultados con simetría radial, alcanzándose el máximo valor dentro del sistema en todos los periodos. Las direcciones predominantes convergen hacia $x/a=y/a=0$ en el interior del sistema y divergen en el exterior. En este caso, los periodos $T=8.0-6.0$ s son los que proporciona unos mayores valores, aunque son de un orden de magnitud inferior respecto el problema total, mientras que para $T=4.0$ s los resultados son prácticamente cero.

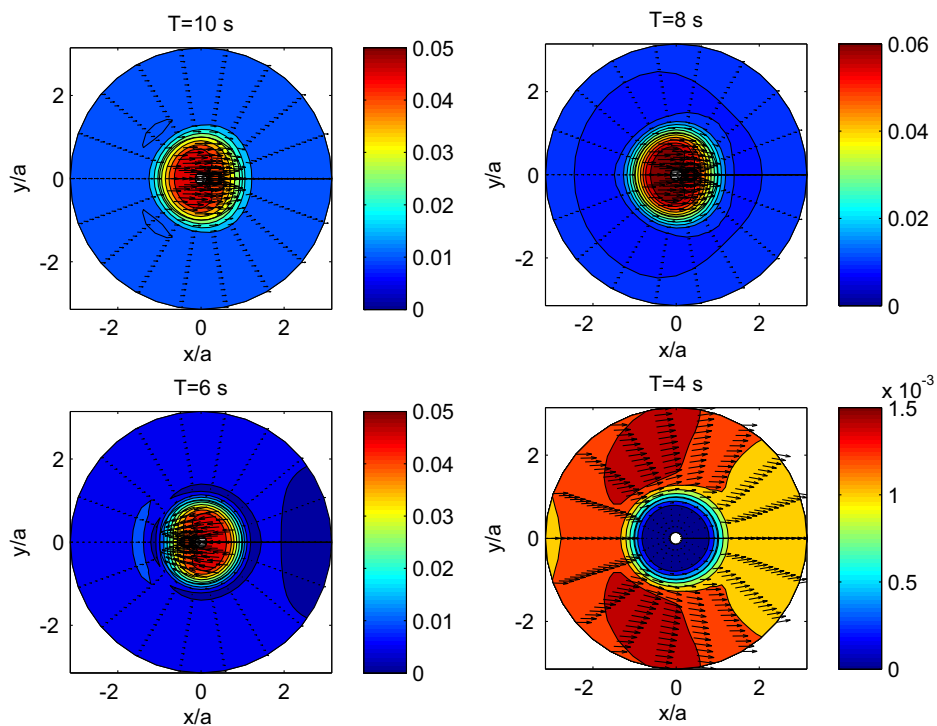


Figura 8.17: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la difracción. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $\xi=1$

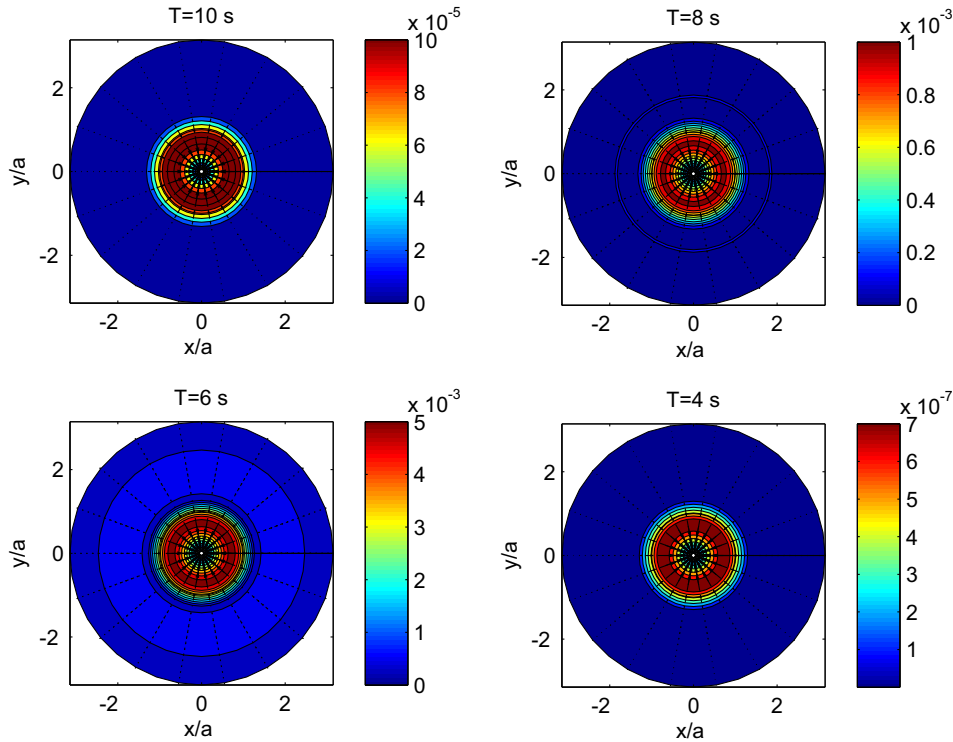


Figura 8.18: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la radiación. $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$

Influencia de la velocidad de giro

El siguiente análisis se realiza sobre la velocidad de giro de la turbina N . Para ello se compara la sumergencia óptima anual ($d=8.0$ m) con una velocidad de giro distinta a la óptima anual ($N=1000.0$ rpm), para distintos periodos.

Con $N=1000.0$ rpm, las máximas velocidades (Fig. 8.19) son menores respecto las obtenidas para N_{opt} (Fig. 8.16), salvo para $T=4.0$ s en la que son ligeramente superiores. En cambio, las mínimas velocidades obtenidas son mayores respecto las obtenidas para N_{opt} , lo que origina una reducción del rango de valores entre los que se encuentran los resultados. Las máximas velocidades de la radiación (Fig. 8.20) son mayores respecto las obtenidas para N_{opt} , salvo para $T=8.0$ s en la que son prácticamente iguales.

Las direcciones predominantes se mantienen iguales que en el caso anterior, aunque para el problema con $T=6.0$ s la dirección predominante en el interior del sistema es paralela a la dirección de propagación, al igual que ocurre en la corriente euleriana y deriva de Stokes. En este caso no se ha representado los resultados asociados a la difracción, porque son independientes de la velocidad de giro y por tanto iguales que en el apartado anterior.

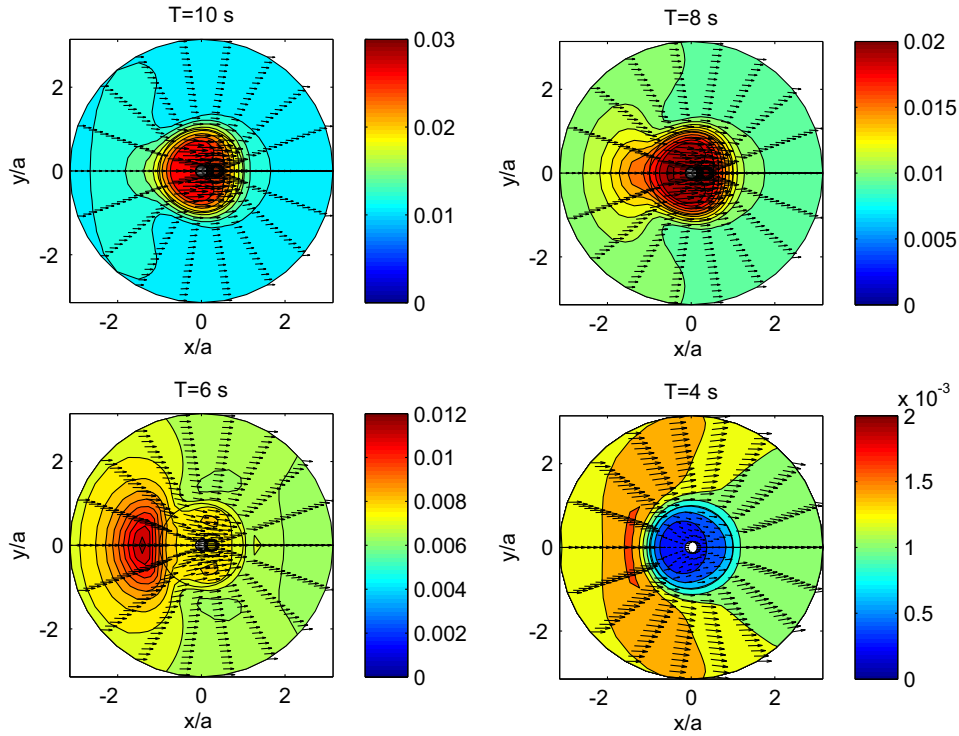


Figura 8.19: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5\text{ m}$, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0\text{ m}$, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0\text{ rpm}$, $\xi=1$

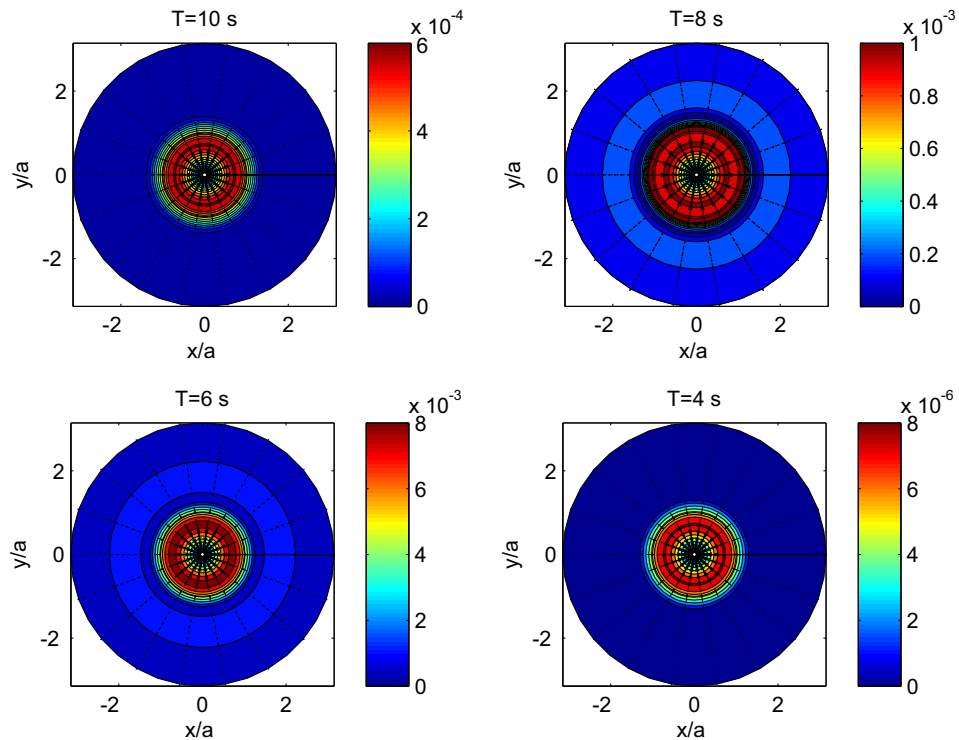


Figura 8.20: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la radiación. $h=10.0\text{ m}$, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0\text{ rpm}$, $\xi=1$

De estos dos análisis se concluye que para las características geométricas del OWC estudiadas, la influencia de la difracción en el resultado final es mayor que la influencia de la radiación.

Influencia la sumergencia

En las siguientes figuras, se representan las velocidades del transporte de masa (Fig. 8.21) y las correspondientes a la difracción (Fig. 8.22) y radiación (Fig. 8.23), para un periodo $T=8.0$ s y distintas sumergencias $d= 2.0-5.0-8.0$ m.

En este caso, los mayores valores de la velocidad del transporte de masa se alcanzan dentro de la cámara aunque al disminuir el valor de d , disminuye el valor alcanzado y el rango de valores entre los que se encuentra.

Los resultados correspondientes a la difracción son prácticamente iguales al problema total, mientras que los correspondientes a la radiación para $d=5.0-2.0$ m son cuatro órdenes de magnitud inferiores respecto el resultado final, por lo que se pueden despreciar. Por tanto, al disminuir d manteniendo constantes el resto de parámetros, la influencia de la radiación es prácticamente nula.

