

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

**OPTIMIZACIÓN EXPERIMENTAL DE
LA DISIPACIÓN DE OLEAJE EN UN
TANQUE (“FLUME”) DE ANÁLISIS
DE DISPOSITIVOS DE ENERGÍAS
MARINAS**

Alumno: Vázquez Clemente, Asier

Director (1): Esteban Alcalá, Gustavo Adolfo

Director (2): Albaina López de Armentia, Iñigo

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 27 de junio de 2019

Abstract

This thesis presents an experimental study seeking the optimization of a wave dissipation system in a flume for the analysis of marine energy devices. The reflection coefficient of various waves of different characteristics is calculated in this research, analyzing the effect that different geometries of the dissipation system have in these. The entirety of the experimental tests have taken place in the Bilbao Engineering School's fluid mechanics laboratory.

The wave, by means of a digitally activated wave generation system, travels until it collides with a plane beach, whose slope varies depending on the test. The incident wave is then reflected. Two ultrasonic sensors capture the reflected wave's height at different points. By making a fitting with MATLAB, the surrounding wave's profile is obtained, and, subsequently, the reflection coefficient. A relationship is established between this and the dissipation system's geometry.

Experimental analysis is a key part in any wave energy absorber's development. Due to the difficulties that installing real scale prototypes in open sea entail, the study in laboratories is an important step in the evolutive process, until their commercial use.

Keywords: wave dissipation, reflection coefficient, wave flume, wave energy converters (WECs), wave energy absorbers.

En este trabajo se presenta un estudio experimental para la optimización de un sistema de disipación del oleaje en un tanque ("flume") de análisis de dispositivos de energías marinas. La investigación se lleva a cabo calculando el coeficiente de reflexión para ondas incidentes de distintas características y observando el efecto que distintas geometrías del mismo sistema de extinción tienen sobre ellas. La totalidad de los ensayos experimentales se lleva a cabo en el laboratorio de mecánica de fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

En el tanque, mediante un sistema de generación de oleaje activado digitalmente, la ola viaja hasta colisionar contra una playa plana, cuya inclinación variará en función del ensayo realizado. La ola incidente se ve reflejada y, gracias a dos sensores de ultrasonidos, se mide la altura de esta en diferentes posiciones. De esta forma, realizando un ajuste en el software MATLAB, es posible obtener el perfil de la onda envolvente y, posteriormente, el coeficiente de reflexión. Se establece así una relación entre este y la geometría del sistema de disipación.

El análisis experimental es una parte vital en el desarrollo de cualquier dispositivo de captación de energía marina. Debido a las dificultades que supone la construcción de modelos a escala real y su implementación en mar abierto, el estudio en laboratorios supone un primer

paso importante en el proceso evolutivo, hasta la posible explotación comercial de dichos dispositivos.

Palabras clave: disipación del oleaje, coeficiente de reflexión, tanque (“flume”) de olas, convertidores de energía del oleaje (WECs), absorbedores de energía del oleaje.

Lan honetan itsas-jatorriko energia aprobetxatzen duten sistemen analisirako depositu (“flume”) batean olatuen disipazioaren optimizazio experimentalak aurkezten da. Ikerketa ezaugarri ezberdineko uhin erasotzaileen islapen koefizientea kalkulatu egiten da, disipazio sistema beraren geometria ezberdinek hauetan duten eragina aztertuz. Saiakuntza guztiak Bilboko Ingeniaritza Eskolako jariakinen mekanika saileko laborategian egin dira.

Deposituan, digitalki aktibatutako sortze sistema batetik eratutako olatuak hondartza lau batekin talka egin arte hedatzen dira, hondartza honen malda saiakuntzaren arabera aldatzen delarik. Olatu erasotzailea islatu egiten da eta puntu ezberdinetan bere altuera ultrasoinu sentore biren bidez neurtzen da. Hori horrela, MATLAB software-an doikuntza bat eginez, uhin inguratzailearen profila lortzen da. Ondoren, islapen koefizientearen balioa kalkulatu da. Azken honen eta disipazio sistemaren geometriaren arteko erlazio bat ezartzen da.

Analisi experimentalak itsas-jatorriko energia aprobetxatzen duen edozein gailuren garapen prozesuko ezinbesteko atala da. Eskala errealean eraikitako prototipoen itsaso irekian ezartzeak dakartzen zailtasunen ondorioz, laborategietako ikasketek sistema hauen prozesu ebolutiboan lehen pauso garrantzitsua dira; azkenik, sistema hauen ustiapen komertziala lortu arte.

Hitz gakoak: olatuen disipazioa, islapen koefizientez, olatuen depositua (“flume”), olatuen energiaren konbर्सio gailuak (WEC), olatuen energiaren xurgatzaileak.

Índice general

- **Abstract**
- **Índice general**
- **Índice de figuras**
- **Índice de tablas**
- **Siglas**

1 Memoria

1.1. Introducción	16
1.2. Contexto	17
1.3. Objetivos y alcance del trabajo	20
1.3.1. Introducción	20
1.3.2. Necesidad de experimentación con modelos a escala	20
1.3.3. Actividades y procedimientos	22
1.4. Beneficios que aporta el trabajo	23
1.5. Conceptos fundamentales del oleaje	24
1.5.1. Introducción	24
1.5.2. Clasificación y comportamiento del oleaje	24
1.5.3. Estudio del oleaje	27
1.5.3.1. Oleaje regular.....	27
1.5.3.1.1. Teoría lineal de ondas o teoría de Ayri.....	29
1.5.3.1.2. Teoría no lineal de Stokes de 2º orden.....	33
1.6. Sistemas de captación de la energía del oleaje	35
1.6.1. Introducción	35
1.6.2. Tipos de infraestructura	37
1.6.3. Clasificación de los sistemas de captación	39
1.6.3.1. En la costa (“onshore”)	39
1.6.3.1.1. Columna de agua oscilante (Oscillating Water Column, OWC)	39
1.6.3.2. Cerca de la costa (“nearshore”).....	40
1.6.3.3. Mar a dentro (“offshore”)	42
1.6.3.3.1. Boyas agitadas de un solo cuerpo (Single-body heaving buoys).....	42
1.6.3.3.2. Sistemas agitados de dos cuerpos (Two-body heaving systems).....	42

1.6.3.3.3. Sistemas agitados completamente sumergidos (Fully submerged heaving systems)	44
1.6.3.3.4. Sistemas de cabeceo (Pitching devices)	45
1.6.3.3.5. Bottom-hinged systems	46
1.7. Análisis de alternativas. Sistemas de disipación	47
1.8. Selección y descripción de la solución propuesta	49
1.8.1. Playa plana con pendiente continua	49
1.9. Análisis de riesgos	51

2 Metodología

2.1. Descripción del equipamiento	55
2.1.1. Tanque ("flume")	55
2.1.2. Sensores de ultrasonidos	56
2.1.3. Sistema de disipación del oleaje	57
2.2. Descripción de tareas	58
2.2.1. Casos ejecutados	58
2.3. Planificación	62
2.3.1. Introducción	62
2.3.2. Diagrama de Gantt	62
2.4. Cálculos y algoritmos	64
2.4.1. Análisis teórico	64
2.4.2. Desarrollo de un caso práctico	66
2.5. Descripción de los resultados	70
2.5.1. Análisis de tres ondas con períodos similares	70
2.5.1.1. Calado $d = 0,20\text{m}$	70
2.5.1.1.1. Onda I	70
2.5.1.1.2. Onda II	74
2.5.1.1.3. Onda III	77
2.5.1.1.4. Comparación de resultados	80
2.5.1.2. Calado $d = 0,15\text{m}$	82
2.5.1.2.1. Onda I	82
2.5.1.2.2. Onda II	84
2.5.1.2.3. Onda III	87
2.5.1.2.4. Comparación de resultados	89
2.5.2. Análisis de ondas con períodos distintos para una única geometría del sistema de disipación	91

2.5.2.1. Calado $d = 0,20\text{m}$	91
2.5.2.1.1. Onda IV	91
2.5.2.1.2. Onda V	91
2.5.2.1.3. Onda VII	92
2.5.2.1.4. Comparación de resultados	92
2.5.2.2. Calado $d = 0,15\text{m}$	94
2.5.2.2.1. Onda IV	94
2.5.2.2.2. Onda VII	94
2.5.2.2.3. Comparación de resultados	95
2.5.3. Análisis de ondas con períodos distintos para distintas geometrías del sistema de disipación.....	96
2.5.3.1. Calado $d = 0,20\text{m}$	96
2.5.3.1.1. Onda IV	96
2.5.3.1.2. Onda V	97
2.5.3.1.3. Comparación de resultados	98

3 Aspectos económicos

3.1. Descripción del presupuesto ejecutado.....	102
3.1.1. Descripción	102
3.1.1.1. Canal.....	102
3.1.1.2. Estructura de aluminio, acero y paredes de metacrilato	102
3.1.1.3. Playa.....	102
3.1.1.4. Servomotor	102
3.1.1.5. Actuador lineal	103
3.1.1.6. Célula de carga.....	103
3.1.1.7. Bomba	103
3.1.1.8. Sensores de ultrasonidos	104
3.1.1.9. Obra civil	104
3.1.1.10. Instalación, montaje y pruebas.....	104
3.1.2. Resumen y costes totales	104

4 Conclusiones

4.1. Conclusiones finales	107
4.2. Futuros proyectos.....	109

5 Referencias

Anexo I: Plan de pruebas.....	112
Anexo II: Planos. Código.	116
2.1. Planos del sistema de disipación	116
2.2. Código de Matlab	120
2.2.1. Ajuste de los datos experimentales a una curva sinusoidal.	120
2.2.2. Cálculo del coeficiente de reflexión y ajuste del perfil de la onda envolvente. ...	121
Anexo III: Tablas con los resultados obtenidos a partir de los ajustes realizados a los datos experimentales	122

Índice de figuras

1.2-1	Distribución media anual mundial de la energía de las olas en mar abierto en kW/m frente de ola	17
1.2-2	Distribución de la energía de oleaje en aguas profundas en kW/m frente de ola a nivel europeo	19
1.5-1	Características generales de la ola	24
1.5-2	Representación esquemática de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de la energía en ellas contenida	25
1.5-3	Movimiento de las partículas de agua en una ola	26
1.5-4	Diagrama de Le Méhauté	28
1.5-5	Perfil de la ola de Ayri	28
1.5-6	Ola no lineal (Stokes)	33
1.6-1	Diagrama del proceso evolutivo de los dispositivos de captación de energía del oleaje	34
1.6-2	Clasificación de dispositivos según su ubicación	37
1.6-3	Fotografía del laboratorio de la UGR	38
1.6-4	Fotografía del CEPYC	38
1.6-5	Fotografía del tanque ("flume") de laboratorio de mecánica de fluidos de la EIB	38
1.6-6	Representación esquemática de una OWC de estructura fija (Pico)	39
1.6-7	Representación esquemática del BBDB	40
1.6-8	Esquema y fotografía del sistema Oyster	41
1.6-9	Representación esquemática del Wave Roller	41
1.6-10	Heaving Buoy noruega en Trondheim Fjord, 1983	43
1.6-11	Representación esquemática del dispositivo L-10 (izquierda) y de la boya IPS (derecha)	44
1.6-12	Prototipo de la PowerBuoy instalada en Santoña (España)	44
1.6-13	Representación del Archimedes Wave Swing	45
1.6-14	Versión del Duck de 1979 equipada con giroscopios	46
1.6-15	Representación del mazo oscilante en tres posiciones angulares	46

1.7-1	Representación esquemática de playas parabólicas estudiadas por Ouellet y Datta	48
1.8-1	Coeficiente de reflexión para diferentes pendientes. Teoría de Twu y Liu ..	50
2.1-1	Vista general del waveflume (arriba izquierda), sistema de generación (arriba derecha), zona de propagación y sensores (abajo izquierda) y sistema de extinción (abajo derecha)	55
2.2-1	Representación esquemática de la técnica “moving gauge”	60
2.3-1	Diagrama de Gantt	63
2.3-2	Diagrama de Gantt correspondiente a los ensayos en el laboratorio	63
2.4-1	Representación simplificada de la teoría de Galvin para generadores de olas planos en aguas superficiales	64
2.4-2	Teoría de wavemaker plano. Ratio de la amplitud de ola con respecto a la amplitud del pistón versus la profundidad relativa	65
2.4-3	Ensayo 146 $d = 0,20\text{m}$. Onda II. Posición de playa 5. Sensor 1. $x = 90\text{cm}$...	67
2.4-4	Perfil de la onda envolvente correspondiente a la onda II y la posición de playa 5 para el calado de $d = 0,20\text{m}$	68
2.4-5	Representación gráfica del coeficiente de reflexión como función del ángulo de playa para la onda II en el calado de $d = 0,20\text{m}$	69
2.5-1	Onda envolvente de la Onda I para la geometría sin playa. $d = 0,20\text{m}$	70
2.5-2	Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 1. $d = 0,20\text{m}$	70
2.5-3	Onda envolvente de la Onda I la geometría playa 2. $d = 0,20\text{m}$	71
2.5-4	Onda envolvente de la Onda I la geometría playa 3. $d = 0,20\text{m}$	71
2.5-5	Onda envolvente de la Onda I la geometría playa 4. $d = 0,20\text{m}$	71
2.5-6	Onda envolvente de la Onda I la geometría playa 5. $d = 0,20\text{m}$	71
2.5-7	Onda envolvente de la Onda I la geometría playa 6. $d = 0,20\text{m}$	72
2.5-8	Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda I en el calado $d = 0,20\text{m}$	73
2.5-9	Onda envolvente de la Onda II la geometría sin playa. $d = 0,20\text{m}$	74
2.5-10	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 1. $d = 0,20\text{m}$	74
2.5-11	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 2. $d = 0,20\text{m}$	74
2.5-12	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 3. $d = 0,20\text{m}$	74

2.5-13	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 4. $d = 0,20\text{m}$	75
2.5-14	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 5. $d = 0,20\text{m}$	75
2.5-15	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 6. $d = 0,20\text{m}$	75
2.5-16	Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda II en el calado $d = 0,20\text{m}$	76
2.5-17	Onda envolvente de la Onda III la geometría sin playa. $d = 0,20\text{m}$	77
2.5-18	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 1. $d = 0,20\text{m}$	77
2.5-19	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 2. $d = 0,20\text{m}$	77
2.5-20	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 3. $d = 0,20\text{m}$	77
2.5-21	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 4. $d = 0,20\text{m}$	78
2.5-22	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 5. $d = 0,20\text{m}$	78
2.5-23	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 6. $d = 0,20\text{m}$	78
2.5-24	Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda III en el calado $d = 0,20\text{m}$	79
2.5-25	Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para las Ondas I, II y III en el calado de $d = 0,20\text{m}$	80
2.5-26	Onda envolvente de la Onda I la geometría sin playa. $d = 0,15\text{m}$	82
2.5-27	Onda envolvente de la Onda I la geometría playa 1. $d = 0,15\text{m}$	82
2.5-28	Onda envolvente de la Onda I la geometría playa 2. $d = 0,15\text{m}$	82
2.5-29	Onda envolvente de la Onda I la geometría playa 3. $d = 0,15\text{m}$	82
2.5-30	Onda envolvente de la Onda I la geometría playa 4. $d = 0,15\text{m}$	83
2.5-31	Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda I en el calado $d = 0,15\text{m}$	84
2.5-32	Onda envolvente de la Onda II la geometría sin playa. $d = 0,15\text{m}$	84
2.5-33	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 1. $d = 0,15\text{m}$	84
2.5-34	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 2. $d = 0,15\text{m}$	85
2.5-35	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 3. $d = 0,15\text{m}$	85
2.5-36	Onda envolvente de la Onda II la geometría playa 4. $d = 0,15\text{m}$	85
2.5-37	Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda II en el calado $d = 0,15\text{m}$	86
2.5-38	Onda envolvente de la Onda III la geometría sin playa. $d = 0,15\text{m}$	87

2.5-39	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 1. $d = 0,15m$	87
2.5-40	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 2. $d = 0,15m$	87
2.5-41	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 3. $d = 0,15m$	87
2.5-42	Onda envolvente de la Onda III la geometría playa 4. $d = 0,15m$	88
2.5-43	Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda III en el calado $d = 0,15m$	89
2.5-44	Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para las Ondas I, II y III en el calado de $d = 0,15m$	90
2.5-45	Onda envolvente de la Onda IV la geometría playa 5. $d = 0,20m$	91
2.5-46	Onda envolvente de la Onda V la geometría playa 5. $d = 0,20m$	91
2.5-47	Onda envolvente de la Onda VII la geometría playa 5. $d = 0,20m$	92
2.5-48	Representación del coeficiente de reflexión como función del período de las Ondas I, IV, V y VII para la posición de playa 5 en el calado $d = 0,20m$...	93
2.5-49	Onda envolvente de la Onda IV la geometría playa 2. $d = 0,15m$	94
2.5-50	Onda envolvente de la Onda VII la geometría playa 2. $d = 0,15m$	94
2.5-51	Representación del coeficiente de reflexión como función del período de las Ondas I, IV y VII para la posición de playa 5 en el calado $d = 0,15m$	95
2.5-52	Onda envolvente de la Onda IV la geometría playa 7. $d = 0,20m$	96
2.5-53	Onda envolvente de la Onda IV la geometría playa 8. $d = 0,20m$	96
2.5-54	Onda envolvente de la Onda IV la geometría playa 9. $d = 0,20m$	96
2.5-55	Onda envolvente de la Onda IV la geometría playa 10. $d = 0,20m$	96
2.5-56	Onda envolvente de la Onda V la geometría playa 8. $d = 0,20m$	97
2.5-57	Onda envolvente de la Onda V la geometría playa 9. $d = 0,20m$	97
2.5-58	Onda envolvente de la Onda V la geometría playa 10. $d = 0,20m$	97
2.5-59	Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para las Ondas I, IV y V en el calado de $d = 0,20m$	99
2.5-60	Representación del coeficiente de reflexión en la posición en la que se minimiza para las ondas I, IV y V en el calado de $d = 0,20m$	100

Índice de tablas

1.5-1	Ecuaciones de la teoría de Ayri	32
1.5-2	Ecuaciones de la teoría de Stokes de 2º orden	34
1.9-1	Clasificación de los riesgos	51
1.9-2	Matriz para la clasificación de riesgos	52
2.1-1	Errores en la configuración de los sensores	56
2.2-1	Parámetros implementados para ondas de períodos similares en el wavemaker	58
2.2-2	Parámetros implementados para ondas de períodos distintos en el wavemaker	59
2.4-1	Resumen de los datos para la representación de la ola envolvente correspondientes a la Onda II y la posición de playa 5 para el calado de $d = 0,20\text{m}$	67
2.4-2	Valores de la altura de onda y coeficiente de reflexión para la Onda II y la posición de playa 5 para el calado de $d = 0,20\text{m}$	68
2.4-3	Coficiente de reflexión como función del ángulo de playa para la Onda II en el calado de $d = 0,20\text{m}$	69
2.5-1	Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda I en el calado de $d = 0,20\text{m}$	72
2.5-2	Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda II en el calado de $d = 0,20\text{m}$	76
2.5-3	Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda III en el calado de $d = 0,20\text{m}$	79
2.5-4	Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para las Onda I, II y III en el calado de $d = 0,20\text{m}$	80
2.5-5	Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda I en el calado de $d = 0,15\text{m}$	83
2.5-6	Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda II en el calado de $d = 0,15\text{m}$	86
2.5-7	Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda III en el calado de $d = 0,15\text{m}$	88

2.5-8	Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para las Onda I, II y III en el calado de $d = 0,15\text{m}$	89
2.5-9	Resumen del valor del coeficiente de reflexión para la posición de playa 5 para las Ondas I, IV, V y VII en el calado de $d = 0,20\text{m}$	92
2.5-10	Resumen del valor del coeficiente de reflexión para la posición de playa 5 para las Ondas I, IV y VII en el calado de $d = 0,15\text{m}$	95
2.5-11	Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para las Onda I, IV y V en el calado de $d = 0,20\text{m}$	98
3.1-1	Presupuesto ejecutado en el proyecto	104

Siglas

AWS	Archimedes Wave Swing
BBDB	Backward Bent Duct Buoy
BIMEP	Bizcay Marine Energy Centre
CAD	Computer Aided Design
CAPV	Comunidad Autónoma del País Vasco
CEH	Centro de Estudios Hidrográficos
CEPYC	Centro de Estudios de Puertos y Costas
CFD	Computational Fluid Dynamics
EIB	Escuela de Ingeniería de Bilbao
EMEC	European Marine Energy Centre
EVE	Ente Vasco de la Energía
II	Índice de Idoneidad
IPS	Inter Project Service
MATLAB	Matrix Laboratory
OPT	Ocean Power Technologies
OWC	Oscillating Water Column
PTO	Power Take-Off
R&D	Research and Development
UCA	Universidad de Cantabria
UGR	Universidad de Granada
WEC	Wave Energy Converter

1 Memoria

1.1. Introducción	16
1.2. Contexto	17
1.3. Objetivos y alcance del trabajo	20
1.3.1. Introducción	20
1.3.2. Necesidad de experimentación con modelos a escala	20
1.3.3. Actividades y procedimientos	22
1.4. Beneficios que aporta el trabajo	23
1.5. Conceptos fundamentales del oleaje	24
1.5.1. Introducción	24
1.5.2. Clasificación y comportamiento del oleaje	24
1.5.3. Estudio del oleaje	27
1.5.3.1. Oleaje regular	27
1.5.3.1.1. Teoría lineal de ondas o teoría de Ayri	29
1.5.3.1.2. Teoría no lineal de Stokes de 2º orden	33
1.6. Sistemas de captación de la energía del oleaje	35
1.6.1. Introducción	35
1.6.2. Tipos de infraestructura	37
1.6.3. Clasificación de los sistemas de captación	39
1.6.3.1. En la costa (“onshore”)	39
1.6.3.1.1. Columna de agua oscilante (Oscillating Water Column, OWC)	39
1.6.3.2. Cerca de la costa (“nearshore”)	40
1.6.3.3. Mar a dentro (“offshore”)	42
1.6.3.3.1. Boyas agitadas de un solo cuerpo (Single-body heaving buoys)	42
1.6.3.3.2. Sistemas agitados de dos cuerpos (Two-body heaving systems)	42
1.6.3.3.3. Sistemas agitados completamente sumergidos (Fully submerged heaving systems)	44
1.6.3.3.4. Sistemas de cabeceo (Pitching devices)	45
1.6.3.3.5. Bottom-hinged systems	46
1.7. Análisis de alternativas. Sistemas de disipación	47
1.8. Selección y descripción de la solución propuesta	49
1.8.1. Playa plana con pendiente continua	49
1.9. Análisis de riesgos	51

1.1. Introducción

En este Trabajo Fin de Grado se realizará un análisis experimental para optimizar la disipación del oleaje en un tanque (“flume”) de estudio de energías marinas. Se obtendrá el valor del coeficiente de reflexión de una onda conocida en función de la geometría del sistema de disipación. El estudio consistirá en diversos ensayos llevados a cabo en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Se busca profundizar en el área de las energías renovables, y en particular, en la energía undimotriz. Con ese fin, se hará un análisis de de las tecnologías existentes que se encuentran actualmente en desarrollo para el aprovechamiento de la energía marina. Estas serán clasificadas en función de su ubicación con respecto a la costa y la forma en la que se puede aprovechar la energía que se presenta en este medio. Además, se contemplarán diversos sistemas de extinción del oleaje, desarrollando la opción elegida para los ensayos experimentales.

Se comprenderán las bases de la teoría de olas, necesaria para ajustar los datos experimentales a ondas teóricas acordes a sus parámetros característicos.

La experimentación se llevará a cabo en el tanque (“flume”) pequeño a disposición en el citado laboratorio. Se introducirán diversos valores de amplitud, velocidad y aceleración y desaceleración en el programa unido al generador de olas para así generar ondas con parámetros distintos. Dos sensores de ultrasonidos leerán la altura de la onda en diversos puntos con cuyos valores se generará un archivo Microsoft® Office Excel. Se tratarán los datos generados para, así, elegir los datos representativos. Una vez hecho esto, se llevará a cabo un ajuste sinusoidal además de obtener el valor de los parámetros característicos que definen la ecuación de la onda. Cuando se haya obtenido el correspondiente perfil de la onda envolvente para cada uno de los casos analizados, se representará el valor del coeficiente de reflexión y se establecerán sendas relaciones entre este y el ángulo de la playa que sirve como sistema de extinción del oleaje.

El desarrollo del ajuste y el correspondiente cálculo de valores característicos se llevará a cabo con el programa MATLAB (MATrix LABoratory), ampliamente usado en la industria. Entre sus diversas prestaciones ofrece la implementación de algoritmos y la representación de datos y funciones. El software, muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo, utiliza un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Finalmente, con el propósito de servir de guía en el entendimiento del proceso experimental, se anexa información acerca de las fuentes, referencias, códigos y procedimientos.

1.2. Contexto

Con este trabajo se pretende profundizar en el estudio del oleaje, mediante un análisis del estado del arte de las tecnologías e infraestructuras existentes y tratando varios casos prácticos para optimizar el sistema de disipación del oleaje con olas de características distintas. Todo el análisis experimental se lleva a cabo con el fin de establecer una relación entre las ondas incidentes y los resultados obtenidos y, así, explotar los prototipos desarrollados a nivel comercial.

Para ello, es importante entender el potencial del oleaje a nivel mundial, ya que, como se verá a continuación, existen zonas donde la implementación de dispositivos de captación del oleaje permite aprovechar la energía proveniente de las olas. Este análisis se hará de forma más precisa para la costa vasca.

Según los Atlas del Oleaje desarrollados, las zonas con mayor potencial de oleaje a nivel mundial se sitúan entre las latitudes de 30° y 60° en ambos hemisferios, consecuencia de que la acción del viento en estas zonas es mayor y, por tanto, el tamaño y la fuerza del oleaje es mayor. Se considera que la energía del oleaje en aguas profundas (de más de 100m de profundidad) es de entre 1 y 10TW (Panicker, 1976), mientras que el Consejo Mundial de la Energía estima que este valor es superior a 2TW. En las zonas más cercanas a la costa el oleaje pierde parte de su energía; sin embargo, debido a ciertas formas del fondo marino, hay zonas en las que la energía del oleaje se concentra, consiguiendo así valores mayores.

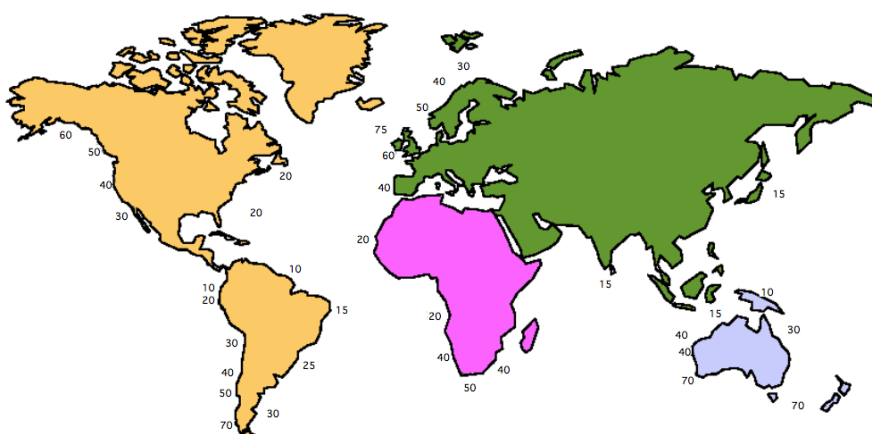


Figura 1.2-1. Distribución media anual mundial de la energía de las olas en mar abierto, en kW/m frente de ola. (Fernández Díez, P. 2004)

Wavenet en 2003 estimó que, cuando los captadores de energía del oleaje actuales estén totalmente desarrollados, la captación de energía variará entre 104 y 750TWh/año, pudiendo alcanzar los 2000TWh/año.

A la hora de dimensionar la capacidad del oleaje en la costa vasca, el estudio realizado por el Ente Vasco de la Energía (EVE) y la Universidad de Cantabria (UCA), la cual se encargó de trazar el Atlas del Oleaje, se analizó desde la isóbata de 10m hasta los 100m de profundidad, abarcando una longitud total de costa de 150km y una superficie de 936 km².

La costa vasca está expuesta a una gran variedad de olas, tanto en altura de la ola (H_s), como de período de pico (T_p), siendo mayoritarias las olas de tipo *swell* (oleaje de largo período). La altura de oleaje media se sitúa alrededor de los 2 m, mientras que el período va entre 4 y 22s. El flujo de energía correspondiente a estos valores de oleaje alcanza un valor de 24kW por metro lineal de frente de ola (en torno a 210MWh/año).

A la hora de decidir las zonas más adecuadas para la instalación de captadores de energía de las olas se establecieron unos criterios mediante los cuales se calculó un Índice de Idoneidad (II) que varía entre 0 (zonas no aptas) y 100 (zonas óptimas). Este análisis de idoneidad se basa en una serie de factores técnicos, medioambientales y socioeconómicos.

Se impuso la hipótesis de que la totalidad de la costa vasca analizada en el estudio previamente mencionado podía abarcar cualquier tipo de captador de energía de las olas.

Con todo esto, la distribución del II indica que las zonas con un mismo valor de dicho índice están muy fraccionadas, siendo los tramos orientados hacia el oeste los que logran valores mayores (220MWh/ml), tales como la zona entre Bilbao y el cabo Matxitxako y entre Orio y el cabo Higuer. Esto se debe, principalmente, a que las olas *swell* provienen de esta dirección.

Sin embargo, los valores de II más elevados se encuentran mayoritariamente en zonas someras. Esto es consecuencia directa de la menor accesibilidad y menor conocimiento de las zonas más profundas; por tanto, la instalación y el posterior mantenimiento de la infraestructura de captación instalada necesitará un mayor esfuerzo. El Índice de Idoneidad establece el 16% de la superficie estudiada como incompatible y el 75% con unos valores entre 60 y 85. El potencial energético total que corresponde a las isóbatas de 30, 60 y 100m es de 13,24; 13,39 y 11,94TWh respectivamente, mientras que el potencial accesible es de 9,48; 11,95 y 11,28TWh. Por todo esto, las zonas óptimas se sitúan en los tramos de costa más expuestos y a una profundidad media de 60m.

En el hipotético caso de que la totalidad de la costa vasca no afectada por incompatibilidades fuese ocupada se generaría una energía que respondería a entre el 7% y el 10% de la demanda eléctrica total de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), o lo que es lo mismo, entre un 37% y un 50% del consumo eléctrico de los hogares de la CAPV, lo que supondría una disminución de emisiones de CO₂ a la atmósfera de 0,96 a 1,54 millones de toneladas.

El principal dispositivo de captación de energía del oleaje del País Vasco se encuentra en Mutriku. Dispone de una tecnología Onshore OWC (Wavegen) con 16 turbinas de 18,5kW; generando así una potencia total de 29kW.

Además, cabe destacar el área BIMEP (Bizcay Marine Energy Platform) situada en Armintza. Se trata de una infraestructura de ensayos de prototipos de captadores de energías marinas y equipamiento auxiliar en mar abierto. Abarca un área de 4 x 2km², comprendida entre los 50 y 90m de profundidad.

En lo que respecta al marco estatal, España no dispone de numerosos lugares apropiados (oleaje mayor de 6m) para la captación de dicha energía, salvo por varios puertos comerciales en los que las restricciones y el impacto ambiental que esta práctica implica imposibilitan la implantación de captadores de oleaje.

Cabe destacar los recursos teóricos disponibles en el Estrecho de Gibraltar. No obstante, el recurso es explotable al máximo en la costa Atlántica y Cantábrica, tal y como se ha podido analizar en el caso de la costa vasca, con un potencial de oleaje de entre 40 y 55kW/m.

Estas condiciones han supuesto que no haya ningún tipo de objetivo nacional en cuanto a la explotación de este recurso natural. Sólo la CAPV ha establecido algún tipo de meta dentro de su mix energético, habiendo instalado 5MW en 2010.

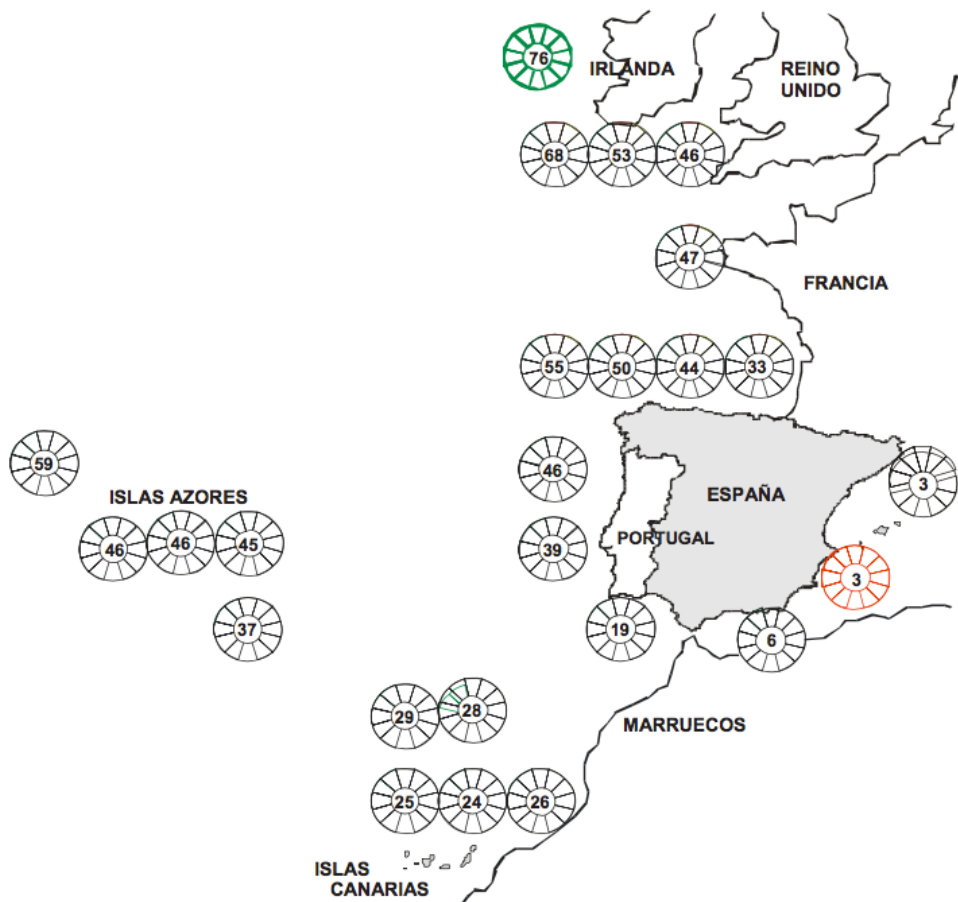


Figura 1.2-2. Distribución de energía del oleaje en aguas profundas en kW/m frente de ola a nivel europeo.