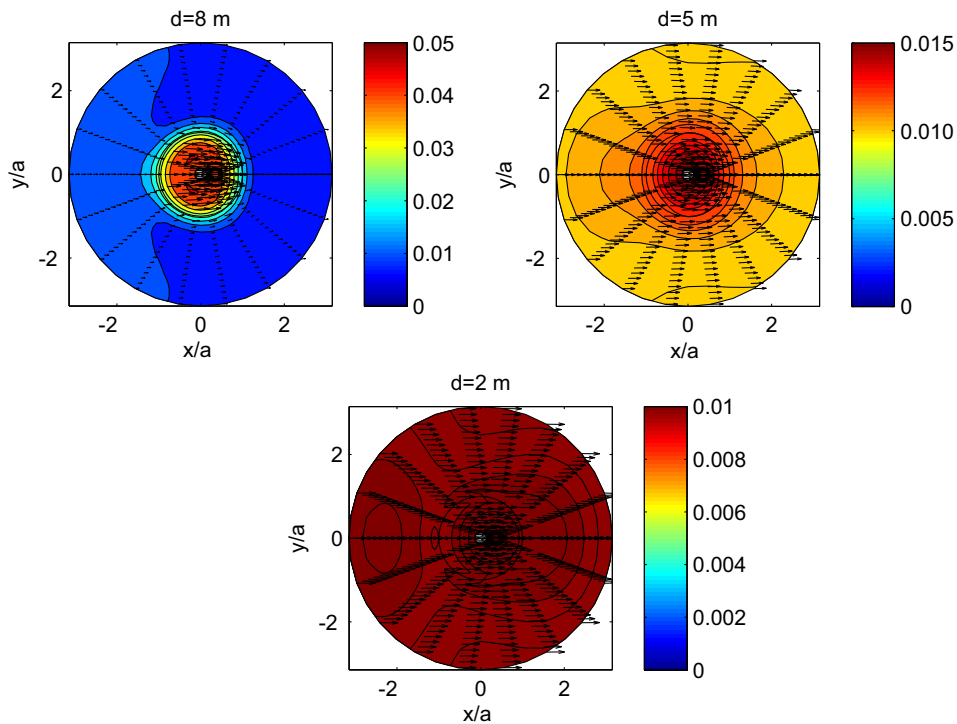


Figura 8.21: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$

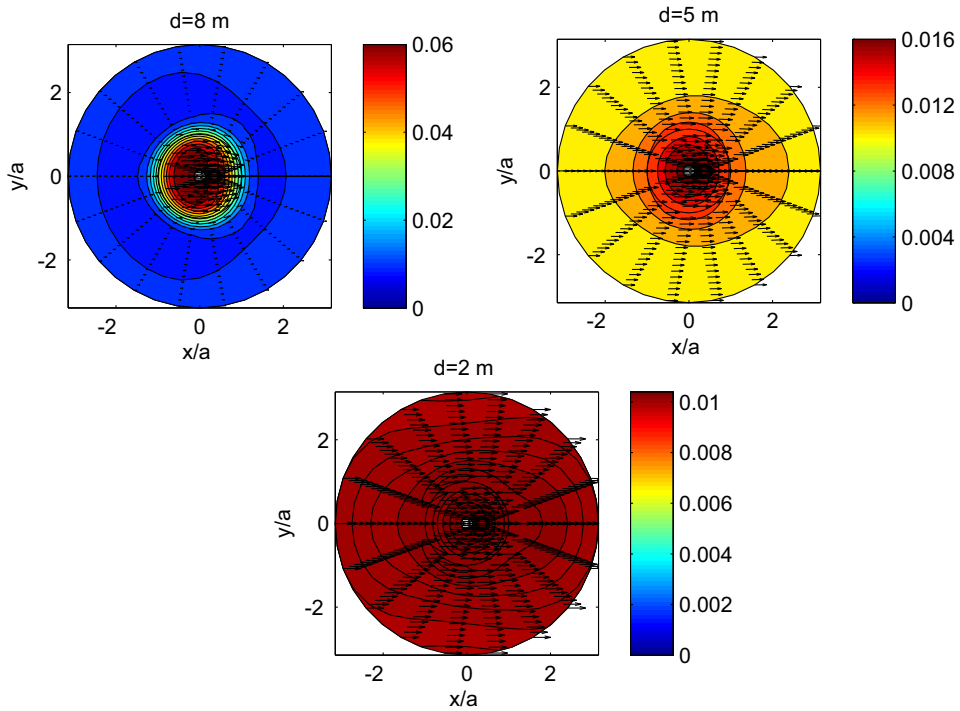


Figura 8.22: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la difracción. $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $\xi=1$

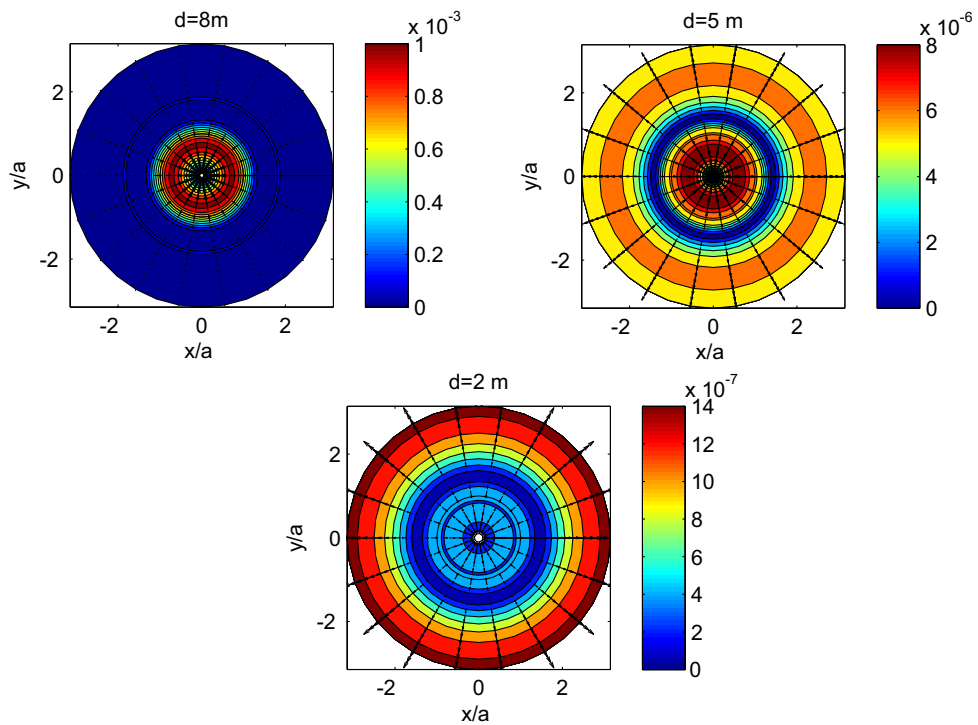


Figura 8.23: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, asociado al problema de la radiación. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=1$

Influencia del periodo y velocidad de giro de la turbina óptimos

En la figura siguiente se representa las velocidades del transporte de masa adimensionalizadas.

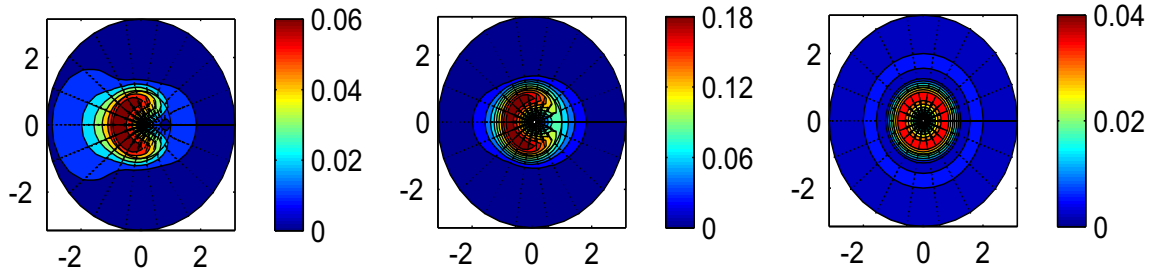


Figura 8.24: Velocidad del transporte de masa adimensionalizada (izda.), asociado a la difracción (centro) y a la radiación (drcha.) adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=6.5$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$

Las máximas velocidades se dan dentro del sistema del mismo modo que la deriva de Stokes, puesto que sus velocidades obtenidas son mayores que las correspondientes a la corriente euleriana y por tanto tiene una mayor influencia en el transporte de masa.

Los valores alcanzados son del mismo orden de magnitud respecto a la geometría óptima anual para $T=8.0$ s (ver Fig. 8.16). Sin embargo, a diferencia de los casos anteriormente analizados, los valores máximos para el problema de la difracción y de la radiación son de un orden de magnitud mayor, y los valores correspondientes al problema de la radiación tienen el mismo orden de magnitud que el problema total. Además, se observa una única dirección predominante que es convergente hacia el centro del sistema aproximadamente.

Por tanto se concluye, que la radiación tiene una mayor influencia puesto que en el problema total se mantiene la forma proporcionada por la difracción aunque con los valores alcanzados por la radiación aproximadamente.

8.2.5 Transporte de sedimentos

El cálculo del transporte de sedimentos se ha realizado a partir de la formulación de Bailard [56] descrita en el apartado 5.2.2 y considerando únicamente el transporte por fondo. Se han considerado los coeficientes $\rho=1027$ kg/m³, $\rho_s = 2650$ kg/m³, $e_b=0.1$, $\gamma=33^\circ$, y el factor de fricción f_w se ha calculado siguiendo la formulación de Nielsen [69] para régimen turbulento, considerando $d_{50}=0.42$ mm [55].

Para la velocidad cerca del fondo se ha considerado la proporcionada por las Ecs. 5.1a-b. En estas expresiones, aparece el parámetro ξ y para su elección, se ha representado los perfiles de la velocidad adimensionalizada dentro de la capa límite para distintos valores de x/a .

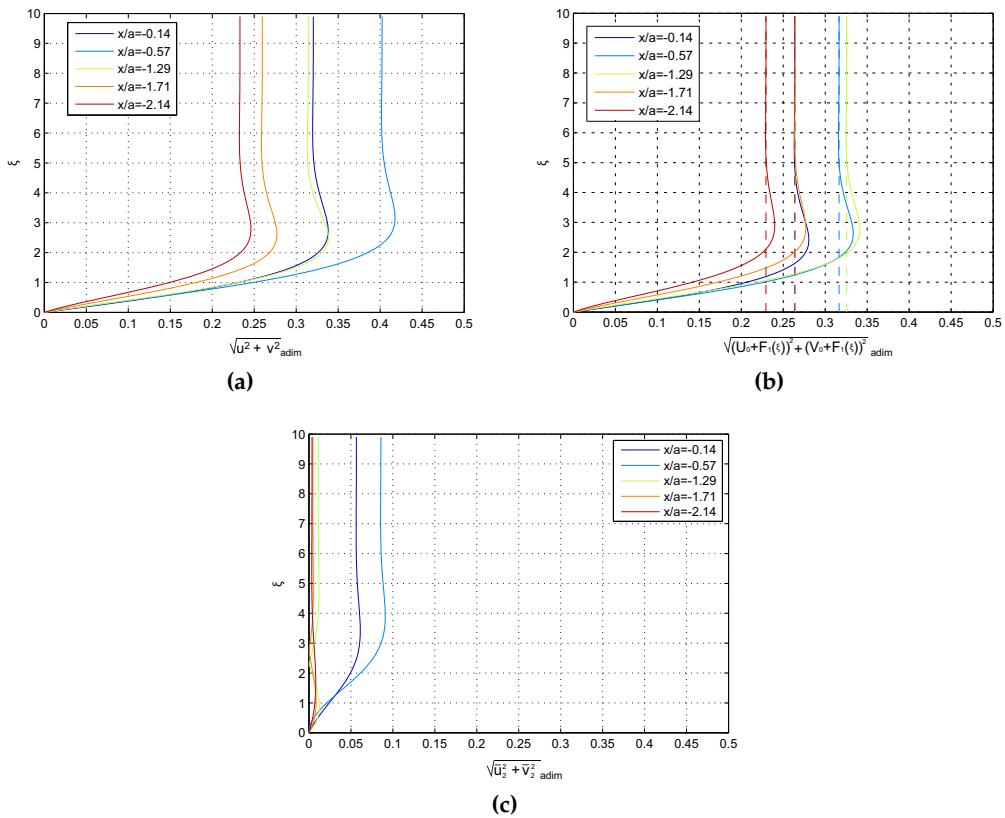


Figura 8.25: Perfiles de velocidad adimensionalizada dentro de la capa límite, para el OWC: (a) velocidad total; (b) velocidad oscilatoria; (c) corriente euleriana. $A_0=0.5$ m, $T=10.0$ s, $d=8.0$ m, $N=300.0$ rpm, $\theta=0^\circ$, $y/a=0$

La Fig. 8.25a representa distintos perfiles de la velocidad dentro de la capa límite y las Figs. 8.25b-8.25c representan las componentes oscilatorias y de corriente euleriana. En la Fig. 8.25b las líneas discontinuas corresponden a la velocidad oscilatoria fuera de la capa límite, que coincide con la componente oscilatoria de la velocidad de la capa límite, cuando $\xi \gg 1$. La condición que debe cumplir la corriente euleriana es que su valor debe ser constante cuando $\xi \rightarrow \infty$, lo cual se satisface (Fig. 8.25c). Por tanto, puesto que para $\xi \gg 1$ la velocidad oscilatoria dentro de la capa límite coincide con la oscilatoria fuera de la capa límite (velocidad orbital) y que cuando $\xi \rightarrow \infty$ la corriente euleriana es constante, se selecciona $\xi=10$ para todos los casos estudiados.

A continuación se presentan todos los resultados obtenidos del transporte de sedimentos adimensionalizados respecto $\frac{1}{H_0^2} \sqrt{\frac{a}{g}}$ y su divergencia respecto $\frac{1}{H_0} \sqrt{\frac{a}{g}}$. En este estudio no se analiza la influencia de la difracción y de la radiación, puesto que del análisis anterior se ha observado que en la mayoría de los casos el efecto de la radiación es despreciable.

Influencia del periodo

En primer lugar se analiza la influencia del periodo, estudiando los mismos casos que en la sección 8.2. La Fig. 8.26, representa el módulo del transporte neto adimensionalizado y su dirección para distintos periodos. Los mayores valores se encuentran en el interior del sistema y se observan dos direcciones predominantes, convergentes en el interior del

sistema y divergentes en el exterior. Al disminuir el periodo disminuyen los resultados, siendo prácticamente despreciable el caso de $T=4.0$ s.

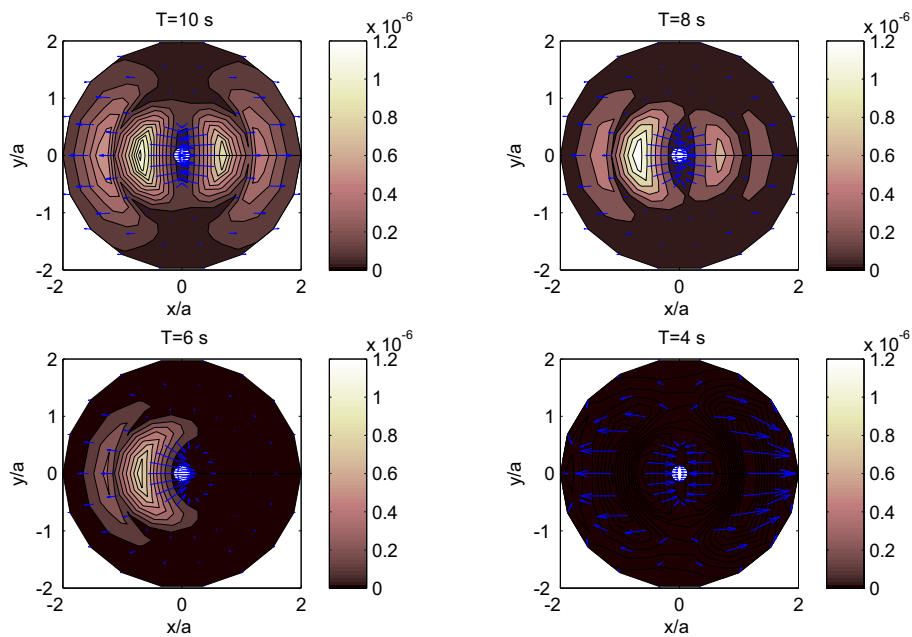


Figura 8.26: Transporte neto de sedimento adimensionalizado. $H_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=10$

En la Fig. 8.27 se representa la divergencia del transporte neto adimensionalizado. En ella se aprecia que para todos los periodos analizados, la tendencia del sedimento es a acumularse en la parte anterior y posterior del sistema. Dentro del sistema, se produce erosión en la zona próxima al sistema y depósito en su parte central. Los mayores valores de depósito corresponden para $T=10.0$ s mientras que los de erosión se producen en $T=8.0$ s.

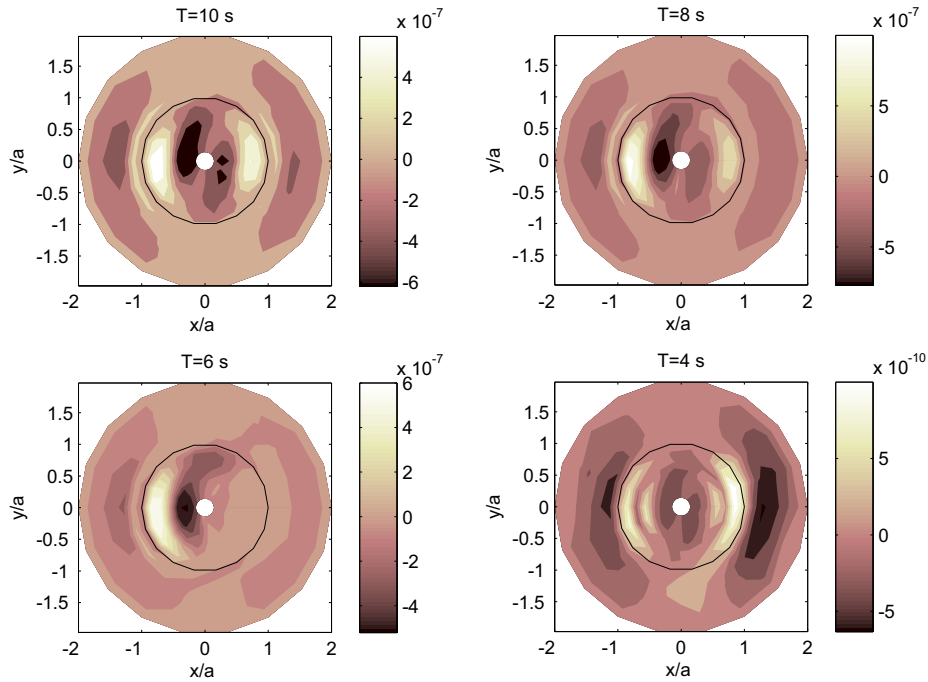


Figura 8.27: Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=10$

Influencia de la velocidad de giro

A continuación se analiza el transporte de sedimentos para $N=1000$ rpm, manteniendo el resto de parámetros iguales que en el apartado anterior. En este caso no se aprecia una diferencia significativa respecto una velocidad de giro inferior, puesto que el transporte neto de sedimentos adimensionalizado (Fig. 8.28) y su divergencia (Fig. 8.29), presentan prácticamente la misma forma y valores que en el caso anterior.

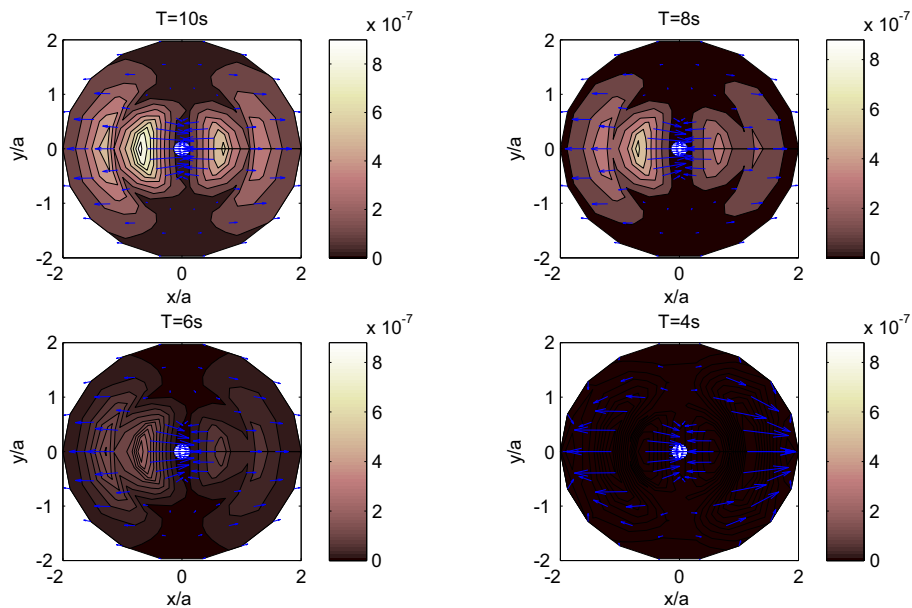


Figura 8.28: Transporte neto de sedimento adimensionalizado. $H_0=1.0$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=10$

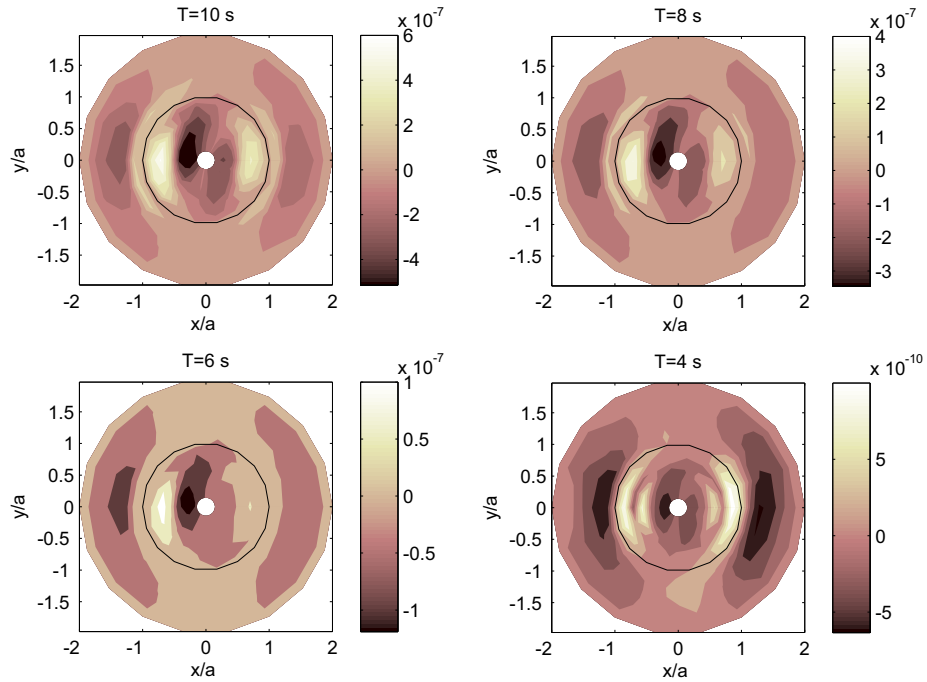


Figura 8.29: Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=1000.0$ rpm, $\xi=10$

Influencia de la sumergencia

El siguiente parámetro que se analiza es la sumergencia y se observa que cuando disminuye d , disminuye el módulo del transporte neto de sedimento y su dirección predominante es divergente tanto en el interior como en el exterior (Fig. 8.30), es decir, predomina el problema de la radiación respecto la difracción. El resultado de la divergencia (Fig. 8.31) muestra un aumento de las zonas de erosión respecto las de depósito al disminuir d .

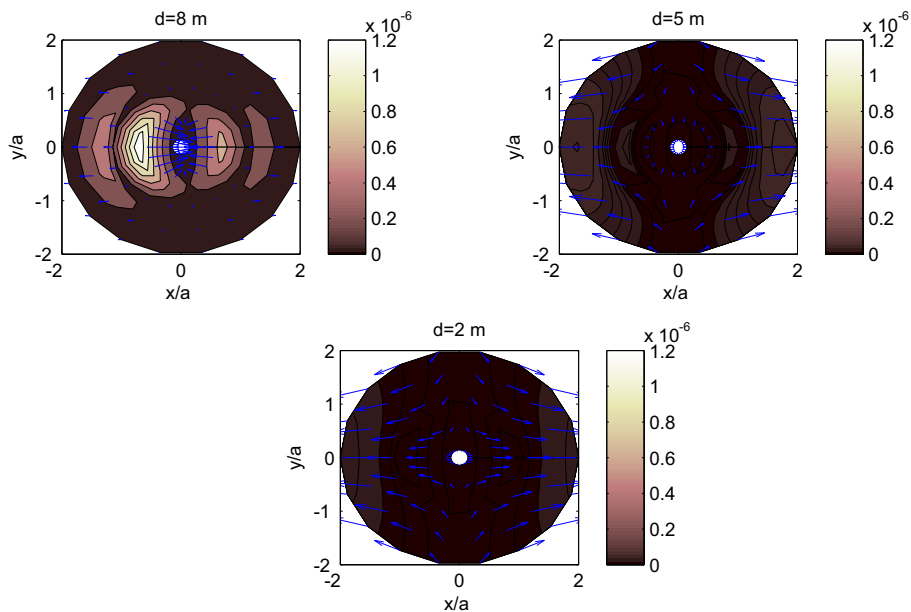


Figura 8.30: Transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=10$

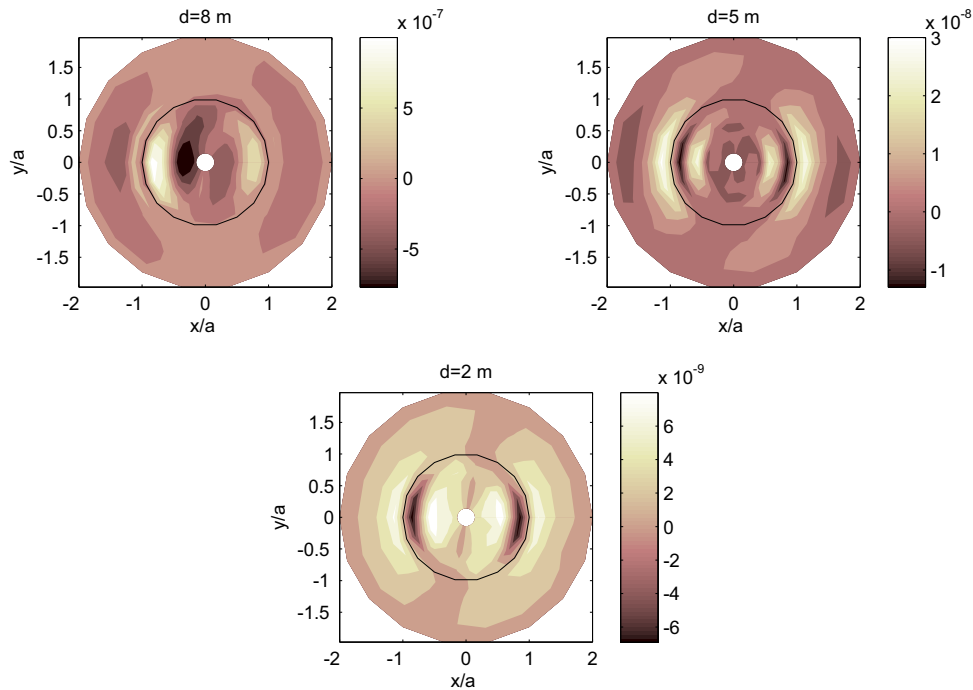


Figura 8.31: Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=8.0$ s, $\theta = 0^\circ$, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $d/h=0.8$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=300.0$ rpm, $\xi=10$

Influencia del periodo y velocidad de giro de la turbina óptimos

El transporte de masa adimensionalizado y su divergencia (Figs. 8.32a-8.32b), para el caso óptimo asociado a un tren de ondas monocromático, muestra unos resultados dos órdenes de magnitud superiores al caso óptimo anual. Los máximos valores siguen apareciendo en el interior del sistema, con direcciones convergentes en el interior del sistema y divergentes en el exterior. En el exterior y en el centro del sistema predomina el depósito. Dentro del sistema, predomina la erosión en las zonas próximas al radio ($x/a \approx 1$).