1.3. Objetivos y alcance del trabajo

1.3.1. Introducción

Con los análisis hechos en este trabajo se busca optimizar los sistemas de disipación para distintas condiciones de oleaje mediante el cálculo del coeficiente de reflexión para dichas condiciones. Para ello se estudiarán diversos casos experimentales y se harán los ajustes necesarios por ordenador para acercar los valores experimentales a curvas teóricas. Adicionalmente, se tratará de explicar el proceso completo llevado a cabo para representar un caso de principio a fin, facilitando al lector entender los pasos a seguir para el cálculo del coeficiente de reflexión para unas condiciones de oleaje y una geometría del sistema de disipación previamente establecidas.

Con todo ello se pretende demostrar la necesidad de la experimentación con modelos a escala en el ámbito de la energía proveniente del oleaje.

1.3.2. Necesidad de experimentación con modelos a escala

A diferencia de la energía eólica, la situación actual muestra una gran variedad de sistemas de captación de la energía del oleaje. Estos se encuentran en distintas fases de desarrollo, compitiendo entre ellos y sin que haya una evidencia de cuál terminará siendo la tecnología idónea.

Durante los últimos quince años, la mayor parte de la actividad R&D en energía de las olas ha tenido lugar en Europa, principalmente debido al financiamiento y la coordinación de manos de la Comisión Europea. Sin embargo, en los últimos años el interés por estos sistemas de aprovechamiento de energía ha crecido en otras partes del mundo.

Generalmente, el desarrollo, desde el concepto inicial hasta un marco comercial, ha sido complicado, lento y costoso. A pesar del progreso logrado en el modelaje teórico y numérico de convertidores de la energía del oleaje, la necesidad de realizar ensayos en los denominados “*wave tanks*” sigue siendo esencial. El escenario final consiste en realizar pruebas bajo condiciones de mar reales. En prácticamente la totalidad de los sistemas desarrollados, la óptima absorción de energía de las olas supone algún tipo de resonancia, lo que implica que la geometría y el tamaño de la estructura está relacionada con la longitud de ola. Por esta razón, si se quisieran probar las estructuras y sistemas conceptuales en mar abierto, estas deberían ser grandes. Es por ello que en este tipo de captación de energía sea difícil seguir la estela de la energía eólica: primeramente, se desarrollaron máquinas pequeñas que fueron aumentando en tamaño y potencia a medida que el mercado evolucionaba.

Como se ha mencionado anteriormente, es interesante y prudente probar los WECs (Wave Energy Converters) desarrollados mediante un sistema de aumentación del modelo a escala, logrando así una reducción de riesgos técnicos y financieros. Este mecanismo es posible

mejorando el conocimiento científico desde el modelo conceptual hasta un modelo a gran escala mediante el cual se verifican los factores económicos.

Los resultados de un programa de pruebas sobre un cierto WEC arrojan información sobre los siguientes objetivos:

- Verificación del concepto.
- Validación y calibración de modelos numéricos.
- Cuantificación de variables ligadas a la ejecución.
- Suministro de datos de carga ambiental para permitir la mejora del diseño, incluidos amarres y cimientos.
- Identificación y desarrollo de la comprensión de la hidrodinámica y otros procesos físicos relevantes.
- Provisión de datos para el diseño de un rendimiento optimizado.
- Evaluación de la economía.
- Calificación de la capacidad de manejo del mar del dispositivo y la navegabilidad general.
- Supervivencia (modelos a gran escala en sitios benignos).
- Impacto ambiental (modelos a gran escala en sitios benignos).

Como se ha explicado, uno de los puntos clave para poder llegar al objetivo último de un prototipo para la explotación comercial es poder tener las infraestructuras necesarias para ensayar, investigar y demostrar el funcionamiento de dispositivos a escala mayor a la de laboratorio. En Europa existen actualmente cuatro instalaciones base:

- **EMEC (European Marine Energy Centre, Orkney, Gran Bretaña).**

Esta base ubicada en las islas Orkney en Escocia se encuentra operativa desde 2005. Su objetivo es probar el funcionamiento de diferentes tipos de captadores. Dispone de cuatro amarres de 2,2MW cada uno. Actualmente es la única infraestructura a escala real que existe.

- **WAVE HUB (Cornwall, Gran Bretaña).**

Consta de una superficie de 8km² situada a más de 10 millas de la costa y con una profundidad de 50 metros. Consta de 4 amarres de 5MW cada uno.

- **MARINE INSTITUTE (Galway, Irlanda).**

Dispone de una superficie de 37 hectáreas a una profundidad de unos 30 metros. Cuenta con una boya que ha recogido datos de oleaje, llegando a la conclusión de que el lugar es óptimo para dispositivos a escala 1:3 a 1:5.

- **ZONA PILOTO (Portugal).**

Situada en el norte de Portugal, tiene especial interés debido al proyecto pre-comercial de dispositivos Pelamis. En la primera fase del proyecto se colocaron tres unidades de 750kW para, en la segunda fase, aumentar el número hasta un máximo de 30 para la explotación a nivel comercial.

1.3.3. Actividades y procedimientos

- **Análisis del estado del arte:**
 - Estado actual de la energía del mar.
 - Conceptos fundamentales de la teoría de olas, generación, tipos de ondas y ecuaciones que las gobiernan.
 - Clasificación y descripción de los dispositivos diseñados para la captación de energía del oleaje.
 - Potencial de la energía del oleaje a nivel mundial y, más concretamente, en la costa vasca.
 - Análisis de diversos sistemas de disipación de la energía proveniente de las olas.
- **Metodología experimental:**
 - Establecimiento de condiciones de oleaje que definen olas regidas por la teoría lineal.
 - Diseño del sistema de disipación con diversos ángulos para, así, crear distintas playas.
 - Caracterización de los sensores necesarios para la captación de datos.
 - Registro de las mediciones de los sensores.
- **Tratamiento de los datos experimentales:**
 - Establecimiento del intervalo temporal en el que las mediciones experimentales son representativas del caso de análisis.
 - Ajuste sinusoidal y cálculo de los parámetros características de cada ola incidente.
 - Representación del perfil de la onda envolvente.
 - Cálculo del coeficiente de reflexión para cada onda.
 - Comparación y establecimiento de una relación entre los coeficientes de reflexión y cada sistema de disipación.

1.4. Beneficios que aporta el trabajo

Con este Trabajo Fin de Grado se busca potenciar el estudio experimental que es necesario llevar a cabo para el desarrollo de la energía proveniente del medio marino. Como se verá en capítulos posteriores, el aprovechamiento de la energía undimotriz se encuentra en pleno desarrollo y, es por eso, que es fundamental profundizar en el análisis experimental para determinar qué modelos, prototipos e infraestructuras son las adecuadas para su correcta futura explotación.

En este contexto, el trabajo se centra en estudiar la relación entre el coeficiente de reflexión de diversas ondas de parámetros conocidos y la geometría del sistema de extinción, principalmente en función de su pendiente. De esta forma será posible verificar experimentalmente varias teorías desarrolladas y presentadas a lo largo del siglo XX.

Se realizará un análisis de distintos sistemas de disipación para determinar cuál presenta mejores prestaciones en función del tipo de ola incidente. Las ondas variarán en amplitud y período y se tratarán, inicialmente, aquellas de igual período pero de amplitudes distintas y, a continuación, aquellas de período distinto e igual amplitud. De esta forma se pretende analizar la influencia de estos dos parámetros en el cálculo del coeficiente de reflexión y, por tanto, en la optimización de los sistemas de disipación del oleaje.

En cuanto a beneficios más concretos, la metodología llevada a cabo para el análisis del coeficiente de reflexión puede ser utilizada para futuros análisis en el tanque grande del laboratorio de mecánica de fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Si bien es cierto que el sistema de extinción utilizado en los dos tanques es distinto, tanto el flujo de tareas como el método utilizado y las herramientas necesarias para realizar los ajustes correspondientes pueden ser perfectamente extrapolados a este caso.

Otra posibilidad sería verificar los resultados experimentales mediante un estudio CFD y así comprobar la autenticidad de las conclusiones obtenidas en este trabajo.

De esta forma, este trabajo no sólo profundiza en un tema en concreto, sino que sirve de introducción para trabajos y estudios posteriores en el ámbito de la captación de la energía del oleaje y, más en detalle, en la influencia de los sistemas de extinción en la reflexión de la ola incidente.

1.5. Conceptos fundamentales del oleaje

1.5.1. Introducción

En esta sección se van a introducir los fundamentos del oleaje, desde su generación hasta su propagación, así como las magnitudes que permiten medir las características de una ola. De la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, una fracción se invierte en un calentamiento desigual de la misma, lo que provoca en la atmósfera zonas de altas y bajas presiones, generando desplazamientos del aire (viento) de mayor o menor intensidad. El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar.

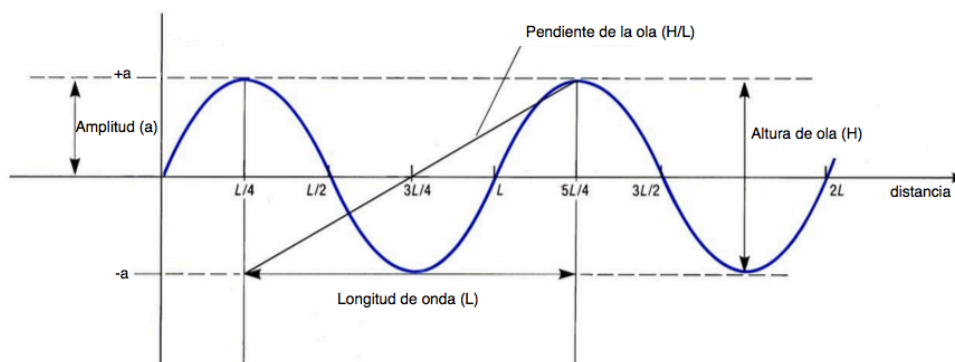


Figura 1.5-1. Características generales de una ola.

1.5.2. Clasificación y comportamiento del oleaje

Existen diversas formas de clasificar el oleaje. Posiblemente la clasificación mayoritaria sería la siguiente, en la que destacan dos grandes grupos:

- Las **ondas estacionarias**: aquellas en las que existen uno o más puntos en los cuales el movimiento es nulo (puntos nodales) y uno o varios puntos en los que el desplazamiento es máximo (puntos ventrales).
- Las **ondas progresivas o transitorias**: aquellas que varían en el tiempo y en el espacio, pudiendo formarse tanto en la superficie como en el seno de la masa oceánica.

Aparte de esta clasificación, cabe destacar aquellas que atienden a los parámetros físicos que ocasionan o disipan la perturbación (fuerzas perturbadoras y restauradoras), y las que distinguen las características intrínsecas de la onda (período y longitud de onda).

Según las fuerzas **perturbadoras**:

- Ondas generadas por el viento u otros agentes atmosféricos. Las primeras tienen asociada la mayor cantidad de energía y períodos del orden de segundos a minutos. Otros agentes perturbadores pueden ser tormentas, un cambio de presión atmosférica que produzca un agitación en resonancia del agua (seiche)...

- Ondas generadas por la atracción de los astros. Fuerzas gravitatorias de la Luna y el Sol que provocan ondas largas conocidas como mareas, con períodos de 12 a 24 horas.
- Ondas generadas por terremotos, conocidas como tsunamis. Son ondas de período largo y progresivas, frecuentes en el Pacífico, que se propagan de una costa a otra o desde el epicentro oceánico hasta las costas, provocando a menudo cuantiosos daños.

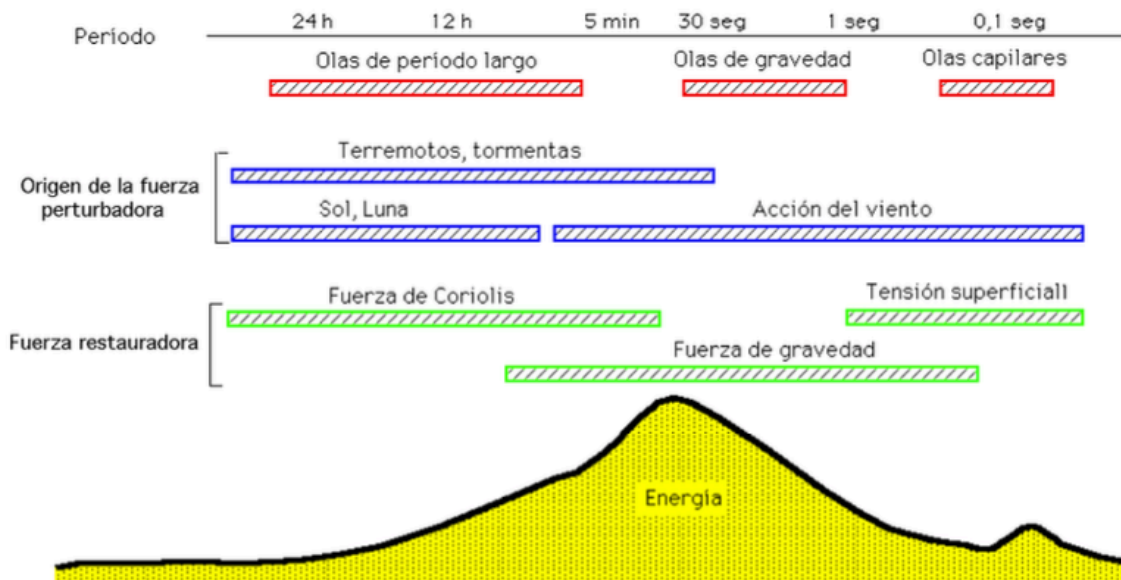


Figura 1.5-2. Representación esquemática de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de la energía en ellas contenida. (Fernández Díez, P. 2004)

Según las fuerzas **restauradoras**:

- Fuerza de Coriolis. Únicamente tiene una afección significativa para las ondas de períodos mayores a 5 minutos, como pueden ser las mareas.
- Fuerza de gravedad. Actúa verticalmente y afecta a períodos del orden de segundos a minutos. Es la fuerza restauradora que actúa en las olas que contienen la mayor parte de la energía.
- Tensión superficial. Predomina en las ondas de longitud y períodos cortos, es decir, en las primeras olas en formarse cuando empieza el viento. En este rango de períodos se opone, principalmente, a la fuerza del viento.

Según el **tiempo de aplicación** de la fuerza perturbadora:

- Ondas libres. Generadas por una aplicación instantánea de la fuerza perturbadora que cesa al momento y deja evolucionar libremente a la ola.
- Ondas forzadas. A diferencia de las anteriores, la perturbación se aplica de una forma continuada. Un ejemplo son las mareas.

Según el **período de duración:**

- Olas de período largo (5 minutos a 24 horas). Estarían en este grupo las mareas, los tsunamis y el resto de olas provocadas por terremotos y tormentas.
- Olas de gravedad (1 a 30 segundos). A este grupo corresponden las olas cuya fuerza restauradora principal es la gravedad. Esta provoca una oscilación o movimiento orbital de las partículas de agua.
- Olas capilares (menos de 0,1 segundos). Tienen un papel importante en la transferencia de energía del aire al agua para formar las corrientes superficiales; sin embargo, no representan una energía significativa dentro del conjunto global.

Es imprescindible diferenciar la forma del perfil de la onda, que en una onda transitoria se mueve con velocidad $\dot{\xi}$, y la trayectoria del movimiento de las partículas de agua que constituyen la ola. Con esto se puede explicar el hecho de que las olas se trasladan, pero no las partículas de agua, que se mueven en trayectorias elípticas o circulares.

El desplazamiento horizontal de las partículas de una ola, situadas en la misma horizontal, es el mismo ya que su trayectoria circular tiene el mismo radio, pero están desfasadas. Por otra parte, el desplazamiento vertical varía por la diferencia geométrica de su trayectoria, pese a estar en fase con las de otros niveles.

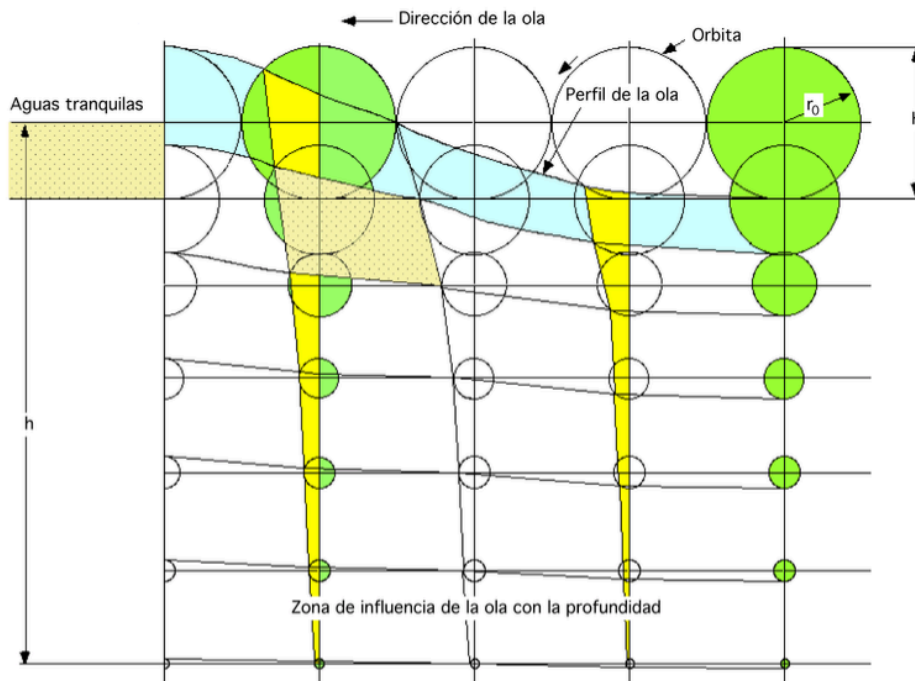


Figura 1.5-3. Movimiento de las partículas de agua en una ola. (Fernández Díez, P. 2004)

Las olas que se propagan en aguas profundas ($\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$) describen un movimiento orbital casi circular, ya que la profundidad es suficiente como para que el fondo marino no afecte al mismo.

En este tipo de olas, las órbitas disminuyen exponencialmente con la profundidad según la relación:

$$r = r_0 \cdot e^{-\frac{2\pi}{\lambda}h}$$

siendo r_0 el radio orbital superficial que coincide con la semialtura $H/2$ de la ola.

Cuando la ola se propaga en aguas intermedias ($\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$) las órbitas sufren un proceso de aplastamiento, convirtiéndose en movimientos elipsoidales.

Finalmente, cuando la ola se propaga en aguas poco profundas ($\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{20}$) el movimiento se convierte en una oscilación puramente longitudinal.

1.5.3. Estudio del oleaje

A la hora de hacer un estudio sobre el aprovechamiento de la energía del oleaje, es necesario conocer el flujo medio de energía por metro de ancho de frente de olas. Como se ha desarrollado anteriormente, las olas representan un movimiento de energía, ya que sus partículas se mueven en órbitas circulares. Este flujo puede descomponerse en energía cinética (como consecuencia del movimiento circular de las partículas) y en energía potencial (debida a la elevación de las partículas por encima del nivel del mar).

Las técnicas de estudio del oleaje pueden clasificarse en técnicas de oleaje regular y oleaje irregular.

1.5.3.1. Oleaje regular

Se considera oleaje regular aquel en el cual las olas son periódicas, es decir, aquellas ondas en las cuales los parámetros característicos descritos anteriormente se mantienen constantes a lo largo del tiempo para un mismo punto.

Existen diversas teorías que describen el oleaje regular y es por ello que es imprescindible definir el dominio de trabajo. Para los dispositivos *offshore*, las olas superficiales tienen una altura muy pequeña comparada con su longitud, asemejándose a ondas sinusoidales. La teoría que mejor define este tipo de oleaje es la teoría de Stokes de primer orden, también denominada teoría lineal de ondas o teoría de Ayri.

Para dispositivos *nearshore*, aquellos situados cerca de la costa, las olas se vuelven asimétricas debido al efecto del fondo marino. Es por ello que, para este dominio, la teoría que mejor se adapta es la teoría de Stokes de 2º orden.

Finalmente, para dispositivos *onshore* situados en la costa, las teorías que mejor se aproximan al perfil de la ola son las teorías de la onda solitaria o la cnoidal.

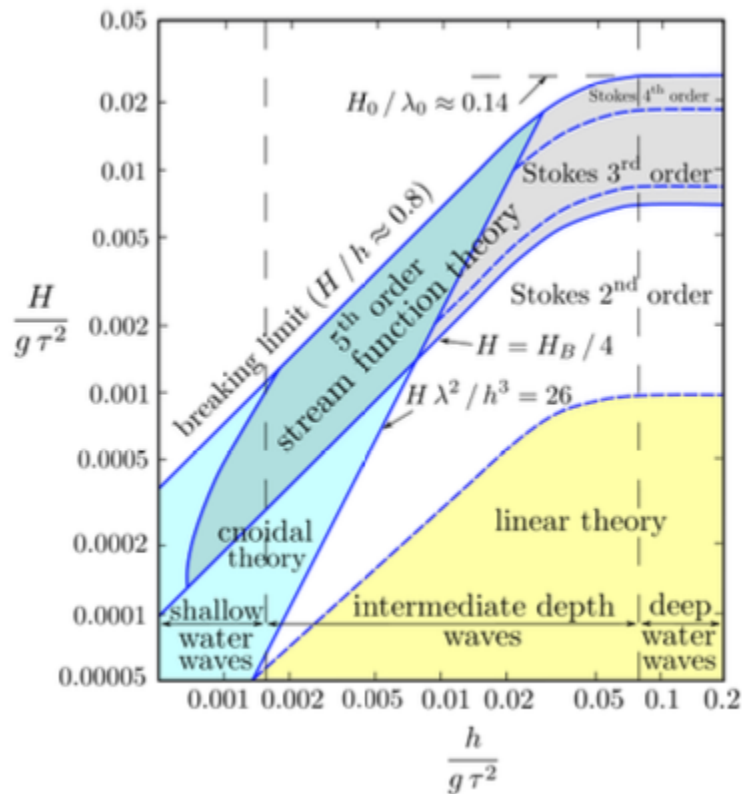


Figura 1.5-4. Diagrama de Le Méhauté

El gráfico de Le Méhauté (1976) permite determinar el rango de validez de cada una de estas teorías. Este establece una relación entre la altura de ola y profundidad del mar con el cuadrado del período por la gravedad.

Otra forma de determinar el rango de aplicación de cada una de las teorías citadas es el número adimensional de Ursell, en que:

$$U_r = \frac{H \lambda^2}{h^3}$$

Según el cual:

Se aplica la teoría de Stokes si $U_r < 21,6$

Se aplican otras teorías si $U_r > 21,6$

1.5.3.1.1. Teoría lineal de ondas o teoría de Ayri

La propagación del oleaje en un fluido es un proceso no lineal; sin embargo, su análisis se puede simplificar con algunas consideraciones:

- Para el estudio del movimiento ondulatorio se considera que las fuerzas principales son las de la gravedad y las producidas por las diferencias de presión, suponiendo que el fluido es no viscoso ($\mu = 0$) y que se pueden despreciar las tensiones tangenciales.
- Se considera el agua como un fluido incompresible ($\rho = 0$).
- Se reduce el movimiento tridimensional a una componente horizontal (u) y otra vertical (v).
- Se dará por bueno el movimiento irrotacional $\nabla \times \vec{u} = 0$ y, por tanto, poder definir un potencial de velocidades tal que $\nabla \phi = \vec{u}$.
- El fondo se toma como fijo e impermeable.
- La ola se considera como periódica y regular.
- Son despreciables el efecto de Coriolis y las pérdidas de energía por rotura de la ola.

El resultado de las simplificaciones mencionadas es conocido como la teoría de ondas lineal, teoría de Ayri o teoría de Stokes de primer orden. En dicha teoría el perfil de ola es simétrico y viene descrito por una función progresiva coseno de amplitud igual a la mitad de su altura:

$$y(x, t) = A \cdot \cos(kx - \omega t)$$

siendo ω la frecuencia angular y k el número de onda.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

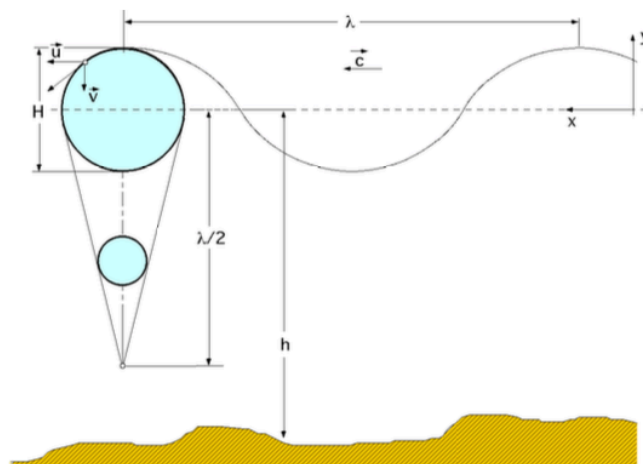


Figura 1.5-5. Perfil de la ola de Ayri. (Fernández Díez, P. 2004)

Por otro lado, resulta importante recordar la llamada ecuación de dispersión, que relaciona la celeridad con la profundidad y la longitud de onda.

La **celeridad** (c), también llamada velocidad de traslación, es la relación entre la longitud de onda (λ) y el período (T). Es decir:

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

Como se puede observar, la velocidad de traslación o propagación (c) depende de la profundidad (h). La ecuación de dispersión se escribe como:

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g \frac{2\pi}{\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi}{\lambda} h\right)$$

Relacionando las dos ecuaciones anteriores, se reescribe la celeridad de la onda de la siguiente forma:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$$

Por tanto, se concluye, de la ecuación anterior, que mientras mayor sea el período de una onda, más rápido viajará. Esto es fundamental para comprender lo que se conoce como dispersión: las olas son dispersivas en frecuencia. Esto significa que las olas, cuando se propagan hacia la costa, van separándose y ordenándose en grupos en función de sus períodos.

En aguas poco profundas $\lambda/20 < h < \lambda/2$, las ecuaciones se convierten en:

$$c = f(h) = \sqrt{gh}$$

$$\lambda = \sqrt{gh} \cdot T$$

que se corresponde con las ondas largas, en las que la celeridad c es independiente de λ y depende sólo de la profundidad h del mar.

En canales de profundidad limitada:

$$c = \sqrt{g(h + H)}$$

A la hora de analizar la rotura de la ola, hay que tener en cuenta los valores de la velocidad (u,v) del movimiento tangencial de las partículas de agua en la ola, que son de la forma:

$$\text{Componente horizontal: } u = \frac{\pi H \cosh\left\{\frac{2\pi}{\lambda}(y+h)\right\}}{T \sinh\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right)} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

$$\text{Componente vertical: } v = \frac{\pi H \sinh\left\{\frac{2\pi}{\lambda}(y+h)\right\}}{T \sinh\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right)} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

Las ecuaciones anteriores se transforman en:

- En aguas profundas:

$$\text{Componente horizontal: } u = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

$$\text{Componente vertical: } v = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

- En aguas poco profundas:

$$\text{Componente horizontal: } u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{H}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

$$\text{Componente vertical: } v = \frac{\pi H}{T} \frac{y+H}{h} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

La ola rompe cuando la componente horizontal de la velocidad de las partículas de agua se iguala a la celeridad ($u = c$), proceso que va acompañado de una importante pérdida de energía; la condición de rotura implica que:

$$\sqrt{g h} = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{H}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right) = |x = 0; t = 0; H = H_r| = \frac{H_r}{2} \sqrt{\frac{g}{h}}$$

siendo H_r la altura de la ola al romper.

Podemos resumir todas las expresiones anteriores que definen el oleaje regular según la teoría de Ayri en la siguiente tabla:

Tabla 1.5-1. Ecuaciones de la teoría de Ayri

Profundidad relativa	Aguas poco profundas $\frac{1}{20} > \frac{h}{\lambda}$	Aguas intermedias $\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$	Aguas profundas $\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$
Perfil η	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T} \right]$	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T} \right]$	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T} \right]$
Celeridad C	$C = \sqrt{gh}$	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left[\frac{2\pi h}{\lambda} \right]$	$C = C_0 = \frac{gT}{2\pi}$
Longitud onda λ	$\lambda = T\sqrt{gh}$	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left[\frac{2\pi h}{\lambda} \right]$	$\lambda = \lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$
Velocidad de grupo C_g	$C_g = C = \sqrt{gh}$	$C_g = \frac{C}{2} \left[1 + \frac{4\pi h/\lambda}{\sinh 4\pi h/\lambda} \right]$	$C_g = C/2 = \frac{gT}{4\pi}$
Velocidad de la particular de agua	$u = \frac{H}{2} \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{h}} \cos\theta$	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{\lambda} \frac{\cosh [2\pi(h+z)/\lambda]}{\cosh [2\pi h/\lambda]} \cos\theta$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{\lambda}} \cos\theta$
Horizontal, u			
Verical, w	$w = \frac{H\pi}{T} \left[1 + \frac{z}{h} \right] \sin\theta$	$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{\lambda} \frac{\sinh [2\pi(h+z)/\lambda]}{\cosh [2\pi h/\lambda]} \sin\theta$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{\lambda}} \sin\theta$

En una ola, cada partícula está dotada de energía cinética y energía potencial. La energía de una onda regular - en la que los valores de la longitud de onda λ y del período T permanecen constantes - es la suma de la energía potencial E_p y la cinética E_c :

$$E = E_p + E_c = \frac{\rho g \lambda b H^2}{8}$$

donde ρ es la densidad del agua en kg/m^3 ; H es la altura de la ola (distancia entre la cresta y el valle) y b es la anchura de la cresta o longitud del frente de ondas.

En aguas profundas:

$$E = E_p = E_c = \frac{\rho g \lambda b H^2}{16} =$$

$$\left| \lambda = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \right) \right| = \frac{\rho g^2 T^2 b H^2}{32\pi} \tanh \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \right) = \left| \tanh \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \right) \approx 1 \right| = 979,2 b T^2 H^2$$

Como se puede apreciar, la energía de las olas depende del cuadrado de su altura H, y, por lo tanto, la disminución de esta altura con la profundidad h es importante en el estudio de la distribución de la energía de las olas en profundidad. La determinación de la presión ejercida por una ola contra un obstáculo, debido a la transferencia de su energía cinética sobre el mismo, es de gran interés para el aprovechamiento de la energía de las olas. La presión de las olas varía, al igual que la energía, con el cuadrado de la amplitud y se atenúa con la profundidad en forma exponencial.

En lo que se refiere a la potencia de la ola, la potencia N_L del frente de onda por unidad de longitud $b = 1$, es:

$$N_L = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H}{2}\right)^2 c \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{\lambda}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)}\right) = \rho g \left(\frac{H}{2}\right)^2 c_g \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

siendo c_g la velocidad del grupo de olas que es diferente de la celeridad, de la forma:

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{\lambda}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)}\right)$$

En lo que respecta a la potencia media del frente de onda por unidad de longitud:

$$\hat{N}_L = \frac{\rho g H^2 T}{32 \pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right) \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{\lambda}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)}\right)$$

Más allá de estos parámetros, cabe analizar el efecto de la reflexión, ya que será objeto de estudio en este trabajo.

Este fenómeno se produce cuando la ola choca contra un obstáculo o barrera vertical, la ola se refleja con muy poca pérdida de energía. Este hecho produce que, si el tren de olas es regular, se sumen las ondas incidente y reflejada generando una onda estacionaria en la que se anulan mutuamente los movimientos horizontales, permaneciendo únicamente los movimientos verticales, de doble altura, por lo que de doble energía.

1.5.3.1.2. Teoría no lineal de Stokes de 2º orden

La teoría de Stokes de 2º orden analiza el comportamiento de la ola no lineal. El perfil de estas olas que se generan en aguas intermedias y poco profundas se caracteriza por presentar unas crestas más altas y delgadas y senos más planos y anchos.

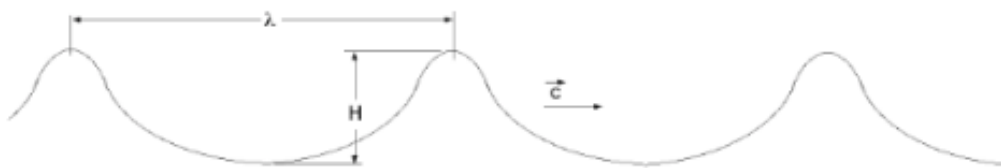


Figura 1.5-6. Ola no lineal (Stokes)

Al igual que en la teoría de Ayri, la ola está formada por la superposición de varias olas. Por esta razón es imprescindible distinguir la celeridad o velocidad de fase c y la velocidad a la que se mueve el conjunto de olas o envolvente, c_g o velocidad de grupo.

A continuación se presentan las ecuaciones que definen el oleaje regular según la teoría de Stokes de 2º orden.

Tabla 1.5-2. Ecuaciones de la teoría de Stokes de 2º orden

Profundidad relativa	Aguas intermedias $\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$
Perfil η	$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{2L} \frac{\cosh(kh) [2 + \cosh(2kh)]}{(\sinh(kh))^3} \cos(kx - \omega t)$
Celeridad C	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left[\frac{2\pi h}{\lambda}\right]$
Longitud onda λ	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left[\frac{2\pi h}{\lambda}\right]$
Velocidad de grupo C_g	$C_g = \frac{C}{2} \left[1 + \frac{4\pi h/\lambda}{\sinh 4\pi h/\lambda}\right]$
Velocidad de la particular de agua Horizontal, u	$u = \frac{\pi H g T}{T \lambda} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{\lambda}\right) c \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - \omega t)$
Verical, w	$w = \frac{\pi H g T}{T \lambda} \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{\lambda}\right) c \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - \omega t)$

En la teoría de Stokes 2º orden, a diferencia de la teoría de Ayri, se considera que hay un transporte neto de moléculas de agua en el sentido de avance la ola.

Para desarrollar el potencial energético se procede del mismo modo que en la teoría lineal. En la teoría no lineal, no obstante, los valores de energía cinética y potencial están corregidos mediante los parámetros característicos de la ola, donde la energía es función de la profundidad h .

1.6. Sistemas de captación de la energía del oleaje

1.6.1. Introducción

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, hoy en día el sector de las energías renovables se encuentra en pleno auge a causa de la creciente preocupación por la dependencia de las energías fósiles y la contaminación que estas producen. Todas ellas son dependientes de una forma u otra de las subvenciones del estado o de la Unión Europea. En una primera etapa en la cual este tipo de energías no son competitivas resulta evidente la necesidad de que exista un organismo que invierta en la investigación y posterior desarrollo de energías alternativas.