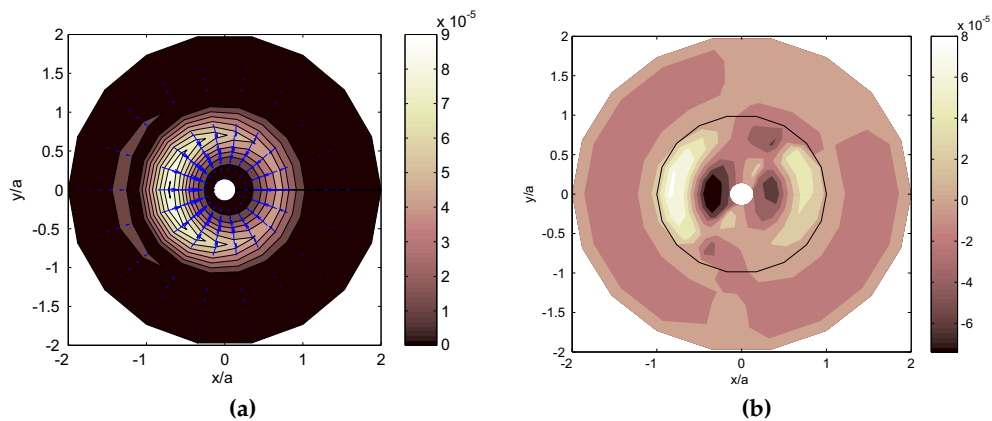


Figura 8.32: (a) Transporte neto de sedimento adimensionalizado (b) Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=6.5$ s, $h=10.0$ m, $a/h=0.35$, $D/h=0.1$, $e/h=0.5$, $N=53.0$ rpm, $\xi=1$

8.3 Sistema OWC con la cámara abierta

8.3.1 Perfiles de velocidad del transporte de masa

Influencia del ángulo de incidencia del oleaje

A continuación, se analiza la influencia del ángulo de incidencia del oleaje en la velocidad del transporte de masa. El análisis se realiza sobre el sistema OWC con la cámara abierta, puesto que para el sistema OWC con sección circular, el ángulo de incidencia del oleaje no influye en el módulo de la velocidad.

En la sección 7.1.3 se observó que para un tren de ondas de periodo $T=7.0$ s incidiendo sobre un sistema con una anchura relativa $B/L=0.55$, una sumergencia relativa $d/h=0.9$ y ubicado a una profundidad $h=10.0$ m, se producía resonancia. Por tanto, se supone esa misma geometría y un tren de ondas incidente de amplitud $A_0=0.5$ m, periodo $T=7.0$ s y distintos ángulos de incidencia $\theta = 0^\circ - 30^\circ - 60^\circ$. En la figura siguiente se representan los perfiles de la velocidad del transporte de masa para $y/B=0$ (Fig. 8.33).

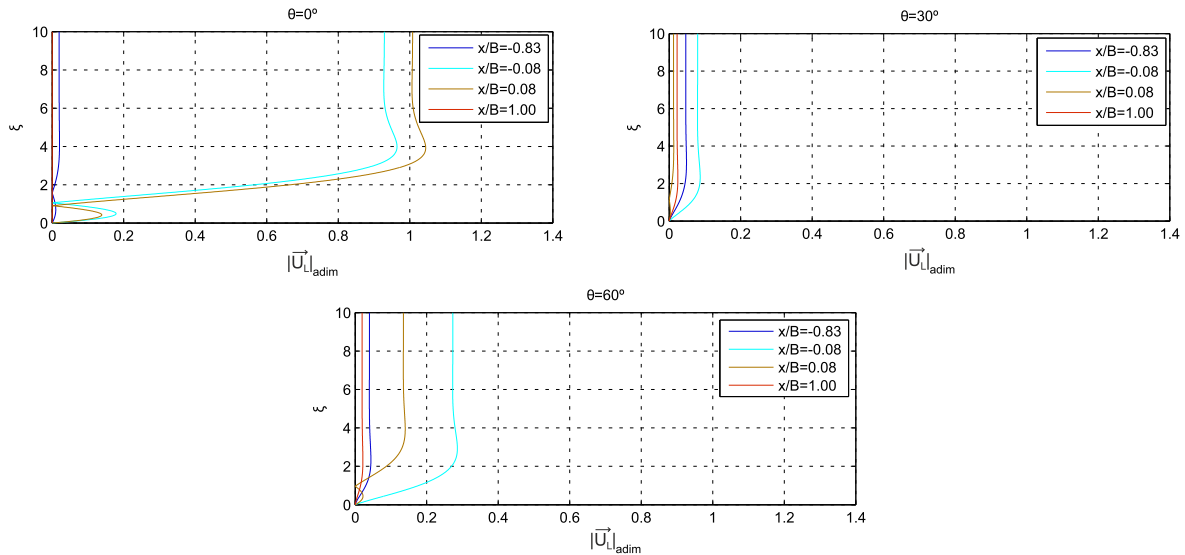


Figura 8.33: Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=1$, $y/B=0$

Del mismo modo que en los análisis para el OWC con sección circular, los perfiles muestran que para algunos valores de x/B y ξ se tiene que $|\vec{U}_L|_{adim}=0$.

Los mayores valores se alcanzan en el entorno de la placa de la región exterior ($x/B < 0$) para $\theta = 30^\circ - 60^\circ$ mientras que para $\theta = 0^\circ$ depende del valor de ξ . En el muro ($x/B = 1$) la velocidad es nula para $\theta = 0^\circ$ mientras que para $\theta = 30^\circ - 60^\circ$ es distinta de cero y paralela al muro, cumpliéndose la condición de contorno de no flujo a través del muro vertical ($u=0$). Para $\theta = 0^\circ$ se alcanza la máxima velocidad que puede deberse a la resonancia que se produce sin pérdida de carga (Fig. 7.14) que conlleva a un aumento del coeficiente de captura respecto los otros ángulos de incidencia del oleaje (Fig. 7.15).

Influencia de la pérdida de carga

La influencia de la pérdida de carga se analiza para el mismo caso que en el apartado anterior. De los perfiles se observa que la pérdida de carga supone una reducción del valor máximo alcanzado en $x/B = 0.08$ del 97.6%- 24.8%-84.4% para $\theta = 0^\circ - 30^\circ - 60^\circ$ respectivamente. Al alejarnos de la placa, la reducción de los valores máximos disminuye, obteniéndose una reducción en $x/B = -0.83$ del 66.1%-12.7%-55% para $\theta = 0^\circ - 30^\circ - 60^\circ$ respectivamente. En ambos puntos, la máxima reducción aparece en $\theta = 0^\circ$ seguida de $\theta = 60^\circ$, del mismo modo que la reducción que experimentan los coeficientes de reflexión (ver Fig. 7.16a)

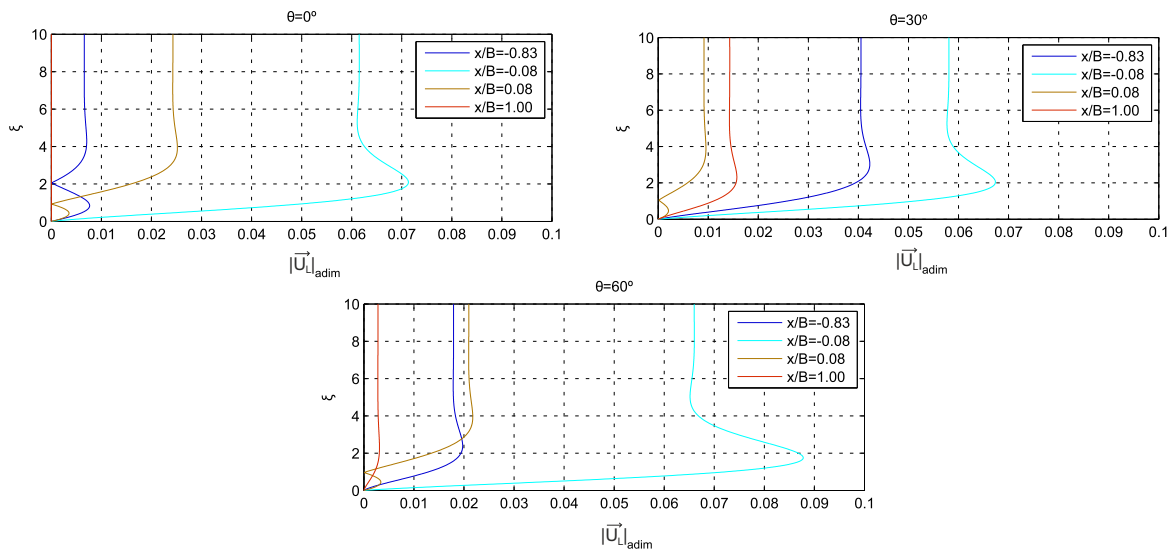


Figura 8.34: Perfil del módulo de la velocidad del transporte de masa adimensionalizado, con pérdida de carga. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $y/B=0$

8.3.2 Transporte de masa

Influencia del ángulo de incidencia del oleaje

La figura siguiente representa la velocidad del transporte de masa y su dirección para $\xi=1.0$ (Fig. 8.35).

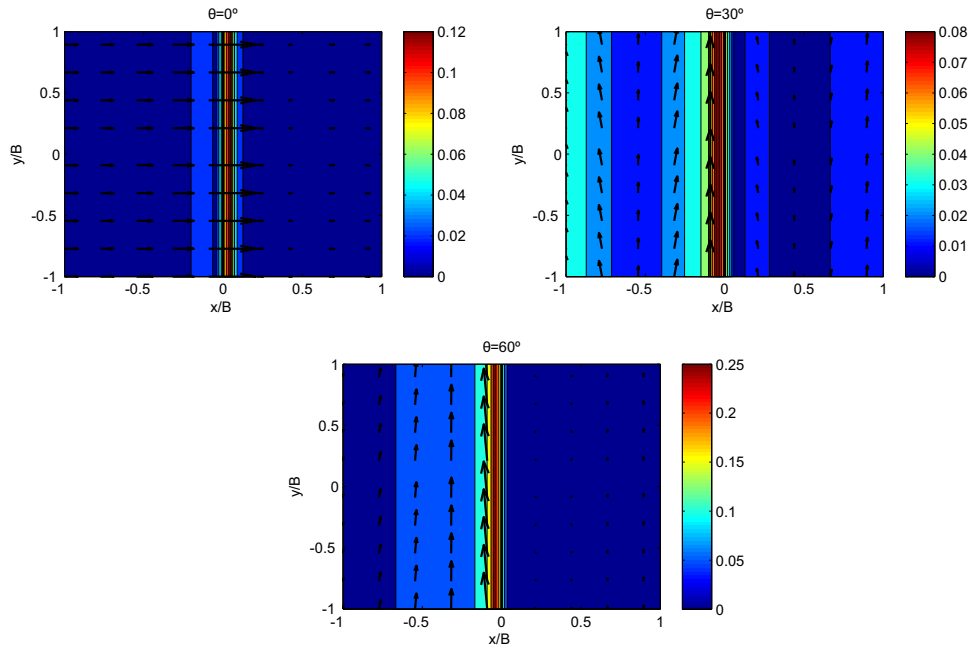


Figura 8.35: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=1$

Los mayores valores se alcanzan para $\theta=60^\circ$, en el entorno de la placa. Las direcciones predominantes son paralelas a la dirección de propagación para $\theta = 0^\circ$, mientras que para $\theta = 30^\circ - 60^\circ$ se vuelven paralelas a la placa

Influencia de la pérdida de carga

Al analizar la pérdida de carga los resultados obtenidos son menores respecto a los alcanzados sin pérdida de carga, excepto para $\theta = 30^\circ$ en el que son prácticamente iguales.

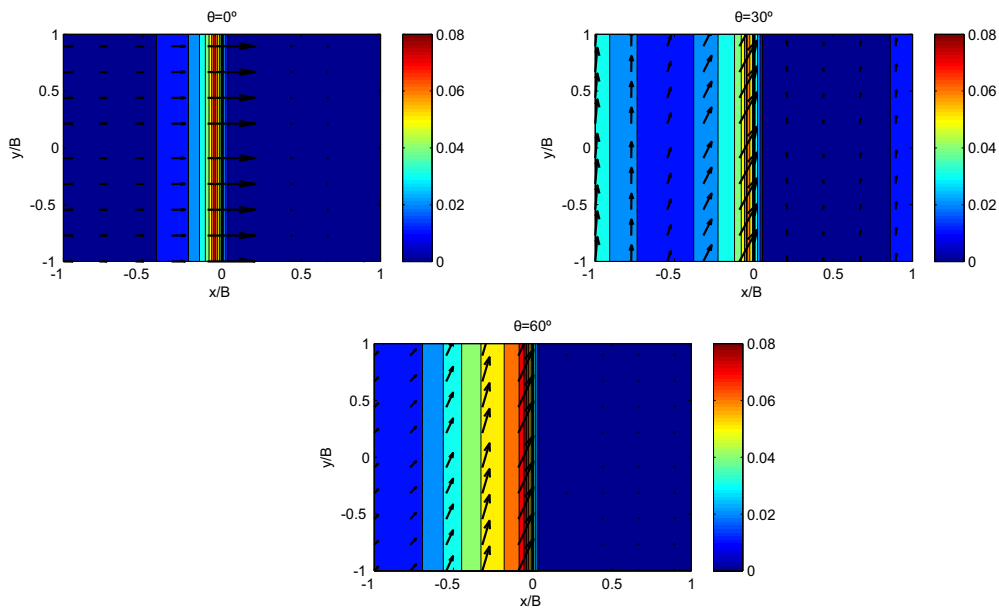


Figura 8.36: Velocidad del transporte de masa adimensionalizado, con pérdida de carga. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=1$

Para intentar explicar la relación entre el ángulo de incidencia del oleaje y el efecto de la pérdida de carga, se representa el promedio espacial de la amplitud de la velocidad horizontal considerando el primer modo propagante $|\overline{U}(x=0, z)|$ en función del ángulo de incidencia, para los problemas con y sin pérdida de carga (Fig. 8.37). Esta amplitud se calcula según la Ec. (4.26) y debido a que la pérdida de carga es proporcional a esta amplitud (Ec. 4.22) y a que cuanto mayor es el coeficiente C_e mayor es la diferencia entre los resultados con y sin pérdida (Figs. 7.5-7.7), se concluye que a mayor $|\overline{U}(x=0, z)|$ sin pérdida de carga mayor será la reducción del resultado al considerar la pérdida de carga para un mismo sistema.

Esto se verifica en la Fig. 8.37, observándose que para $\theta = 0^\circ - 60^\circ$ las diferencias de velocidades sin y con pérdida de carga son mucho mayores que para $\theta = 30^\circ$ en la que prácticamente coinciden ambas velocidades. Esto explicaría la razón por la cuál al considerar la pérdida de carga se han obtenido los mismos valores que sin pérdida de carga para el caso de $\theta = 30^\circ$.

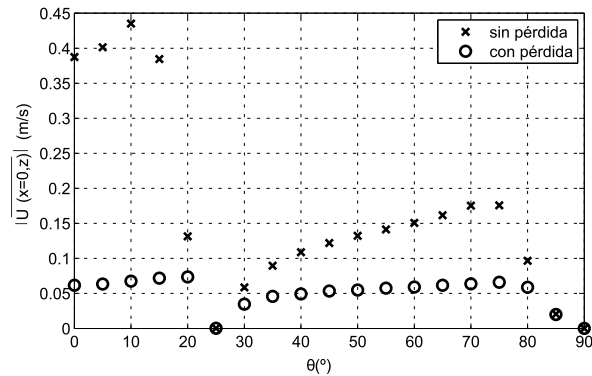


Figura 8.37: Amplitud de la velocidad media horizontal obtenida sin pérdida de carga (x) y con pérdida de carga (o), considerando el primer modo propagante. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$

8.3.3 Transporte de sedimentos

Influencia del ángulo de incidencia del oleaje

A continuación se representa el transporte neto adimensionalizado (Fig. 8.38) y su divergencia (Fig. 8.39).

Los mayores resultados para el transporte neto como para su divergencia se obtienen con $\theta = 0^\circ$. Esto era esperable puesto que para $\xi=10$ la corriente lagrangiana correspondiente es mucho mayor respecto el resto de ángulos (Fig. 8.33) y por tanto la corriente euleriana también será mayor.

La divergencia pone de manifiesto la formación de barras de sedimentos paralelas al sistema, independientemente del ángulo de incidencia del oleaje. En todos los casos aparece una zona de erosión en el entorno de la placa ($x/B \approx 0$). En la parte del muro ($x/B=1$), para $\theta = 0^\circ$ se produce depósito, mientras que para $\theta = 30^\circ - 60^\circ$ aparece erosión. Esto se debe a que para $\theta = 0^\circ$ la velocidad es nula mientras que para $\theta = 30^\circ - 60^\circ$ aparece una velocidad paralela al muro.

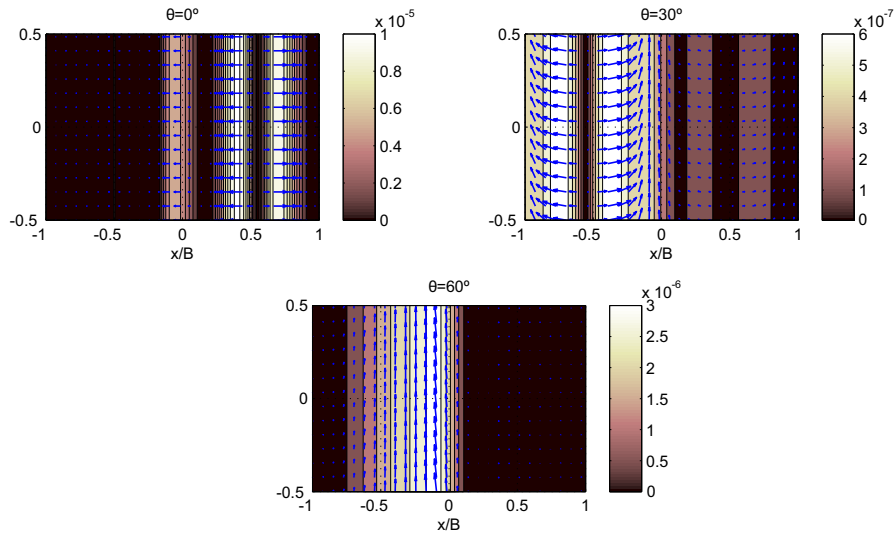


Figura 8.38: Transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi = 10$

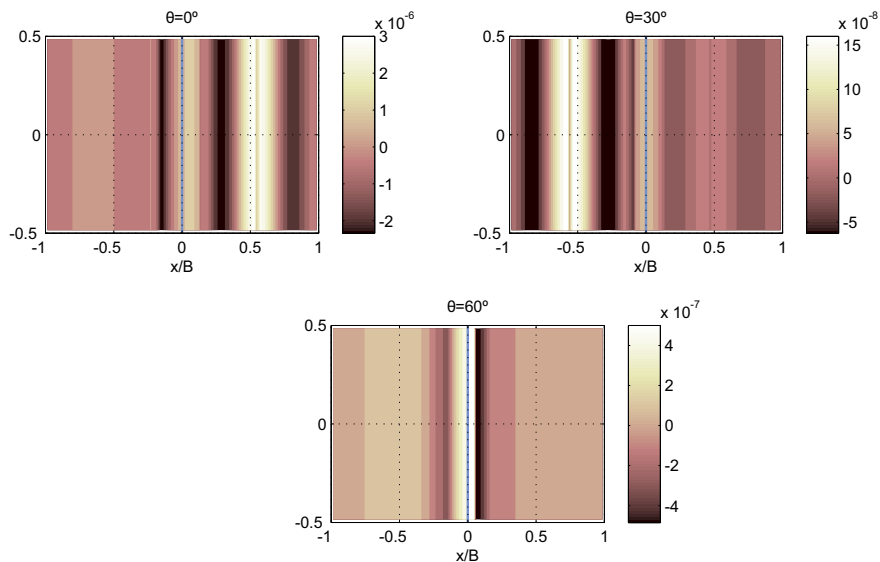


Figura 8.39: Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi = 10$

Influencia de la pérdida de carga

La consideración de la pérdida de carga afecta en mayor medida a los resultados correspondientes a $\theta = 0^\circ - 60^\circ$ del mismo modo que ocurre en el transporte de masa (ver 8.3.2). La divergencia muestra que alrededor de la placa se produce depósito, mientras que en la parte del muro se conserva el depósito para $\theta = 0^\circ$ y la erosión para $\theta = 0^\circ - 60^\circ$.

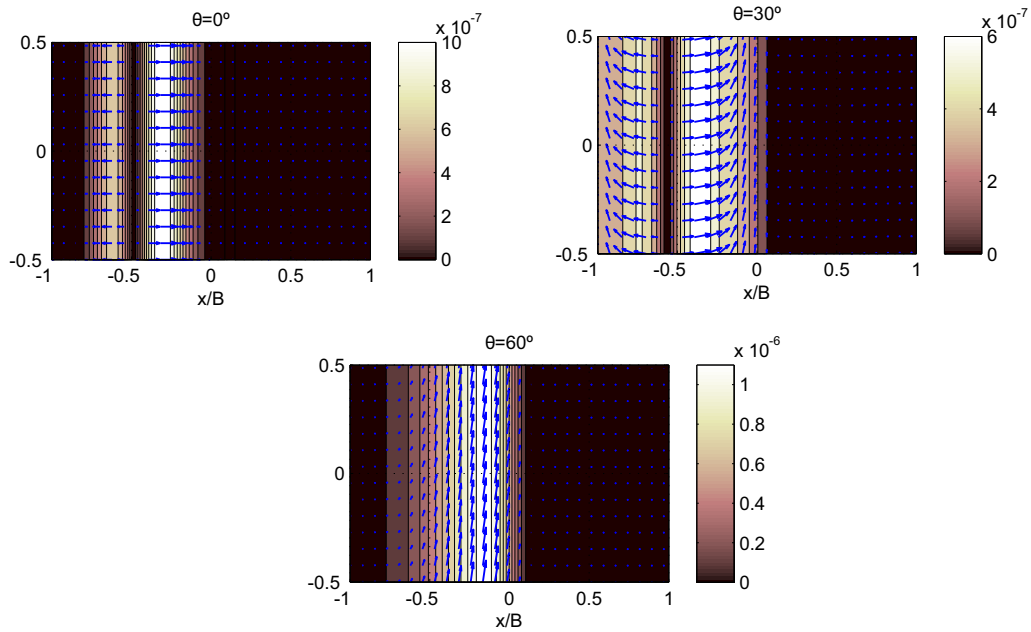


Figura 8.40: Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=10$

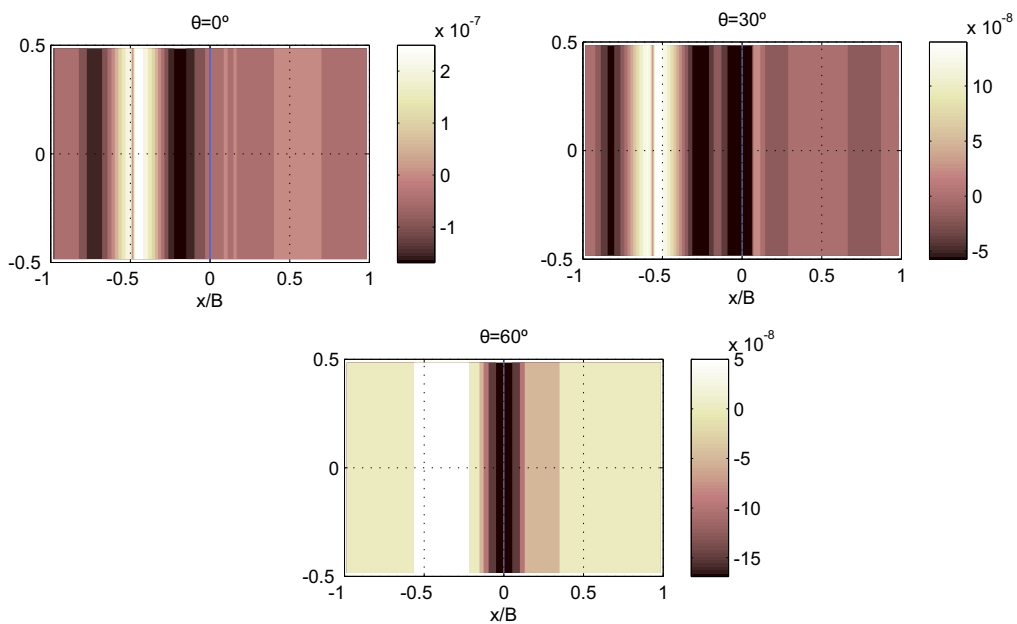


Figura 8.41: Divergencia del transporte neto de sedimento adimensionalizado. $A_0=0.5$ m, $T=7.0$ s, $h=10.0$ m, $B/L=0.55$, $d/h=0.9$, $\xi=10$, $y/B=0$

8.4 Conclusiones

En este capítulo se ha estudiado la velocidad del transporte de masa y el transporte neto de sedimentos, alrededor de dos sistemas OWC distintos (Figs. 3.1-4.1). Para ambos sistemas se desarrollan las expresiones correspondientes a la velocidad del transporte de masa y al transporte neto de sedimentos, las cuales incorporan los efectos de la difracción y de la

radiación para el sistema OWC de sección circular y los efectos de la pérdida de carga para el sistema OWC con la cámara abierta.

La verificación del desarrollo matemático se realiza comparando la solución del transporte de masa proporcionada por Lamoure y Mei [52] para un cilindro vertical de radio pequeño, con la obtenida a partir de la función potencial para un cilindro vertical proporcionada por MacCamy y Fuchs [68]. La coincidencia de ambos resultados permiten validar la metodología empleada.

Los parámetros fundamentales que intervienen en el proceso se pueden clasificar en parámetros del oleaje como altura, periodo y dirección, y parámetros del sistema como sumergencia, velocidad de giro o anchura de la cámara. De entre todos ellos, se analiza la influencia del periodo y del ángulo de incidencia del oleaje, de la sumergencia, anchura y velocidad de giro del sistema y el efecto de la pérdida de carga. Otro parámetro importante a considerar es el efecto de la anchura del sistema, aunque en este estudio no se ha tenido en cuenta puesto que en el Capítulo 6 se obtuvieron mayores valores de potencia neumática media para sistemas con una anchura mayor.

El análisis de la influencia del periodo, se realiza para la geometría óptima anual que proporciona una mayor potencia neumática (ver Tabla.6.2). De los resultados se aprecia que las mayores velocidades del transporte de masa se alcanzan en el interior del sistema para periodos mayores y que se van desplazando hacia el exterior al disminuir T (aumentar ka). Al observar los perfiles de velocidad se aprecia el mismo comportamiento, excepto para $T=6$ s en el que los valores alcanzados dependen de ξ , siendo mayores fuera del sistema para $\xi < 1.0$ aproximadamente. Lamoure y Mei [52] encontraron que para un cilindro vertical el punto en el que $|\vec{U}_L|=0$ aparece en $\xi=2$, lo cual se aproxima con el obtenido fuera del sistema OWC ($\xi=2.5$). Esta pequeña diferencia puede deberse a la radiación asociada al OWC y a que la difracción es menor respecto el cilindro vertical. En el interior del sistema OWC se ha encontrado que $|\vec{U}_L|=0$ aparece en $\xi=1.0$. Para los cuatro periodos analizados, los correspondientes a $T=10-8$ s presentan perfiles exteriores con $|\vec{U}_L|=0$, los correspondientes a $T=4$ s presentan perfiles interiores con $|\vec{U}_L|=0$, mientras que para $T=6$ s aparece tanto en los perfiles interiores como en los exteriores. Respecto a los problemas de radiación y difracción, en la geometría analizada presenta una mayor influencia la difracción respecto la radiación, siendo esta casi despreciable para el menor periodo.

Si se aumenta la velocidad de giro de la turbina, se obtienen por lo general menores velocidades máximas y mayores velocidades mínimas respecto la geometría óptima anual. Esto origina una reducción del rango de valores entre los que se encuentran los resultados.