La energía undimotriz es un recurso que presenta en la actualidad muchos retos tecnológicos y sociales a superar. Gran Bretaña es, a nivel europeo, el país pionero en este tipo de dispositivos, gracias al apoyo institucional en inversiones de I+D+i y al alto potencial disponible en sus costas. A pesar de que existen multitud de diseños de prototipos, algunos de los cuales se han llegado a reproducir a escala reducida y otros más avanzados a escala real, ninguna tecnología ha logrado imponerse al resto.

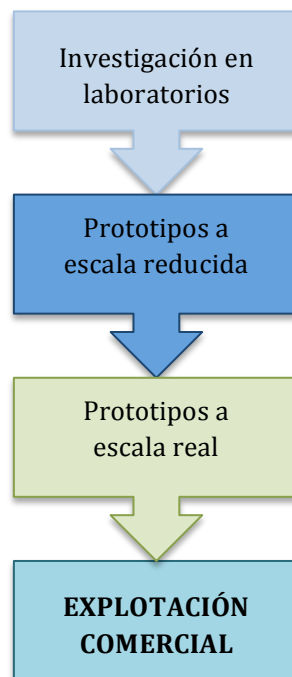


Figura 1.6-1. Diagrama del proceso evolutivo de los dispositivos

La utilización de la energía del oleaje implica la utilización de una cadena de procesos de conversión de energía, cada uno de los cuales está caracterizado por su eficiencia y una serie de limitaciones que introduce, por lo que debe ser controlado.

Si el aparato debe ser un absorbente eficaz, su frecuencia de oscilación debería ser aquella de las olas que actúan con él, i.e. debería operar cerca de las condiciones de resonancia. Sin embargo, esto implica ciertos problemas: (i) excepto si el cuerpo (o el OWC) es lo suficientemente grande, su frecuencia de oscilación va a ser mucho más grande que la frecuencia de oscilación típica de las olas en el océano; (ii) el oleaje real no tiene una sola frecuencia.

Para un cuerpo con un solo modo de oscilación en olas regulares, la resonancia ocurre cuando la velocidad del cuerpo está en fase con la fuerza de excitación. Actuar en el PTO para conseguir esta coincidencia de fase se denomina control de fase.

Como hemos comentado anteriormente, la frecuencia de resonancia ω de los absorbentes es, generalmente, mayor que la frecuencia típica del oleaje en mar abierto.

$$\omega = \left(\frac{\rho g S + K}{m + A(\omega)} \right)^{1/2}$$
$$C = B(\omega)$$

La primera de las ecuaciones representa una condición de resonancia: la parte derecha indica la frecuencia de oscilaciones libres de un oscilador mecánico de masa $m + A$ sin amortiguación y con un resorte de rigidez $\rho g S + K$. La segunda ecuación expone que el amortiguamiento de PTO óptimo debería ser igual al amortiguamiento de radiación.

Tal y como se puede apreciar en la primera ecuación, la solución ω puede disminuir permitiendo que la rigidez K del resorte adquiera valores negativos. A esto se le denomina control de fase reactivo. Aparte de la impracticabilidad que una rigidez negativa conlleva, esto introduce otro problema. Como la fuerza PTO no está en fase con la velocidad del absorbente, la dirección del flujo de energía toma la dirección inversa durante parte del ciclo de la ola, con consecuencias negativas si los picos de potencia reactivos no son pequeños y las pérdidas (por fricción) son significantes en el proceso de transferencia de energía.

A diferencia de las torres eólicas, existe una gran variedad de tecnologías capaces de captar la energía del oleaje que dependen de la profundidad y la ubicación, además de los diferentes modos en los que esta energía puede ser absorbida.

A la hora de clasificar los sistemas captación del oleaje, una de las distinciones más frecuentes se hace en función de su distancia a la costa. En general, a medida que aumenta esta distancia, la densidad de energía es mayor, pero la supervivencia está más comprometida y existe una mayor complicación para el transporte de la energía generada, por lo que hay que encontrar un compromiso entra la supervivencia del dispositivo y la densidad de energía. Se reconocen tres zonas:

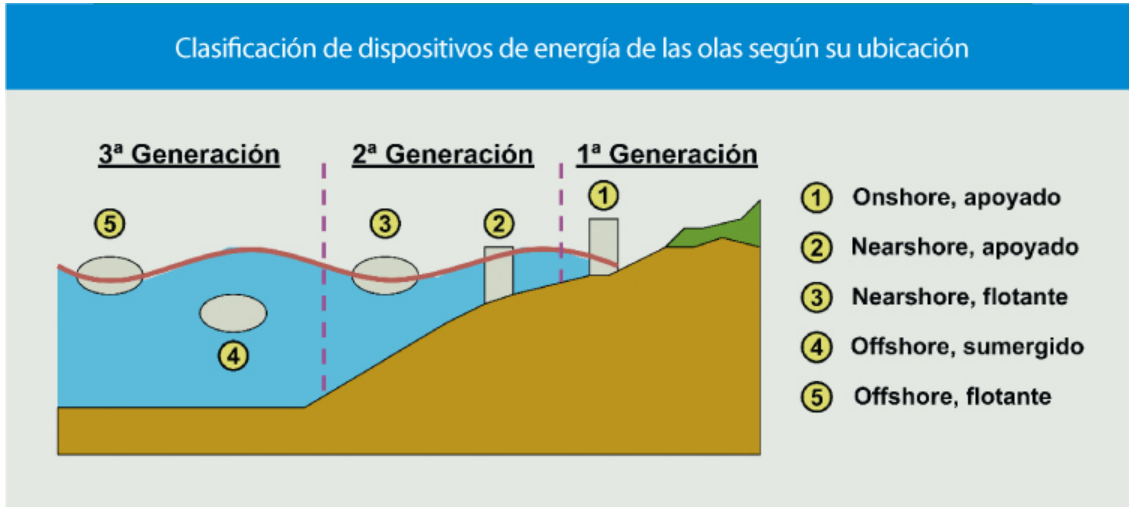


Figura 1.6-2. Clasificación de dispositivos según su ubicación. (José Luis Villate Martínez, Ruiz-Minguela, & Pérez Morán, 2012)

1.6.2. Tipos de infraestructura

Como se ha podido ver atendiendo al diagrama del proceso evolutivo de los dispositivos de captación de energía del oleaje representado en el apartado anterior, existen varios tipos de infraestructuras en las que analizar los sistemas antes de su explotación comercial:

- **Canales de pruebas.** Se utilizan para analizar el comportamiento hidrodinámico de prototipos a pequeña escala y, así, verificar que su diseño es adecuado.
- **Infraestructuras de test.** Se trata de prototipos a escala 1/10 o 1/3. Las pruebas se realizan en medio marino restringido y limitado.
- **Infraestructuras de demostración.** Son prototipos a escala real probados en mar abierto y conectados a la red eléctrica.

Entre los laboratorios de experimentación marítima se encuentran:

- El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, en Madrid, está compuesto por varias entidades especializadas en diferentes materias. Cabe destacar el CEH (Centro de Estudios Hidrográficos) que se centra en los aspectos relacionados con la calidad del recurso hídrico y el CEPYC (Centro de Estudios de Puertos y Costas).
- El Laboratorio de Dinámica de Flujos Ambientales, en la Universidad de Granada (UGR), en el que se pueden encontrar un canal de generación de ola-corriente, un tanque de oleaje multidireccional, un canal basculante y un tanque de difusión.

Sin embargo, tal y como se ha podido ver en el capítulo 1.3. son pocas las instalaciones, a nivel europeo, que han ensayado en el mar a escala natural.



Figura 1.6-3. Fotografía del laboratorio de la UGR



Figura 1.6-4. Fotografía del CEPYC

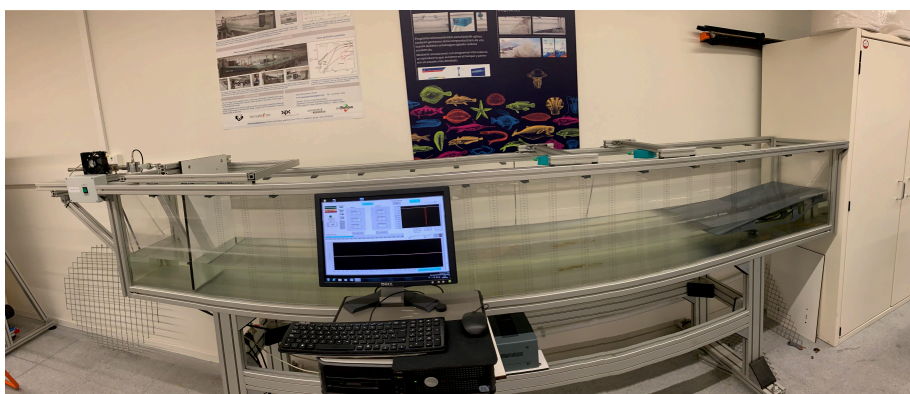


Figura 1.6-5. Fotografía del tanque ("flume") del laboratorio de mecánica de fluidos de la EIB

1.6.3. Clasificación de los sistemas de captación

1.6.3.1. En la costa (“onshore”)

Estos sistemas ocasionalmente denominados de primera generación se colocan cerca de la costa. Generalmente, están fijados al fondo marino o a acantilados rocosos, lo que facilita su instalación y mantenimiento, ya que no requieren anclajes profundos ni cableado eléctrico subacuático de gran longitud. El menor clima de oleaje en la costa está parcialmente compensado por la concentración de energía de oleaje natural debida a la refracción y/o difracción. El sistema de primera generación más utilizado es la OWC.

1.6.3.1.1. Columna de agua oscilante (Oscillating Water Column, OWC)

La Columna de Agua Oscilante (OWC) está formada por una estructura de hormigón o acero parcialmente sumergida con una apertura bajo la superficie en la cual el aire es atrapado sobre la superficie libre interna del agua. La oscilación de esta superficie debida al oleaje incidente hace que el aire fluya a través de una turbina conectada a un generador eléctrico. La turbina Wells de flujo axial tiene la ventaja de no necesitar válvulas rectificantes. El área transversal de estas OWC se sitúa en un rango de 80-250m², mientras que la potencia instalada es de 60-500kW. Los rendimientos suelen ser del 30-35% y pueden estar instalados en estructuras fijas, móviles o flotantes, o bien sobre el lecho rocoso de la costa o aprovechando instalaciones portuarias.

Se ha demostrado tanto teórica como experimentalmente que el proceso de absorción de energía del oleaje puede ser mejorado realizando unos salientes en las paredes en la dirección de las olas formando así un puerto o colector.

El diseño y la construcción de las estructuras son las cuestiones más críticas en la tecnología OWC, así como las que mayor influencia tienen en la economía y en la energía producida.

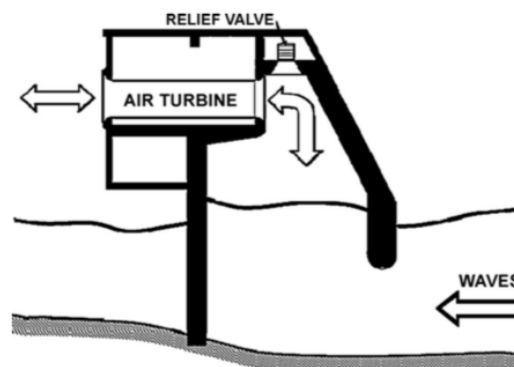


Figura 1.6-6. Representación esquemática de una OWC de estructura fija (Pico). (Falcao, 2009)

Las OWC flotantes disponen de una geometría distinta, siendo el Backward Bent Duct Buoy (BBDB) el sistema más utilizado. En las BBDB, el canal de la OWC está recostado respecto a la dirección de la ola incidente. De esta forma, la longitud de la columna de agua puede hacerse lo suficientemente grande como para conseguir la resonancia, mientras se mantiene el calado de la estructura flotante dentro de unos límites aceptables.

La estructura típica posee las siguientes dimensiones: una longitud de 50m, una anchura de 30m, un calado de 12m y un desplazamiento de 4400t. Está compuesta de tres cámaras de aire situadas en el frente, conectadas cada una de ellas a una turbina Wells. La potencia total es de en torno a 110kW.

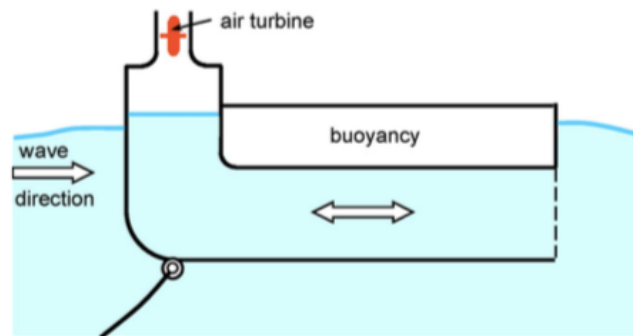


Figura 1.6-7. Representación esquemática del BBDB. (Falcao, 2009)

1.6.3.2. Cerca de la costa (“nearshore”)

Son aquellos dispositivos situados a una distancia máxima de 500 metros de la costa y a una profundidad que oscila entre los 20 y 30 metros. Pueden estar apoyados en el fondo o ser flotantes. Al igual que en el caso de los dispositivos *onshore*, presentan la ventaja de tener un coste de instalación y mantenimiento menor que en aguas profundas. No obstante, el mayor inconveniente es, además del impacto visual, que su instalación implica la modificación de la dinámica costera.

Uno de los dispositivos principales *nearshore* es la OWC de Port Kembla, Australia. Este prototipo de columna de agua oscilante está situado a 200 metros de la costa y utiliza una pared parabólica para focalizar la energía de las olas. Es capaz de generar potencias superiores a 320kW.

Otra tecnología importante es la denominada *Oyster*. Este concepto, instalado en el European Marine Energy Centre (EMEC), consta de un flotante y una solapa unida al fondo marino. Esta solapa que se encuentra prácticamente en su totalidad sumergida, se mueve hacia atrás y hacia delante debido a las olas cercanas a la costa. El movimiento de la aleta impulsa dos pistones hidráulicos que empujan el agua a alta presión en tierra para impulsar una turbina hidroeléctrica convencional.

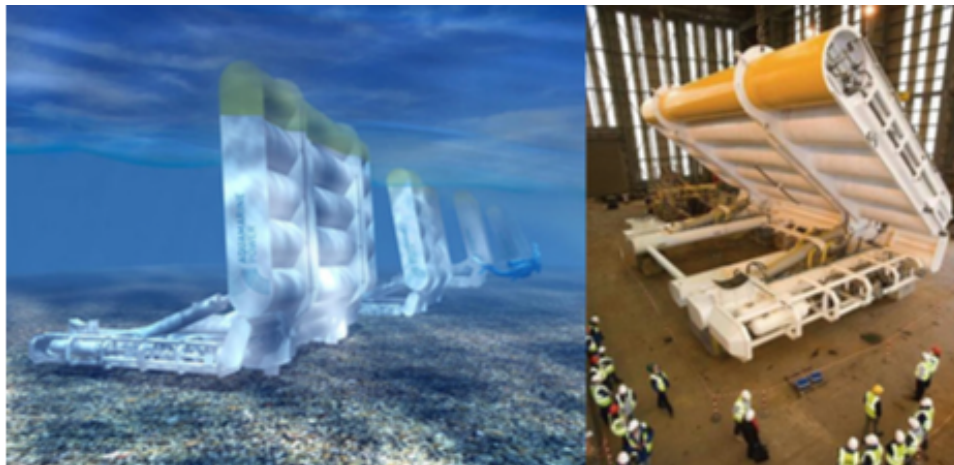


Figura 1.6-8. Esquema y fotografía del sistema Oyster.

Cabe mencionar, además, el Wave Roller. Este dispositivo consiste en una placa anclada al fondo marino que se mueve gracias al movimiento oscilatorio del oleaje. Generalmente se disponen entre 3 y 45 placas, proporcionando una potencia nominal de 13kW por placa. Al estar completamente sumergido, se evita el impacto visual y acústico causado por el resto de sistemas mencionados.

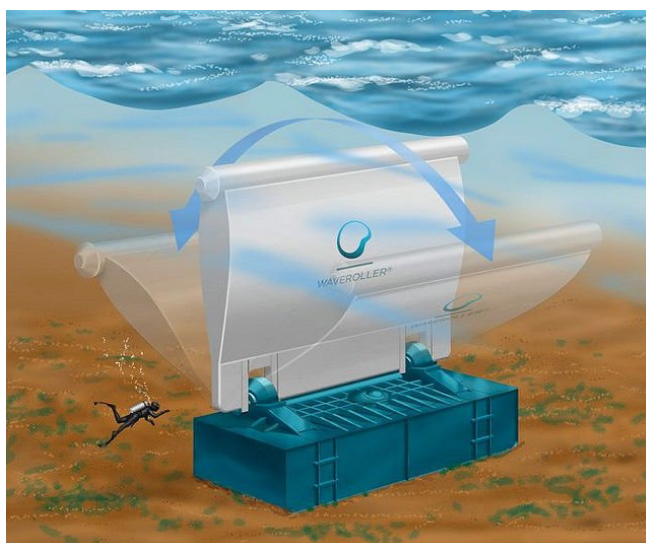


Figura 1.6-9. Representación esquemática del Wave Roller.

1.6.3.3. Mar a dentro (“offshore”)

Los dispositivos *offshore*, conocidos generalmente como dispositivos de tercera generación, son, generalmente, cuerpos oscilantes, bien flotantes o completamente sumergidos (menos frecuente). Explotan los regímenes de oleaje de mayor potencial, disponibles a distancias mayores de la costa y a mayores profundidades -más de 40 metros-. Los dispositivos de captación del oleaje *offshore* son normalmente más complejos comparados con los sistemas de primera generación. Esto, sumado a los problemas adicionales asociados con el anclaje, la necesidad de un largo cableado subacuático y las dificultades a la hora del mantenimiento, ha retrasado su desarrollo, y sólo recientemente han alcanzado algunos sistemas su desarrollo hasta prácticamente una escala real.

Se clasificarán las tecnologías existentes en función de la oscilación.

1.6.3.3.1. Boyas agitadas de un solo cuerpo (Single-body heaving buoys)

Los sistemas de oscilación más simples son las boyas agitadas, que son consideradas como absorbentes puntuales.

Un prototipo inicial es el G-1T, que consiste en una boya en forma de cuña de plataforma rectangular cuyo movimiento vertical está guiado por una estructura de acero fija a un rompeolas. El PTO utilizado era un ejemplo de la posteriormente desarrollada bomba de ariete incluyendo un acumulador de gas.

Otro ejemplo es la boya noruega que consiste en un flotador esférico que podía oscilar con respecto a un puntal conectado a un ancla en el lecho marino gracias a una junta universal. La boya podía tener un control de fase y estaba equipada con una turbina de aire.

Un diseño alternativo consiste en una boya conectando a una estructura fija subacuática mediante un cable que se mantiene tenso gracias a un resorte u otro dispositivo similar. El movimiento relativo entre la boya debido al oleaje y la estructura fija en el fondo marino activa un sistema PTO.

1.6.3.3.2. Sistemas agitados de dos cuerpos (Two-body heaving systems)

El concepto de un sistema oscilante de un solo cuerpo puede suponer problemas debido a la distancia entre el propio sistema y el fondo marino. En sustitución a estos sistemas, existen los sistemas de varios cuerpos en los que la energía es convertida del movimiento relativo entre los cuerpos que oscilan de forma diferente.



Figura 1.6-10. Heaving buoy noruega en Trondheim Fjord, 1983. (Falcao, 2009)

El Absorbedor Puntual Bipartito consiste en dos flotadores, siendo el exterior una estructura con una frecuencia de resonancia muy baja que actúa como referencia y el interior el que actúa como absorbente resonante. La masa del cuerpo interno se aumenta conectándolo a otro cuerpo totalmente sumergido situado lo suficientemente profundo.

Otro sistema interesante fue desarrollado por IPS. Este consiste en una boya rígidamente conectada a un tubo vertical completamente sumergido. Dicho tubo contiene un pistón cuyo movimiento relativo respecto al sistema tubo-flotador activa un mecanismo PTO.

Además, cabe destacar el sistema PowerBuoy desarrollado por la compañía americana OPT (Ocean Power Technologies). Un flotador con una geometría de disco actúa contra un cuerpo cilíndrico sumergido que dispone de un gran plato horizontal amortiguador en su extremo inferior, cuya función es aumentar la inercia mediante la adición de masa al agua que rodea dicho cuerpo. El movimiento relativo entre los dos cuerpos es convertido en energía eléctrica mediante un PTO hidráulico. Este es el sistema instalado en septiembre de 2008 en la costa de Santoña, capaz de ofrecer una potencia de 40kW.

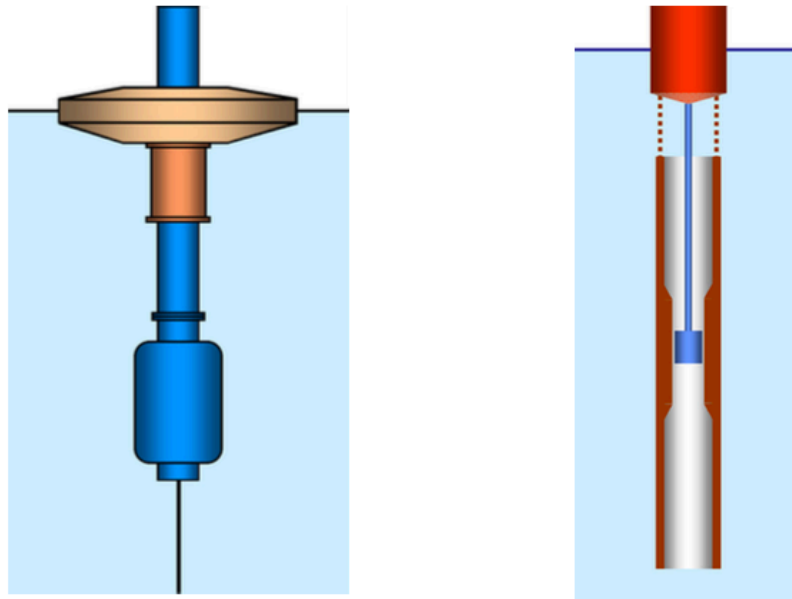


Figura 1.6-11. Representación esquemática del dispositivo L-10 (izquierda) y de la boya IPS (derecha). (Falcao, 2009)



Figura 1.6-12. Prototipo de la PowerBuoy instalada en Santoña (España)

1.6.3.3.3. Sistemas agitados completamente sumergidos (Fully submerged heaving systems)

El Archimedes Wave Swing (AWS) es un sistema totalmente sumergido que consiste en una parte superior oscilante y una parte inferior fija. El flotador es empujado hacia abajo durante la cresta de la ola y se mueve ascendentemente en el punto mínimo. Este movimiento

es resistido por un generador eléctrico lineal en el cual la presión del aire interior actúa como resorte.

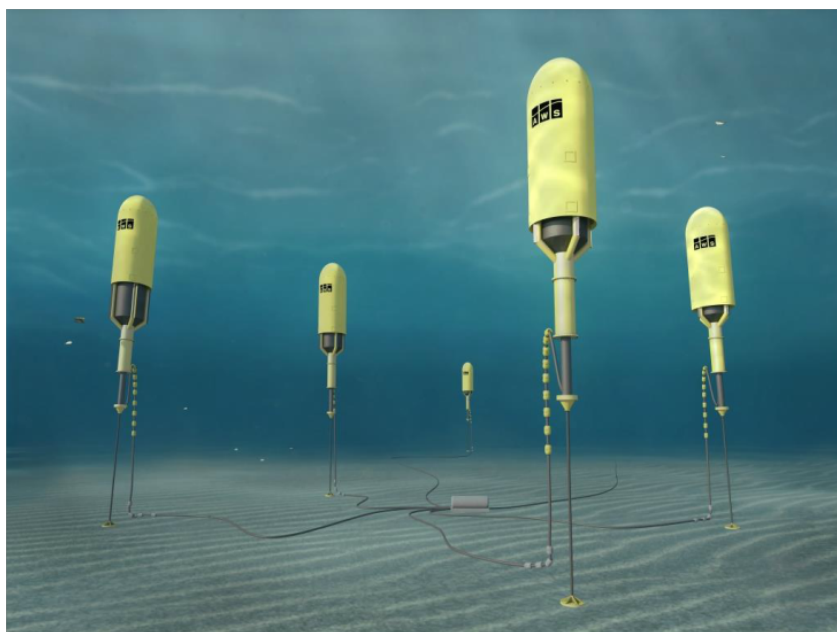


Figura 1.6-13. Representación del Archimedes Wave Swing.

1.6.3.3.4. Sistemas de cabeceo (Pitching devices)

Los sistemas oscilantes descritos anteriormente son sistemas agitados, i.e. la conversión de energía se consigue gracias a un movimiento de traslación relativa. Sin embargo, existen otros sistemas en los cuales la conversión de energía se consigue mediante la rotación, sobre todo el cabeceo.

Este es el caso del *nodding Duck*, el que es, posiblemente, el dispositivo de cabeceo más importante desarrollado en la década de los 70 y 80 y que ha servido de base para posteriores sistemas. El *nodding Duck* está formado por un flotador en forma de leva que cabecea con el movimiento del oleaje. Inicialmente se desarrolló con el objetivo de colocar varios dispositivos en serie, alineados con el frente de ola. No obstante, posteriormente se propuso instalar el sistema como un cuerpo único, en el cual el movimiento relativo se produce entre un giróscopo y el dispositivo en sí.



Figura 1.6-14. Versión del Duck de 1979 equipada con giroscopios.

1.6.3.3.5. Bottom-hinged systems

Los sistemas anteriores cuyo funcionamiento se centra en el cabeceo fueron propuestos basándose en el concepto del péndulo invertido anclado al fondo marino. El mazo, desarrollado por Stephen Salter, consiste de un mástil flotante que puede balancearse respecto a una junta universal en el fondo. La reacción Power take-off (PTO) se consigue a través de un conjunto de cables enrollados varias veces alrededor de un torno-tambor que avanza tanto hacia adelante como hacia atrás en la dirección de la ola predominante. La rotación recíproca del tambor se convierte en energía por medio de un sistema hidráulico.

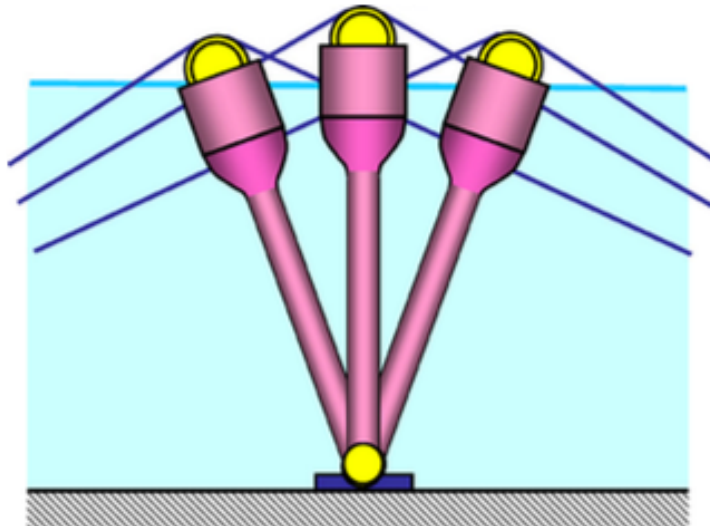


Figura 1.6-15. Representación del mazo oscilante en tres posiciones angulares.

1.7. Análisis de alternativas. Sistemas de disipación

En los sistemas de generación de oleaje en *waveflumes* basados en un diseño de respaldo mojado es esencial disipar de un modo efectivo la energía del oleaje. De esta forma, además de alargar la vida útil del equipamiento, se consigue frenar el fenómeno de re-reflexión, con el cual se continúa añadiendo energía a la ola incidente y, por tanto, al sistema. Generalmente, los usuarios buscan amortiguadores o absorbedores de la energía de la ola incidente que ocupen un espacio mínimo del total disponible para llevar a cabo la experimentación. Sin embargo, para que un absorbedor sea eficiente en disipar la energía de la ola, este debe tener una pendiente de, aproximadamente, 1:10, lo que implica que ocupe gran parte del tanque de generación. Es por ello que resulta un verdadero reto diseñar un absorbedor que ocupe la mínima cantidad de espacio y tenga las características necesarias para disipar adecuadamente la energía de la ola incidente.

Existen numerosos sistemas de absorbedores. Dichos sistemas de disipación pueden ser activos o pasivos. Los amortiguadores activos constan de un sistema mecánico capaz de moverse como respuesta a una ola incidente. Estos sistemas activos se asemejan a un generador de oleaje, con la diferencia de que están ubicados en la parte opuesta con el fin de absorber las olas progresivas. A medida que la olas alcanzan el absorbedor, la pala de este se mueve de forma que resulta invisible al oleaje incidente. Una disipación eficiente implica mover el absorbedor en el momento correcto, de forma que la velocidad de la pala sea igual a la celeridad de la onda. Sin embargo, el uso de estos sistemas sigue estando bastante limitado debido a su alto coste.

En cuanto a los sistemas pasivos más populares, cabe destacar las playas de pendiente constante, formadas por piedras o gravilla. Estas se sitúan en uno de los extremos del *waveflume* y suelen presentar una ligera pendiente de 1:10. Están diseñadas de forma que sean efectivas para un gran rango de condiciones de oleaje, pero necesitan un gran espacio para conseguir una reflexión de la ola por debajo del 10%. Una playa con pendiente variable permitiría reducir la longitud total de la playa. Una reducción mayor puede conseguirse gracias a un perfil de playa parabólico. Este diseño de playa se usa generalmente con superficies rugosas y materiales porosos.

Otro concepto de playas utilizadas en laboratorios es el de absorbedores progresivos. Estos utilizan materiales cuya porosidad disminuye hacia la parte posterior del absorbedor. Entre ellos, es habitual utilizar virutas de aluminio con un nivel de compactación diferente. Otro modelo es el compuesto por placas metálicas verticales. La porosidad de estas placas disminuye a medida que se avanza en el absorbedor. Los análisis hechos con este último tipo demuestran una gran capacidad de absorción en longitudes relativamente pequeñas.

El tema, en auge, es objeto de investigación de diversos científicos; entre ellos se encuentran los trabajos de Lean, Sand y Ouellet y Datta. Sin embargo, cabe destacar que la

mayoría de estos trabajos están limitados a un rango pequeño de parámetros de oleaje y profundidades.

De entre todos los modelos presentados, los más indicados para absorber el oleaje en un tanque son los modelos pasivos. No obstante, estos sistemas son eficientes para un rango limitado de condiciones de oleaje, además de estar probados con un flujo unidireccional, y por eso son difícilmente transportables a cuencas marinas, donde el oleaje puede presentarse en diversas direcciones. De entre todos los modelos de absorbedores pasivos, la playa parabólica es la que presenta los mejores resultados. La eficiencia aumenta con un aumento en la rugosidad y porosidad del material. Si se desea trabajar con valores de profundidad variable, la playa parabólica ajustable, cuyo extremo no alcance el fondo sería el modelo apropiado. (Ouellet & Datta, A survey of wave absorbers, 1987)

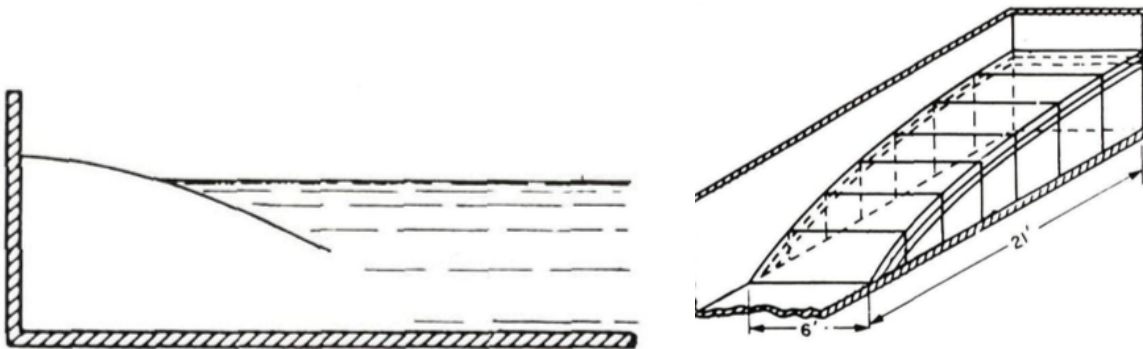


Figura 1.7-1. Representación esquemática de playas parabólicas estudiadas por Ouellet y Datta.

En el caso de los absorbedores permeables en los cuales se posicionan piedras, cabe mencionar que el tamaño de dichas piedras presenta un efecto muy pequeño en el valor del coeficiente de reflexión. (Ouellet & Datta, A survey of wave absorbers, 1987)

Atendiendo al mallado empleado en la fabricación de las playas, Jamieson y Mansard obtuvieron varias conclusiones. Los materiales porosos funcionan mejor con olas que presentan una amplitud mayor; mientras que, para olas de pequeñas alturas, es aconsejable utilizar materiales con poca porosidad. Al igual que en los modelos activos, lo idóneo sería que la porosidad decreciese hacia la parte posterior de la playa, sea cual fuere el tipo de ola. En cuanto al tamaño de dichos absorbedores, estos no deberían ser menores de $0,35L$, donde L es la longitud de onda máxima que se atenúa efectivamente. (Jamieson & Mansard, 1987)

1.8. Selección y descripción de la solución propuesta

De entre las opciones presentadas en la sección anterior, en los ensayos llevados a cabo se utilizará una playa plana; es decir, un sistema pasivo. La simplicidad, junto con las posibilidades que ofrece de establecer distintas pendientes y su bajo coste hacen de este sistema el más adecuado para llevar a cabo los ensayos. Cabe mencionar, que en el tanque grande del laboratorio de mecánica de fluidos de la EIB hay una playa parabólica ajustable, que, como se ha visto, ofrece unos mejores resultados.

1.8.1. Playa plana con pendiente continua

Diversos estudios realizados a lo largo de los años concluyen que existen tres factores importantes en el rendimiento de este tipo de absorbedores:

- La inclinación de la playa.
- La amplitud de la ola incidente.
- Las características de la estructura de la playa.