Del análisis de la sumergencia se aprecia que los mayores resultados del transporte de masa se obtienen para la mayor d y que la influencia de la radiación para $d=2$ m es prácticamente nula. Además, al disminuir d , los perfiles para los distintos valores de x/a son prácticamente iguales desapareciendo los valores de $|\vec{U}_L|=0$, tanto en el exterior como en el interior.

La influencia de la optimización asociada a un tren de ondas monocromático pone de manifiesto que la influencia de la radiación es mayor que la difracción en el transporte de masa. En este caso, en todos los perfiles representados se tiene un punto ξ en el que $|\vec{U}_L|=0$.

Del análisis de la corriente euleriana y la deriva de Stokes se observa que tienen la misma influencia en el transporte de masa, para los casos analizados.

El ángulo de incidencia del oleaje y el efecto de la pérdida de carga se analiza para el sistema OWC con la cámara abierta. El ángulo de incidencia determina la región en la que aparecen los máximos de la velocidad del transporte de masa y hace que exista una velocidad paralela al muro o no, lo que implica un posible transporte paralelo al muro o una acumulación de sedimentos. Los mayores valores se obtienen para $\theta=0^\circ$, ya que se corresponde con el caso resonante (ver Fig. 7.14). Los perfiles, al igual que para el caso OWC con sección circular, presentan valores de $|\vec{U}_L|=0$ tanto en la parte anterior al sistema ($\xi=1$) como dentro de la cámara ($\xi \approx 2$). Al considerar la pérdida de carga se produce una reducción de los mayores valores para $\theta = 0^\circ - 60^\circ$, manteniéndose prácticamente igual para $\theta = 30^\circ$. Esto se debe a la velocidad horizontal en $x = 0$ que lleva asociada cada ángulo de incidencia del oleaje.

Respecto al transporte neto de sedimentos, todos los casos analizados para el OWC con sección circular ponen de manifiesto posibles zonas de acumulación del sedimento en toda la sección representada, siendo mayor alrededor del sistema. Los mayores valores se alcanzan para el sistema con geometría óptima proporcionada por Hervé y Mei [16].

Del mismo modo, el transporte neto de sedimentos alrededor del sistema OWC con la cámara abierta, para distintos ángulos de incidencia del oleaje, muestra una acumulación de sedimento alrededor de la placa, distinguiéndose además otras posibles zonas de erosión y depósito a lo largo de los valores de x/B representados para $\theta = 0^\circ - 30^\circ$. La consideración de la pérdida de carga afecta en mayor medida a los resultados correspondientes a $\theta = 0^\circ - 60^\circ$ del mismo modo que ocurre en el transporte de masa, llegando incluso a no diferenciarse las posibles zonas de erosión/depósito.

Parte V

**CONCLUSIONES Y FUTURAS
LÍNEAS DE TRABAJO**

9

Conclusiones y Futuras líneas de trabajo

Del trabajo de investigación desarrollado en esta tesis doctoral, realizado según los objetivos de investigación propuestos en el Capítulo 2, se derivan las siguientes conclusiones y futuras líneas de trabajo:

• **Objetivo de Investigación 1:** *Investigar la importancia de la variabilidad de la escala temporal de la dinámica marina (oleaje) en los resultados de la optimización de sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje.*

La metodología propuesta para el diseño y gestión de sistemas de energía óptimos teniendo en cuenta el carácter estocástico del oleaje y su aplicación a un escenario real, pone de manifiesto la importancia de la variabilidad del clima marítimo a distintas escalas temporales.

De las dos variables de diseño (la sumergencia y la velocidad de giro de la turbina) consideradas en esta tesis, los resultados demuestran que en un estado de mar, los valores para los cuales se obtiene un rendimiento óptimo dependen muy débilmente de la altura de ola significativa H_s , si bien la potencia óptima aumenta con H_s . Para valores de H_s fijos, el aprovechamiento óptimo se obtiene en torno a un determinado valor del periodo de pico relacionado con el periodo propio resonante de la cámara. Estos resultados demuestran la importancia de tener en cuenta los periodos que predominan en la zona de estudio para la elección del sistema de extracción de energía, concretamente en sistemas de columna de agua oscilante (OWC).

El análisis del rendimiento óptimo estocástico, el cual considera la variabilidad estacional y anual, y su comparación con los resultados obtenidos para un dispositivo que

podiera adaptar sus características al estado de mar, demuestran que este último proporciona el mejor rendimiento medido tanto en relación con la potencia desarrollada como con el número de eventos y su duración en los cuales la potencia supera un determinado umbral. Este hallazgo abre una prometedora línea de investigación para mejorar la competitividad de los sistemas OWC que vale la pena explorar con mayor profundidad.

En el ejemplo de aplicación se ha tomado como función objetivo del problema de optimización la potencia neumática disponible para la turbina. Esta metodología, sin embargo, puede aplicarse a cualquier otra función objetivo relacionada con el rendimiento del sistema OWC que dependa del clima marítimo. En este sentido, el coste-beneficio del sistema OWC es una función objetivo relevante para optimizar en trabajos futuros. En este estudio podría tener sentido considerar otras variables de optimización.

Cabe señalar que aunque se estudió un dispositivo OWC aislado, el método usado en este estudio abre la posibilidad de extenderlo en un futuro a un campo de sistemas OWC. Para ello, sería necesario resolver el problema hidrodinámico de la interacción entre sistemas, teniendo en cuenta su disposición y la direccionalidad del oleaje.

• **Objetivo de Investigación 2:** *Analizar la influencia de las características del oleaje y la pérdida de carga localizada en la funcionalidad de sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje.*

El modelado analítico de un sistema lineal con la cámara oscilante (LOC) mediante una placa vertical delgada semisumergida y separada una cierta distancia de un muro vertical y su comparación con los resultados obtenidos con modelos numéricos (Fluent, Fluinco), ha demostrado reproducir de manera notable la pérdida de carga producida y el fenómeno de resonancia dentro de la cámara.

Para el caso sin pérdida de carga, bajo las características geométricas en las que el coeficiente de captura es mayor que uno, aparece la mayor fuerza por unidad de ancho ejercida por un tren de ondas incidiendo en la placa, siendo mayor que la fuerza máxima aplicada sobre un muro vertical. En cambio, en el problema con pérdida de carga, las mayores fuerzas aparecen para la placa completamente sumergida ($d/h = 1$), como era de esperar.

En la aplicación a oleaje irregular, bajo la hipótesis de equivalencia, se tiene que la distribución de las fuerzas máximas por unidad de ancho en un estado de mar sigue una distribución Weibull, debido a la no linealidad que aportan los modos evanescentes y la consideración de la fuerza producida por la columna de agua por encima del nivel medio. La no consideración de esto, supone una reducción del valor máximo de la fuerza en el estado de mar de hasta el 34% en los casos analizados.

Puesto que el análisis se ha realizado considerando un sistema con la cámara abierta para simplificar el problema hidrodinámico, una futura línea de trabajo es la consideración del sistema LOC junto con el efecto de la turbina.

• **Objetivo de Investigación 3:** *Analizar la formación de formas de lecho en el entorno de las infraestructuras concebidas para albergar los sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje.*

El cálculo del transporte de masa y el transporte de sedimentos realizados en esta tesis para los diferentes sistemas considerados, con el fin de estudiar el desarrollo de formas de lecho, muestran que el mayor transporte de masa y en consecuencia el mayor transporte de sedimentos se tiene para los dispositivos óptimos. En ese caso, la optimización funcional del sistema podría no ser la más conveniente para la estabilidad del lecho. Por otro lado, la consideración de la pérdida de carga produce una reducción de los mayores valores del transporte de masa y del transporte de sedimentos, afectando en mayor medida a los casos que presentan un mayor valor de la de velocidad horizontal a través del sistema.

Respecto a la formación de las barras de sedimentos, todos los casos analizados para el OWC con sección circular ponen de manifiesto posibles zonas de acumulación y depósito del sedimento en toda la sección representada, siendo mayor para el sistema con geometría óptima. Para el sistema LOC, también aparecen posibles zonas de acumulación y depósito, formándose barras de sedimentos paralelas al sistema independientemente del ángulo de incidencia del oleaje.

Este estudio abre varias líneas de investigación que no han sido adecuadamente valoradas. Solo por mencionar un ejemplo, la evaluación de los efectos sobre los ecosistemas asociados a las modificaciones que se generan en las formas del lecho debido al emplazamiento de estructuras de aprovechamiento de la energía undimotriz podría constituir una relevante línea de investigación.

10

Conclusions and Future Works

Based on the research work developed in this thesis, and according to the research objectives outlined in Chapter 2, the following concluding remarks and future lines of research can be highlighted:

• **Research objective 1:** *Investigate the importance of the timescales variability of marine dynamics (waves) on the results of the optimization of wave energy converters.*

The methodology proposed for the design and management of optimal energy systems, taking into account the random nature of the wave climate and its application to a real scenario, highlights the importance of the variability of the wave climate at different time scales.

Regarding the optimization variables (the submergence and the rotational speed of the turbine) considered in this work, the results show that for a given sea state, both variables weakly depend on the significant wave height H_s , though the maximum power increases with H_s . For fixed H_s values, the device performance shows optimal results around a certain peak period related to the resonant period of the chamber. These results highlight the importance of taking into account the periods that predominate in the study area for the selection of the energy systems, particularly in oscillating water column systems (OWC).

The optimal stochastic performance analysis, which takes into account seasonal and annual variability, and its comparison with the results obtained for a device that could adapt its characteristics to the sea state, show that the latter provides the best performance in both the developed power as in the number of events and its duration in which the power exceeds a certain threshold. This conclusion opens a promising line of research to improve the competitiveness of OWC systems that is well worth exploring in greater depth.

In the applied example, the available pneumatic power for the turbine was chosen as the objective function. This methodology, however, can be applied to any other objective function related to the OWC performance that depends on wave climate. In this sense, the cost-benefit of the OWC is a objective function candidate to consider in future works. In addition, a natural further improve would be to consider other suitable optimization variables of the OWC system.

It should be noted that even though an isolated device OWC was studied, the method used in this study opens the possibility of extending it in the future to a field of OWC systems. To this end, it would be necessary to solve the hydrodynamic problem of the interaction between systems taking into account their arrangement and the wave direction.

• **Research Objective 2:** *Analyze the importance of the incident wave characteristics and localized head loss on the functionality of wave energy converters.*

The analytical modelling of a linear structure with oscillating chamber (LOC), by a thin semi-submerged vertical plate and separated a given distance from a vertical wall, and its comparison with the results obtained with numerical models (Fluent, Fluinco), has proven to be remarkably good to reproduce the head loss and the resonance phenomenon within the chamber.

For the case without head loss, under the geometric characteristics for which the capture coefficient is greater than one, the greatest force per unit width exercised by a wave train resulted greater than the force applied on a vertical wall. In contrast, considering the problem with head loss, higher forces appeared for a fully submerged plate ($d=h=1$), as expected.

In the application of irregular waves, assuming the equivalence hypothesis, it is observed that the distribution of the maximum forces per unit width in a sea state has a Weibull distribution, due to the nonlinearity provided by the evanescent modes and the consideration of the force produced by the water column above the average level. If this is neglected, the maximum value of force can be reduced up to 34% for the analyzed cases.

Since the analysis was performed considering a system with an open chamber in order to simplify the hydrodynamic problem, a future line of work is the consideration of the system together with the effect of the turbine.

• **Research Objective 3:** *Analyze the formation of bed forms around the infrastructure designed to house wave energy converters.*

The calculation of the mass transport and the sediment transport developed in this thesis for the different systems, in order to study the sediment transport patterns, shows the highest mass transport and consequently the highest sediment transport for the optimal devices. In that case, the functional optimization of the system might not be the most convenient for the stability of the bed. On the other hand, the consideration of the head loss causes a reduction in the higher values of the mass transport and the sediment transport, affecting in a more significant way to those cases that present higher values of horizontal speed through the system.

Regarding the sediment transport patterns, all the analyzed cases for the OWC with circular section highlighted possible areas of accumulation and deposit of sediment throughout the represented section, being higher for the system whose geometry is optimal. For the LCO system, there are also possible accumulation and storage areas. In this case, the sediment bars are parallel to the system regardless of the incidence wave angle.

This research opens several inspiring lines of research that have not been adequately valued in the past. Just to mention a likely example, the evaluation of effects over the ecosystem associated with the sediment transport patterns that are generated in the location of the wave energy converters could be considered as a relevant future research.

A

Modelo analítico OWC

Este apéndice proporciona las expresiones utilizadas para el modelo analítico del sistema OWC en el Capítulo 3.

Se supone un tren de ondas monocromático de amplitud A_0 y frecuencia angular ω , propagándose desde el infinito por una profundidad constante h , que se encuentra con un sistema OWC de radio a , sumergido una profundidad d y con una emergencia e :

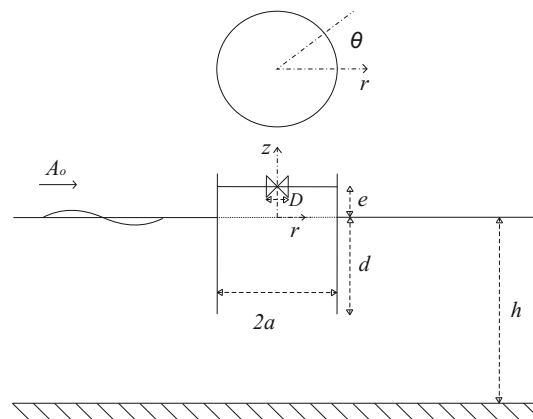


Figura A.1: Diagrama del sistema OWC

El tren incidente se difracta e induce en el aire de la cámara una presión oscilatoria, $p(t) = \Re\{\hat{P}e^{-i\omega t}\}$ sobre la presión atmosférica exterior. Esta presión oscilatoria de aire, a su vez, irradia ondas a través del hueco existente entre el sistema OWC y el fondo, que deben cumplir la condición de radiación en el infinito.

Admitiendo las hipótesis iniciales de fondo horizontal e impermeable, flujo irrotacional y fluido incompresible y no viscoso, el problema puede formularse en términos de la función potencial, que debe satisfacer la ecuación de Laplace en el fluido, la condición de contorno cinemática en las fronteras, y la condición de contorno mixta (cinemática y dinámica) en la superficie libre.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{para } h < z < 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = -h \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi = \begin{cases} \frac{i\omega}{\rho_w g} \hat{P} & \text{para } z = 0, r < a, 0 < \theta < 2\pi \\ 0 & \text{para } z = 0, r > a, 0 < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

donde (r, θ) son las coordenadas polares, z es el eje vertical ubicado en el nivel de mar en reposo y positivo hacia arriba, a es el radio del sistema, g es la aceleración de la gravedad, ω es la frecuencia angular, ρ_w es la densidad del agua, h es la profundidad del fondo horizontal y ϕ y \hat{P} son las amplitudes complejas de la función potencial y de la presión, definidas como:

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta, z, t) &= \Re\{\phi(r, \theta, z)e^{-i\omega t}\} \\ p(t) &= \Re\{\hat{P}e^{-i\omega t}\} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Siguiendo el método de Evans [24], la solución de la función potencial se descompone en dos partes,

$$\phi = \phi_{dif} + \phi_{rad} \quad (\text{A.5})$$

donde ϕ_{dif} es la solución del problema de la difracción de un tren de ondas monocromático que se propaga desde el infinito por una profundidad constante h , con la presión atmosférica dentro de la cámara del sistema OWC y ϕ_{rad} corresponde a la solución del problema de la radiación en el que el mar está en reposo y la oscilación se genera debido a una presión oscilatoria de aire distinta de la atmosférica $p(t)$, en el interior de la cámara.

A.1 Problema de la Difracción

En el problema de la difracción (Figura 34), la oscilación dentro de la cámara se genera debido a la incidencia de un tren de ondas monocromático de amplitud A_o y frecuencia angular ω , sobre el OWC.

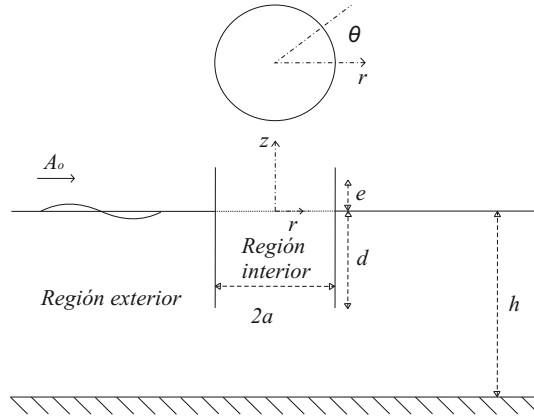


Figura A.2: Esquema del problema de la difracción

La solución a este problema se obtiene considerando por separado las regiones exterior e interior al cilindro e imponiendo condiciones de acuerdo en las superficies adyacentes. En ambas regiones la función potencial debe satisfacer la ecuación de Laplace con las condiciones de flujo nulo en el fondo así como la condición de contorno linealizada en la superficie libre:

$$\frac{\partial^2 \phi_{dif}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_{dif}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi_{dif}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi_{dif}}{\partial z^2} = 0 \quad \text{para } h < z < 0 \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial \phi_{dif}}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = -h \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial \phi_{dif}}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_{dif} = \begin{cases} 0 & \text{para } z = 0, r < a, 0 < \theta < 2\pi \\ 0 & \text{para } z = 0, r > a, 0 < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Las soluciones a estos problemas se obtienen por separación de variables y a continuación se les exige que satisfagan las siguientes condiciones de acuerdo cinemáticas y dinámicas:

$$\frac{\partial \phi_{dif,ext}}{\partial r} = \frac{\partial \phi_{dif,int}}{\partial r} = 0 \quad \text{para } r = a, 0 < \theta < 2\pi, -d < z < 0 \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{\partial \phi_{dif,ext}}{\partial r} = \frac{\partial \phi_{dif,int}}{\partial r} = U(z, \theta) \quad \text{para } r = a, 0 < \theta < 2\pi, -h < z < -d \quad (\text{A.10})$$

$$\phi_{dif,ext} = \phi_{dif,int} \quad \text{para } r = a, 0 < \theta < 2\pi, -h < z < -d \quad (\text{A.11})$$

donde

$$U(z, \theta) = \frac{-igA_0}{\sigma} \sum_{m=0}^{N_m} \cos(m\theta) \sum_{p=0}^{N_p} \alpha_{mp} u_p(z) \quad (\text{A.12})$$

$$u_p(z) = \frac{2(-1)^p}{\pi \sqrt{(h-d)^2 - (z+d)^2}} T_{2p} \left(\frac{z+h}{h-d} \right)$$

siendo T_p los polinomios de Chebychev de orden p .

El problema se resuelve a partir de las expresiones propuestas para las funciones potenciales por Garrett [70] y siguiendo el desarrollo de Hervé y Mei [16]:

$$\Phi_{dif,i}(r, z, \theta, t) = \Re\{\phi(r, \theta, z)e^{-i\omega t}\}, i = ext, int \quad (A.13)$$

$$\phi_{dif,int}(r, z, \theta) = \frac{-igA_o}{\sigma} \sum_{m=0}^{N_m} \epsilon^m i^m \sum_{l=0}^{N_l} B_{ml} \frac{I_m(k_l r)}{k_l a I'_m(k_l a)} Z_l(z) \cos(m\theta) \quad (A.14)$$

$$\phi_{dif,ext} = \frac{-igA_o}{\sigma} \sum_{m=0}^{N_m} \epsilon^m i^m \cos(m\theta) \quad (A.15)$$

$$\left(\left(J_m(kr) - H_m(kr) \frac{J'_m(ka)}{H'_m(ka)} \right) \frac{Z_o(z)}{Z_o(0)} + \sum_{l=0}^{N_l} A_{ml} \frac{K_m(k_l)}{k_l a K'_m(k_l a)} Z_l(z) \right)$$

donde J_m son las funciones de Bessel de primer tipo, H_m son las funciones de Hankel, I_m y K_m corresponden a las funciones de Bessel Modificadas y $Z_l(z)$ son las autofunciones normalizadas definidas por:

$$Z_l(z) = \frac{\cosh k_l(h+z)}{\sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sinh 2k_l h}{2k_l h} \right)}}, \quad l = 0, 1, \dots, N_l \quad (A.16)$$

donde k_0 corresponde a la solución real de la ecuación de la dispersión y k_1, k_2, \dots, k_{N_l} corresponden a las soluciones imaginarias.

Los coeficientes A_{ml} y B_{ml} vienen dados por:

$$A_{ml} = B_{ml} = \frac{a}{h} \int_{-h}^{-d} \left(\sum_{p=0}^{N_p} \alpha_{mp} u_p(z) \right) Z_l(z) dz \quad (A.17)$$

con

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^{N_m} \sum_{p=0}^{N_p} \sum_{l=0}^{N_l} \alpha_{mp} \left[F_{pl} \left(\frac{K_m(k_l a)}{k_l a K'_m(k_l a)} \frac{I_m(k_l a)}{k_l a I'_m(k_l a)} \right) F_{pl} \right] &= -\frac{h}{a} \beta_m F_{P0} \\ F_{pl} &= N_c^{-0.5} J_{2p}(k_l(h-d)) \\ F_{Pl} &= N_c^{-0.5} J_{2P}(k_l(h-d)) \\ N_c &= \left(1 + \frac{\sinh 2k_l h}{2k_l h} \right) \\ \beta_m &= \left(J_m(ka) - H_m(ka) \frac{J'_m(ka)}{H'_m(ka)} \right) \frac{1}{Z_o(0)} \end{aligned} \quad (A.18)$$

A.2 Problema de la Radiación

En el problema de la radiación (Fig. A.3), el mar está en reposo y la oscilación se genera debido a una variación de presión distinta de la atmosférica, que se considera armónica, de frecuencia angular ω y uniforme en el espacio, esto es $p(t) = \Re\{\hat{P}e^{-i\omega t}\}$

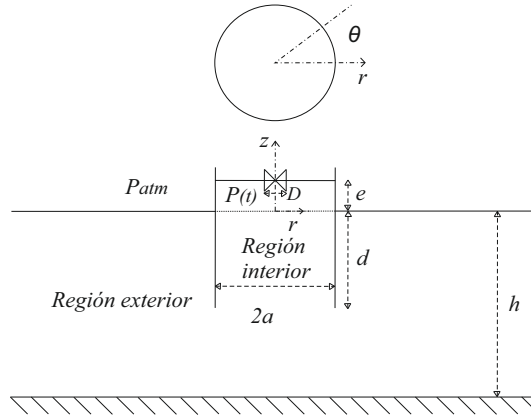


Figura A.3: Esquema del problema de la radiación

Del mismo modo que en la resolución del problema de la difracción, la solución a este problema se obtiene considerando por separado las regiones interior y exterior al cilindro e imponiendo las condiciones de acuerdo en las superficies adyacentes.

En este caso, la condición de contorno linealizada en la superficie libre es distinta al problema de la difracción, quedando las ecuaciones que deben satisfacer las funciones potenciales en ambas regiones como:

$$\frac{\partial^2 \phi_{rad}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_{rad}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi_{rad}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi_{rad}}{\partial z^2} = 0 \quad \text{para } h < z < 0 \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{\partial \phi_{rad}}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = -h \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{\partial \phi_{rad}}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_{rad} = \begin{cases} \frac{i\omega}{\rho_w g} \hat{P} & \text{para } z = 0, r < a, 0 < \theta < 2\pi \\ 0 & \text{para } z = 0, r > a, 0 < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

Las soluciones a estos problemas se obtienen por separación de variables y a continuación se les exige que satisfagan las siguientes condiciones de acuerdo cinemáticas y dinámicas:

$$\frac{\partial \phi_{rad,ext}}{\partial r} = \frac{\partial \phi_{rad,int}}{\partial r} = 0 \quad \text{para } r = a, -d < z < 0 \quad (\text{A.22})$$

$$\frac{\partial \phi_{rad,ext}}{\partial r} = \frac{\partial \phi_{rad,int}}{\partial r} = U(z) \quad \text{para } r = a, -h < z < -d \quad (\text{A.23})$$

$$\phi_{rad,ext} = \phi_{rad,int} \quad \text{para } r = a, -h < z < -d \quad (\text{A.24})$$

Evans y Porter [58] estudiaron la solución a este problema, por lo que se ha repetido su cálculo.

B

Funciones de distribución no-estacionarias

Este apéndice describe las distribuciones mixtas no estacionarias y sus parámetros de ajuste, para las variables aleatorias H_s y T_p utilizadas en el Capítulo 6.

La función de distribución marginal no estacionaria de la variable aleatoria H_s se modela con una distribución mixta que está formada por una distribución log-normal que representa el régimen central y dos distribuciones generalizadas de Pareto para los regímenes extremos [21].

$$F(x) = \begin{cases} F_m(x)F_c(u_1) & \text{for } x < u_1 \\ F_c(x) & \text{for } u_1 \leq x \leq u_2 \\ F_c(u_2) + F_M(x)(1 - F_c(u_2)) & \text{for } u_2 < x \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

donde:

$$\begin{aligned} F_m &= \left(1 - \frac{\xi_1}{\sigma_1}(x - u_1)\right)^{-\frac{1}{\xi_1}} \\ F_M &= 1 - \left(1 + \frac{\xi_2}{\sigma_2}(x - u_2)\right)^{-\frac{1}{\xi_2}} \\ F_c &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{\ln(x) - \mu_{LN}}{\sqrt{2}\sigma_{LN}} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

y,

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= -\xi_1 u_1 & (B.3) \\
\xi_1 &= -\frac{F_c(u_1)}{u_1 f_c(u_1)} \\
\sigma_2 &= \frac{1 - F_c(u_2)}{f_c(u_2)}
\end{aligned}$$

con $u_i = F_c^{-1}(\phi(Z_i))$, donde ϕ es la distribución normal estándar.

Para la variable aleatoria T_p , se utiliza una distribución que combina dos distribuciones log-normales [20]:

$$F(x) = \alpha F_{LN1}(x) + (1 - \alpha) F_{LN2}(x) \quad (B.4)$$

donde,

$$F_i = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{\ln(x) - \mu_{LN_i}}{\sqrt{2}\sigma_{LN_i}} \right) \quad (B.5)$$

En ambos casos, para representar la variabilidad inter-anual e interanual, todos los parámetros del modelo son expresados como superposición de series de Fourier sobre un intervalo de tiempo de un año y dos ciclos senoidales de períodos $T_1=5$ años y $T_2=11$ años:

$$\begin{aligned}
\theta(t) &= \theta_0 + \sum_{k=1}^{N_k} [\theta_a^k \cos(2\pi kt) + \theta_b^k \sin(2\pi kt)] & (B.6) \\
&+ \theta_{a1} \cos(2\pi t/T_1) + \theta_{b1} \sin(2\pi t/T_1) \\
&+ \theta_{a2} \cos(2\pi t/T_2) + \theta_{b2} \sin(2\pi t/T_2)
\end{aligned}$$

Los mejores valores de ajuste de estos parámetros se obtienen con el método de máxima verosimilitud, y se muestran en la Tabla B.1 (altura de ola significativa) y la Tabla B.2 (período pico).

Parámetro	θ_0	Ord.(k)	θ_a^k	θ_b^k	θ_{a1}	θ_{b1}	θ_{a2}	θ_{b2}
μ_{LN}	-0.0159	1	0.3108	0.1864	0.0145	0.1415	-0.0215	0.0380
		2	-0.0044	-0.0494				
		3	-0.0067	-0.0054				
		4	0.0371	0.0032				
σ_{LN}	0.4857	1	0.0862	-0.0060	0.0064	-0.0334	0.0046	-0.0025
		2	-0.0004	-0.0087				
		3	-0.0022	-0.0055				
ξ_{LN}	-0.0836	1	-0.1762	0.0039	-0.0227	-0.0022	-0.1195	-0.0929
		Z_1			Z_2			
			-0.9402			1.7202		

Tabla B.1: Parámetros de ajuste de la distribución mixta no-estacionaria para la altura de ola significativa.