En 1944, Miche desarrolló una expresión que establece una relación entre los tres parámetros mencionados:

$$K = \rho \cdot \frac{\delta_m}{\delta_o}$$

δ_m representa la amplitud máxima de ola que sería totalmente reflectada por un absorbedor impermeable y completamente liso. Las olas con amplitudes pequeñas y longitudes de onda grandes perciben la playa como si fuera una pared vertical. Por otra parte, aquellas olas con amplitudes más grandes que δ_m sufren reflexión. A medida que aumenta la inclinación de la playa, δ_m aumenta. Miche dedujo una relación analítica entre δ_m y el ángulo de playa α :

$$\delta_m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \alpha}{\pi}$$

δ_o representa la amplitud de la ola incidente. Con un aumento en este parámetro, el absorbedor actúa realmente como lo que es, una playa con pendiente continua; y, por tanto, el valor del coeficiente de reflexión K disminuye. Por su parte, el valor de ρ depende de las características de la propia ola incidente y de la playa y debe ser calculado experimentalmente.

Las características de la playa atienden a su rugosidad y su impermeabilidad. Las playas permeables presentan mejores resultados de absorción del oleaje que aquellas impermeables, por lo que el valor de ρ será menor si la playa tiene cierta permeabilidad. La relación con la rugosidad es idéntica: ρ disminuye con materiales más rugosos. En el caso de estructuras

impermeables, Miche obtuvo unos valores de ρ que variaban entre 0,68 y 1, en función del nivel de rugosidad.

Otro método, desarrollado más tarde, es el de Twu y Liu. Basado en cálculos analíticos, simula la playa como si fuera una escalera de N niveles. Su teoría saca diversas conclusiones:

- Es muy complicado amortiguar olas con una longitud muy grande (i.e. h/L tiende a cero).
- Para valores de $h/L < 0,5$ (i.e. olas superficiales y transitorias), el valor de K está fuertemente influenciado por dicha relación. Es por ello que diferentes olas pueden tener diferentes coeficientes de reflexión para la misma estructura.
- Para valores de $h/L \geq 0,5$ (i.e. aguas profundas) K tiende a ser constante. De esta forma Twu y Liu concluyen que en aguas profundas el coeficiente de reflexión depende única y exclusivamente del ángulo de la playa. Esto se opone a la teoría de Miche, quien afirma que la amplitud de la ola incidente siempre tiene influencia en el coeficiente de reflexión.
- K disminuye a medida que el ángulo de playa disminuye.

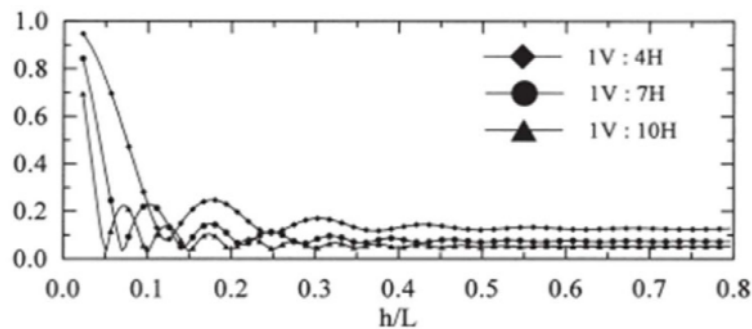


Figura 1.8-1. Coeficiente de reflexión para diferentes pendientes. Teoría de Twu y Liu.

1.9. Análisis de riesgos

A la hora de realizar un análisis de riesgos eficaz es importante enumerar la totalidad de contingencias que pueden tener lugar, examinando la frecuencia con la que pueden ocurrir y la gravedad de las consecuencias que el propio riesgo conlleva. Se estudiarán las causas de las posibles amenazas y probables eventos no deseados y los daños y consecuencias que estas puedan producir.

En este trabajo se analizarán los riesgos relacionados con la inexactitud de los resultados obtenidos, debido a errores humanos o técnicos. Estos se recogerán en una tabla precisando, a su vez, la frecuencia y la gravedad, como se ha mencionado anteriormente.

Tabla 1.9-1. Clasificación de los riesgos

Número	Riesgo	Probabilidad	Gravedad
#1	Inexactitud en la posición de los sensores	Probable	Baja
#2	Inexactitud en la geometría del sistema de extinción	Posible	Baja
#3	Inexactitud en la medición del calado	Improbable	Baja
#4	Pérdida de precisión debida a la anchura del lóbulo	Posible	Media
#5	Inexactitud debida a la falta de estabilización	Improbable	Alta
#6	Fallo en el rango de tiempos tratado para realizar el ajuste	Raro	Muy alta

- #1: inexactitud en la posición de los sensores. Hace referencia al fallo humano que se puede cometer a la hora de colocar los sensores en las distintas posiciones en las que se van a realizar los ensayos.
- #2: inexactitud en la geometría del sistema de extinción. Errores cometidos en la caracterización de la playa: altura mojada, inclinación...
- #3: inexactitud en la medición del calado. Consiste en el fallo al establecer el calado con el que se van a realizar los ensayos.

- #4: pérdida de precisión debida a la anchura del lóbulo. Como se explicará en capítulos posteriores, los sensores utilizados trabajan mediante ultrasonidos. La señal enviada y posteriormente captada es de forma cónica, por lo que su base aumenta con un aumento en la distancia al objeto a medir (en este caso, la superficie). Es por ello que, con el calado mínimo con el que se va a trabajar el error en los datos experimentales es mayor que con el calado máximo.
- #5: inexactitud debida a la falta de estabilización. Con sistemas de disipación con los que no se consigue amortiguar la onda, esta necesita más tiempo en estabilizarse una vez se detiene la generación (sobre todo el cuando se trabaja en una geometría sin playa).
- #6: fallo en el rango de tiempos tratado para realizar el ajuste. El rango útil es aquel entre la reflexión y la re-reflexión; los valores fuera de este intervalo no son representativos en el análisis que se va a llevar a cabo.

Es posible representar los riesgos descritos en una matriz de 3 dimensiones: incidencia, gravedad del impacto y probabilidad de que el impacto tenga lugar.

Tabla 1.9-2. Matriz para la clasificación de riesgos

Probabilidad		IMPACTO			
		Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Casi cierto	81-100%				
Probable	61-80%	#1			
Posible	41-60%	#2	#4		
Improbable	21-40%	#3		#5	
Raro	1-20%				#6

2 Metodología

2.1. Descripción del equipamiento	55
2.1.1. Tanque (“flume”)	55
2.1.2. Sensores de ultrasonidos.....	56
2.1.3. Sistema de disipación del oleaje.....	57
2.2. Descripción de tareas.....	58
2.2.1. Casos ejecutados	58
2.3. Planificación	62
2.3.1. Introducción.....	62
2.3.2. Diagrama de Gantt.....	62
2.4. Cálculos y algoritmos.....	64
2.4.1. Análisis teórico.....	64
2.4.2. Desarrollo de un caso práctico.....	66
2.5. Descripción de los resultados.....	70
2.5.1. Análisis de tres ondas con períodos similares	70
2.5.1.1. Calado $d = 0,20\text{m}$	70
2.5.1.1.1. Onda I	70
2.5.1.1.2. Onda II.....	74
2.5.1.1.3. Onda III	77
2.5.1.1.4. Comparación de resultados	80
2.5.1.2. Calado $d = 0,15\text{m}$	82
2.5.1.2.1. Onda I	82
2.5.1.2.2. Onda II.....	84
2.5.1.2.3. Onda III	87
2.5.1.2.4. Comparación de resultados	89
2.5.2. Análisis de ondas con períodos distintos para una única geometría del sistema de disipación.....	91
2.5.2.1. Calado $d = 0,20\text{m}$	91
2.5.2.1.1. Onda IV	91
2.5.2.1.2. Onda V.....	91
2.5.2.1.3. Onda VII.....	92
2.5.2.1.4. Comparación de resultados	92
2.5.2.2. Calado $d = 0,15\text{m}$	94
2.5.2.2.1. Onda IV	94
2.5.2.2.2. Onda VII.....	94
2.5.2.2.3. Comparación de resultados	95

2.5.3. Análisis de ondas con períodos distintos para distintas geometrías del sistema de disipación.....	96
2.5.3.1. Calado $d = 0,20\text{m}$	96
2.5.3.1.1. Onda IV	96
2.5.3.1.2. Onda V	97
2.5.3.1.3. Comparación de resultados	98

2.1. Descripción del equipamiento

2.1.1. Tanque (“flume”)

En el siguiente estudio, con el objetivo de caracterizar el coeficiente de reflexión para distintas posiciones de playa y con diversas condiciones de oleaje, se ha utilizado el material disponible en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Las dimensiones principales del tanque son de 3,00m de largo, 0,40m de ancho y 0,50m de alto. La estructura de dicho tanque está compuesta de perfiles de aluminio que soportan una plataforma de acero inoxidable, la cual está rodeada de paredes de metacrilato. La longitud total del waveflume puede separarse en tres regiones principales: la zona de generación de la ola, la zona de propagación y la zona de extinción.

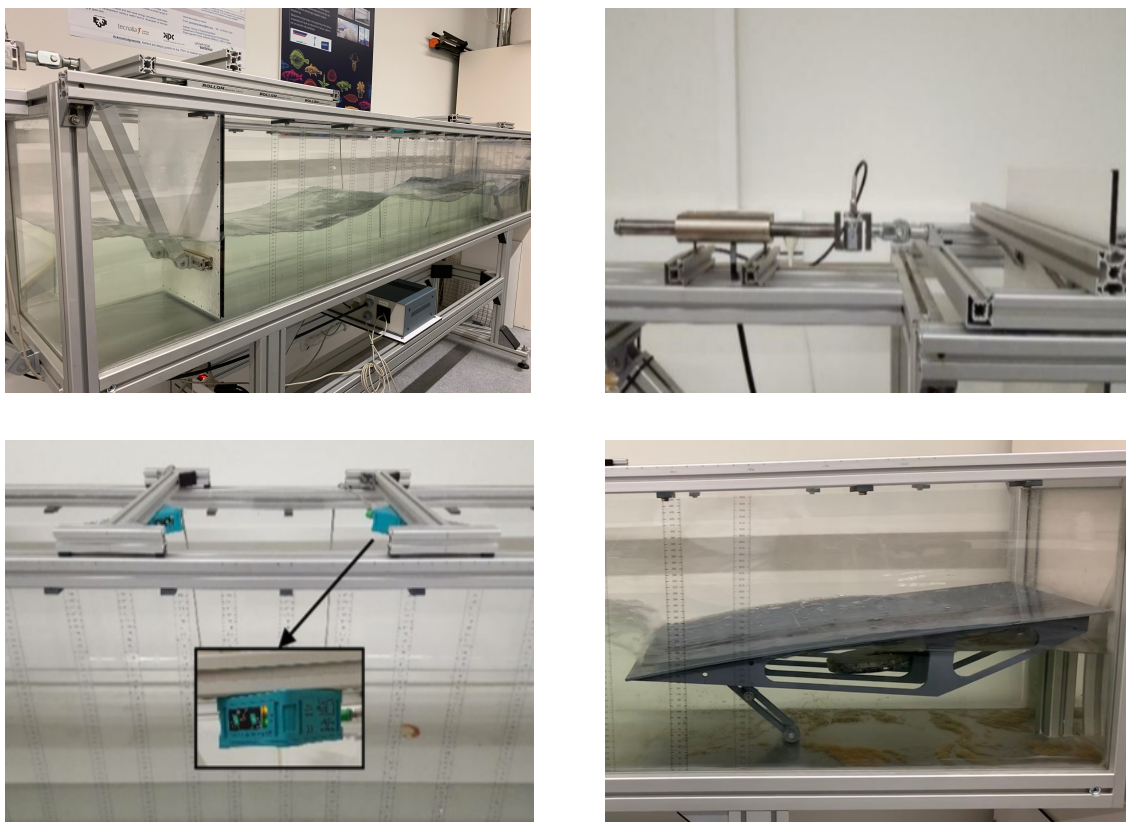


Figura 2.1-1. Vista general del waveflume (arriba izquierda), sistema de generación (arriba derecha), zona de propagación y sensores (abajo izquierda) y sistema de extinción (abajo izquierda). (Izquierdo, Esteban, Blanco, Albaina, & Peña, 2019)

Los canales de generación de olas (“flume wavemakers”) funcionan, generalmente, gracias a servomotores eléctricos de corriente alterna. Los grandes generadores están impulsados

hidráulicamente. Estos generadores se basan en un diseño de respaldo mojado, con el fin de simplificar y facilitar el mantenimiento.

Para profundidades de hasta 1,5m la generación de olas es debida a un pistón gracias al cual una pala se mueve horizontalmente. La ventaja de este tipo de diseño comparado con otros es que el movimiento de la pala no está muy limitado, permitiendo así la generación de olas solitarias.

En el caso del tanque utilizado para el análisis experimental, la generación de olas se consigue mediante un sistema de pala-pistón, siendo la carrera máxima de la pala de 0,70m.

2.1.2. Sensores de ultrasonidos

Los sensores se encuentran en la denominada zona de propagación del waveflume. Estos se encuentran anclados a perfiles de aluminio que se deslizan a lo largo del tanque. De este modo es posible aplicar la técnica del moving gauge para realizar los ensayos necesarios para el posterior cálculo del coeficiente de reflexión. Los sensores utilizados son sensores Pepperl Fuchs UB500-F42S-E5-V15. Estos trabajan mediante ultrasonidos, es decir, envían una señal cónica que choca contra una superficie, en el caso de análisis esta será la ola, y captan la señal reflectada. De este modo, el sensor calcula el tiempo transcurrido entre la emisión de la señal y la consecuente recepción y transforma dicho valor en una altura que corresponde con aquella de la superficie libre de la ola generada.

Primeramente, se ha realizado una configuración de los sensores, ya que estos disponen de tres configuraciones distintas atendiendo al ancho del lóbulo ultrasónico. Con el tanque en calma se ha procedido a analizar las señales emitidas por cada uno de los dos sensores para cada anchura de lóbulo. Dichos limnómetros se han colocado a una distancia de 100cm con el fin de evitar interferencias entre ellos (que la señal enviada por uno, tras rebotar sobre la superficie del agua, sea captada por el otro, por ejemplo).

Los resultados se recogen en la *Tabla 2.1-1* (distancias en mm).

Tabla 2.1-1. Errores en la configuración de los sensores.

Ancho de lóbulo	Sensor 1		Sensor 2	
	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior
Lóbulo estrecho	+0,4	-0,2	+0,3	-0,3
Lóbulo medio	+0,2	-0,2	+0,2	-0,2
Lóbulo ancho	+0,1	-0,2	+0,1	-0,1

Como podía preverse, al trabajar con una anchura de lóbulo menor, la precisión es mayor. Sin embargo, en ensayos posteriores se ha analizado el comportamiento de cada configuración

para tres tipos de olas distintas, principalmente atendiendo a su amplitud. Con un aumento en la altura de la ola, los resultados arrojados por los limnímetros empiezan a no ser representativos, es decir, los valores recogidos por los sensores se disparan, ya que la señal rebota en distintas partes del perfil de la ola, llegando a ser posible que un sensor capte la señal emitida por el otro. Este comportamiento se acentúa en el caso del lóbulo estrecho y medio. Si bien para una altura de ola pequeña los resultados obtenidos trabajando con el lóbulo estrecho serían más precisos que usando el ancho y el medio, no es posible para casos de olas más grandes. Es por ello que, con el fin de normalizar el análisis experimental, se ha realizado la totalidad de este con un ancho de lóbulo ancho para ambos sensores.

2.1.3. Sistema de disipación del oleaje

En cuanto al sistema de disipación o extinción, como se ha desarrollado en el capítulo 1.8, el modelo utilizado es el denominado “playa plana deslizable”. La playa tiene unas dimensiones de 0,72m de largo y 0,40m de ancho, por lo que encaja a la perfección en el tanque utilizado. Esta se puede regular en altura de forma que es posible obtener ángulos distintos, lo que abre una ventana de posibilidades a la hora de realizar diversos ensayos con sistemas de disipación distintos. En el *Anexo II* se encuentran representadas la totalidad de posiciones en las que se ha colocado la playa para la realización de los correspondientes ensayos.

2.2. Descripción de tareas

2.2.1. Casos ejecutados

El objetivo de establecer distintas condiciones de oleaje es el de caracterizar el coeficiente de reflexión para situaciones diversas y, así, hallar la geometría óptima de disipación del oleaje tratado. Es por ello que se ha tratado de establecer tres olas distintas, pero que mantengan el mismo período. En el capítulo 2.4 se explicará el desarrollo llevado a cabo para determinar los parámetros y el posterior tratamiento de datos. Estas se generan estableciendo varios parámetros iniciales en el wavemaker:

Tabla 2.2-1. Parámetros implementados para ondas de períodos similares en el wavemaker.

Parámetros	Onda I	Onda II	Onda III
A (mm)	30	40	50
v (m/s)	0,07	0,1	0,2
a = d (m/s²)	25	1	0,8

Donde A es la amplitud de la pala, v la velocidad a la que esta se mueve y a y d la aceleración y desaceleración, respectivamente.

Primeramente, se trabajará con estas olas de períodos similares en dos calados distintos, correspondientes a profundidades de $h = 0,20\text{m}$ y $h = 0,15\text{m}$. Para cada calado se establecen distintas configuraciones de playa para la extinción del oleaje. De esta forma, para el calado mayor se trabajará con una configuración sin playa y con seis posiciones de playa distintas, en las que se varía el ángulo de inclinación de la misma, en función de la parte sumergida de esta. Todas ellas están representadas en el *Anexo II*.

Una vez analizados los resultados de este primer calado se decide omitir algunas de las configuraciones para trabajar con el segundo calado citado anteriormente. Cabe recordar que el objetivo de este Trabajo Fin de Grado es hallar la configuración del sistema de extinción óptima, en la que se minimiza el coeficiente de reflexión. Es por ello que algunas configuraciones no son totalmente necesarias para el correcto análisis de la zona óptima. Por ese motivo, en el segundo calado se trabajará con una configuración sin playa, nuevamente, y con otras cuatro configuraciones distintas, siguiendo el procedimiento desarrollado anteriormente.

Además de las ondas mencionadas anteriormente, se ha trabajado con otras manteniendo la altura de ola constante y variando el período.

Tabla 2.2-2. Parámetros implementados para ondas de períodos distintos en el wavemaker.

Parámetros	Onda IV	Onda V	Onda VII
A (mm)	40	70	35
v (m/s)	0,08	0,26	0,09
a = d (m/s²)	0,5	0,5	0,5

Con estas tres ondas se ha trabajado en la configuración en la que se minimizaba el coeficiente de reflexión con el objetivo de analizar el comportamiento de ondas de distintos períodos para una configuración fija.

Al analizar los resultados, como se verá en capítulos posteriores, se percibe una gran dependencia del período. Es por ello que, con el objetivo de profundizar en este ámbito, se trabajará con las ondas IV y V en el calado $h = 0,20\text{m}$ para las geometrías del sistema de extinción trabajadas anteriormente.

A continuación se recoge en un listado la totalidad de casos ejecutados:

d = 0,20m

- **Onda I**

- Sin playa
- Playa 1
- Playa 2
- Playa 3
- Playa 4
- Playa 5
- Playa 6

- **Onda II**

- Sin playa
- Playa 1
- Playa 2
- Playa 3
- Playa 4
- Playa 5
- Playa 6

- **Onda III**

- Sin playa
- Playa 1
- Playa 2
- Playa 3
- Playa 4
- Playa 5
- Playa 6

- **Onda IV**

- Sin playa
- Playa 5
- Playa 7
- Playa 8
- Playa 9
- Playa 10

- **Onda V**

- Sin playa
- Playa 5
- Playa 7
- Playa 8
- Playa 9
- Playa 10

- **Onda VII**

- Playa 5

$d = 0,15\text{m}$

- **Onda I**
 - Sin playa
 - Playa 1
 - Playa 2
 - Playa 3
 - Playa 4
- **Onda II**
 - Sin playa
 - Playa 1
 - Playa 2
 - Playa 3
 - Playa 4
- **Onda III**
 - Sin playa
 - Playa 1
 - Playa 2
 - Playa 3
 - Playa 4
- **Onda IV**
 - Playa 2
- **Onda V**
 - Playa 2
- **Onda VII**
 - Playa 2

El estudio se lleva a cabo mediante la técnica experimental denominada “moving gauge”. Dicha técnica consiste en ir desplazando los sensores a lo largo de una parte del canal realizando ensayos en distintas posiciones. Como se dispone de dos sensores, algunos ensayos se han llevado a cabo manteniendo uno de los dos sensores fijo y desplazando el otro, mientras que en otros se han desplazado simultáneamente los dos sensores con el objetivo de abarcar un rango de estudio más amplio.

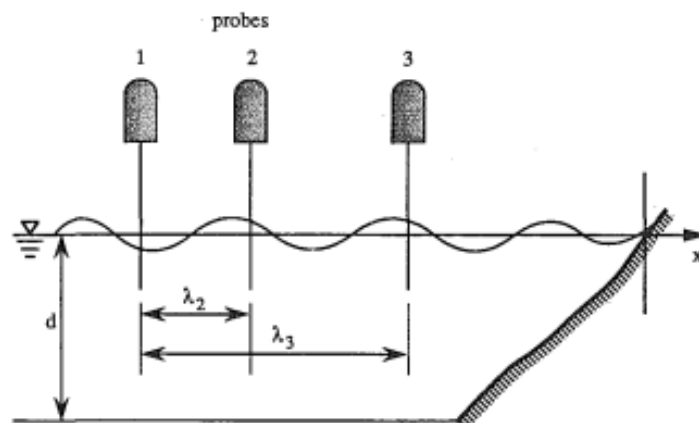


Figura 2.2-1. Representación esquemática de la técnica “moving gauge”

Se busca trabajar en el rango entre dos máximos de la onda; es por ello que, inicialmente, se intenta colocar uno de los dos sensores en uno de los máximos y, a continuación, ir desplazando el otro sensor (o los dos) hasta hallar otro máximo.

En el *Anexo I* es posible encontrar la totalidad de ensayos realizados para las condiciones de calado, onda y sistema de extinción mencionados anteriormente.

Una vez hecho un ajuste sinusoidal a cada una de las olas incidentes captadas mediante los limnímetros para cada conjunto de parámetros iniciales es posible representar el perfil de la onda envolvente con los valores de amplitud de cada una de las olas caracterizadas previamente. Posteriormente, se procede a calcular la altura de la ola incidente H y el coeficiente de reflexión K .

2.3. Planificación

2.3.1. Introducción

El objetivo principal del trabajo es hallar la geometría óptima del sistema de disipación del oleaje en un tanque experimental, tal y como se ha desarrollado en capítulos anteriores. Sin embargo, el trabajo no se limita al estudio experimental.

La primera tarea consiste en realizar un estudio teórico, principalmente de cara a decidir cómo se va a llevar a cabo el análisis experimental. En este período se han valorado los casos que iban a ser ejecutados, desarrollando para ello una metodología con el fin de normalizar al máximo posible el plan de pruebas. Asimismo, se examinan las diferentes teorías existentes para obtener el coeficiente de reflexión a partir de una onda incidente: método mediante dos sensores, método de mínimos cuadráticos y método de tres alturas. Una vez decidido que el método que se va a llevar a cabo es el primero de los citados, se desarrolla el código necesario para la investigación. El estudio inicial, más teórico, se lleva a cabo durante un período de seis semanas, mientras que la elección del método analítico y desarrollo del código prolonga esta tarea otras dos semanas.

Posteriormente, de manera simultánea, se realizan los ensayos experimentales en el laboratorio y el análisis pertinente para obtener los resultados. Tal y como se representará en la sección 2.3.2. primero se trabaja con un calado de 0,20m estudiando las ondas de igual período para todas las geometrías y, después, aquellas en las que el período varía únicamente para una geometría. A continuación, se realiza el mismo estudio con el calado de 0,15m. Finalmente, tras haber obtenido todos los resultados anteriores, se trabaja, una vez más, con el calado de 0,20m y las ondas de distintos períodos, pero para la casi totalidad de las geometrías desarrolladas. Los ensayos y el análisis tienen una duración aproximada de nueve semanas.

Durante todo este período se van presentando tanto los desarrollos teóricos como los prácticos en una memoria escrita. Una vez finalizado el estudio práctico, se obtienen las conclusiones finales.

El cronograma de las tareas mencionadas se muestra en la siguiente sección mediante un diagrama de Gantt.

2.3.2. Diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt es una herramienta gráfica cuyo objetivo es exponer el tiempo de dedicación previsto para diferentes tareas o actividades a lo largo de un tiempo total determinado.

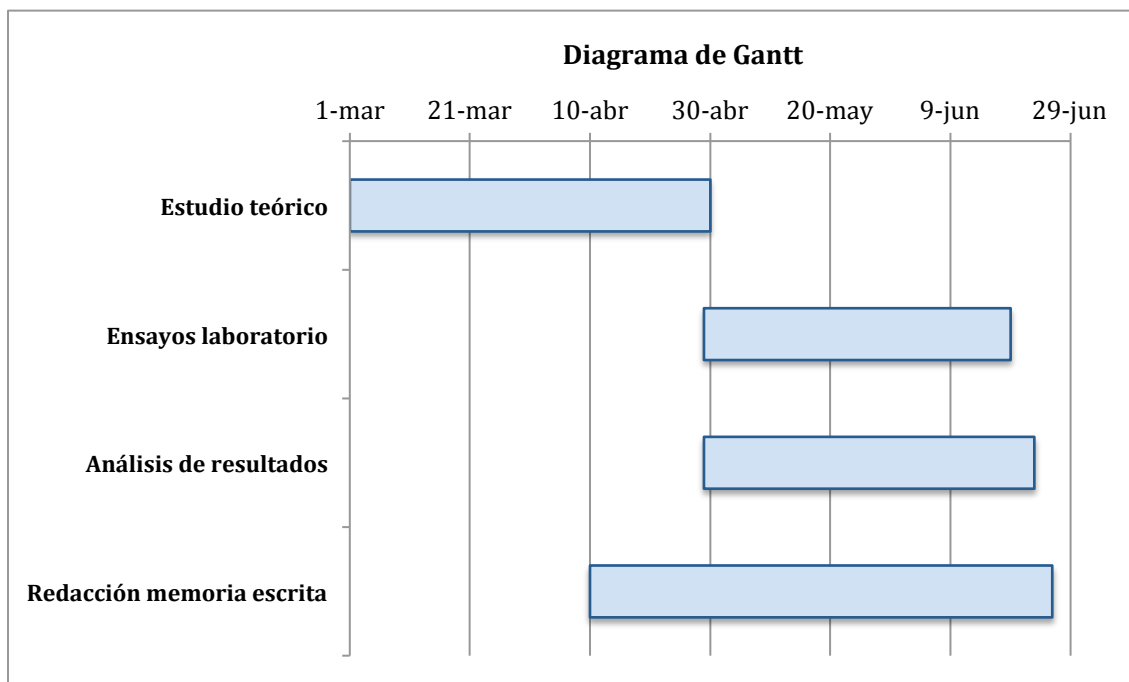


Figura 2.3-1. Diagrama de Gantt

Es oportuno descomponer el tiempo dedicado a los ensayos prácticos; ya que, de esta forma, es más sencillo visualizar el tiempo dedicado a cada uno de los calados y estudios mencionados en la sección anterior.

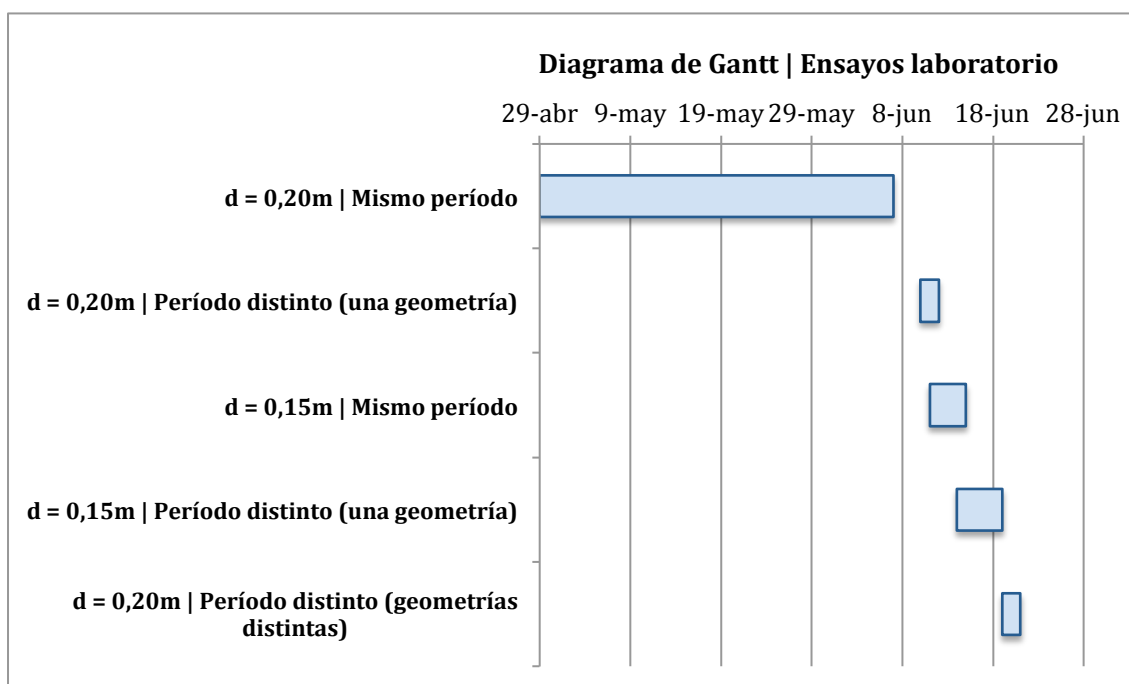


Figura 2.3-2. Diagrama de Gantt correspondiente a los ensayos en el laboratorio

2.4. Cálculos y algoritmos

2.4.1. Análisis teórico

Como se ha explicado en capítulos anteriores, se han analizado ondas de igual período y distinta amplitud y de período distinto e igual amplitud.

Para determinar los parámetros que se deben introducir en el generador de oleaje se decide, en primera instancia, aplicar la teoría para generadores de olas planas (“plane wavemakers”) para aguas superficiales propuesta por Galvin (1964). Esta afirma que el agua desplazada por el wavemaker debe ser igual al volumen de la cresta de la ola que se está propagando. Considérese un wavemaker en el cual la propagación del oleaje se consigue mediante el movimiento de un pistón a lo largo de una distancia S para una profundidad h constante. El volumen total de agua desplazado en una batida es Sh (véase Figura 2.4-1). El volumen de agua en la cresta de una ola es $\int_0^{L/2} \left(\frac{H}{2}\right) \sin kx \, dx = H/k$. Igualando los dos volúmenes:

$$Sh = \frac{H}{k} = \frac{H}{2} \left(\frac{L}{2}\right) \frac{2}{\pi}$$

donde $2/\pi$ representa el ratio del área sombreada con respecto al área del rectángulo envolvente. La ecuación anterior también puede ser expresada como:

$$\left(\frac{H}{S}\right)_{piston} = kh$$

Esta relación es válida para aguas superficiales, $h/\lambda < 1/20$.

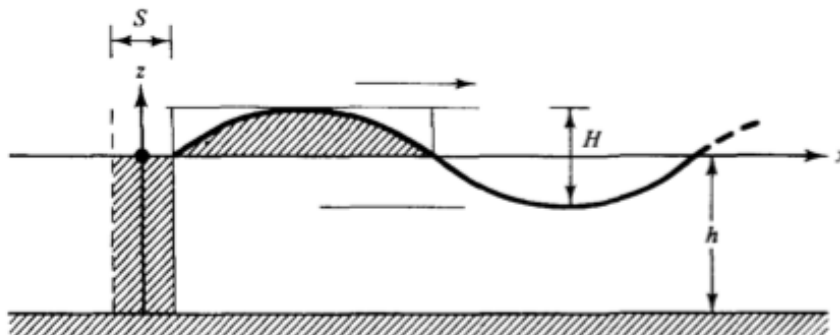


Figura 2.4-1. Representación simplificada de la teoría de Galvin para generadores de olas planas en aguas superficiales.

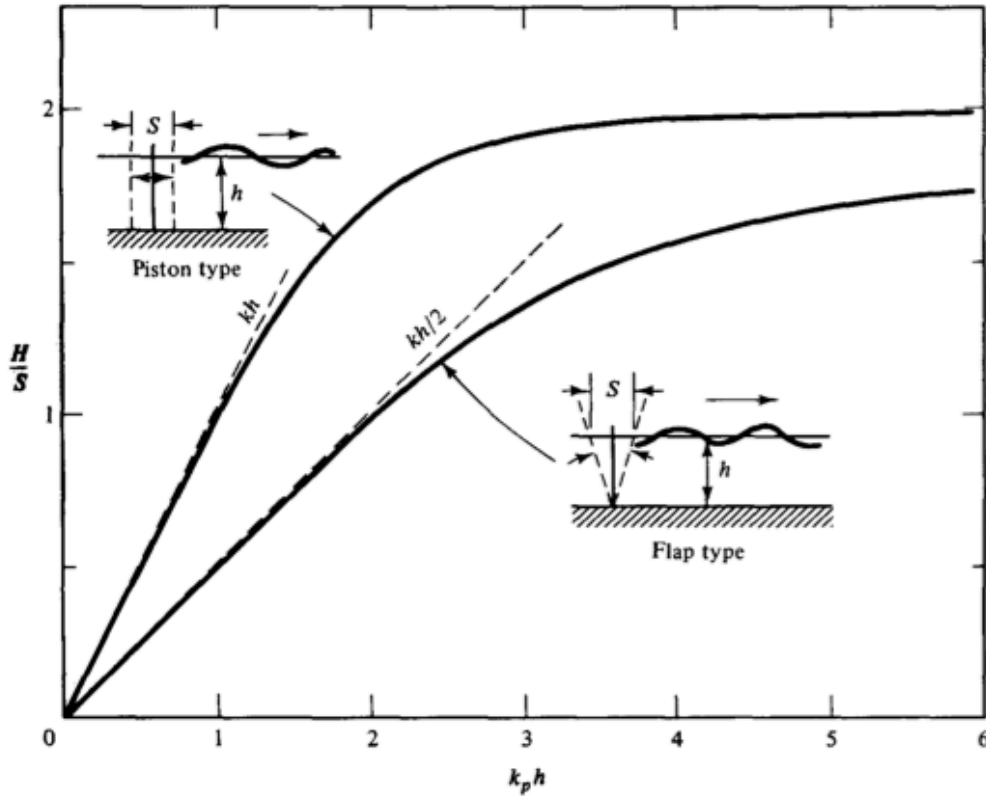


Figura 2.4-2. Teoría de wavemaker plano. Ratio de la amplitud de ola con respecto a la amplitud del pistón versus la profundidad relativa.

Sin embargo, el posterior estudio se ha realizado en condiciones de aguas intermedias:

$$\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$$

Es por ello que la teoría de Galvin previamente desarrollada no es útil a la hora de delimitar los parámetros característicos de las olas incidentes. Estos parámetros han sido establecidos basándose en un estudio anterior realizado por Gustavo A. Esteban y Urko Izquierdo, ambos profesores de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Asimismo, el hecho de trabajar en aguas intermedias posibilita la aplicación de la teoría lineal o teoría de Ayri, previamente desarrollada en este trabajo.

$$\eta = \frac{H}{2} \cdot \cos(kx - wt)$$

Se ajustarán los datos experimentales a la última expresión y, a partir de ahí tal y como se explicará en la sección 2.4.2. se calculará el coeficiente de reflexión K y la altura de la ola envolvente H . El cálculo se realizará mediante las siguientes ecuaciones:

$$H = \frac{2 \cdot |\eta_c|_{max} + 2 \cdot |\eta_c|_{min}}{2}$$

$$K = \frac{H_r}{H_i} = \frac{2 \cdot |\eta_c|_{max} - 2 \cdot |\eta_c|_{min}}{2 \cdot |\eta_c|_{max} + 2 \cdot |\eta_c|_{min}}$$

2.4.2. Desarrollo de un caso práctico

Una vez realizado el ensayo experimental, se genera un archivo Excel en el que están representados los valores correspondientes a la altura captada por los dos sensores como función del tiempo.

Como el análisis se realiza en el tiempo que transcurre desde la reflexión hasta la re-reflexión, se representan en un gráfico todos los valores experimentales y se delimita el intervalo de tiempo válido para el posterior estudio, en función de lo visto en el laboratorio y del perfil de onda. Este proceso se lleva a cabo entre 5 y 8 veces para cada tipo de onda y cada posición de playa, en función de los ensayos realizados en cada situación descrita.

El objetivo ahora es tratar estos datos experimentales y ajustarlos a una onda teórica, representando, así, su perfil y hallando los parámetros característicos. Como se ha descrito anteriormente, el ajuste realizado corresponde a una onda lineal definida por la teoría de Ayri.

El análisis se realiza mediante el software MATLAB. Todos los códigos utilizados y mencionados a continuación se encuentran desarrollados en el *Anexo II*.

Primeramente, se trabaja con los datos correspondientes a cada posición del sensor de ultrasonidos. Se calcula la amplitud, el período y el desfase y se ajustan los valores a una curva sinusoidal (véase *Figura 2.4-3*).

Tras realizar el correspondiente ajuste a todos los ensayos de un tipo de onda determinada, se resumen los valores obtenidos en una tabla (*Tabla 2.4-1*).

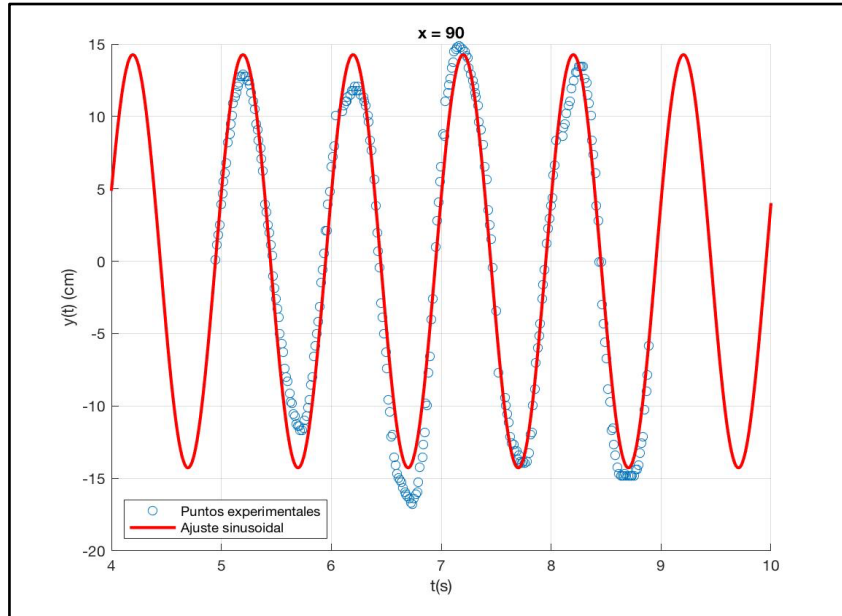


Figura 2.4-3. Ensayo 146 | $d = 0,20\text{m}$. Onda II. Posición de playa 5. Sensor 1. $x = 90\text{cm}$

Tabla 2.4-1. Resumen de los datos para la representación de la ola envolvente correspondientes la Onda II y la posición de playa 5 para el calado de $d = 0,20\text{m}$.

A [m]	40
v_p [m/s]	0,1
$a = d$ [m/s ²]	1

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	$w = 2*\pi/T$ [rad/s]
82	14,803	1,006	6,245
90	14,267	1,002	6,273
98	13,179	1,003	6,265
106	11,934	0,996	6,311
114	11,748	1,002	6,273
120	12,405	1,004	6,258
126	13,189	1,000	6,282
132	14,035	1,012	6,207
140	14,301	1,004	6,256
146	14,241	0,999	6,291
150	13,917	1,018	6,170

x indica la posición del limnómetro en la que se ha realizado el ensayo, C_1 la amplitud de la onda en esa posición y C_2 el período de la onda.

Los valores de x y C_1 permiten representar el perfil de la onda envolvente. Para ello es necesario realizar otro ajuste sinusoidal. De este ajuste se obtiene la longitud de onda y los valores máximos y mínimos de la onda, con los que se calcula la altura de onda H y el coeficiente de reflexión K .

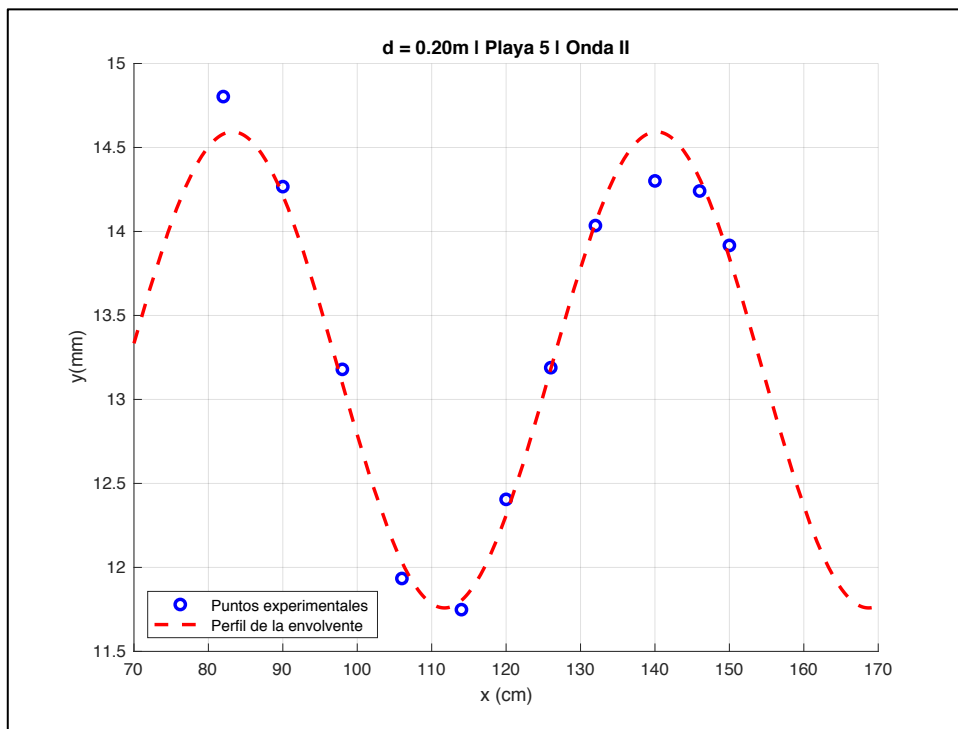


Figura 2.4-4. Perfil de la onda envolvente correspondiente a la onda II y la posición de playa 5 para el calado de $d = 0,20m$.

Tabla 2.4-2. Valores de la altura de onda y coeficiente de reflexión para la onda II y la posición de playa 5 para el calado de $d = 0,20m$.

H [mm]	K [-]
13,175	0,107

Tabla 2.4-3. Coeficiente de reflexión como función del ángulo de playa para la onda II en el calado de $d = 0,20m$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Onda II
Sin Playa	90,0	0,577
Playa 1	25,8	0,541
Playa 2	18,6	0,306
Playa 6	17,8	0,283
Playa 5	16,6	0,107
Playa 3	13,7	0,302
Playa 4	8,1	0,362

Una vez calculado el coeficiente de reflexión para una determinada onda en todas sus posiciones, este se representa en función del ángulo de playa de cada ensayo.

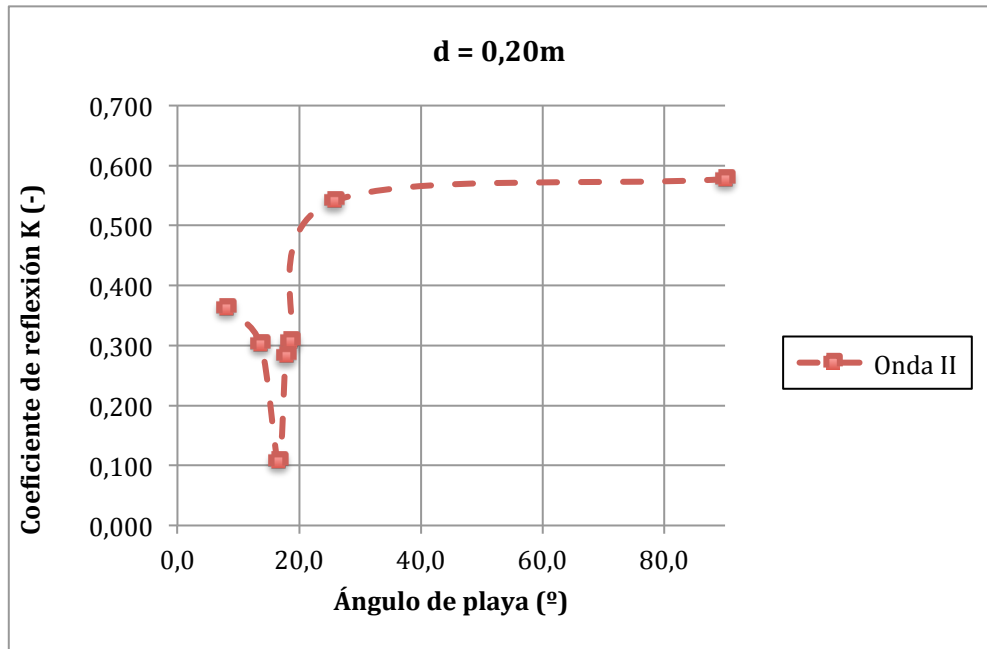


Figura 2.4-5. Representación gráfica del coeficiente de reflexión como función del ángulo de playa para la onda II en el calado de $d = 0,20m$

El caso desarrollado en este capítulo se podrá ver también en la siguiente sección, donde se recoge la totalidad de resultados.

2.5. Descripción de los resultados

En este capítulo se recogerán y comentarán los resultados obtenidos de los ensayos experimentales. Tal y como se ha desarrollado anteriormente, el análisis se iniciará con aquellas ondas de igual período tanto para el calado de $d = 0,20\text{m}$ como para el de $d = 0,15\text{m}$. Se proseguirá con las ondas de período distinto; estudiándolas, inicialmente, para una única geometría de disipación y, posteriormente, realizando un análisis más detallado en diversas geometrías.

Se representarán los perfiles de las ondas envolventes para la totalidad de casos tratados y se mostrará el valor del coeficiente de reflexión. Mediante diversas gráficas, se establecerán relaciones entre el coeficiente de reflexión y el ángulo de la playa en las diversas posiciones del sistema de disipación.

2.5.1. Análisis de tres ondas con períodos similares

2.5.1.1. Calado $d = 0,20\text{m}$

2.5.1.1.1. Onda I

Sin Playa

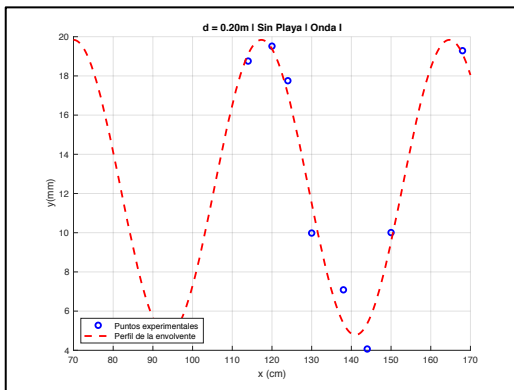


Figura 2.5-1. Onda envolvente de la Onda I para una geometría sin playa. $d = 0,20\text{m}$

H [mm]	K [-]
12,318	0,611

Playa 1

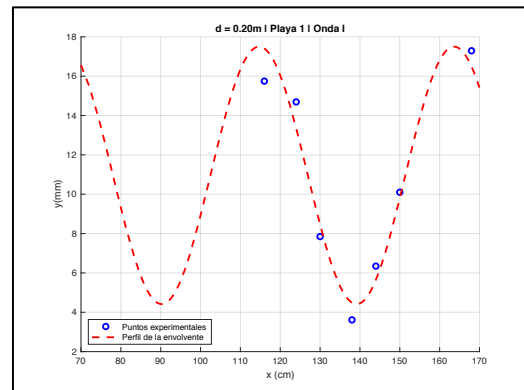


Figura 2.5-2. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 1. $d = 0,20\text{m}$

H [mm]	K [-]
10,954	0,597

Playa 2

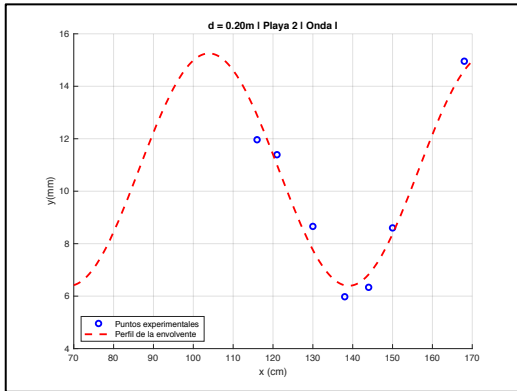


Figura 2.5-3. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 2. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
10,823	0,409

Playa 3

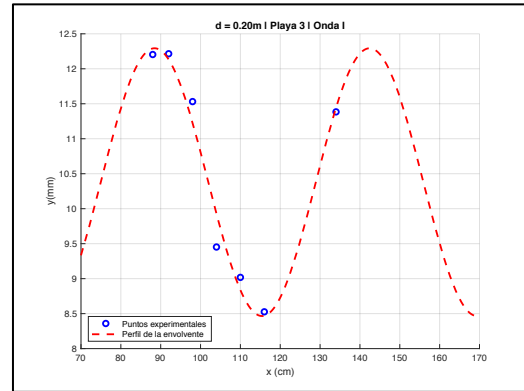


Figura 2.5-4. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 3. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
10,378	0,184

Playa 4

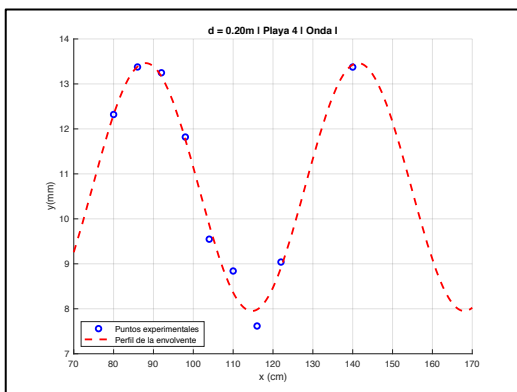


Figura 2.5-5. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 4. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
10,705	0,257

Playa 5

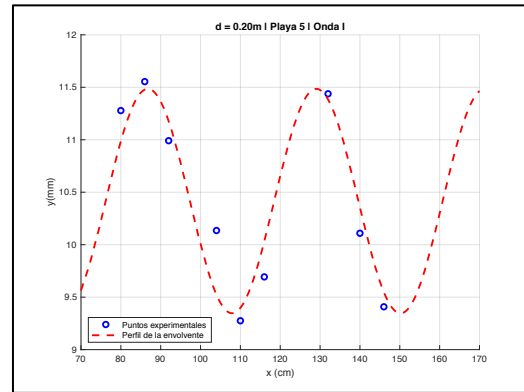


Figura 2.5-6. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 5. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
10,414	0,102

Playa 6

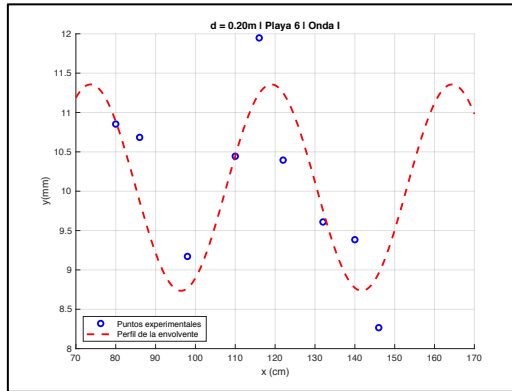


Figura 2.5-7. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 4. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
10,048	0,131

Tabla 2.5-1. Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda I en el calado de $d = 0,20m$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Coeficiente de reflexión K [-]
		Onda I
Sin Playa	90,0	0,611
Playa 1	25,8	0,597
Playa 2	18,6	0,409
Playa 6	17,8	0,131
Playa 5	16,6	0,102
Playa 3	13,7	0,184
Playa 4	8,1	0,257

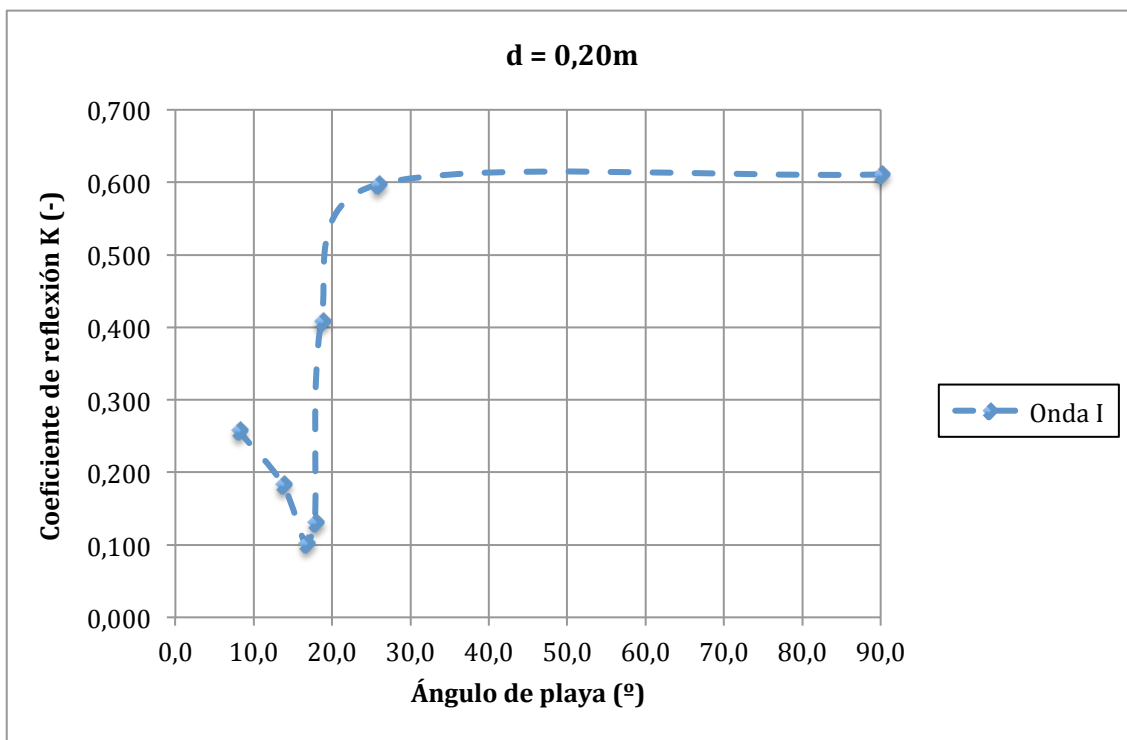


Figura 2.5-8. Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda I en el calado de $d = 0,20m$

Una disminución en el coeficiente de reflexión implica una mejor disipación de la onda. Tal y como se ha descrito anteriormente y, siendo el objetivo principal de este trabajo, se busca optimizar un cierto sistema de disipación. Experimentalmente, esto se logra hallando el punto en el cual se minimiza el coeficiente de reflexión.

La posición sin playa representa una pared vertical y, por tanto, cabría esperar un coeficiente de reflexión cercano a la unidad, ya que tiene lugar una reflexión prácticamente total. Sin embargo, debido a posibles errores descritos anteriormente, este valor es inferior al intuitivo. No obstante, no representa un inconveniente en el estudio realizado. El objetivo es analizar la zona en la que se obtienen los mínimos valores del coeficiente de reflexión.

A la hora de verificar los resultados, se considera conveniente establecer una comparación entre diversas ondas. Es por ello que se desarrollarán y obtendrán conclusiones una vez se representen estas de forma conjunta.

2.5.1.1.2. Onda II

Sin Playa

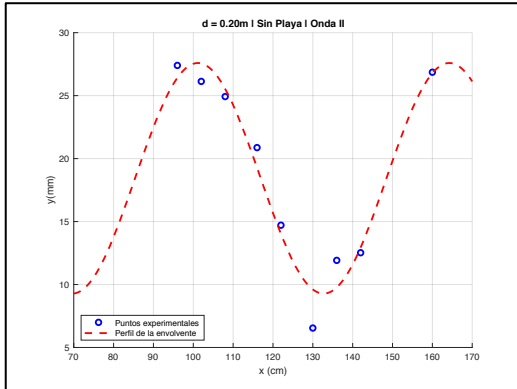


Figura 2.5-9. Onda envolvente de la Onda II para una geometría sin playa. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
17,681	0,577

Playa 1

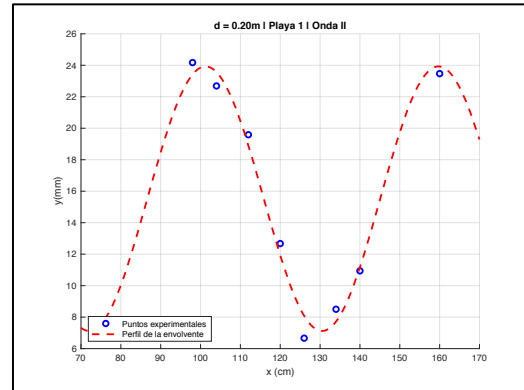


Figura 2.5-10. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 1. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
15,522	0,541

Playa 2

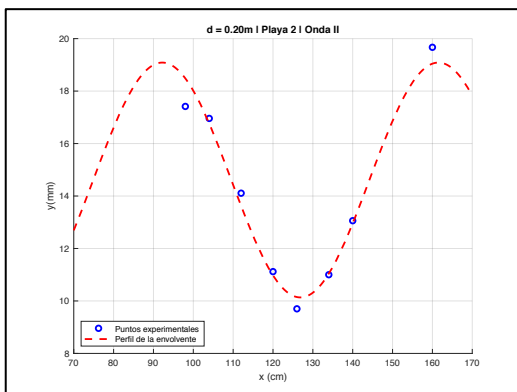


Figura 2.5-11. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 2. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
14,615	0,306

Playa 3

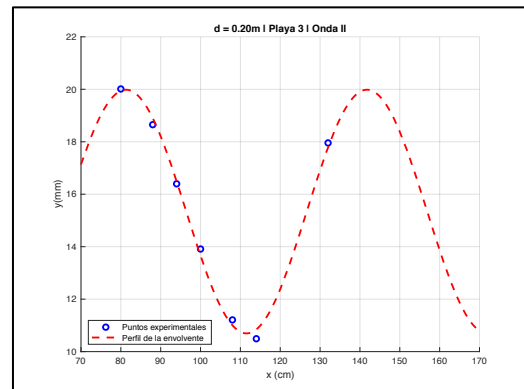


Figura 2.5-12. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 3. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
15,350	0,302

Playa 4

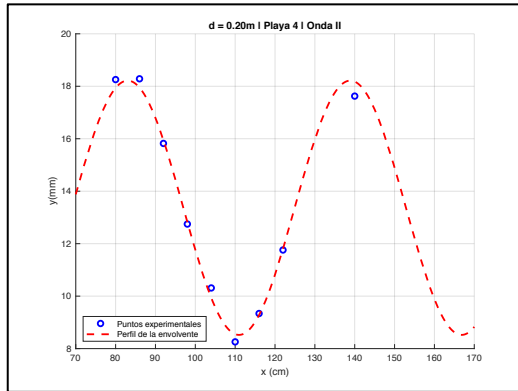


Figura 2.5-13. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 4. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
13,368	0,362

Playa 5

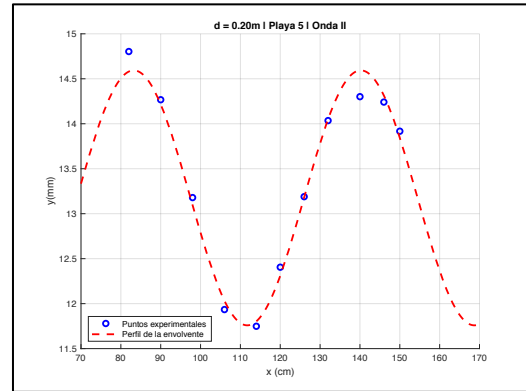


Figura 2.5-14. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 5. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
13,175	0,107

Playa 6

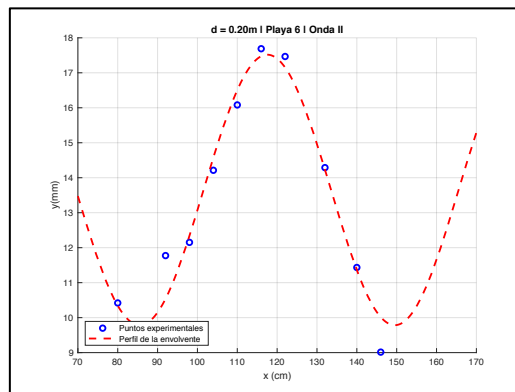


Figura 2.5-15. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 6. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
13,653	0,283

Tabla 2.5-2. Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda II en el calado de $d = 0,20m$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Coeficiente de reflexión K [-]
		Onda II
Sin Playa	90,0	0,577
Playa 1	25,8	0,541
Playa 2	18,6	0,306
Playa 6	17,8	0,283
Playa 5	16,6	0,107
Playa 3	13,7	0,302
Playa 4	8,1	0,362

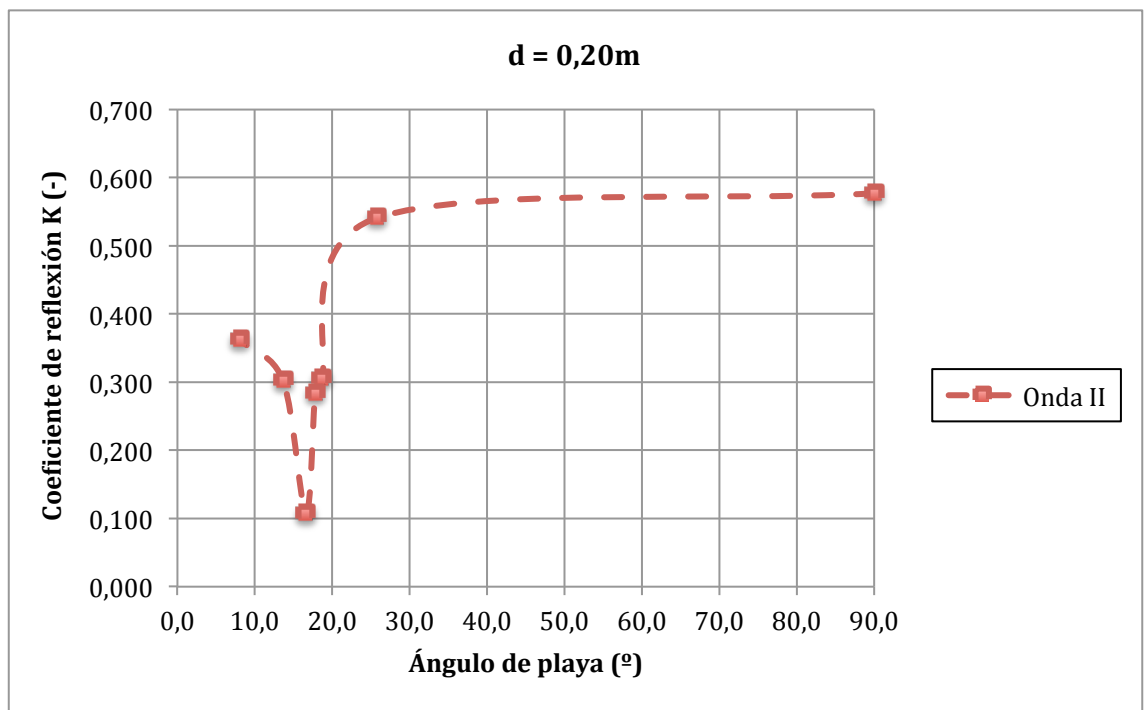


Figura 2.5-16. Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda II en el calado de $d = 0,20m$

2.5.1.1.3. Onda III

Sin Playa

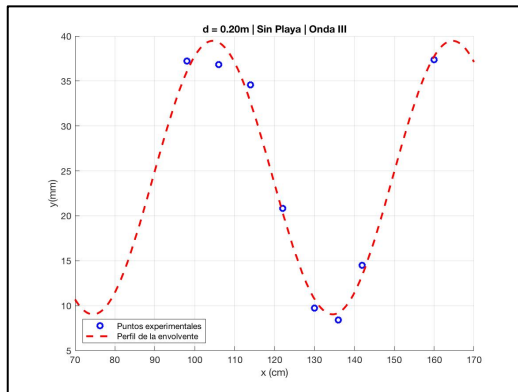


Figura 2.5-17. Onda envolvente de la Onda III para la geometría sin playa. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
24,262	0,627

Playa 1

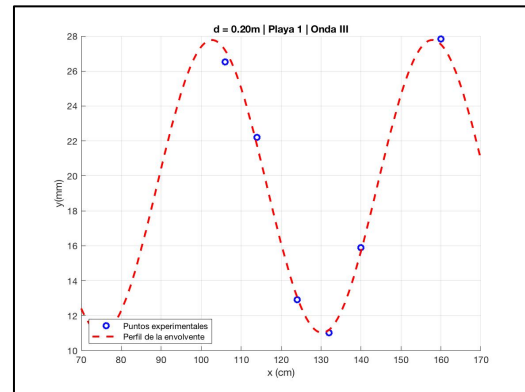


Figura 2.5-18. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 1. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
19,405	0,432

Playa 2

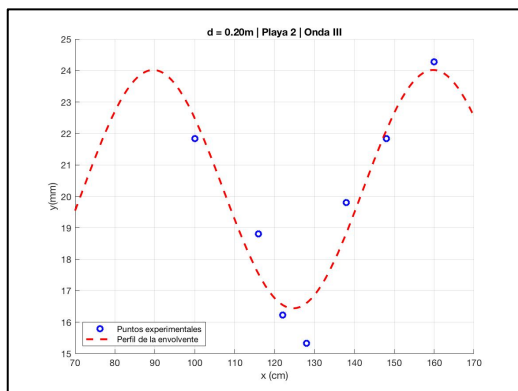


Figura 2.5-19. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 2. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
20,225	0,187

Playa 3

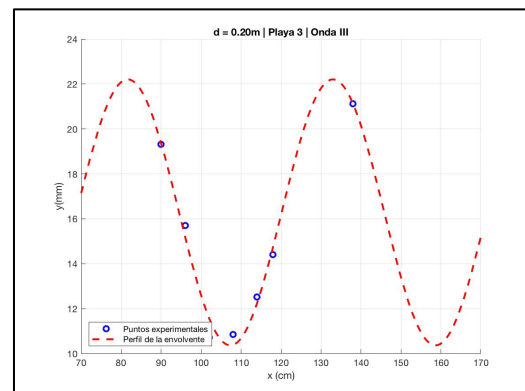


Figura 2.5-20. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 3. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
16,285	0,363

Playa 4

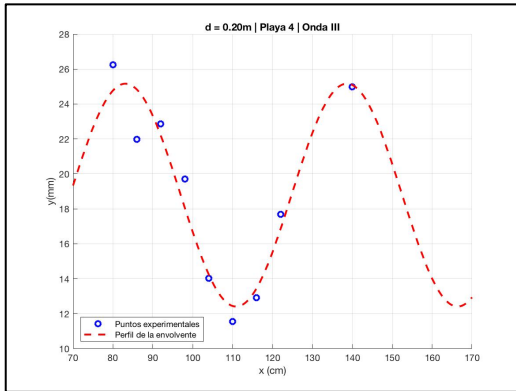


Figura 2.5-21. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 4. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
19,070	0,382

Playa 5

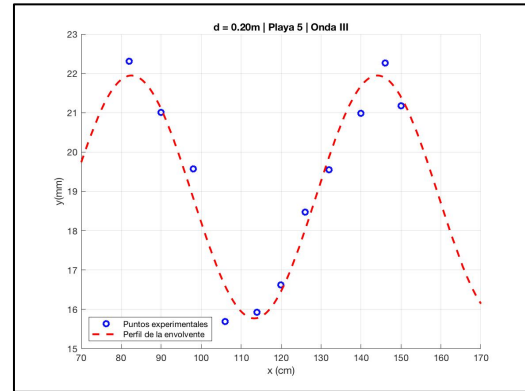


Figura 2.5-22. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 5. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
18,855	0,167

Playa 6

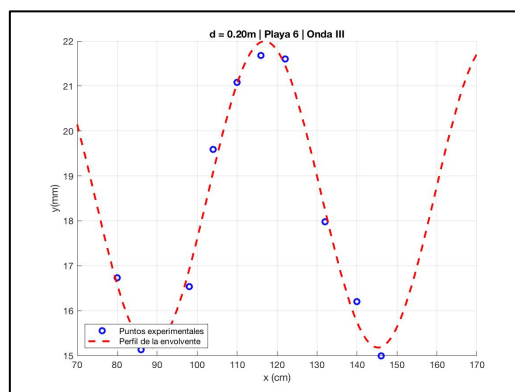


Figura 2.5-23. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 6. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
18,590	0,183