Parámetro	θ_0	Ord.(k)	θ_a^k	θ_b^k	θ_{a1}	θ_{b1}	θ_{a2}	θ_{b2}
α	04365	1	-0.1271	0.0025	-0.0229	-0.0162	0.0851	0.1113
		2	0.0391	0.0440				
		3	-0.0246	-0.0525				
		4	-0.0348	0.0092				
μ_1	1.6930	1	0.1091	0.0982	0.0193	0.0337	-0.0182	0.0107
σ_1	0.2259	1	0.0599	0.0199	0.0016	-0.0114	0.0016	-0.0092
μ_2	2.3628	1	0.1906	0.0786	-0.0133	0.0408	-0.0480	-0.0327
		2	-0.0192	0.0063				
		3	-0.0045	0.0117				
		4	0.0053	-0.0037				
σ_2	0.1834	1	-0.0012	-0.0268	-0.0015	-0.0115	-0.0036	0.0037
		2	-0.0131	-0.0113				
		3	0.00590	0.0114				
		4	-0.0045	-0.0067				

Tabla B.2: Parámetros de ajuste de la distribución mixta no-estacionaria para el período pico.



Publicaciones

Los resultados de la investigación que se presenta en esta tesis y otras contribuciones afines del autor, se reflejan parcialmente en los artículos de revistas, congresos nacionales e internacionales y programas registrados que a continuación se detallan:

C.1 Artículos de revistas

- María L Jalón, Asunción Baquerizo, Miguel A Losada. Optimization at different time scales for the design and management of an oscillating water column system. *Energy*, 95: 110-123 (2016) doi:10.1016/j.energy.2015.11.062 (I.F.: 4.844, Rank: 2.576%)
- María L. Jalón, Asunción Baquerizo, Miguel A. Losada. Wave interaction with an onshore OWC with open chamber. En preparación.

C.2 Congresos

- M.L Jalón. Optimización de un sistema de columna de agua oscilante. *XIII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Junio 2015. ISBN 978 - 84 - 608 - 4359 - 7*
- A. Mendonça, M.L Jalón, R. Correia, J. Dias, M.G Neves, E. Didier. Design optimization of an oscillating water column wave energy converter: analytical and numerical modeling. *SCACR2015-International Short Course/Conference on Applied Coastal Research 28th September-1st October 2015-Florence,Italy, (pendiente de asignar ISBN)*

C.3 Software

- M.L Jalón (35%), S. Solari (45%), M.A. Losada (5%), P.J Magaña (5%), F.J Bello (5%), P. Folgueras (5%). Statistical Modelling and Simulation of Geophysical Variables

(SAMOEV). Registro Territorial de la Propiedad Intelectual de Andalucía. Expediente:
GR-364-15.

Referencias

- [1] J. Cruz. *Ocean wave energy: current status and future perspectives*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] A. S. Bahaj. Generating electricity from the oceans. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7):3399–416, 2011.
- [3] S. Lindroth and M. Leijon. Offshore wave power measurements—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9):4274–85, 2011.
- [4] A. F. O. Falcão. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3):899–918, 2010.
- [5] A. F. O. Falcão and R. J. A. Rodrigues. Stochastic modelling of OWC wave power plant performance. *Applied Ocean Research*, 24(2):59–71, 2002.
- [6] A. F. O. Falcão. Stochastic modelling in wave power-equipment optimization: maximum energy production versus maximum profit. *Ocean Engineering*, 31(11–12):1407–21, 2004.
- [7] R. P. F. Gomes, J. C. C. Henriques, L. M. C. Gato, and A. F. O. Falcão. Hydrodynamic optimization of an axisymmetric floating oscillating water column for wave energy conversion. *Renewable Energy*, 44:328–39, 2012.
- [8] R. Carballo and G. Iglesias. A methodology to determine the power performance of wave energy converters at a particular coastal location. *Energy Conversion and Management*, 61:8–18, 2012.
- [9] E. B. L. Mackay, A. S. Bahaj, and P. G. Challenor. Uncertainty in wave energy resource assessment. Part 2: Variability and predictability. *Renewable energy*, 35(8):1809–19, 2010.
- [10] C.C. Mei. *The applied dynamics of ocean surface waves*, volume 1. World scientific, 1989.
- [11] M.S. Longuet-Higgins. Mass transport in water waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 245(903):535–581, 1953.
- [12] M.L. Jalón, A. Baquerizo, and M.A. Losada. Optimization at different time scales for the design and management of an oscillating water column system. *Energy*, 95:110–123, 2016.
- [13] I. López, B. Pereiras, F. Castro, and G. Iglesias. Optimisation of turbine-induced damping for an OWC wave energy converter using a RANS–VOF numerical model. *Applied Energy*, 127:105–14, 2014.

- [14] I. López, B. Pereiras, F. Castro, and G. Iglesias. Performance of OWC wave energy converters: influence of turbine damping and tidal variability. *International Journal of Energy Research*, 39(4):472–83, 2015.
- [15] I. López, F. Castro, and G. Iglesias. Hydrodynamic performance of an oscillating water column wave energy converter by means of particle imaging velocimetry. *Energy*, 83:89–103, 2015.
- [16] H. Martins-Rivas and C. C. Mei. Wave power extraction from an oscillating water column at the tip of a breakwater. *Journal of fluid Mechanics*, 626:395–414, 2009.
- [17] S. Lovas, C. C. Mei, and Y. Liu. Oscillating water column at a coastal corner for wave power extraction. *Applied Ocean Research*, 32(3):267–83, 2010.
- [18] A. F. O. Falcão, J. C. C. Henriques, and J. J. Cândido. Dynamics and optimization of the OWC spar buoy wave energy converter. *Renewable Energy*, 48:369–81, 2012.
- [19] R. Carballo, M. Sánchez, V. Ramos, J. A. Fraguera, and G. Iglesias. The intra-annual variability in the performance of wave energy converters: A comparative study in N Galicia (Spain). *Energy*, 82:138–46, 2015.
- [20] S. Solari and P. H. A. J. M. van Gelder. *On the use of Vector Autoregressive (VAR) and Regime Switching VAR models for the simulation of sea and wind state parameters*. Marine Technology and Engineering. CENTEC Anniversary Book, 2011.
- [21] S. Solari and M. A. Losada. Non-stationary wave height climate modeling and simulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 116(C9), 2011.
- [22] A. J. N. A. Sarmiento and A. F. O. Falcão. Wave generation by an oscillating surface-pressure and its application in wave-energy extraction. *Journal of Fluid Mechanics*, 150:467–85, 1985.
- [23] Y. Goda. *Random Seas and Design of Maritime structures, 2nd ed.* Singapore. World Scientific, 2000.
- [24] D. V. Evans. Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions. *Journal of Fluid Mechanics*, 114:481–99, 1982.
- [25] J. R. Birge and F. Louveaux. *Introduction to Stochastic Programming*. Springer Science & Business Media, 1997.
- [26] A. Baquerizo and M. A. Losada. Human interaction with large scale coastal morphological evolution. An assessment of the uncertainty. *Coastal Engineering*, 55(7–8):569–80, 2008.
- [27] A.F. de O. Falcão. The shoreline OWC wave power plant at the azores. In *Proceedings of the Fourth European Wave Energy Conference, Aalborg, Denmark*, pages 42–8, 2000.
- [28] T. Heath, T.J.T. Whittaker, and C.B. Boake. The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay, Scotland). In *4th European wave energy conference*, pages 4–6, 2000.
- [29] Y. Masuda and M.E McCormick. Experiences in pneumatic wave energy conversion in Japan. In *Utilization of Ocean Waves—Wave to Energy Conversion*, pages 1–33. ASCE, 1986.

- [30] J.L. Lye, D.T. Brown, and F. Johnson. An investigation into the non-linear effects resulting from air cushions in the Orecon oscillating water column (owc) device. In *ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, pages 779–89. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [31] I.J. Losada, M.A. Losada, and A.J. Roldán. Propagation of oblique incident waves past rigid vertical thin barriers. *Applied Ocean Research*, 14(3):191–99, 1992.
- [32] M. Isaacson, S. Premasiri, and G. Yang. Wave interactions with vertical slotted barrier. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(3):118–126, 1998.
- [33] C.K. Sollitt and R.H. Cross. Tengo duda! wave transmission through permeable breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(13), 1972.
- [34] J.N. Newman. Interaction of water waves with two closely spaced vertical obstacles. *Journal of Fluid Mechanics*, 66(01):97–106, 1974.
- [35] P. McIver. Scattering of water waves by two surface-piercing vertical barriers. *IMA journal of applied mathematics*, 35(3):339–355, 1985.
- [36] M. Isaacson, J. Baldwin, S. Premasiri, and G. Yang. Wave interactions with double slotted barriers. *Applied ocean research*, 21(2):81–91, 1999.
- [37] S. Zhu and A.T. Chwang. Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall. *Coastal Engineering*, 43(2):93–104, 2001.
- [38] C.C. Mei, P.L.F. Liu, and A.T. Ippen. Quadratic loss and scattering of long waves. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 100(3):217–239, 1974.
- [39] G.S. Bennett, P. McIver, and J.V. Smallman. A mathematical model of a slotted wave-screen breakwater. *Coastal Engineering*, 18(3):231–249, 1992.
- [40] M.A. Losada and L.A. Giménez-Curto. Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action. *Coastal Engineering*, 4:187–206, 1981.
- [41] A. Baquerizo and M.A. Losada. Wave height to depth ratio in front of coastal structures. In *Proceedings of Coastal Structures*, 1999.
- [42] C.C. Mei, M. Stiassnie, and D.K.-P. Yue. *Theory and Applications of Ocean Surface Waves: nonlinear aspects*, volume 23. World Scientific, 2005.
- [43] M.S. Longuet-Higgins. On the joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves. *Journal of Geophysical Research*, 80(18):2688–2694, 1975.
- [44] J. Fredsøe and R. Deigaard. *Mechanics of coastal sediment transport*, volume 3. World scientific, 1992.
- [45] G.G. Stokes. *On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums*, volume 9. Pitt Press, 1851.
- [46] I.G. Jonsson. Measurements in the turbulent wave boundary layer. *Proc. 10th Congr. IAHR*, 1:85–92, 1963.
- [47] I.G. Jonsson. On the existence of universal velocity distributions in an oscillatory turbulent boundary layer. *Coastal Engineering Laboratory, Technical University of Denmark, Copenhagen. Basic Research Progress Report*, 12:2–10, 1966.

- [48] I.G. Jonsson and N.A. Carlsen. Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer. *Journal of Hydraulic Research*, 14(1):45–60, 1976.
- [49] J.N. Hunt and B. Johns. Currents induced by tides and gravity waves. *Tellus*, 15(4):343–351, 1963.
- [50] T.G. Carter, P.L.F. Liu, and C.C. Mei. Mass transport by waves and offshore sand bedforms. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 99(2):165–184, 1973.
- [51] M.S. Longuet-Higgins. The mechanics of the boundary layer near the bottom in a progressive wave. In *Proceedings of the 6th International Conference on Coastal Engineering, Berkeley (CA), ASCE*, volume 184–193, 1958.
- [52] J. Lamoure and C.C. Mei. Effects of horizontally two-dimensional bodies on the mass transport near the sea bottom. *Journal of Fluid Mechanics*, 83(03):415–431, 1977.
- [53] L.C. Van Rijn. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, volume 1006. Aqua publications Amsterdam, 1993.
- [54] A. Baquerizo and M.A. Losada. Sediment transport around a mound breakwater: The toe erosion problem. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(26), 1998.
- [55] G. Besio and M. A. Losada. Sediment transport patterns at Trafalgar offshore windfarm. *Ocean Engineering*, 35(7):653–65, 2008.
- [56] J.A. Bailard. An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 86(C11):10938–10954, 1981.
- [57] D.V. Evans and R. Porter. Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device. *Applied Ocean Research*, 17(3):155–64, 1995.
- [58] R. Porter and D. V. Evans. Efficient calculation of hydrodynamic properties of owc-type devices. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 119(4):210–18, 1997.
- [59] M. Egüen. Sources of variability in the forcing agents of the dynamics in atlantic estuaries in Andalusia (in Spanish). Ph. D. Thesis. University of Granada. Spain, 2014.
- [60] J. T. Kirby and R. A. Dalrymple. *Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.5: Documentation and User's Manual*. CACR-94-22, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, 1994.
- [61] N. Booij, R. C. Ris, and L. H. Holthuijsen. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 104(C4):7649–66, 1999.
- [62] P. R. F. Teixeira, D. P. Davyt, E. Didier, and R. Ramalhais. Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier–Stokes equations. *Energy*, 61:513–30, 2013.
- [63] A. F. O. Falcão. Wave-power absorption by a periodic linear array of oscillating water columns. *Ocean Engineering*, 29(10):1163–86, 2002.
- [64] P.H. Perroud. The solitary wave reflection along a straight vertical wall at oblique incidence. Technical report, DTIC Document, 1957.

- [65] P. Camus, F. J. Mendez, R. Medina, and A. S Cofiño. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6):453–462, 2011.
- [66] T. Sarpkaya and M. Isaacson. *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- [67] I.J. Losada, M.A. Losada, and A. Baquerizo. An analytical method to evaluate the efficiency of porous screens as wave dampers. *Applied Ocean Research*, 15(4):207–215, 1993.
- [68] R.C. MacCamy and R.A. Fuchs. Wave forces on piles: a diffraction theory. Technical report, DTIC Document, 1954.
- [69] P. Nielsen. *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*, volume 4. World scientific, 1992.
- [70] C.J.R. Garrett. Bottomless harbours. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(03):433–449, 1970.