Tabla 2.5-3. Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda III en el calado de $d = 0,20\text{m}$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Coeficiente de reflexión K [-]
		Onda III
Sin Playa	90,0	0,627
Playa 1	25,8	0,432
Playa 2	18,6	0,187
Playa 6	17,8	0,182
Playa 5	16,6	0,164
Playa 3	13,7	0,363
Playa 4	8,1	0,382

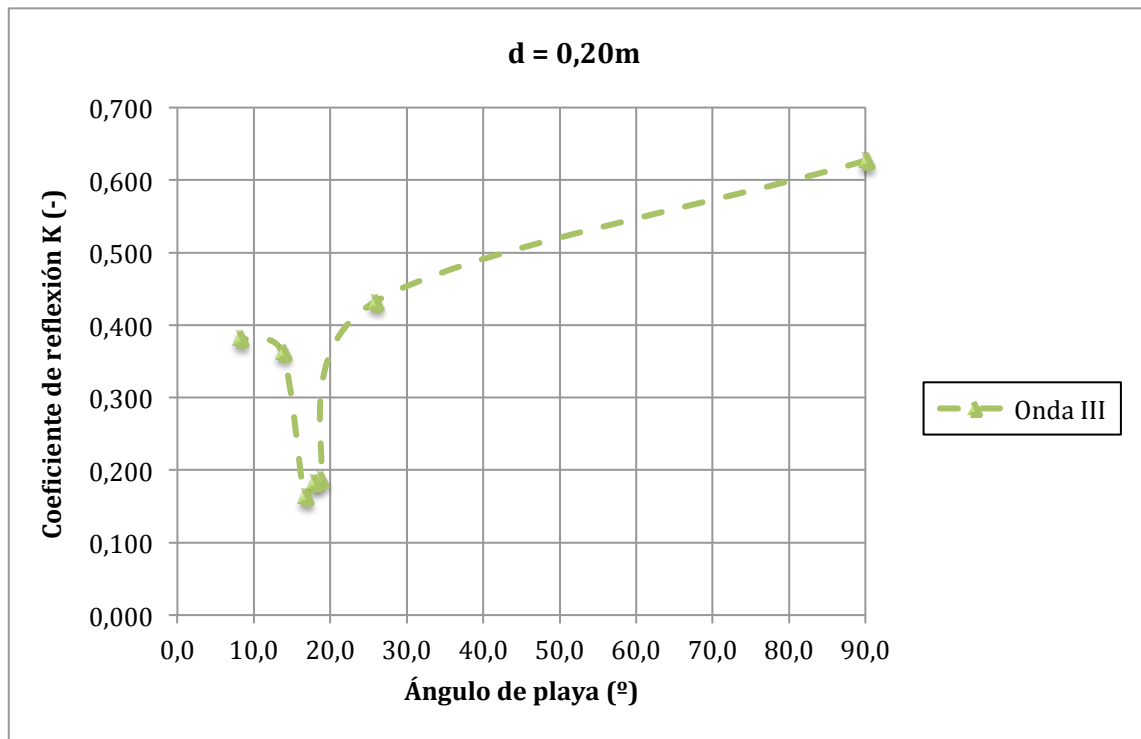


Figura 2.5-24. Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda III en el calado de $d = 0,20\text{m}$

2.5.1.1.4. Comparación de resultados

Tabla 2.5-4. Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para las Ondas I, II y III en el calado de $d = 0,20m$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Coeficiente de reflexión K [-]		
		Onda I	Onda II	Onda III
Sin Playa	90,0	0,611	0,577	0,627
Playa 1	25,8	0,597	0,541	0,432
Playa 2	18,6	0,409	0,306	0,187
Playa 6	17,8	0,131	0,283	0,182
Playa 5	16,6	0,102	0,107	0,164
Playa 3	13,7	0,184	0,302	0,363
Playa 4	8,1	0,257	0,362	0,382

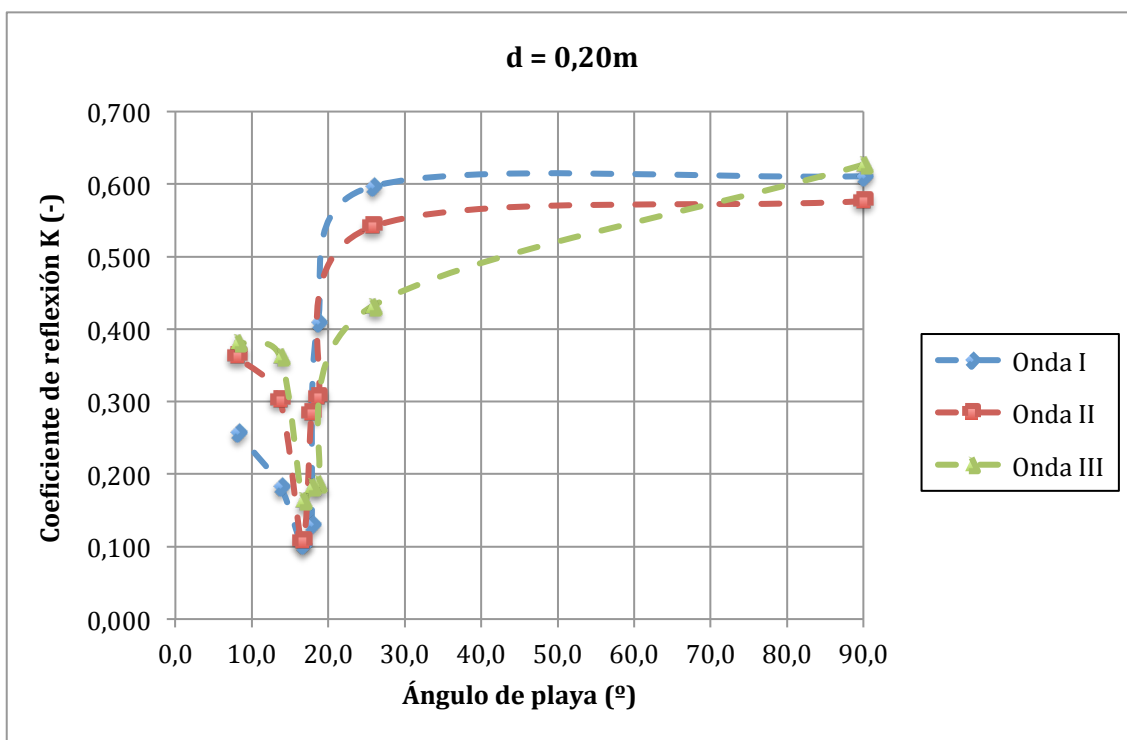


Figura 2.5-25. Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para las Ondas I, II y III en el calado de $d = 0,20m$

Una vez analizadas las tres ondas por separado, es adecuado compararlas entre sí, con el objetivo de obtener conclusiones y establecer relaciones entre los parámetros que gobiernan las ondas y el valor del coeficiente de reflexión.

Como es bien sabido, las tres ondas estudiadas en la sección 2.5.1. presentan un período similar de alrededor de un segundo. Sin embargo, la gran diferencia, notable si se estudia el perfil de la onda envolvente en cada caso, reside en el valor de la altura de onda resultante; siendo la onda I aquella que presenta el valor más bajo y la onda III la de valor más alto.

La finalidad ahora es centrarse en la zona para la cual el coeficiente de reflexión es mínimo. Para las tres ondas estudiadas, se obtiene el valor mínimo en la geometría 5; aquella que presenta un ángulo con respecto a la horizontal de $\alpha = 16,6^\circ$.

El coeficiente de reflexión disminuye a medida que disminuye el ángulo de la playa. Una vez alcanzado el punto óptimo el valor de K aumenta, siendo un valor de $\alpha = 0^\circ$, idealmente, idéntico a una configuración sin playa en la que tendría lugar una reflexión total.

Tal y como se puede comprobar en la *Figura 2.5-25*, la tendencia es similar para las tres ondas. Si bien es cierto que en posiciones intermedias los valores del coeficiente de reflexión varían de una onda a otra, los valores mínimos alcanzados son similares.

Como se ha descrito anteriormente, los estudios de Twu y Liu concluyeron que, para aguas superficiales e intermedias, el valor de K está fuertemente influenciado por el parámetro adimensional h/λ . Habiendo analizado las tres ondas en el mismo calado, el coeficiente de reflexión varía, para una misma geometría, en función de λ . Según la teoría desarrollada por Twu y Liu, la amplitud de la ola incidente tiene influencia en el valor de K .

El estudio experimental valida, además de la teoría de Twu y Liu, la de Miche (1944). Cabe representar el coeficiente de reflexión para una playa de pendiente continua no como un número fijo, sino como un intervalo de números. Haciendo referencia una vez más a la teoría de Miche, esta observación no es únicamente válida para playas planas de pendiente continua, sino que se trata de un hecho general válido para la totalidad de absorbedores de oleaje.

No obstante, la conclusión principal que es posible obtener del análisis de las ondas I, II y III es que, siendo el período similar, la máxima disipación se obtiene con una misma geometría. Esto es vital a la hora de realizar estudios futuros, ya que no es necesario hacer un estudio detallado de todas las olas con las que se quiera trabajar. Es posible detectar la geometría que minimiza el coeficiente de reflexión y maximiza la disipación simplemente conociendo al período de la onda incidente, no importa cuál sea su amplitud.

Realizando, a continuación, el mismo estudio para otro calado distinto se busca validar los resultados experimentales obtenidos.

2.5.1.2. Calado $d = 0,15m$

2.5.1.2.1. Onda I

Sin Playa

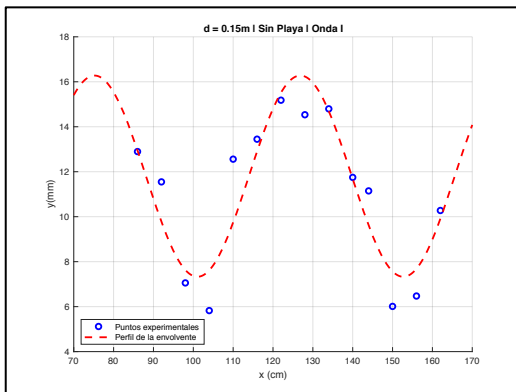


Figura 2.5-26. Onda envolvente de la Onda I para la geometría sin playa. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
11,047	0,473

Playa 1

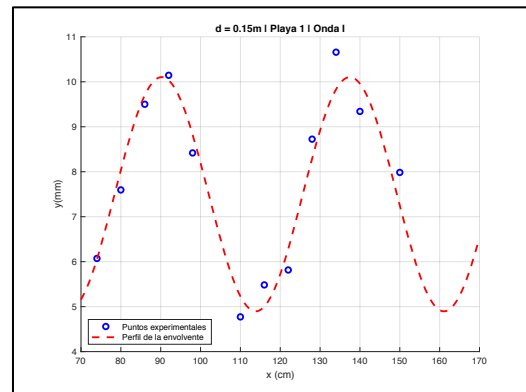


Figura 2.5-27. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 1. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
7,496	0,346

Playa 2

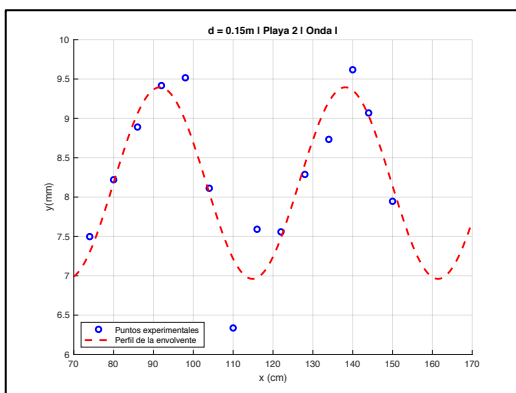


Figura 2.5-28. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 2. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
8,178	0,149

Playa 3

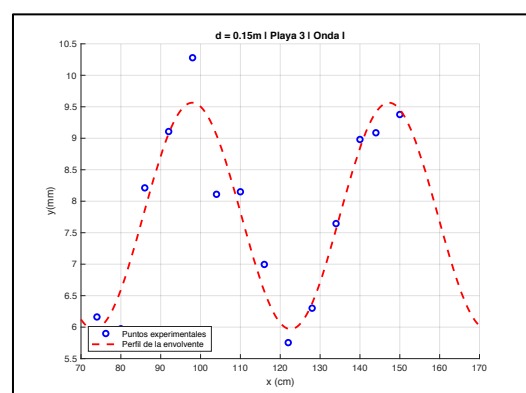


Figura 2.5-29. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 3. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
7,8835	0,242

Playa 4

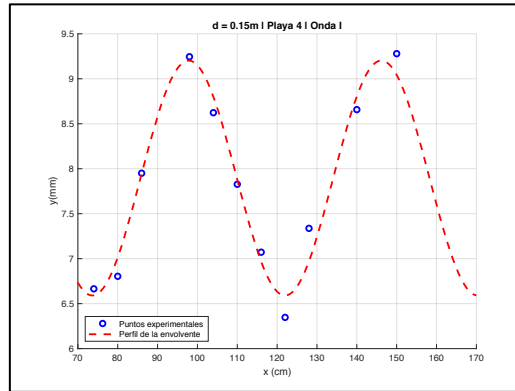


Figura 2.5-30. Onda envolvente de la Onda I para la geometría playa 4. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
7,8965	0,165

Tabla 2.5-5. Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda I en el calado de $d = 0,15m$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Coeficiente de reflexión K [-]
		Onda I
Sin Playa	90,0	0,473
Playa 1	16,5	0,346
Playa 2	12,7	0,149
Playa 4	10,0	0,165
Playa 3	8,2	0,242

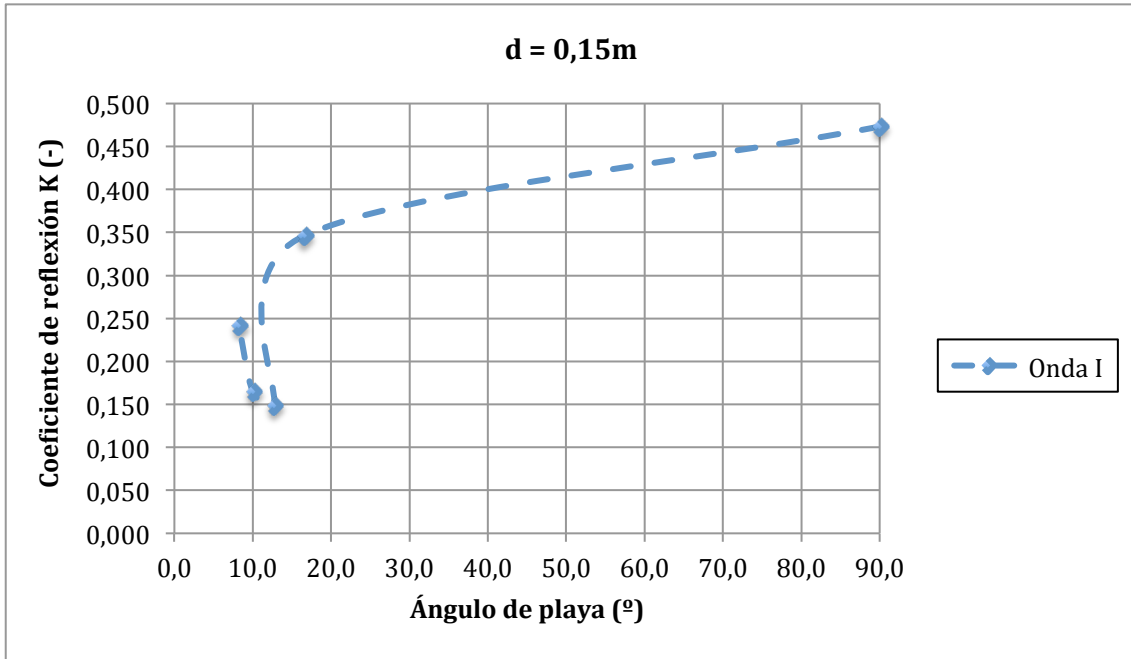


Figura 2.5-31. Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda I en el calado de $d = 0,15m$

2.5.1.2.2. Onda II

Sin Playa

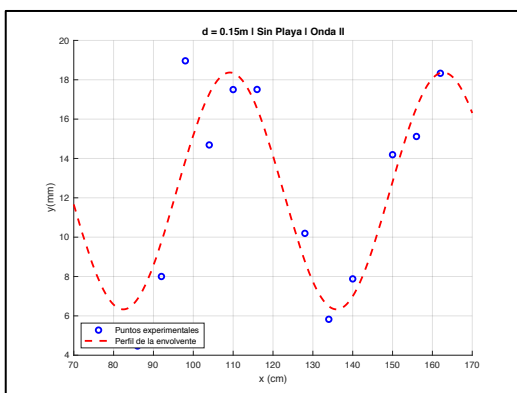


Figura 2.5-32. Onda envolvente de la Onda II para la geometría sin playa. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
13,216	0,501

Playa 1

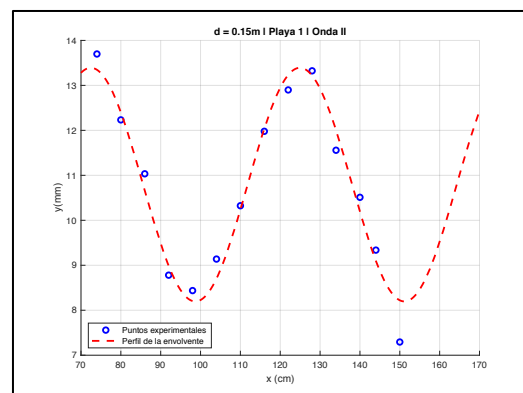


Figura 2.5-33. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 1. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
10,793	0,241

Playa 2

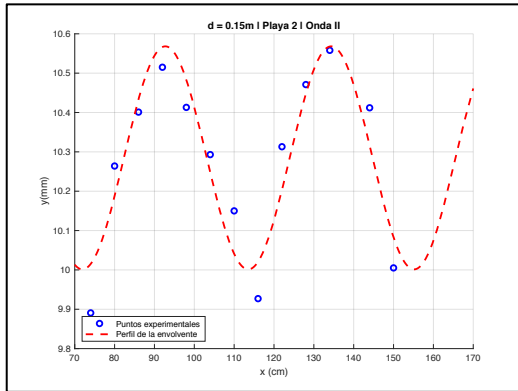


Figura 2.5-34. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 2. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
10,230	0,033

Playa 3

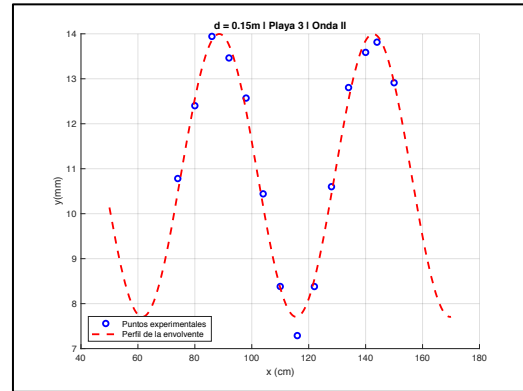


Figura 2.5-35. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 3. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
10,535	0,329

Playa 4

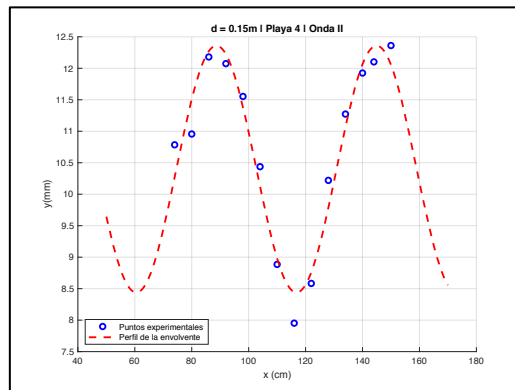


Figura 2.5-36. Onda envolvente de la Onda II para la geometría playa 4. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
10,401	0,188

Tabla 2.5-6. Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda II en el calado de $d = 0,15m$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Coficiente de reflexión K [-]
		Onda II
Sin Playa	90,0	0,501
Playa 1	16,5	0,241
Playa 2	12,7	0,033
Playa 4	10,0	0,188
Playa 3	8,2	0,329

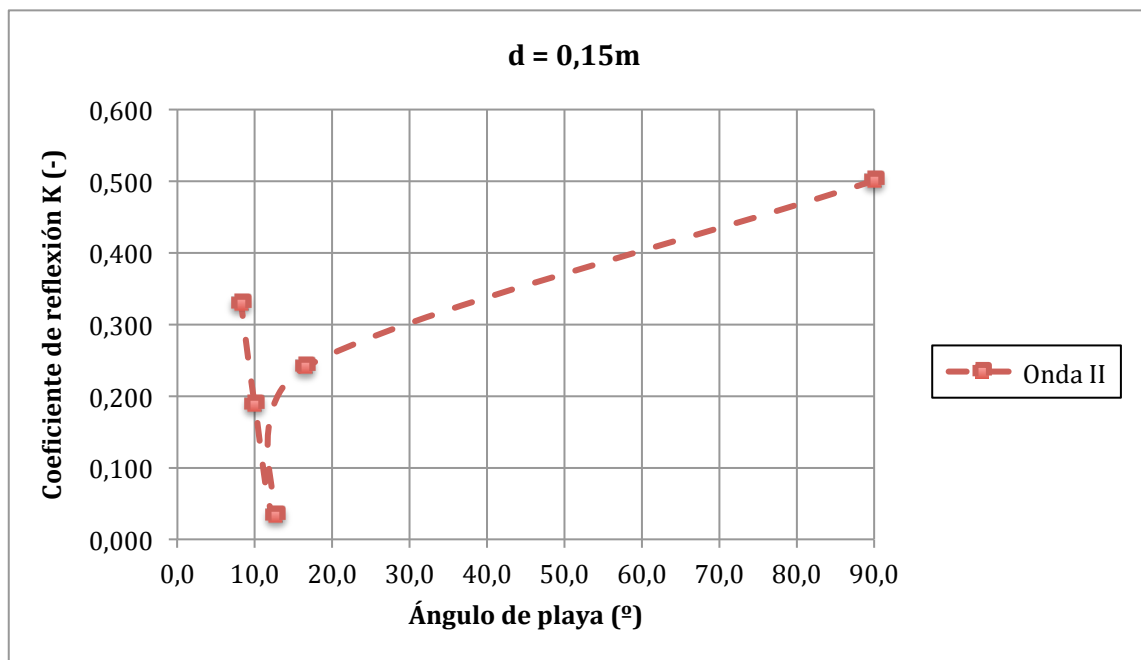


Figura 2.5-37. Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda II en el calado de $d = 0,15m$

2.5.1.2.3. Onda III

Sin Playa

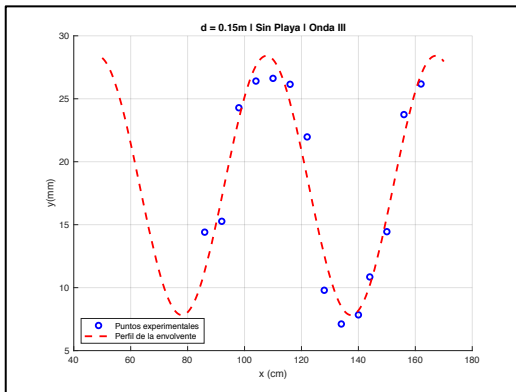


Figura 2.5-38. Onda envolvente de la Onda III para la geometría sin playa. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
18,090	0,568

Playa 1

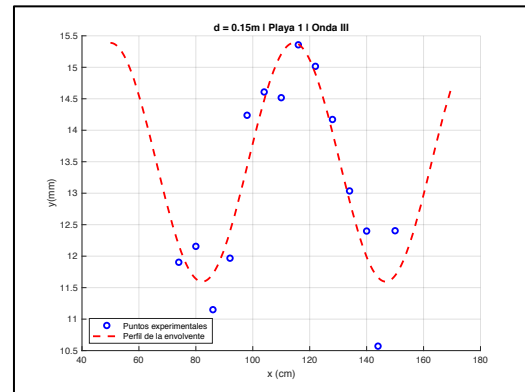


Figura 2.5-39. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 1. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
13,495	0,140

Playa 2

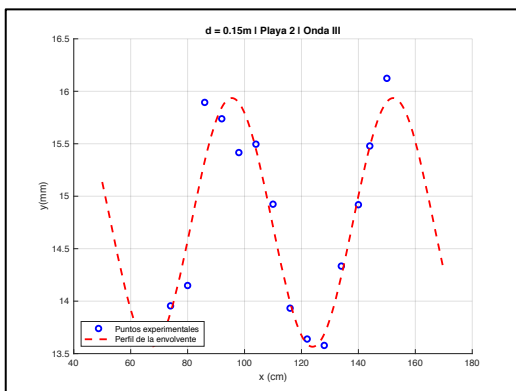


Figura 2.5-40. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 2. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
14,740	0,080

Playa 3

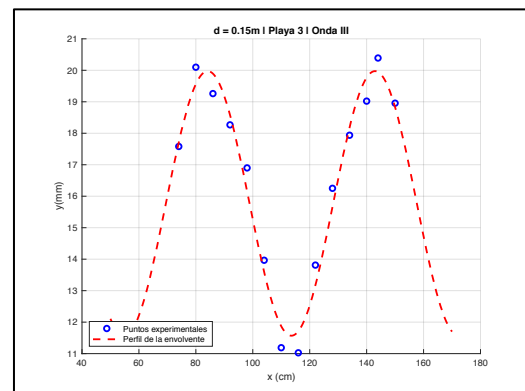


Figura 2.5-41. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 3. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
15,770	0,266

Playa 4

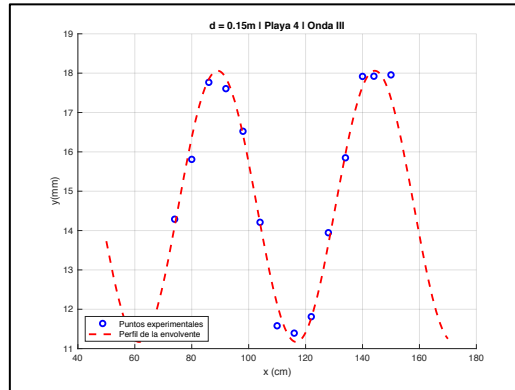


Figura 2.5-42. Onda envolvente de la Onda III para la geometría playa 4. $d = 0,15m$

H [mm]	K [-]
14,600	0,237

Tabla 2.5-7. Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda III en el calado de $d = 0,15m$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Coeficiente de reflexión K [-]
		Onda III
Sin Playa	90,0	0,568
Playa 1	16,5	0,140
Playa 2	12,7	0,080
Playa 4	10,0	0,237
Playa 3	8,2	0,266

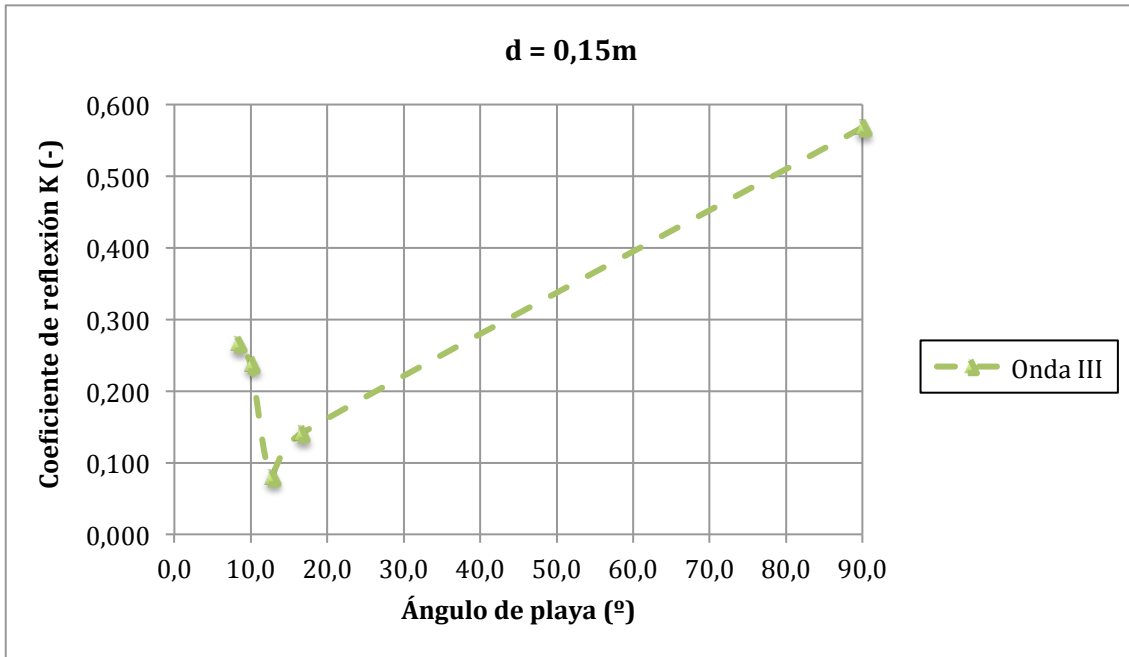


Figura 2.5-43. Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para la Onda III en el calado de $d = 0,15m$

2.5.1.2.4. Comparación de resultados

Tabla 2.5-8. Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para las Ondas I, II y III en el calado de $d = 0,15m$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Coeficiente de reflexión K [-]		
		Onda I	Onda II	Onda III
Sin Playa	90,0	0,473	0,501	0,568
Playa 1	16,5	0,346	0,241	0,140
Playa 2	12,7	0,149	0,033	0,080
Playa 4	10,0	0,165	0,188	0,237
Playa 3	8,2	0,242	0,329	0,266

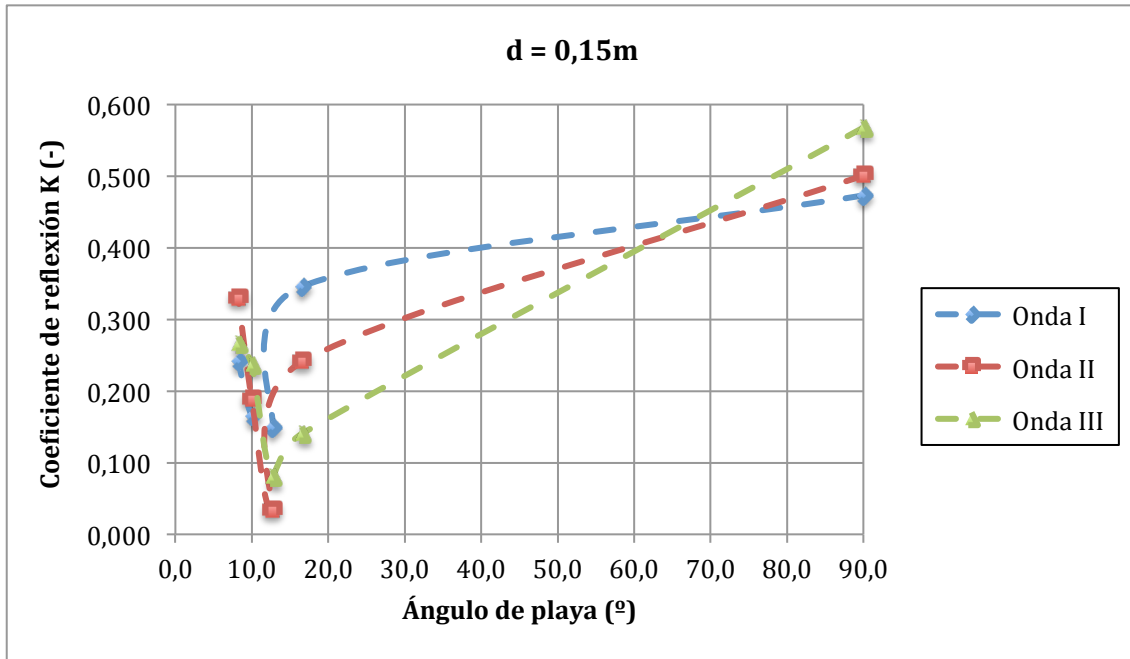


Figura 2.5-44. Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para las Ondas I, II y III en el calado de $d = 0,15m$

Al observar la Figura 2.5-44 se percibe una tendencia similar a aquella representada en la Figura 2.5-25. Aunque cuantitativamente los resultados no sean idénticos, el trabajo experimental arroja una conclusión clara: las olas de igual período se disipan al máximo para la misma geometría de la playa plana de pendiente continua.

Las conclusiones finales, donde se analizarán los posibles errores y las diferencias entre los diferentes casos son objeto de estudio del capítulo 4.1. Sin embargo, queda patente que, considerando el coeficiente de reflexión como un rango de números en lugar de un único número, tal y como sugieren tanto Twu y Liu como Miche, sea cual fuere el calado, el oleaje de período similar se disipa al máximo en la misma zona.

Teniendo en cuenta los valores numéricos, podríamos establecer un intervalo que englobe aquellas playas planas con un ángulo respecto a la horizontal entre $\alpha = 12^\circ$ y $\alpha = 17^\circ$.

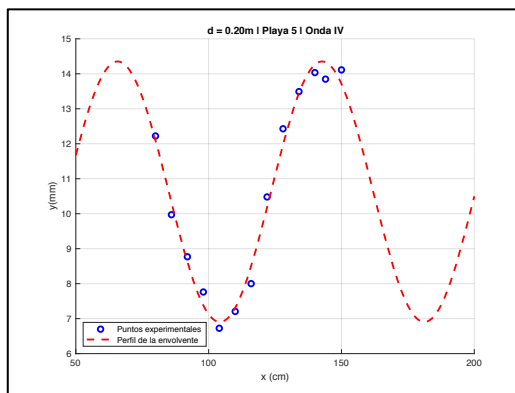
Cabe mencionar que, al igual que sucedía en el calado anteriormente tratado, una vez se minimiza el coeficiente de reflexión, este aumenta bruscamente, mostrando un patrón que sugiere que alcanzará el valor inicial cuando la pendiente de la playa sea nula.

2.5.2. Análisis de ondas con períodos distintos para una única geometría del sistema de disipación

Se analizarán las denominadas Ondas IV, V y VII, junto con la anteriormente definida Onda I. Todas ellas presentan una altura de ola similar, mientras que hay notables diferencias en el período. Los ensayos se han realizado con la geometría que minimizaba el coeficiente de reflexión para la Onda I. En el caso del calado $d = 0,20\text{m}$, esto se lograba en la posición de playa 5; mientras que en el calado $d = 0,15\text{m}$, el valor de K era mínimo en la posición de playa 2

2.5.2.1. Calado $d = 0,20\text{m}$

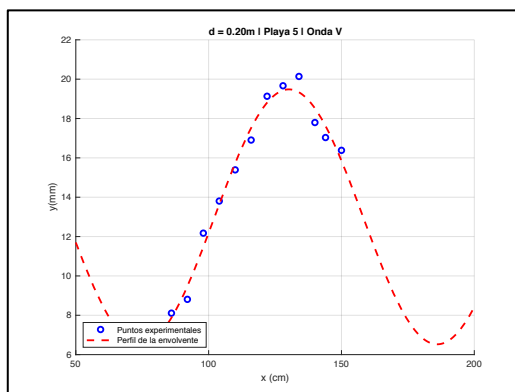
2.5.2.1.1. Onda IV



H [mm]	K [-]
10,628	0,350

Figura 2.5-45. Onda envolvente de la Onda IV para la geometría playa 5. $d = 0,20\text{m}$

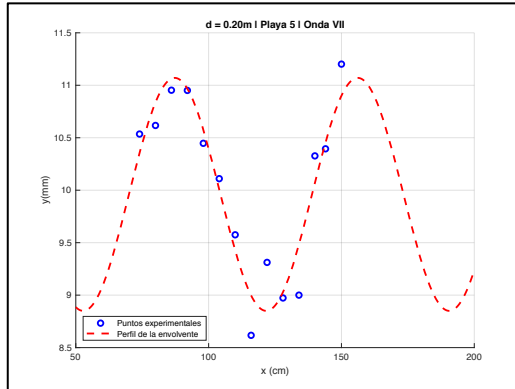
2.5.2.1.2. Onda V



H [mm]	K [-]
10,519	0,617

Figura 2.5-46. Onda envolvente de la Onda V para la geometría playa 5. $d = 0,20\text{m}$

2.5.2.1.3. Onda VII



H [mm]	K [-]
10,013	0,104

Figura 2.5-47. Onda envolvente de la Onda VII para la geometría playa 5. $d = 0,20m$

2.5.2.1.4. Comparación de resultados

Tabla 2.5-9. Resumen del valor del coeficiente de reflexión para la posición de playa 5 para las Ondas I, IV, V y VII en el calado de $d = 0,20m$

	Ángulo $\alpha = 16,6^\circ$		
	T (s)	K (-)	H (mm)
Onda I	0,920	0,102	10,412
Onda VII	1,140	0,104	10,013
Onda IV	1,343	0,350	10,628
Onda V	1,545	0,617	10,519

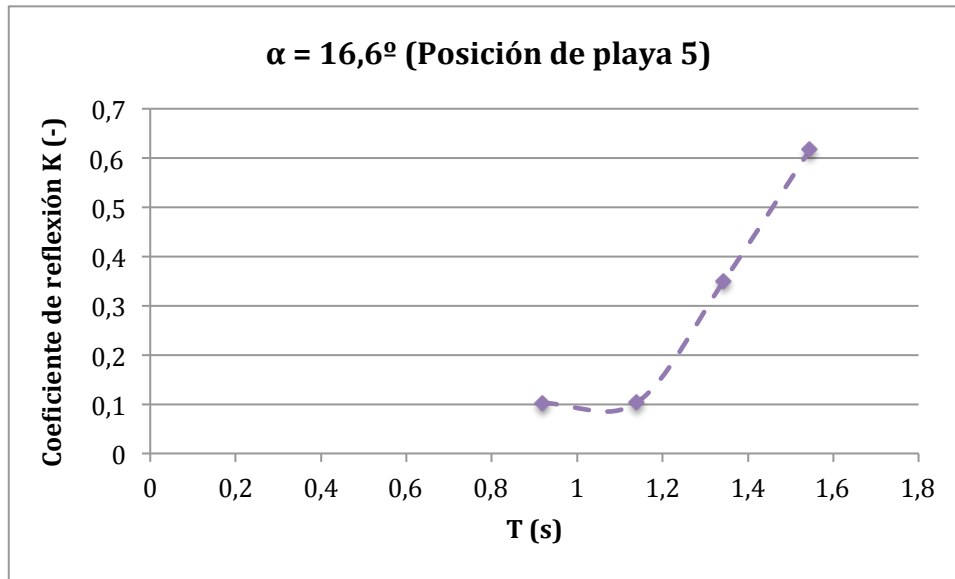


Figura 2.5-48. Representación del coeficiente de reflexión como función del período de las Ondas I, IV, V y VII para la posición de playa 5 en el calado de $d = 0,20\text{m}$

Las ondas analizadas varían en período manteniendo igual su altura de onda. Habiendo comprobado en secciones anteriores que la altura de la onda no tiene una influencia notable en el momento de minimizar el valor del coeficiente de reflexión, queda patente que las diferencias que existen en este, tal y como se puede apreciar en la Figura 2.5-48, son función del período de la onda incidente.

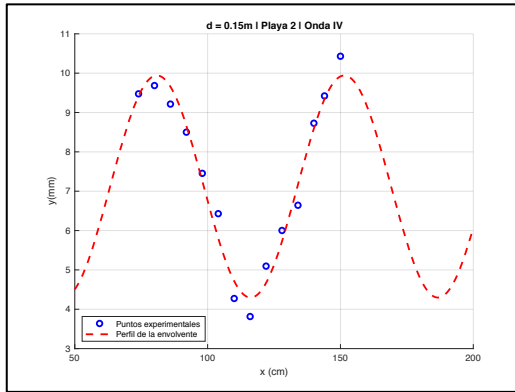
Existe, por lo tanto, una fuerte dependencia entre el valor del coeficiente de reflexión K y el período de la onda T , estableciendo así que, a medida que disminuye este último, también lo hace el primero hasta obtener una posición óptima.

Con el fin de profundizar en este análisis y cuantificar la importancia que tiene el período de las ondas incidentes a la hora de ser disipadas, se desarrollará un análisis más detallado para las ondas IV y V en la sección 2.5.3. Así, será posible verificar que existen diferencias en función del período para ondas de igual amplitud.

No obstante, primeramente se realizará este mismo análisis para el calado de $d = 0,15\text{m}$.

2.5.2.2. Calado $d = 0,15m$

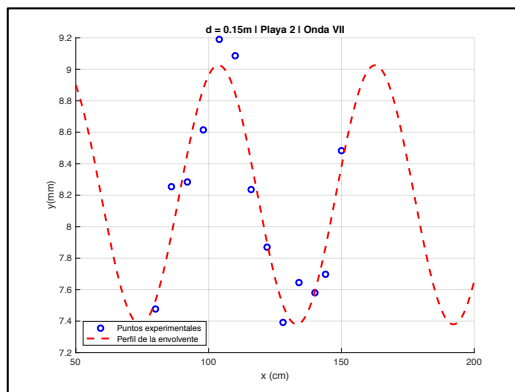
2.5.2.2.1. Onda IV



H [mm]	K [-]
7,118	0,396

Figura 2.5-49. Onda envolvente de la Onda IV para la geometría playa 2. $d = 0,15m$

2.5.2.2.2. Onda VII



H [mm]	K [-]
8,203	0,100

Figura 2.5-50. Onda envolvente de la Onda VII para la geometría playa 2. $d = 0,15m$

2.5.2.2.3. Comparación de resultados

Tabla 2.5-10. Resumen del valor del coeficiente de reflexión para la posición de playa 2 para las Ondas I, IV y VII en el calado de $d = 0,15m$

	Ángulo $\alpha = 12,7^\circ$		
	T (s)	K (-)	H (mm)
Onda I	0,901	0,1488	8,178
Onda VII	1,163	0,1	8,203
Onda IV	1,322	0,3963	7,118

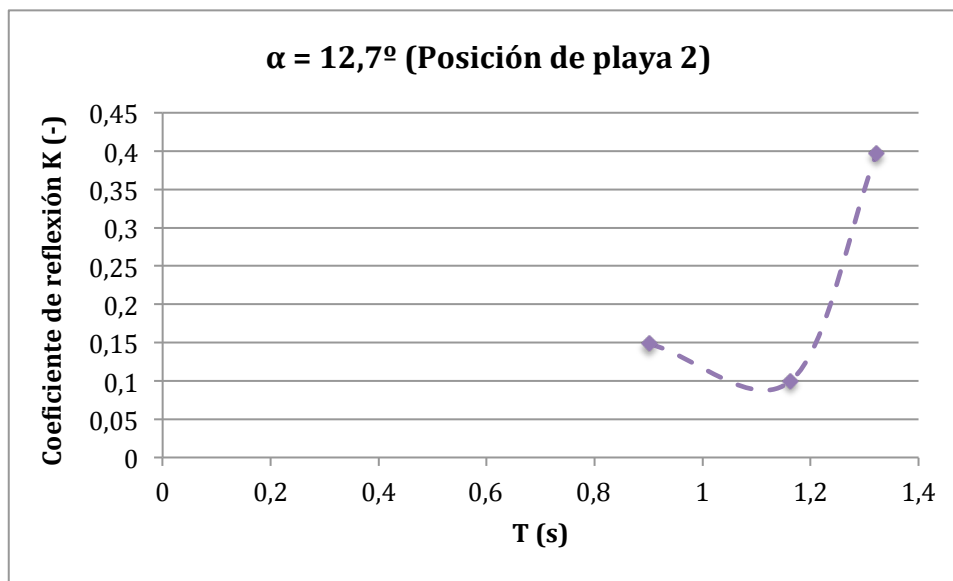


Figura 2.5-51. Representación del coeficiente de reflexión como función del período de las Ondas I, IV y VII para la posición de playa 2 en el calado de $d = 0,15m$

Es evidente que existe una fuerte dependencia entre el valor de K y del período. La tendencia es igual para los dos calados analizados.

2.5.3. Análisis de ondas con períodos distintos para distintas geometrías del sistema de disipación

2.5.3.1. Calado $d = 0,20m$

2.5.3.1.1. Onda IV

Playa 7

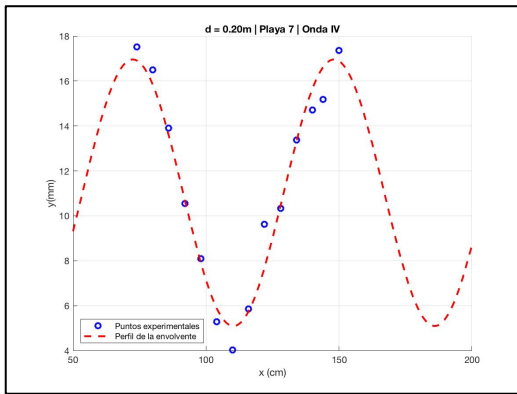


Figura 2.5-52. Onda envolvente de la Onda IV para la geometría playa 7. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
11,029	0,538

Playa 8

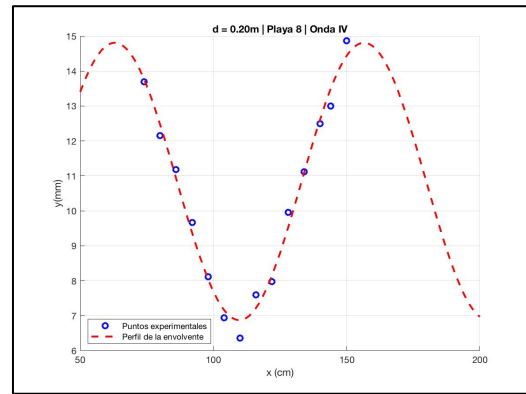


Figura 2.5-53. Onda envolvente de la Onda IV para la geometría playa 8. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
10,844	0,310

Playa 9

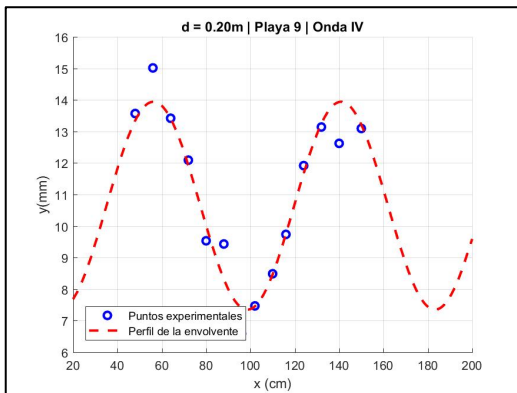


Figura 2.5-54. Onda envolvente de la Onda IV para la geometría playa 9. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
10,667	0,312

Playa 10

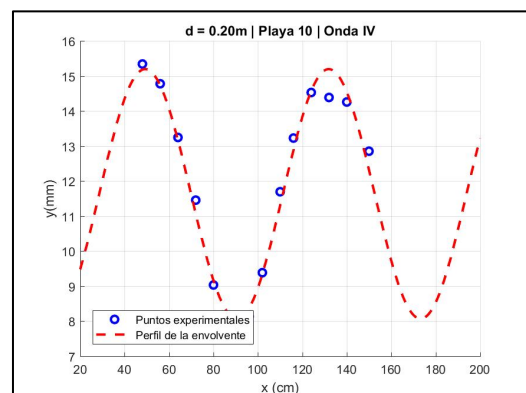


Figura 2.5-55. Onda envolvente de la Onda IV para la geometría playa 10. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
10,756	0,320

2.5.3.1.2. Onda V

Playa 8

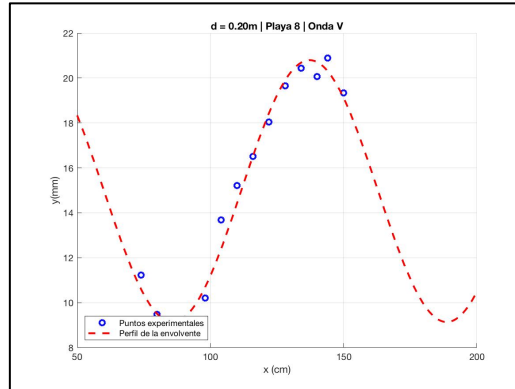


Figura 2.5-56. Onda envolvente de la Onda V para la geometría playa 8. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
14,977	0,389

Playa 9

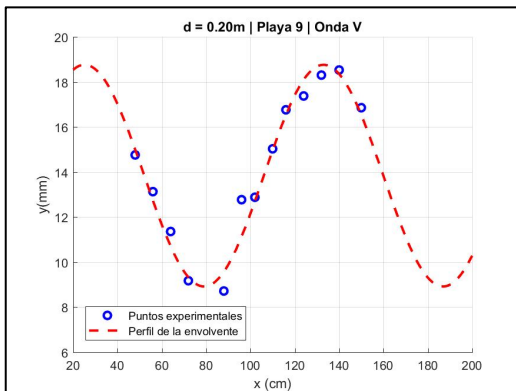


Figura 2.5-57. Onda envolvente de la Onda V para la geometría playa 9. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
13,982	0,347

Playa 10

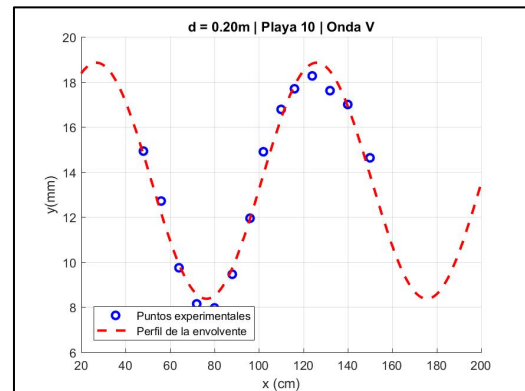


Figura 2.5-58. Onda envolvente de la Onda V para la geometría playa 10. $d = 0,20m$

H [mm]	K [-]
14,431	0,390

2.5.3.1.3. Comparación de resultados

Antes de mostrar las representaciones del coeficiente de reflexión en función del ángulo del sistema de disipación, es necesario comentar que, debido a problemas en la fijación de la playa en el flume las geometrías trabajadas no son las mismas para las tres ondas analizadas. Sin embargo, la zona en la cual se maximiza la disipación está plenamente definida para todas las olas.

Tabla 2.5-11. Resumen del valor del coeficiente de reflexión en función del ángulo de la geometría utilizada para las Ondas I, IV y V en el calado de $d = 0,20m$

Configuración sistema de disipación	Ángulo [°]	Coeficiente de reflexión K [-]		
		Onda I	Onda IV	Onda V
Sin Playa	90,0	0,611	-	-
Playa 1	25,8	0,597	-	-
Playa 7	21,2	-	0,538	-
Playa 2	18,6	0,409	-	-
Playa 6	17,8	0,131	-	-
Playa 5	16,6	0,102	0,350	0,617
Playa 8	14,9	-	0,310	0,389
Playa 3	13,7	0,184	-	-
Playa 9	13,6	-	0,312	0,347
Playa 10	11,0	-	0,320	0,390
Playa 4	8,1	0,257	-	-

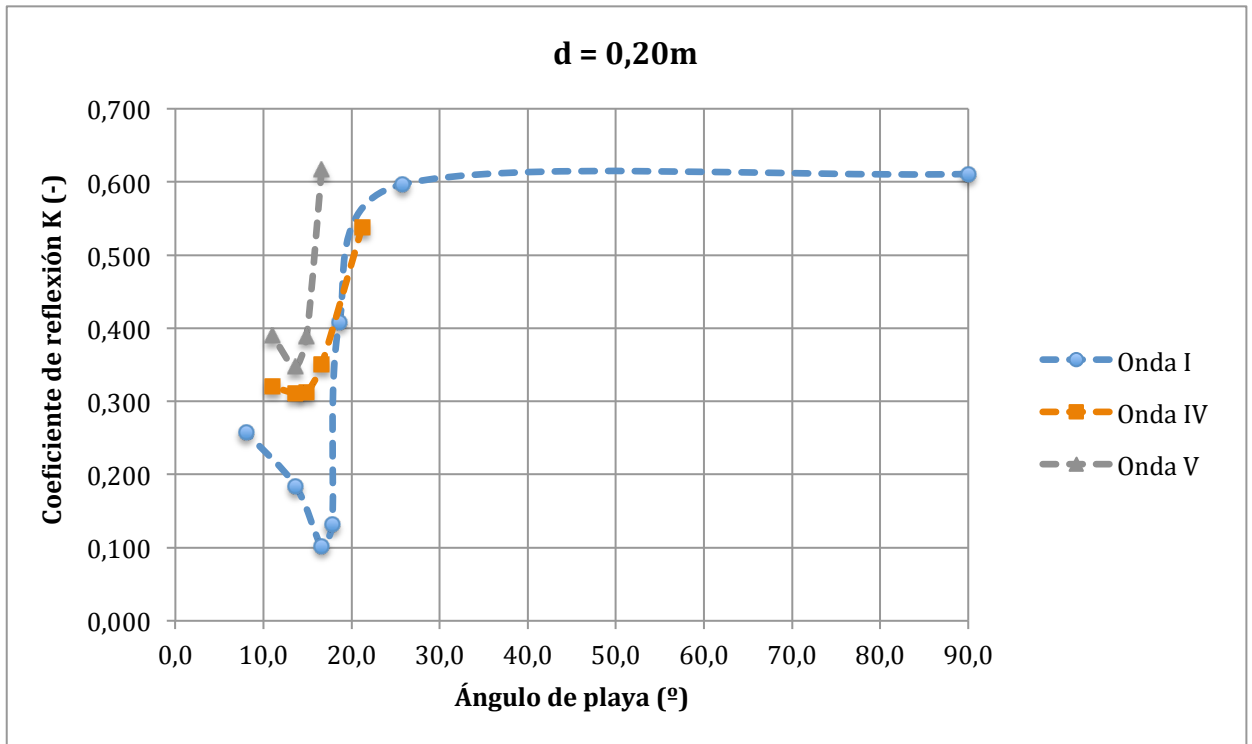


Figura 2.5-59. Representación del coeficiente de reflexión como función del ángulo de la geometría utilizada para las Ondas I, IV y V en el calado de $d = 0,20m$

La Figura 2.5-59 deja entrever dos consecuencias muy importantes que tienen lugar con un aumento en el período de la ola incidente:

- (i) Es necesario un ángulo de playa menor para conseguir la máxima disipación del oleaje.
- (ii) No se consigue disipar la ola de la misma manera; es decir, la máxima disipación posible es menor, *ergo* el valor mínimo de K es mayor.

La fuerte influencia del período que quedaba patente en los análisis anteriores se ve reflejada perfectamente en este análisis.

De cara a representar los resultados obtenidos de una forma más clara y precisa, se mostrarán a continuación, únicamente las configuraciones que minimizan el coeficiente de reflexión para cada una de las ondas. Se tratará así de obtener una relación entre el valor del período y el valor mínimo de K .

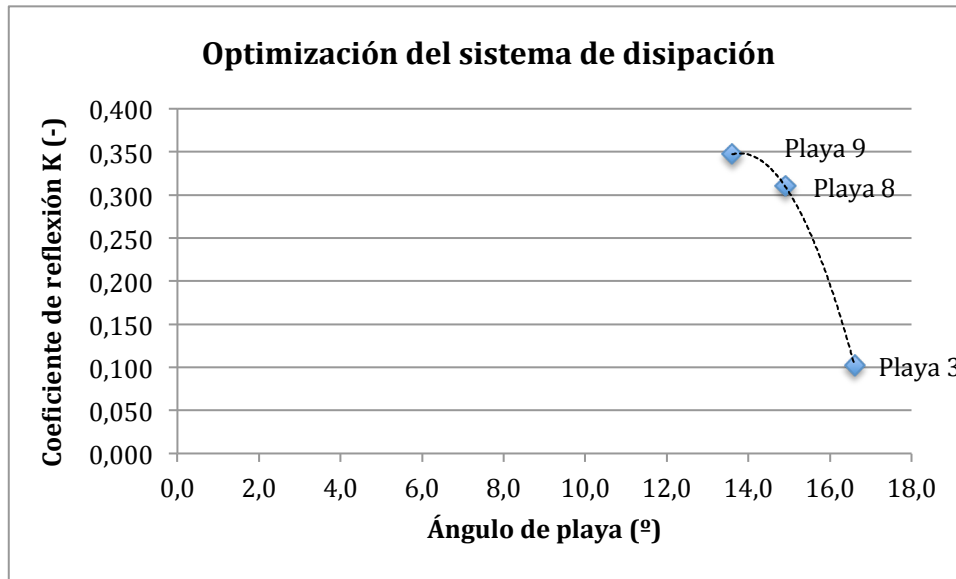


Figura 2.5-60. Representación del coeficiente de reflexión en la posición en la que se minimiza para las ondas I, IV y V en el calado de $d = 0,20m$

Es posible observar en la Figura 2.5-60 que el punto en el que se minimiza el coeficiente de reflexión se desplaza hacia la izquierda a medida que aumenta el período; es decir, es necesaria una pendiente menos pronunciada para disipar al máximo el oleaje.

3 Aspectos económicos

3.1. Descripción del presupuesto ejecutado	102
3.1.1. Descripción	102
3.1.1.1. Canal	102
3.1.1.2. Estructura de aluminio, acero y paredes de metacrilato	102
3.1.1.3. Playa	102
3.1.1.4. Servomotor	102
3.1.1.5. Actuador lineal	103
3.1.1.6. Célula de carga	103
3.1.1.7. Bomba	103
3.1.1.8. Sensores de ultrasonidos	104
3.1.1.9. Obra civil	104
3.1.1.10. Instalación, montaje y pruebas	104
3.1.2. Resumen y costes totales	104

3.1. Descripción del presupuesto ejecutado

3.1.1. Descripción

A continuación se detallará el equipamiento utilizado para llevar a cabo los ensayos experimentales.

3.1.1.1. Canal

Dimensiones principales:

- Longitud: 3,00m
- Anchura: 0,40m
- Altura: 0,50m

3.1.1.2. Estructura de aluminio, acero y paredes de metacrilato

3.1.1.3. Playa

Dimensiones principales:

- Longitud: 0,72m
- Anchura: 0,40m

3.1.1.4. Servomotor

LinMot PS01-37Sx120F-HP-N

nº artículo: 0150-1296

Datos técnicos:

- Stroke máximo: 1480mm
- Fuerza máxima: 255N
- Fuerza continua: 35-67N
- Velocidad máxima: 3,8m/s
- Diámetro del estátor: 37mm
- Longitud del estátor: 150mm
- Masa del estátor: 800g
- Diámetro de la deslizadera: 20mm
- Longitud de la deslizadera: 240-1600mm
- Masa de la deslizadera: 490-3620g

3.1.1.5. Actuador lineal

ROLLON ASN280450 300916

Guía telescópica de extensión parcial compuesta por una guía y un cursor.

Datos técnicos:

- Carrera máxima: 1013mm
- Longitud máxima de la guía: 1970mm
- Velocidad máxima de extensión: 0,8m/s
- Extensión: 50%
- Intervalo de temperatura: -20°C a 170°C
- Pistas de rodadura templadas por inducción
- Guías y cursores con rodamiento de acero al carbono laminado en frío
- Bolas realizadas con rodamientos de acero al carbono templado
- Galvanizado electrolítico según la norma ISO 2081

3.1.1.6. Célula de carga

Grupo EPELSA S.L. Modelo TSF.

nº de serie: 50088842/2010

nº de certificado: TC2970

Datos técnicos:

- Emax = 60kg
- Vmin = max/8000

3.1.1.7. Bomba

Pedrollo 3960/A TOP 1 n.B

Datos técnicos:

- Q = 20-140L/min
- Hmax = 7m
- Hmin = 1m
- V = 220-240V
- f = 50Hz
- P = 0,25kW (0,33HP)
- I = 1,3A
- C = 6,3µF

3.1.1.8. Sensores de ultrasonidos

Pepperl Fuchs UB500-F42S-E5-V15 con sistema de cabezal único.

Datos técnicos:

- Rango de detección: 30-500mm
- Rango de ajuste: 50-500mm
- Zona ciega: 0-30mm
- Estándar: 100 x 100 (mm²)
- Frecuencia del transductor: aprox. 390kHz
- Retardo de respuesta: aprox. 50ms

3.1.1.9. Obra civil

Consistente en la perforación del suelo para la instalación de tuberías.

3.1.1.10. Instalación, montaje y pruebas

Se estima un tiempo de montaje de 40h aproximadamente y un coste de 75€/h.

3.1.2. Resumen y costes totales

Tabla 3.1-1. Presupuesto ejecutado en el proyecto.

HORAS INTERNAS			
Concepto	nº horas	Coste (€/h)	Total
Ingeniero júnior	200	30	6.000 €
Ingeniero superior	25	50	1.250 €
Subtotal			7.250 €

AMORTIZACIONES				
Concepto	nº horas	Coste inicial	Vida útil (h/año)	Total
Licencia MATLAB	50	1.000 €	400	125 €
Licencias Microsoft®Office	100	230 €	7000	3,29 €
Ordenador	180	1.000 €	3000	60 €
Canal (3,00 x 0,40 x 0,50)	50	16.600 €	500	1.660 €
Estructura	50	12.000 €	500	1.200 €
Playa	50	1.800 €	500	180 €
ServoMotor y actuador lineal	50	4.250 €	500	425 €
Célula de carga	50	250 €	500	25 €
Sistema de generación de olas	50	2.100 €	500	2.100 €
Tarjeta de adquisición de datos	50	1.900 €	500	190 €
Bomba	2	4.500 €	40	225 €
Sensores de ultrasonidos	50	600 €	1000	30 €
			Subtotal	6.223 €

GASTOS	
Concepto	Total
Material	5 €
Traslados	60 €
Otros gastos (agua, luz, etc.)	300 €
Subtotal	365 €

SUBCONTRATACIONES	
Concepto	Total
Obra civil	1.500 €
Instalación, montaje y pruebas	3.000 €
Subtotal	4.500 €

RESUMEN	
HORAS INTERNAS	7.250 €
AMORTIZACIONES	6.223 €
GASTOS	365 €
SUBCONTRATACIONES	4.500 €
COSTES DIRECTOS	18.338 €
Imprevistos (10%)	1.834 €
TOTAL	20.172 €

4 Conclusiones

4.1. Conclusiones finales	107
4.2. Futuros proyectos.....	109

4.1. Conclusiones finales

En este apartado se realiza un breve resumen de los resultados obtenidos y analizados más detalladamente en el apartado 2.5.

Primeramente, se considera oportuno hacer una síntesis de la metodología utilizada para llevar a cabo, de forma satisfactoria, la realización de los ensayos experimentales.

1. Se han analizado tres ondas de distinta amplitud pero igual período para un calado de $d = 0,20\text{m}$.
2. Se ha verificado la tendencia de los resultados iniciales desarrollando el mismo análisis para un calado de $d = 0,15\text{m}$.
3. Se ha trabajado con otras tres ondas de igual amplitud pero cuyo período varía. Se han realizado ensayos en las posiciones en las que se minimizaba el valor del coeficiente de reflexión para los calado citados anteriormente.
4. Al ver una fuerte influencia del período en el valor del coeficiente de reflexión, se han efectuado diversos ensayos para diferentes geometrías del sistema de disipación para las ondas de distinto período.

A continuación, se analizan los resultados para cada una de las variables estudiadas:

- **Ondas de igual período pero distinta amplitud**

El valor mínimo del coeficiente de reflexión se obtiene en todas las ondas para la misma geometría. Esto implica que, si se quiere disipar al máximo una cierta onda de un período T_1 conocido, es suficiente con haber realizado un estudio precedente de otra onda de período $T = T_1$; no es necesario ejecutar un nuevo estudio.

Aunque exista una dependencia clara entre la amplitud de la onda y el coeficiente de reflexión, esto conlleva, únicamente, diferencias en los valores numéricos. Cuantitativamente, la onda se disipa al máximo siempre para la misma geometría, sea cual fuere su amplitud.

Los resultados obtenidos para el calado de $d = 0,20\text{m}$ son más representativos que aquellos correspondientes al calado de $d = 0,15\text{m}$. Esto se debe a la distancia entre los sensores y la superficie libre. En el caso del calado de $d = 0,15\text{m}$, esta es mayor, lo que implica que la señal de ultrasonidos viaja una distancia más grande, pudiendo desviarse con mayor facilidad al entrar en contacto con el agua.

Esto explica también las diferencias en los valores obtenidos para las configuraciones sin playa. Como se ha mencionado anteriormente, se presuponían unos valores cercanos a la unidad y ; sin embargo, se han obtenido valores menores. No obstante, esto no tiene una influencia importante en el estudio realizado.

- **Ondas de distinto período e igual amplitud**

En este caso, la diferencia de período tiene una fuerte influencia en el valor del coeficiente de reflexión. Cuanto mayor es el período de la onda, mayor es el valor de K para la misma geometría del sistema de disipación.

Las ondas no se disipan al máximo para geometrías idénticas. Un aumento en el período implica que, para minimizar la reflexión, sea necesaria una pendiente menos pronunciada. Además, no se consigue disipar las olas al mismo nivel. La relación es idéntica: cuanto mayor sea el período de la ola, más difícil es disiparla.

4.2. Futuros proyectos

Una vez alcanzada una visión global de las partes implicadas a la hora de analizar el coeficiente de reflexión de una manera experimental, se adquiere una mayor perspectiva de las variantes que se podrían abordar:

1. Las mejoras que se podrían aplicar al experimento en cuestión, de forma que los resultados se ajusten más a la realidad, son:
 - a. Esperar a que el nivel del agua se estabilice por completo antes de empezar a realizar un nuevo ensayo.
 - b. Fijar la playa en el extremo en el que se coloca, de forma que las mediciones de los ángulos sean más precisas.
 - c. Teniendo en cuenta la fuerte implicación de los dispositivos electrónicos a la hora de hacer las mediciones, se destaca la importancia de desarrollar los proyectos en colaboración con otras ramas de la ingeniería.
2. Trabajar con olas no contempladas por la teoría de Ayri. Son especialmente interesantes, desde un punto de vista del estudio futuro en la costa vasca, aquellas definidas por la teoría de Stokes de 2^º orden, ya que son las más frecuentes en el área delimitada por BIMEP.
3. Debido a los continuos avances desarrollados entorno a las maquetas de ensayo disponibles en la escuela, sería interesante llevar a cabo la metodología experimental en el *flume* (Izquierdo, Esteban, Blanco, Albaina, & Peña, 2019) grande del laboratorio de mecánica de fluidos.
4. El análisis realizado permite dimensionar el efecto de la reflexión al ejecutar ensayos con otros fines. De la misma forma, es posible, además de minimizar el efecto de la ola reflejada, conocer sus propiedades, lo que supondría unas mejoras en los cálculos efectuados validando prototipos de captación de energía del oleaje, por ejemplo.
5. Debido a algunas diferencias entre los valores esperados y los obtenidos, se propone realizar una simulación CFD para verificar los resultados y obtener así unos más próximos a la realidad.

5 Referencias

- Dean, R., & Dalrymple, R. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists* (Vol. 2). Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. .
- Delafontaine, M. (2016). *Experimental study on the performance of different wave absorbers in a wave flume*. Universiteit Gent, Department of Civil Engineering. Gent: Faculty of Engineering and Architecture.
- Falcao, A. F. (22 de Octubre de 2009). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , págs. 899-918.
- Fernández, P. (2004). Energía de las olas. En P. Fernández, *Energía del mar* (págs. 60-82). Santander, Cantabria, España: Escuelas de Ing. Industriales y de Ing. de Caminos de la Universidad de Cantabria.
- Galparsoro, I., Liria, P., Legorburu, I., Ruiz-Minguela, P., Pérez, G., Marqués, J., y otros. (Octubre de 2008). Atlas de energía del oleaje en la costa vasca. (D. Á. Borja, Ed.) *Revista de investigación marina* , 1-9.
- Goda, Y., & Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *15th Coastal Engineering Conference*, (págs. 828-845).
- Goda, Y., & Suzuki, Y. (1976). Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments. En Y. Goda, & Y. Suzuki, *Coastal Engineering* (págs. 828-845). Nagase, Yokosuka, Japan.
- Holmes, B. (2009). *Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems*. Londres: The European Marine Energy Centre Ltd.
- Hughes, S. A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering* (Vol. 7). World Scientific.
- International Energy Agency. (1 de Abril de 2019). Obtenido de <https://www.iea.org>
- International Energy Agency. (2019). *Global Energy & CO2 Status Report*. Paris: IEA Publications.
- Isaacson, M. (1991). Measurement of regular wave reflection. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* , 117 (6), págs. 553-569.
- Izquierdo, U., Esteban, G., Blanco, J., Albaina, I., & Peña, A. (19 de Febrero de 2019). Experimental validation of a CFD model using a narrow wave flume. *Applied Ocean Research* , págs. 1-12.
- Jamieson, W., & Mansard, E. (1987). An efficient upright wave absorber. *Coastal Hydrodynamics Conference* (págs. 124-139). Newark: ASCE.

- Lean, G. (1967). A simplified theory of permeable wave absorbers. *Journal of Hydraulic research* , 5 (1), págs. 15-30.
- Mansard, E., & Funke, E. (1980). The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method. En E. P. Mansard, & E. R. Funke, *Coastal Engineering* (págs. 154-172). Ottawa, Canadá.
- Neelamani, S., & Al-Ragum, A. (Diciembre de 2009). Wave dissipation characteristics of arrays of crater type barriers. *Indian Journal of Marine Sciences* , 38(4), págs. 418-422.
- Ouellet, Y., & Datta, I. (1987). A survey of wave absorbers. *Journal of Hydraulic research* , 24 (4), págs. 265-279.
- Ouellet, Y., & Datta, I. (26 de Marzo de 1987). A survey of wave absorbers. *Journal of Hydraulic Research* , 24 (4), págs. 265-280.
- Palomino Monzón, M., & Almazán Gárate, J. (2000). *Descripción, medida y análisis del oleaje*. Madrid: E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Sand, S., Donslund, B., Hansen, K., & Mathiesen, N. (1982). *Optimization of absorbers for DHI Offshore Basin by means of 3-gauge reflection procedure*. Internal Report of DHI.
- Tiedeman, S., Allsop, W., Russo, V., & Brown, A. (2012). A demountable wave absorber for wave flumes and basins. *Coastal Engineering* , 1-10.
- Villate Martínez, J. L., Ruiz-Minguela, P., & Pérez Morán, G. (2012). Energías renovables en el medio marino. *Anales de mecánica y electricidad* , 28-34.
- Villate, J. L., & Molins, S. (24 de Noviembre de 2008). Ocean Energy. (Tecnalia, Ed.) Zamudio, Bizkaia, España.

Anexo I: Plan de pruebas.

d = 0,20m

Sin Playa	Playa 1	Playa 2	Playa 3	Playa 4	Playa 5	Playa 6	Playa 7	Playa 8	Playa 9	Playa 10
Onda I										
1	22	156	132	124	61	41				
2	23	157	133	125	62	42				
3	24	158	134	126	63	43				
4	25	159	135	127	64	44				
5	26	160	136	128	65	45				
6	27	161	137	129	66	46				
7	28	162	138	130	79					
86		163	139	131	80					
87					81					
88					82					
89					83					
90					84					
91					85					
92										
Onda II										
8	29	164	140	108	67	48				
9	30	165	141	109	68	49				
10	31	166	142	110	69	50				
11	32	167	143	111	70	51				
12	33	168	144	112	71	52				
13	34	169	145	113	72	52				
14	35	170	146	114		54				
93		171	147	115						
94										
95										
96										
97										
98										
99										
100										
Onda III										
17	36	172	148	116	73	55				
18	37	173	149	117	74	56				
19	38	174	150	118	75	57				
20	39	175	151	119	76	58				
21	40	176	152	120	77	59				
101		177	153	121	78	60				

102		178	154	122						
103		179	155	123						
104										
105										
106										
107										
Onda IV										
411					201		369	383	397	425
412					202		370	384	398	426
413					203		371	385	399	427
414					204		372	386	400	428
415					205		373	387	401	429
416					206		374	388	402	430
417					207		375	389	403	431
Onda V										
418					208		376	390	404	432
419					209		377	391	405	433
420					210		378	392	406	434
421					211		379	393	407	435
422					212		380	394	408	436
423					213		381	395	409	437
424					214		382	396	410	438
Onda VII										
					222					
					223					
					224					
					225					
					226					
					227					
					228					

$d = 0,15m$

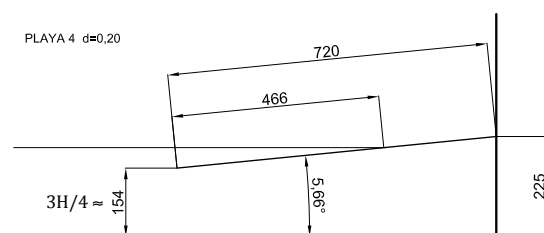
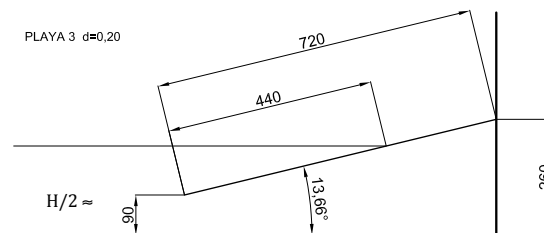
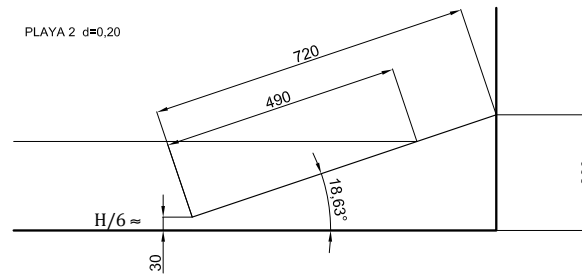
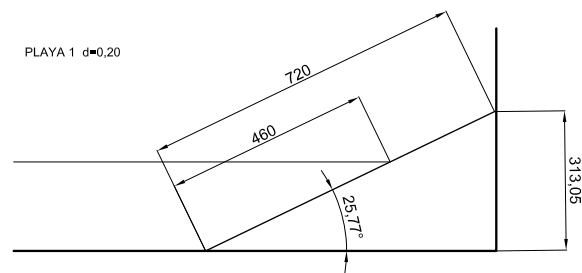
Sin Playa	Playa 1	Playa 2	Playa 3	Playa 4	Playa 5	Playa 6	Playa 7	Playa 8	Playa 9	Playa 10
Onda I										
306	264	229	271	313						
307	265	230	272	314						
308	266	231	273	315						
309	267	232	274	316						
310	268	233	275	317						
311	269	234	276	318						
312	270	235	277	319						
Onda II										
299	257	236	278	320						
300	258	237	279	321						
301	259	238	280	322						
302	260	239	281	323						
303	261	240	282	324						
304	261	241	283	325						
305	263	242	284	326						
		334								
		335								
		336								
		337								
		338								
		339								
		340								
Onda III										
292	250	243	285	327						
293	251	244	286	328						
294	252	245	287	329						
295	253	246	288	330						
296	254	247	289	331						
297	255	248	290	332						
298	256	249	291	333						
		362								
		363								
		364								
		365								
		366								
		367								
		368								
Onda IV										
		341								
		342								
		343								
		344								

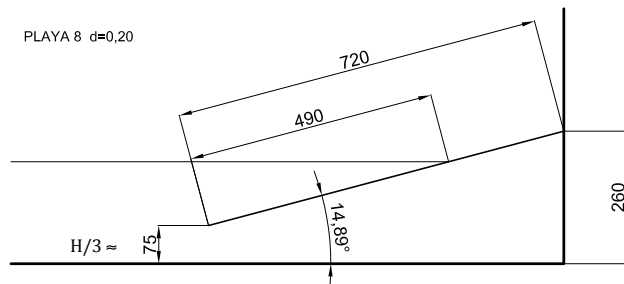
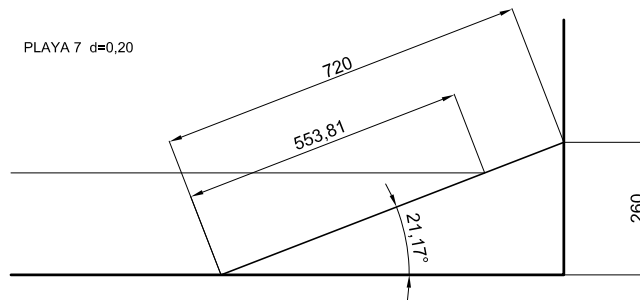
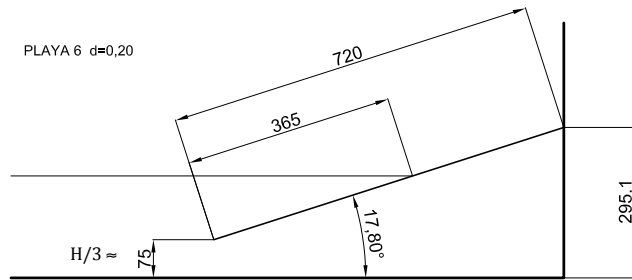
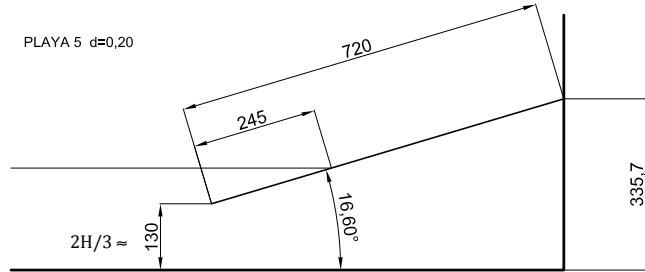
		345								
		346								
		347								
Onda V										
		348								
		349								
		350								
		351								
		352								
		353								
		354								
Onda VII										
		355								
		356								
		357								
		358								
		359								
		360								
		361								

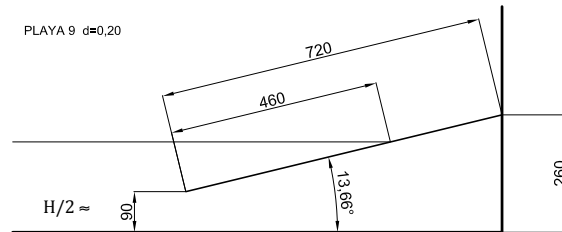
La numeración representa la cantidad de ensayos realizada para cada geometría del sistema de disipación y cada una de las ondas tratadas.

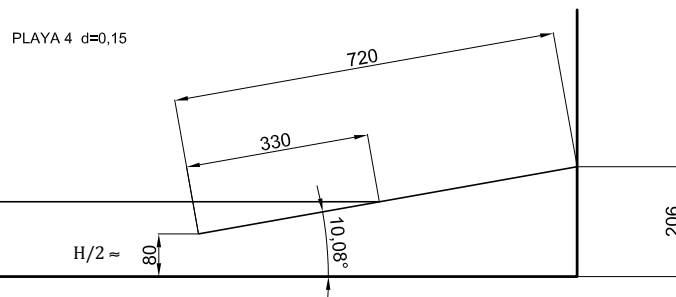
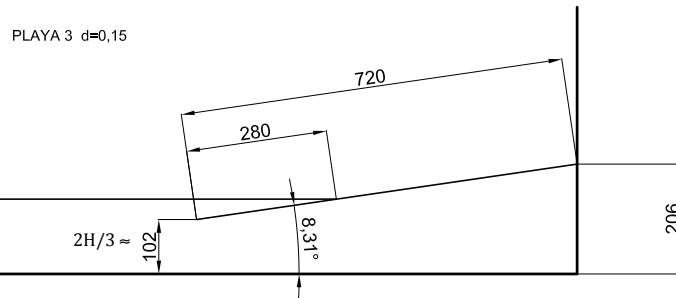
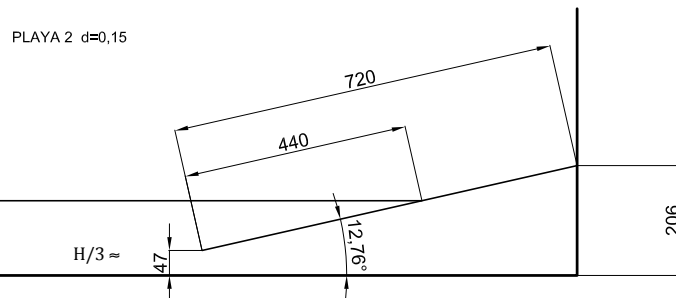
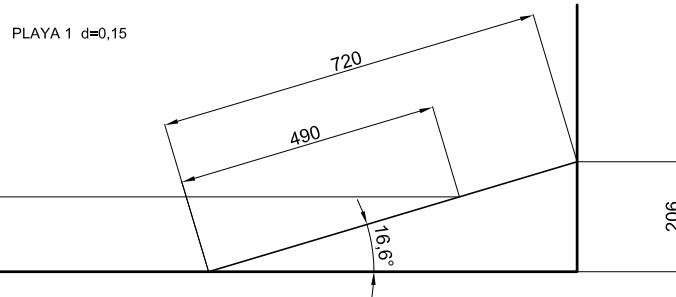
Anexo II: Planos. Código.

2.1. Planos del sistema de disipación









2.2. Código de Matlab

2.2.1. Ajuste de los datos experimentales a una curva sinusoidal.

```

t = []; %Vector del tiempo de análisis
y = []; %Valores de la onda

C = fminsearch(@ds,[20 1 4.5]) %Permite hallar los valores C1, C2, y
                                %C3 gracias a la función 'ds' definida

figure(1);
hold on;
grid on;

plot(t, y, 'o') %Representación de los puntos experimentales

fplot(@(t)C(1)*sin(2*pi/C(2)*(t-C(3))),[t1 t2], 'r', 'LineWidth', 2)
%Representación del ajuste sinusoidal

title('')
xlabel('')
ylabel('')
legend('Puntos experimentales', 'Ajuste sinusoidal', 'Location',...
       'SouthWest')
print .jpg -djpeg

```

.....

```

function [ds] = ds(C)

t = [];
y = [];

f = C(1)*sin(2*pi/C(2)*(t-C(3))); %Ecuación sinusoidal definida para
hallar los parámetros C1, C2 y C3

ds = (f-y).^2;
%Se define un array en el cual cada elemento es igual a la diferencia
al cuadrado entre los elementos correspondientes de f e y

ds = sum(ds);
%Se suman todos los elementos de ds. Esta variable será la que
devuelva la función 'ds', la cual será minimizada por 'fminsearch'

```

2.2.2. Cálculo del coeficiente de reflexión y ajuste del perfil de la onda envolvente.

```

x = []; %Vector de posición de los limnímetros
y = []; %Vector de la amplitud de la onda para cada posición

C = fminsearch(@fm, [C1 C2 C3 C4])

figure(2);
hold on;
grid on;

plot(x, y, 'o') %Representación de la amplitud

fplot(@(t)C(1)*sin(2*pi/C(2)*(t-C(3)))+C(4), [x1 x2], '--r',
'LineWidth', 2)
%Ajuste sinusoidal del perfil de la envolvente

title('')
xlabel('')
ylabel('')
legend('Puntos experimentales', 'Perfil de la envolvente', 'Location',
'SouthWest')
print .jpg -djpeg

```

.....

```

function [fm] = fm(C)

x = [];
y = [];

f = C(1)*sin(2*pi/C(2)*(x-C(3)))+C(4);
%Ecuación sinusoidal definida para hallar los parámetros C1, C2, C3 y
C4

fm = (f-y).^2;
%Se define un array en el cual cada elemento es igual a la diferencia
al cuadrado entre los elementos correspondientes de f e y
fm = sum(fm);
%Se suman todos los elementos de ds. Esta variable será la que
devuelva la función 'ds', la cual será minimizada por 'fminsearch

```

Anexo III: Tablas con los resultados obtenidos a partir de los ajustes realizados a los datos experimentales

3.1. Calado $d = 0,20\text{m}$

3.1.1. Onda I¹

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = $2*\pi/T$ [rad/s]
114	18,757	0,945	6,877
120	19,519	0,896	6,807
124	17,755	0,906	6,778
130	9,983	0,8988	6,877
138	7,086	0,856	6,827
144	4,067	1,067	6,258
150	10,008	0,970	6,398
168	19,287	0,936	6,740

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = $2*\pi/T$ [rad/s]
116	15,748	0,938	6,702
124	14,691	0,906	6,934
130	7,848	0,866	7,256
138	3,612	0,899	6,991
144	6,3452	0,9898	6,348
150	10,100	0,900	6,981
168	17,290	0,930	6,753

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = $2*\pi/T$ [rad/s]
116	11,962	0,928	6,770
121	11,391	0,932	6,743
130	8,658	0,927	6,779
138	5,9769	0,9422	6,669
144	6,336	0,924	6,804
150	8,601	0,939	6,694
168	14,955	0,929	6,762

¹ Por orden de aparición: sin Playa, playa 1, playa 2, playa 3, playa 4, playa 5 y playa 6

x [cm]	C1 = A [m]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
88	12,204	0,930	6,754
92	12,215	0,945	6,652
98	11,531	0,916	6,861
104	9,452	0,953	6,597
110	9,018	0,920	6,833
116	8,526	0,935	6,719
134	11,384	0,937	6,706

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	12,320	0,912	6,889
86	13,377	0,966	6,506
92	13,248	0,929	6,767
98	11,819	0,950	6,617
104	9,5477	0,9495	6,617
110	8,840	0,910	6,906
116	7,617	0,919	6,837
122	9,039	0,974	6,453
140	13,375	0,946	6,644

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	11,278	0,944	6,657
86	11,554	0,915	6,867
92	10,991	0,937	6,709
98	9,663	0,935	6,721
104	10,1351	0,8957	7,015
110	9,275	0,976	6,438
116	9,693	0,872	7,202
122	9,624	0,901	6,974
132	11,438	0,943	6,661
140	10,109	0,883	7,120
146	9,408	0,912	6,889

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	10,853	0,937	6,706
86	10,684	0,911	6,896
92	8,174	0,966	6,506
98	9,171	0,965	6,510
110	10,444	0,920	6,833
116	11,948	0,960	6,543
122	10,395	0,893	7,037
132	9,609	0,898	6,997
140	9,384	0,914	6,874
146	8,266	0,900	6,981

3.1.2. Onda II²

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
96	27,399	1,023	5,909
102	26,130	1,015	5,845
108	24,926	1,023	5,916
116	20,872	1,007	6,075
122	14,710	1,020	6,701
130	6,544	0,852	5,870
136	11,918	1,034	5,712
142	12,525	0,997	5,884
160	26,860	1,019	5,884

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
98	24,173	1,020	6,162
104	22,687	1,013	6,204
112	19,588	1,022	6,149
120	12,673	1,018	6,170
126	6,664	1,014	6,198
134	8,501	1,024	6,134
140	10,939	1,014	6,199
160	23,469	1,020	6,161

² Por orden de aparición: sin playa, playa 1, playa 2, playa 3, playa 4, playa 5 y playa 6

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
98	17,415	1,011	6,218
104	16,958	1,011	6,215
112	14,108	1,010	6,223
120	11,118	1,016	6,186
126	9,700	1,000	6,283
134	11,000	1,000	6,283
140	13,059	1,010	6,219
160	19,669	1,009	6,229

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	20,012	1,006	6,246
88	18,651	1,005	6,254
94	16,396	1,005	6,253
100	13,911	1,005	6,253
108	11,209	1,004	6,261
114	10,491	1,001	6,275
132	17,956	1,005	6,252

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	18,255	1,005	6,251
86	18,285	1,002	6,270
92	15,821	1,003	6,264
98	12,748	1,002	6,273
104	10,312	1,003	6,268
110	8,257	1,015	6,193
116	9,338	1,010	6,220
122	11,759	0,999	6,289
140	17,625	1,005	6,255

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
82	14,803	1,006	6,245
90	14,267	1,002	6,273
98	13,179	1,003	6,265
106	11,934	0,996	6,311
114	11,7485	1,0016	6,273
120	12,405	1,004	6,258
126	13,189	1,000	6,282
132	14,035	1,012	6,207
140	14,301	1,004	6,256
146	14,241	0,999	6,291
150	13,917	1,018	6,170

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	10,420	0,997	6,304
92	11,774	1,040	6,042
98	12,152	1,030	6,102
104	14,2128	1,0172	6,177
110	16,081	1,028	6,110
116	17,688	1,029	6,109
122	17,466	1,010	6,223
132	14,289	1,008	6,233
140	11,434	1,017	6,178
146	9,014	0,993	6,328

3.1.3. Onda III³

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
98	37,223	1,023	6,001
106	36,823	1,030	5,811
114	34,564	0,986	5,851
122	20,851	1,000	5,776
130	9,738	0,977	5,706
136	8,420	0,995	5,919
142	14,486	0,991	5,919
160	37,372	1,002	5,919

³ Por orden de aparición: sin playa, playa 1, playa 2, playa 3, playa 4, playa 5 y playa 6

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
106	26,513	1,017	6,181
114	22,200	1,000	6,283
124	12,912	1,016	6,187
132	11,023	1,030	6,100
140	15,893	1,021	6,156
160	27,848	1,016	6,185

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
100	21,836	1,004	6,257
116	18,807	1,006	6,247
122	16,232	1,006	6,248
128	15,326	1,009	6,229
138	19,808	1,007	6,242
148	21,836	1,004	6,259
160	24,275	1,005	6,253

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
90	19,319	1,038	6,054
96	15,697	1,037	6,058
102	10,716	1,068	5,884
108	10,846	1,057	5,947
114	12,532	1,054	5,960
118	14,413	1,055	5,958
138	21,128	1,051	5,980

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	26,237	0,999	6,289
86	21,984	1,008	6,233
92	22,869	0,989	6,356
98	19,698	0,989	6,354
104	14,017	0,998	6,298
110	11,540	1,010	6,224
116	12,916	1,009	6,225
122	17,676	0,999	6,288
140	24,980	1,004	6,259

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
82	22,313	1,008	6,233
90	21,004	1,014	6,195
98	19,572	0,994	6,321
106	15,686	0,997	6,305
114	15,9278	0,9917	6,336
120	16,621	0,997	6,305
126	18,478	1,007	6,239
132	19,551	1,003	6,264
140	20,987	1,006	6,244
146	22,263	0,999	6,290
150	21,174	1,009	6,228

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	16,734	0,992	6,334
86	15,136	0,997	6,300
98	16,536	1,000	6,284
104	19,5874	1,0198	6,161
110	21,078	1,025	6,131
116	21,682	1,016	6,186
122	21,605	1,009	6,228
132	17,984	1,020	6,162
140	16,202	1,007	6,243
146	15,000	1,010	6,223

3.1.4. Onda IV⁴

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	12,222	1,337	4,700
86	9,971	1,365	4,602
92	8,769	1,355	4,637
98	7,762	1,367	4,597
104	6,725	1,3295	4,726
110	7,206	1,340	4,689
116	8,000	1,325	4,744
122	10,479	1,355	4,638
128	12,428	1,345	4,671
134	13,491	1,349	4,657
140	14,034	1,333	4,712
144	13,8473	1,332	4,717
150	14,1118	1,3306	4,722

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	17,5213	1,3613	4,616
80	16,503	1,349	4,657
86	13,913	1,362	4,614
92	10,541	1,368	4,593
98	8,100	1,290	4,873
104	5,292	1,2794	4,911
110	4,023	1,324	4,746
116	5,862	1,360	4,622
122	9,626	1,342	4,682
128	10,323	1,350	4,654
134	13,382	1,332	4,719
140	14,703	1,343	4,678
144	15,176	1,311	4,793
150	17,3571	1,335	4,707

⁴ Por orden de aparición: playa 5, playa 7, playa 8 y playa 9

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	13,6883	1,3461	4,668
80	12,1488	1,3348	4,707
86	11,1877	1,3325	4,715
92	9,6707	1,3233	4,748
98	8,1113	1,3104	4,795
104	6,9415	1,3059	4,811
110	6,3637	1,3299	4,725
116	7,5938	1,3556	4,635
122	7,9803	1,3572	4,630
128	9,9624	1,3243	4,745
134	11,1137	1,3177	4,768
140	12,4924	1,3284	4,730
144	12,9994	1,3344	4,709
150	14,8686	1,3319	4,717

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
48	13,569	1,3357	4,704
56	15,0149	1,3594	4,622
64	13,4193	1,3715	4,581
72	12,0899	1,3535	4,642
80	9,5326	1,3805	4,551
88	9,4304	1,4562	4,315
96	6,5831	1,3233	4,748
102	7,4667	1,3724	4,578
110	8,4862	1,3678	4,594
116	9,7358	1,371	4,583
124	11,9168	1,3803	4,552
132	13,1408	1,3944	4,506
140	12,6218	1,382	4,546
150	13,0944	1,3886	4,525

3.1.5. Onda V⁵

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
80	6,793	1,601	3,926
86	8,108	1,656	3,795
92	8,809	1,511	4,159
98	12,174	1,554	4,044
104	13,805	1,5265	4,116
110	15,390	1,505	4,176
116	16,906	1,528	4,113
122	19,132	1,578	3,983
128	19,665	1,520	4,133
134	20,138	1,523	4,127
140	17,796	1,539	4,083
144	17,0332	1,5229	4,126
150	16,3831	1,5224	4,127

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	11,2296	1,4394	4,365
80	9,4919	1,4118	4,450
86	8,6907	1,4875	4,224
92	8,5271	1,4349	4,379
98	10,2138	1,4517	4,328
104	13,6838	1,4571	4,312
110	15,2212	1,4836	4,235
116	16,511	1,4692	4,277
122	18,0483	1,4735	4,264
128	19,6555	1,4681	4,280
134	20,4323	1,4765	4,255
140	20,0602	1,4739	4,263
144	20,8944	1,4947	4,204
150	19,3452	1,4885	4,221

⁵ Por orden de aparición: playa 5, playa 8 y playa 9

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
48	14,7573	1,5413	4,077
56	13,1268	1,6049	3,915
64	11,3568	1,5163	4,144
72	9,1725	1,4876	4,224
80	7,6824	1,4798	4,246
88	8,7153	1,4511	4,330
96	12,7702	1,6168	3,886
102	12,8779	1,5486	4,057
110	15,0302	1,6928	3,712
116	16,7619	1,5722	3,996
124	17,376	1,5265	4,116
132	18,302	1,5044	4,177
140	18,5286	1,5102	4,160
150	16,8546	1,5391	4,082

3.1.6. Onda VII⁶

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	10,5352	1,1378	5,522
80	10,617	1,148	5,475
86	10,953	1,141	5,505
92	10,951	1,139	5,515
98	10,447	1,140	5,510
104	10,110	1,1421	5,501
110	9,575	1,139	5,517
116	8,617	1,135	5,536
122	9,312	1,139	5,519
128	8,973	1,137	5,527
134	9,000	1,138	5,519
140	10,327	1,144	5,491
144	10,3945	1,1404	5,510
150	11,2015	1,139	5,516

⁶ Datos correspondientes a la playa 5

3.2. Calado $d = 0,15\text{m}$

3.2.1. Onda I⁷

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = $2*\pi/T$ [rad/s]
86	12,8963	0,9154	6,864
92	11,548	0,890	7,061
98	7,055	0,878	7,158
104	5,824	0,846	7,429
110	12,559	1,018	6,174
116	13,447	0,9398	6,686
122	15,181	0,919	6,835
128	14,534	0,919	6,835
134	14,796	0,906	6,935
140	11,748	0,889	7,071
144	11,147	0,865	7,260
150	6,010	1,032	6,091
156	6,4721	0,9312	6,747
162	10,2756	0,9296	6,759

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = $2*\pi/T$ [rad/s]
74	6,0718	0,8839	7,108
80	7,595	0,889	7,065
86	9,500	0,937	6,705
92	10,144	0,919	6,841
98	8,418	0,903	6,960
110	4,772	0,964	6,519
116	5,483	0,929	6,764
122	5,815	0,896	7,012
128	8,724	0,928	6,771
134	10,658	0,919	6,838
140	9,341	0,919	6,839
150	7,9843	0,9372	6,704

⁷ Por orden de aparición: sin playa, playa 1, playa 2, playa 3 y playa 4

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	7,4976	0,8962	7,011
80	8,220	0,910	6,908
86	8,890	0,950	6,615
92	9,417	0,901	6,973
98	9,516	0,883	7,114
104	8,112	0,9045	6,947
110	6,337	0,943	6,667
116	7,591	0,862	7,289
122	7,558	0,892	7,042
128	8,288	0,939	6,690
134	8,733	0,896	7,012
140	9,618	0,873	7,197
144	9,0692	0,9095	6,908
150	7,9465	0,9659	6,505

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	6,1617	0,8669	7,248
80	5,974	0,891	7,051
86	8,212	0,964	6,521
92	9,107	0,889	7,069
98	10,279	0,883	7,113
104	8,110	0,9692	6,483
110	8,150	0,900	6,979
116	6,996	0,887	7,083
122	5,754	0,899	6,987
128	6,301	0,978	6,426
134	7,645	0,895	7,023
140	8,981	0,893	7,036
144	9,087	0,9879	6,360
150	9,3771	0,9088	6,914

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	6,6647	0,9123	6,887
80	6,804	0,928	6,768
86	7,950	0,906	6,937
98	9,245	0,893	7,035
104	8,623	0,9051	6,942
110	7,827	0,934	6,731
116	7,072	0,906	6,934
122	6,347	0,924	6,799
128	7,337	0,906	6,933
140	8,657	0,887	7,083
150	9,2792	0,9258	6,787

3.2.2. Onda II⁸

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
86	4,4693	1,1275	5,573
92	8,001	1,088	5,777
98	18,963	1,116	5,631
104	14,687	1,027	6,120
110	17,501	1,079	5,824
116	17,507	1,0465	6,004
128	10,194	1,032	6,089
134	5,826	1,010	6,221
140	7,880	1,146	5,485
150	14,192	1,099	5,717
156	15,1179	1,0493	5,988
162	18,3303	1,1024	5,700

⁸ Por orden de aparición: sin playa, playa 1, playa 2, playa 3 y playa 4

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	13,6982	0,9994	6,287
80	12,233	0,997	6,303
86	11,034	1,006	6,247
92	8,780	1,004	6,258
98	8,437	1,011	6,218
104	9,138	1,0037	6,260
110	10,324	0,986	6,372
116	11,979	0,999	6,288
122	12,899	0,994	6,324
128	13,324	1,000	6,283
134	11,558	1,011	6,212
140	10,511	0,993	6,330
144	9,3372	0,9913	6,338
150	7,2936	0,997	6,302

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	9,8907	1,0068	6,241
80	10,264	1,002	6,273
86	10,401	0,989	6,354
92	10,515	1,003	6,264
98	10,413	0,997	6,300
104	10,293	1,003	6,264
110	10,150	0,999	6,288
116	9,927	1,001	6,275
122	10,313	1,008	6,234
128	10,471	0,999	6,288
134	10,558	1,005	6,255
144	10,412	1,0058	6,247
150	10,0051	0,9995	6,286

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	10,7817	1,0221	6,147
80	12,401	1,014	6,197
86	13,942	1,015	6,193
92	13,463	1,010	6,219
98	12,571	1,012	6,207
104	10,441	0,9993	6,288
110	8,381	1,017	6,181
116	7,289	1,023	6,143
122	8,380	1,019	6,165
128	10,600	1,010	6,224
134	12,805	1,023	6,145
140	13,5868	1,015	6,189
144	13,814	1,0084	6,231
150	12,9117	1,006	6,246

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	10,7848	1,0199	6,161
80	10,956	1,016	6,185
86	12,180	1,007	6,239
92	12,074	1,014	6,199
98	11,553	1,014	6,198
104	10,437	1,0149	6,191
110	8,885	1,019	6,167
116	7,952	1,014	6,198
122	8,583	1,016	6,184
128	10,220	1,011	6,214
134	11,273	1,016	6,184
140	11,9248	1,015	6,191
144	12,102	1,0122	6,207
150	12,3615	1,0257	6,126

3.2.3. Onda III⁹

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
86	14,4061	1,0855	5,788
92	15,269	1,106	5,679
98	24,285	1,037	6,058
104	26,405	1,059	5,934
110	26,620	1,027	6,116
116	26,149	1,0452	6,011
122	21,970	1,024	6,135
128	9,792	1,071	5,864
134	7,113	1,021	6,152
140	7,838	1,095	5,738
144	10,850	1,055	5,956
150	14,444	1,032	6,087
156	23,7439	1,0481	5,995
162	26,1734	1,0325	6,085

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	11,9033	1,0441	6,018
80	12,156	1,055	5,953
86	11,150	1,056	5,949
92	11,968	1,105	5,684
98	14,238	1,033	6,082
104	14,608	1,0668	5,890
110	14,517	1,088	5,777
116	15,357	1,076	5,841
122	15,015	1,045	6,015
128	14,171	1,066	5,896
134	13,036	1,115	5,634
140	12,399	1,067	5,887
144	10,5707	1,0357	6,067
150	12,4039	1,1195	5,612

⁹ Por orden apariencia: sin playa, playa 1, playa 2, playa 3 y playa 4

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	13,9551	0,9992	6,288
80	14,149	1,007	6,240
86	15,894	1,014	6,198
92	15,738	0,992	6,331
98	15,416	1,003	6,262
104	15,496	1,0093	6,225
110	14,924	1,000	6,281
116	13,933	1,007	6,240
122	13,639	1,011	6,214
128	13,578	0,995	6,313
134	14,334	0,993	6,330
140	14,919	1,002	6,268
144	15,4788	1,0098	6,222
150	16,1233	1,004	6,258

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	17,5804	1,0403	6,040
80	20,098	1,057	5,947
86	19,260	1,042	6,033
92	18,267	1,029	6,105
98	16,899	1,035	6,070
104	13,966	1,03	6,100
110	11,188	1,030	6,098
116	11,026	1,041	6,035
122	13,812	1,074	5,850
128	16,251	1,051	5,979
134	17,937	1,036	6,064
140	19,021	1,010	6,222
144	20,3902	1,0272	6,117
150	18,9555	1,0179	6,173

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	14,2881	1,0163	6,182
80	15,809	0,996	6,308
86	17,767	1,007	6,241
92	17,606	1,011	6,214
98	16,523	1,007	6,239
104	14,210	1,0009	6,278
110	11,580	1,038	6,054
116	11,393	1,025	6,132
122	11,811	1,001	6,280
128	13,945	1,001	6,279
134	15,849	1,012	6,209
140	17,917	1,010	6,223
144	17,9218	1,0057	6,248
150	17,956	1,0321	6,088

3.2.5. Onda IV¹⁰

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	9,4746	1,3186	4,765
80	9,685	1,322	4,751
86	9,214	1,319	4,763
92	8,500	1,318	4,766
98	7,454	1,321	4,758
104	6,429	1,3866	4,531
110	4,274	1,282	4,901
116	3,815	1,315	4,778
122	5,096	1,331	4,720
128	6,002	1,319	4,763
134	6,643	1,321	4,756
140	8,728	1,341	4,687
144	9,4216	1,3301	4,724
150	10,4299	1,3267	4,736

¹⁰ Resultados correspondientes a la playa 2

3.2.6. Onda VII¹¹

x [cm]	C1 = A [mm]	C2 = T [s]	w = 2*π/T [rad/s]
74	7,3009	1,1576	5,428
80	7,477	1,158	5,425
86	8,254	1,170	5,372
92	8,284	1,166	5,388
98	8,615	1,139	5,518
104	9,190	1,1469	5,478
110	9,086	1,162	5,408
116	8,236	1,153	5,449
122	7,870	1,159	5,421
128	7,392	1,168	5,380
134	7,645	1,182	5,315
140	7,580	1,169	5,377
144	7,6977	1,1385	5,519
150	8,4831	1,1327	5,547

¹¹ Resultados correspondientes a la playa 2